

## СЕКЦИЯ 2 НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Среда, 18 апреля 2007 г., ауд.278 (гл. корпус МГТУ).

**Начало в 10.00.**

**Председатель: профессор, д.т.н. Шахнов В.А.**  
**Руководитель экспертной комиссии: профессор Парфенов Е.М.**  
**Ученый секретарь: Соловьев В.А.**

Экспертная комиссия:

ЧЕКАНОВ А.Н., МЫСЛОВСКИЙ Э.В., БИЛИБИН К.И., ГРИГОРЬЕВ В.П., ГРИДНЕВ В.Н., ИВАНОВ Ю.В., МАРКЕЛОВ В. В., МАКАРЧУК В.В., ШЕРСТНЕВ В.В., РЕЗЧИКОВА Е.В., КУРНОСЕНКО А., ГЛАЗУНОВА Г.П., КУЗНЕЦОВ А.С., КАРПУНИН А.А., ЦЫГАНОВ И.Г., ОЯ Д.Р., КАМЫШНАЯ Э.Н., КОЛОСКОВ С.В., ДЕНИСОВ А.А.

В рамках работы секции будет осуществлен конкурсный отбор проектов по программе «УМНИК» ФАСИЕ. Критериями конкурсного отбора участников молодежного научно-инновационного конкурса являются:

1. Уровень инновационности идеи (предложения, метода, способа ...).

1.1. Идея должна быть новой, впервые сформулированной именно самим номинантом. В этом смысле все номинанты равны. Остальные просто не могут быть номинированы на участие в этой программе.

1.2. Уровень наукоемкости тем выше, чем более:

- основательны научные исследования, в результате которых она появилась;

- основательны дальнейшие научные исследования, необходимые для ее реализации.

1.3. Техническая значимость тем выше, чем большее влияние ее реализация окажет на уровень техники. «Пионерные» идеи (изобретения) – пенициллин, лазер, синтез алмазов - открывают новые отрасли науки и техники. Идеальная по инновационности идея неожиданна для рынка. Поэтому она им не может быть сейчас востребована, она сама формирует новую потребность и нишу рынка.

Высокий технический уровень имеют решения, например, многоотраслевого использования.

Оригинальные технические решения дают новые принципы решения известной задачи.

Есть решения, позволяющие решить проблему еще одним, дополнительно к известным, способом. Но и в этом случае, если уже известно 10 способов решения задачи, то новый способ может и не давать существенных преимуществ в решении задачи или давать их только в очень ограниченном по масштабам применения числе случаев.

А может быть и просто рацпредложение.

1.4. Масштабность использования предложения тоже может сильно различаться – от решения локальной задачи одного местного потребителя до ...

Грубый способ оценки масштабности экспертами – возможный полный объем производства продукта на основе данного предложения – 106, 107, 108, 109, 1010, 1011 рублей

1.5. Срок превращения идеи в конечный продукт с выходом его на рынок:

2-3 года – не в УМНИК, а в СТАРТ

10-15 лет – пока на гранты РФФИ

5-7 лет в УМНИК (новизна, рискованность идеи, объем необходимых научных исследований не позволяют уложиться в 2-3 года, но и не требуют 10-15 лет)

1.6. Идея тем актуальней, чем меньше вероятность того, что за 5-7 лет в результате научных исследований появятся и «раскрутятся» до продукта другие более эффективные пути решения задачи.

Для рекомендуемых экспертами участников программы просьба очень четко указать, за какую собственно идею (предложение) они отобраны.

НИОКР по реализации предложенного способа (метода, идеи) программа и будет поддерживать.

Пример: «За предложенный способ (метод, идею) ... расширения энергетического диапазона детектора..., отличающийся...».

УМНИК сам организует работу по привлечению необходимого финансирования. Программа оказывает ему поддержку на начальном этапе работы над его идеей.

## СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ: АНАЛИЗ ИСКАЖАЮЩИХ ЭФФЕКТОВ

Сарымсаков Р.Г.

Научный руководитель: ассистент Оя Д. Р.  
кафедра ИУ4, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

## SCANNING PROBE MICROSCOPY: ANALYSIS OF DISTORTION EFFECTS

Sarymsakov R. G.

Scientific adviser: instructor Oya D. R.  
IU4 department, BMSTU, Moscow, Russia  
E-mail: [ragnor.rs@gmail.com](mailto:ragnor.rs@gmail.com)

### Аннотация

Выявлены основные факторы, влияющие на качество сканирующей зондовой микроскопии. Исследовано влияние искажающих факторов на изображения, получаемые методами СЗМ. Представлена математическая модель, описывающая влияние этих факторов. Даны рекомендации по их устранению.

### Abstract

The basic distorting factors during the process of scanning probe microscopy (SPM) were examined. A mathematical model which describes how these factors affect SPM images is given. Several recommendations on elimination of distorting effects are also proposed.

Несмотря на возможность достижения высокого пространственного разрешения, информация, получаемая методами зондовой микроскопии, может неадекватно отображать реальные особенности поверхности, что является следствием влияния инструмента исследования на объект и приводит к наблюдению *артефактов*. Эти артефакты, как правило, легко учитываются на качественном уровне при интерпретации результатов СЗМ, однако специфика ряда задач может потребовать количественных оценок и методов восстановления реальной геометрии объектов.

Ниже проанализированы два основных артефакта СЗМ, влияние которых существенно при проведении исследований отдельных микрообъектов на поверхности твердой подложки: *эффекта уширения профиля* и *эффекта занижения высот*.

### Контактные деформации зонда и образца

Уже в первых работах по атомно-силовой микроскопии (АСМ) было отмечено, что высоты полученных изображений ДНК существенно занижены в сравнении с модельными представлениями о структуре молекулы [1,2]. В то же время, для ряда других объектов (с близкими физическими свойствами, но отличными геометрическими размерами) эффект занижения высот проявляется не столь выражено. Так было обнаружено, что эффект занижения высот для вирусных частиц несущественен (при минимизации силы воздействия зонда), в то время, как высота изображений молекул нуклеиновых кислот в тех же условиях эксперимента занижена более чем на 50%, несмотря на то, что и те и другие объекты визуализированы на одном кадре

В дальнейшем было показано, что эффект занижения высот изображений объектов связан с контактными деформациями [3]. В процессе сканирования зонд воздействует на образец с некоторой силой, величина которой обычно лежит в диапазоне  $(1 \div 100) \times 10^9$  Н. Действие этой силы, в связи с чрезвычайно малым радиусом кривизны зондирующего острия (обычно около 10 нм), приводит к возникновению значительного контактного давления, которое должно вызывать *контактные деформации* (рис. 1).

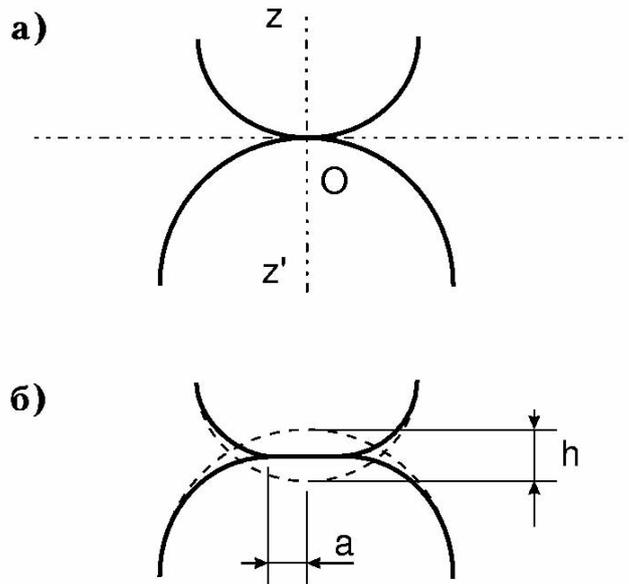


Рис. 1. Контакт двух тел.

- а) - соприкосновение контактирующих поверхностей;  
 б) - деформации при наложении сближающей силы;  
 h - сближение за счет деформации,  
 a - латеральный размер контактной площадки.

Впервые задача о контактных деформациях двух тел была рассмотрена Г. Герцем в 1882 г. [4]. Известно, что соотношения Герца легко упрощаются в случае, когда контактирующие тела имеют сферическую геометрию [5]. Такая модель геометрии контакта может найти широкое применение в задачах, связанных с интерпретацией результатов СЗМ - при рассмотрении контактных деформаций, возникающих в процессе сканирования микрообъектов, форма которых может быть аппроксимирована сферой (например, молекул ряда белков и пр.), а также плоских образцов, например, тонких пленок.

Введем параметр  $D$ , обратный некоторому эффективному модулю Юнга области контакта:

$$D = \frac{3}{4} \left( \frac{1 - \sigma^2}{E} + \frac{1 - \sigma'^2}{E'} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\sigma'$  - модули Пуассона материалов зонда и образца,  
 $E$  и  $E'$  - модули Юнга материалов зонда и образца.

Если зонд и образец вблизи точки контакта описываются сферическими поверхностями и характеризуются радиусами кривизны  $R$  и  $R'$ , то для величины  $h$  - сближения зонда и образца за счет контактных деформаций - справедлива формула:

$$h = (FD)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где  $F$  - сдвливающая сила.

Согласно [6], область контакта будет представлять собой окружность радиуса

$$a = (FD)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

и площадью

$$S = \pi a^2 = \pi (FD)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Таким образом, давление на образец может быть вычислено по формуле:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{\pi} (FD)^{-\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

Рассмотрим контакт кремниевого зонда с  $E = 1,5 \cdot 10^{11}$  Па и радиуса кривизны  $R = 10$  нм с плоским образцом (табл. 1). Примем величину сдвливающей силы  $F = 10^{-8}$  Н.

Табл. 1. Зависимость сдвливания от исследуемого материала

Материал	Модуль Юнга $E'$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\sigma'$	Величина сдвига $h$ , нм	Давление на образец $P$ , ГПа
Si	0,15	0,25	0,206	1542
SiO <sub>2</sub>	75	0,17	0,13	2445
Поликристаллический Si	160	0,2	0,13	2446
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	165	0,26	0,13	2447
Биополимеры	0,001	0,3	3,614	88
Пенопласт	0,0001	0,4	16,584	20

Таким образом при исследовании структур ИС эффект занижения высот можно не учитывать (величина сдвига меньше 1 нм). Однако из-за формы зонда горизонтальные размеры существенно искажаются. Это явление называется эффектом уширения.

#### **Задача об определении ширины объектов по измеренным параметрам профиля**

Эффект уширения проявляется в том, что у изображений одиночных объектов, полученных методами СЗМ, завышены значения ширины профиля, и связан с тем, что зонд микроскопа имеет конечный радиус кривизны кончика. Традиционно для учета эффекта уширения объект исследования описывают сферической геометрией. Для получения более точных результатов можно обобщить этот подход для модели эллипсоидального объекта (рис. 2).

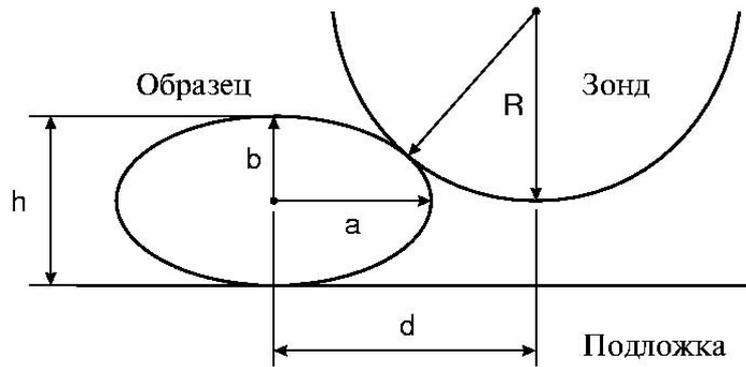


Рис. 2. Геометрия контакта зонда и образца.  
 $2d$  - измеренная ширина профиля,  
 $2a$  - истинная ширина объекта,  
 $R$  - радиус кончика зонда,  
 $h = 2b$  - высота профиля объекта над подложкой.

Запишем систему уравнений для эллипса (сечение профиля исследуемой частицы) и окружности (сечение профиля иглы):

$$\begin{cases} y_{ell} = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \\ y_{cir} = R - \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2} \end{cases}$$

Точка соприкосновения  $(x_0, y_0)$  будет удовлетворять системе

$$\begin{cases} b\sqrt{1 - \frac{x_0^2}{a^2}} = R - \sqrt{R^2 - \left(x_0 - \frac{d}{2}\right)^2} \\ \left. \frac{dy_{cir}}{dx} = \frac{dy_{ell}}{dx} \right|_{x_0} \end{cases}$$

Данную систему можно свести к уравнению с одним неизвестным ( $x_0$ ), которое решается численными методами [7]. После нахождения  $x_0$ , можно вычислить реальную ширину профиля по формуле

$$a = \frac{x_0}{\sqrt{b^2 - \left(R - \sqrt{R^2 - \left(x_0 - \frac{d}{2}\right)^2}\right)^2}} \quad (6)$$

Таким образом, по имеющимся экспериментальным данным о профиле исследуемого объекта, можно восстановить его реальную геометрию с помощью формул (2) и (6).

## Литература

1. C. Bustamante, J. Vesenka, C. L. Tang, W. Rees, M. Guthod, and R. Keller, Circular DNA molecules imaged in air by scanning force microscopy // *Biochemistry*, -1992, - v. 31, - pp. 22-26.
2. J. Vesenka, M. Guthod, C. L. Tang, R. Keller, E. Delaine, and C. Bustamante, Substrate preparation for reliable imaging of DNA molecules with the scanning force microscope // *Ultramicroscopy*, -1992, - v. 42-44, - pp. 1243-1249.
3. Z. Shao, J. Mou, D. M. Czajkowsky, J. Yang, and J.-Y. Yuan, Biological atomic force microscopy: what is achieved and what is needed // *Advances in Physics*, -1996, - v. 45, - No 1, - pp. 1-86.
4. H. Herz, // *J. Reine Angew. Math.*, -1882, - v. 92, - pp. 156.
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория упругости*, - т. VII серии *Теоретическая физика*. - М.: Наука, 1987. -246 с.
6. М. О. Галлямов, И. В. Яминский. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов, - 2001 -раздел 2.1.2
7. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков, *Численные методы*. - М.: Наука, 1987. -598 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР В НАНОРАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Степанеко М.Н.

*Научный руководитель: ассистент каф. ИУ4 Оя Д.Р.*

**Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**

## APPLICATION OF SPECIFIC NANOSTRUCTURES IN NANODIMENSIONAL ELECTRONICS

Stepanenko M.N.

*Supervisor of studies: assistant Oya D.R.*

**BMSTU, Moscow, Russian Federation**

### Аннотация

В настоящее время углеродные нанотрубки широко применяются в нанэлектронике. Данная работа посвящена исследованию одного из важных и перспективных направлений в данной области – специфическим разветвленным нанотрубкам, которые могут заменить современные МОП-транзисторы и послужить основой новой элементной базы.

### Abstract

Presently carbon nanotubes are widely used in nanoelectronics. The present work is devoted to investigations in one of the important and advanced trends in this field – specific split nanotubes which can substitute modern MOS-transistors and become the basis for a new element base.

Быстрое развитие микроэлектроники в конце XX-го века обусловлено, в первую очередь, постепенным уменьшением размеров транзисторов, которые стали базовым блоком почти всех бытовых и промышленных устройств.

Однако в конце текущего десятилетия будет достигнут предел миниатюризации транзисторов. По словам специалистов Intel, изготовление транзистора размером менее 100 нанометров сопряжено с большими трудностями и без радикального изменения производственного процесса невозможно вообще.

Выход из этой ситуации - использование Y-нанотрубок длиной всего несколько десятков нанометров. Благодаря свойствам нанотрубки ее можно использовать в качестве основы для нового класса транзисторов и других полупроводниковых приборов.



Рис. 1. Схема Y-транзистора

Для того чтобы создать нанотрубку в форме буквы Y, была разработана новая технология выращивания. Сначала была выращена обычная "прямая" нанотрубка, затем на ее поверхность нанесли специально обработанные наночастицы титана, которые выступили в роли катализаторов роста еще одной ветви на поверхности уже сформированной нанотрубки.

В данном случае, более простым кажется объяснение раздвоения, если считать, что мы имеем дело с нанотрубками свиткового типа. Тогда любой дефект в графитовой плоскости может привести к ее частичному разрыву в процессе формирования нанотрубок. И при сворачивании плоскости, разорванные части будут формировать свои ветки. В частности, свиткообразность нанотрубок объясняет различный размер веток на рис. 2

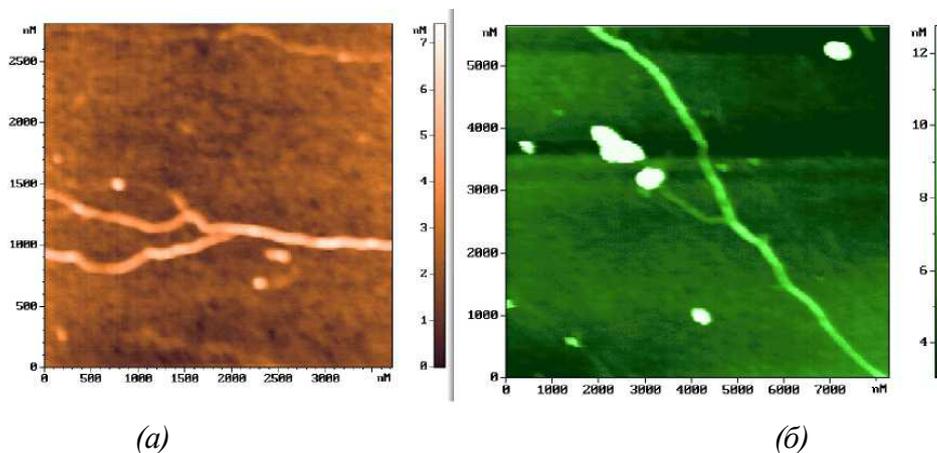


Рис. 2 Ветвящиеся нанотрубки на золотой (а) и кремниевой (б) подложке.

Когда Y-транзистор был готов, были изучены его электрические свойства. Как показали результаты измерений вольтамперных характеристик наносистемы путем прикладывания напряжения на "ствол" нанотрубки, протекание электронов от одной ветви к другой прекращается. Это характерная особенность транзисторных ключей: при подаче напряжения на затвор ток между истоком и стоком не протекает. И наоборот: как только был приложен положительный потенциал к "стволу" нанотранзистора, протекание тока через "ветви" возобновилось.

Транзисторы с нанотрубками обладают рядом улучшенных характеристик и преимуществ по сравнению с традиционными кремниевыми. А именно:

1. Повышенное быстродействие (транзистор на основе нанотрубки способен переключаться с частотой не менее единиц ТГц – это в тысячу раз больше частоты работы самых совершенных микропроцессоров на кремниевой основе)
2. Термо- и радиационная стойкость (определяется уникальными механическими свойствами нанотрубок и их миниатюрностью)
3. миниатюрность
4. Низкое энергопотребление и как следствие – тепловыделение

Как полупроводники, нанотрубки в отличие от кремния не требуют легирования. Кроме того, существует принципиальная возможность уже при синтезе получать необходимую электропроводность трубок.

Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если углеродный шестиугольник заменить, например, на пятиугольник, семиугольник или на два таких дефекта, как показано на рис. 3, нанотрубка изогнется.

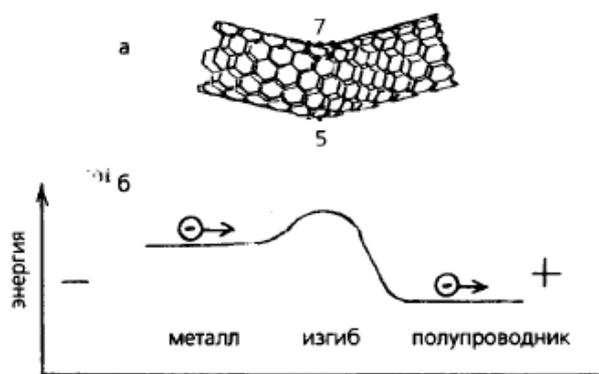


Рис. 3. Влияние дефекта семиугольник – пятиугольник на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б).

С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников окажется различной. Но с изменением ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняется ее электронный спектр, положение уровня Ферми, ширина оптической щели и т.п. В частности, для приведенного на рис.3 случая слева относительно изгиба нанотрубка должна быть металлической, а справа – полупроводниковой. Ток через подобную систему может течь только в одном направлении – из нанотрубки получается выпрямляющий диод.

Электронные свойства нанотрубок можно полностью менять путем их заполнения другими веществами. Так эксперименты показали, что интеркаляция (т.е. внедрение) атомов различных металлов меняет электрические свойства фуллеренов и может превратить изолятор в сверхпроводник. Таким же образом можно менять свойства нанотрубок.

Сейчас перед мировой микроэлектронной индустрией остро стоит вопрос выбора дальнейшего направления пути развития. Это объясняется необходимостью продления действия закона Мура (возможности дальнейшей миниатюризации электронных схем на основе традиционных полупроводников будут полностью исчерпаны в ближайшие 10-20 лет). В этом отношении нанотрубки рассматриваются как наиболее перспективное направление.

### Литература

1. Ч. Пул, Ф. Оунс «Нанотехнологии» М.: Техносфера, 2005
2. Chau R., Boyanov B., Doyle B. et al. Silicon nano-transistors for logic applications // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2003. V. 19. N. 1-2. P. 1-5.
3. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Петрик В.И., Чаплыгин Ю.А. Вольтамперные характеристики двухэлектродных элементов с углеродными нанотрубками // Микроэлектроника. 2003. Том 32. N 2. С 102-104.
4. Ю.С. Бараш. Силы Ван-дер-Ваальса//Москва. Наука. 1988.

# ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ КМОП СБИС С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ TCAD

Глушко А.А., Родионов И.А.

*Научный руководитель: к. т. н., доцент Макаrchук В.В.*

Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

## ABILITIES OF TECHNOLOGICAL PROCESSES MODELLING OF SUBMICRON CMOS VLSI PRODUCING WITH THE MODERN TCAD SYSTEMS

Glushko A.A., Rodionov I.A.

*Supervisor of studies: Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.*

BMSTU, Moscow, Russian Federation

### Аннотация

Настоящая работа посвящена особенностям технологических процессов изготовления субмикронных КМОП СБИС и их моделирования. Особое внимание уделено моделированию примесного профиля.

### Abstract

This work is devoted to the features of submicron CMOS VLSI producing technological processes and their simulation. The main attention is concentrated to the modeling of doping profile.

Математическое моделирование играет все большую и большую роль в микроэлектронике, в частности, при изготовлении субмикронных СБИС. При этом практически неприемлемым становится экспериментальный подход, в котором оптимизация конструкции элементов СБИС производится методом проб и ошибок. Такое моделирование технологических процессов дает в настоящее время непосредственный экономический эффект, существенно уменьшая затраты на экспериментальные работы. Однако с проблемой математического моделирования тесно связаны особенности изготовления субмикронных СБИС [1, 2].

Элементы СБИС обладают субмикронными характерными размерами порядка 0,5 – 0,35 мкм, а толщины слоев и глубины переходов в них составляют порядка 0,1 мкм. Маршрут изготовления субмикронных СБИС должен удовлетворять четырем основным требованиям.

Во-первых, процессы изготовления СБИС должны проводиться при достаточно низких температурах, что позволяет свести к минимуму диффузию легирующих примесей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Аналогичный эффект также можно получить, используя очень кратковременную обработку пластин при высоких температурах, проводя быстрый термический или фотонный отжиг.

Второе важное требование состоит в обеспечении малых сопротивлений проводящих дорожек и контактов. Паразитные сопротивления и емкости могут приводить к существенному снижению быстродействия СБИС. Сопротивление дорожек и контактов с субмикронными размерами может быть уменьшено путем селективного выращивания и осаждения пленок тугоплавких металлов на поликремниевые затворы, а также на истоки и стоки полевых транзисторов с последующим силицидированием контактов к указанным областям. Использование силицидов таких тугоплавких металлов, как платина, титан и вольфрам, позволяет существенным образом снизить вышеуказанные сопротивления.

Третьим требованием, критичным для изготовления структур с субмикронными размерами, является обеспечение планарности (плоскостности) поверхности обрабатываемой пластины. Планарность необходима, в основном, по трем причинам. Во-первых, фоторезист должен быть планарным для того, чтобы при оптическом экспонировании топологический рисунок был воспроизведен точно. Наличие ступенек рельефа существенно затрудняет выполнение этого требования. Во-вторых, изменения топографии усложняют и без того очень трудную задачу фокусирования экспонирующего устройства (степпера), сокращают

глубину фокуса, следовательно, уменьшают ширину процессного окна, а, значит, ведут к нестабильности технологического процесса, и зачастую к невозможности выполнения требований по надежности и проектным нормам. Планарность критична и с точки зрения обеспечения хорошего перекрытия ступенек в местах перехода от межсоединений к контактам.

И, наконец, четвертым требованием, необходимым для производства СБИС с субмикронными размерами структур, является использование т.н. «глубокого субмикрона» (то есть длины волны экспонирующего излучения степпера 250 нм и менее). При этом уже не представляется возможным отделить технологию производства СБИС от их проектирования, так как важно учитывать существенное отклонение геометрической формы полученной маски от ее изображения на фотошаблоне [3, 4]. Это отклонение связано с волновыми явлениями, происходящими при длине волны экспонирующего излучения, которая сравнима с геометрическими размерами получаемой структуры.

Топологию СБИС изменяют с учетом введения сложных источников освещения, введения фигур коррекции эффектов близости, учета получаемого рельефа поверхности кристалла, эффекта больших полей, подготовки к последующим процессам фотолитографии и травления, и, наконец, учета различных технологических уходов [5].

Все описанные корректировки топологии невозможно ввести эмпирическим путем, иначе для этого потребовалось слишком много времени. Поэтому необходимо использовать все более мощные средства моделирования технологического процесса производства СБИС. Необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько мощных систем TCAD таких фирм, например, как TMA Inc. (США), ISE Integrated Systems Engineering AG (Швейцария), Synopsys Inc. (США) и Silvaco International (США). Эти системы TCAD обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса производства СБИС. Стоимость подобных программных средств исчисляется сотнями тысяч долларов за лицензию, не говоря уже о стоимости подготовки специалистов, способных грамотно их использовать. В настоящей статье речь пойдет о моделях, используемых в таких системах технологического моделирования

На рис. 1 представлен типичный технологический маршрут изготовления КМОП СБИС.



Рис. 1. Технологический маршрут изготовления КМОП-структур

Поперечное сечение реализуемой КМОП-структуры показано на рис. 2.

При разработке технологического маршрута формирования субмикронных КМОП СБИС и его моделировании в системах TCAD основной целью является получения заданного примесного профиля, который, в свою очередь, является основой для моделирования электрических характеристик.

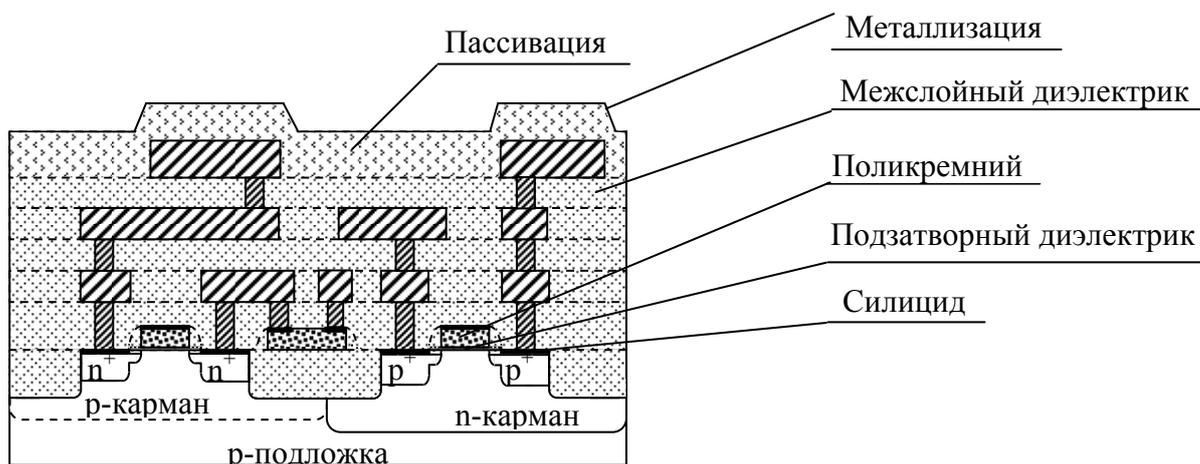


Рис. 2. Поперечный разрез КМОП-структуры

Из приведенных на рис. 1 технологических операций основную роль в формировании примесного профиля играют процессы ионной имплантации и последующего отжига.

Имплантация обеспечивает чрезвычайно однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления током ионов во время процесса. Кроме того, оксидные слои, используемые в качестве масок при диффузии, можно применять и для маскирования по отношению к ионному пучку. Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, однако для рекристаллизации поврежденной решетки и активирования примесей (перемещение атомов примеси из междоузлий в узлы решетки) требуется последующий отжиг.

Для расчета имплантационного примесного профиля в системе TCAD применяются аналитические методы расчета, в основе которых лежат функции распределения Гаусса или Пирсона. В этих методах допускается, что каждый пучок имплантированных ионов вызывает перераспределение ионов в пластине в соответствии с вероятностными распределениями Гаусса и Пирсона. Для получения плотности распределения ионов от всего пучка применяют принцип суперпозиции.

Кроме того, для моделирования распределения имплантированных ионов и имплантационных дефектов применяется метод Монте-Карло. С помощью этого метода моделируются физические события, происходящие при торможении отдельных частиц. Ионы тормозятся при ядерных столкновениях и в результате электронного трения. Ядерные столкновения описываются формулой Линдхарда. Местоположения рассеивающих атомов мишени считаются случайными.

Преимущество метода Монте-Карло заключается в присутствии у него прямого соответствия реальным физическим событиям, а основной недостаток – в чрезмерных затратах машинного времени, необходимых для получения статистически надежных результатов.

Как отмечалось выше, после ионной имплантации необходимо проводить отжиг. Модель отжига в системах TCAD довольно сложна и учитывает как диффузионные процессы, так и процессы химических превращений на поверхности пластины. Если отжиг проводится за короткий промежуток времени, измеряемый секундами, то изменение концентрационного профиля в результате диффузии незначительно. Если же отжиг проводится длительное время, происходит значительное перераспределение примеси.

В основе моделирования диффузионного примесного профиля лежит диффузионное уравнение. Поскольку в ряде случаев это уравнение нелинейно (к примеру, если диффузия происходит при высокой концентрации имплантированной примеси), то необходимо пользоваться численными методами решения дифференциальных уравнений.

Процессы осаждения и травления можно рассматривать как вспомогательные для проведения селективной диффузии и имплантации. Точность проведения этих процессов

влияет на качество полученной топологии кристалла, что становится особенно важным при проектировании субмикронных структур.

Осаждение и травление в первом приближении можно рассматривать как процессы, контролируемые скоростью поверхностной реакции. Каждая точка поверхности рассматривается как бесконечно малый источник Гюйгенса, а передвигающийся контур при этом представляет собой геометрическое место точек касания со всеми сферами влияния этих источников. Для выполнения точных и эффективных расчетов в алгоритмах необходимо учитывать особенности моделируемых процессов и соответствующие граничные условия.

И, наконец, разработчику технологического процесса важно знать, как организована система моделирования. В соответствии с рисунком 3, все программные компоненты систем TCAD можно условно разбить на три группы. Первая группа программ предназначена для подготовки входных файлов. Данные о технологическом процессе изготовления СБИС, о топологии проектируемой СБИС переводятся ими в программные коды. Вторая группа программ – собственно программы моделирования. Они, как правило, не имеют развитого графического интерфейса, но с их помощью проводятся расчеты, результаты которых сохраняются в выходных файлах моделирования. Просмотреть результаты моделирования можно с помощью третьей группы программ – программ визуального отображения результатов моделирования.

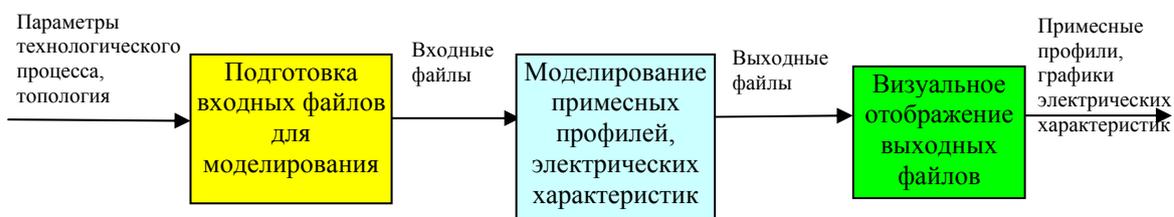


Рис. 3. Структура систем TCAD

На входе систем TCAD задаются параметры технологического процесса (последовательность выполнения операций и список необходимых данных для их выполнения), а также топология. На выходе получают профили распределения примесей в сформированных структурах, которые, в свою очередь, являются исходными данными для последующего моделирования их электрических характеристик. С помощью систем TCAD становится возможным не только проектировать технологический процесс, но также контролировать его, а также прогнозировать влияние отдельных параметров технологического процесса на качество получаемых СБИС.

### Литература

1. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема: Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1988.– 496 с.:ил.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем: Пер. с англ.– М.: Мир, 1991.– 327 с.: ил.
3. Ir. H.J.M. Veendrick. Deep-Submicron CMOS ICs, Second Edition, 2000, Kluwer academic publishers, 526 pp.
4. H.W. Kennel, S.M. Cea, A.D. Lilak, P.H. Keys, M.D. Giles, J. Hwang, J.S. Sandford, S.Corcoran. Modeling of ultrahighly doped shallow junctions for aggressively scaled CMOS, Electron Devices Meeting, 2002. IEDM '02.Digest. International, pp. 875-878
5. P. Sixt. Optical Proximity Correction (OPC). Technology Review, Volume 1, Issue 7, April 2003, pp. 1-8.

# INVESTIGATION OF SIMULATION TECHNIQUES AND FABRICATION TECHNOLOGIES OF MEMS BY THE EXAMPLE OF MICROFLUIDIC SWITCH BASED ON COANDA EFFECT

Alexey Denisov, Thomas Barzan, Stefano Meliga, Guillaume Bougrine, Yoan Civet

*Research supervisors: Prof. Pierluigi Civera, Prof. Vladimir Victorov*

Polytechnic Institute of Turin, Italy

## Abstract

Under consideration are simulation techniques and fabrication technologies of MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). By the example of microfluidic switch based on Coanda effect, FE (Finite Element), Lumped Electrical and EDA (Electronic Design Automation) models were developed. In order to examine feasibility of microfluidic switch design, several technological approaches were investigated.

## Introduction

Nowadays *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems) technology has been identified as one of the most promising technologies for the 21<sup>st</sup> century and has the potential to revolutionize both industrial and consumer products by combining silicon-based microelectronics with micromachining technology.

MEMS is a process technology used to create tiny integrated devices or systems that combine mechanical and/or sensor with electrical components. They are preferably fabricated using integrated circuit batch processing techniques and can range in size from a few micrometers to millimeters. These devices (or systems) have the ability to sense, control and actuate on the micro scale, and generate effects on the macro scale. The interdisciplinary nature of MEMS utilizes design, engineering and manufacturing expertise from a wide and diverse range of technical areas including integrated circuit fabrication technology, mechanical engineering, materials science, electrical engineering, chemistry and chemical engineering, as well as fluid engineering, optics, instrumentation and packaging.

*Microfluidics* is the science and engineering of devices which are able to handle fluid volumes in the nano- and sub-nanoliter range or which make explicit use of the effects which are typical for fluids interacting with microstructures [1, 2]. Microfluidics has become one of the most dynamically emerging disciplines of microtechnology, supplying some of the key hardware to enable the rapid growth and commercialization of the life sciences as well as other fields of business such as inkjet and propulsion industries in the recent decade. Modern inkjet technology with global turnover beyond 10 billion dollars represents an impressive example of how microfluidics has leveraged a mature and commercially very successful field of business.

**The aim of the project** is to investigate simulation techniques and fabrication technologies of microfluidic flip-flop switch based on Coanda effect.

In the last two decades thousands of researchers spend a lot of effort to develop new microfluidic components or to explore the basic microfluidic operations such as fluid transport, fluid mixing, valving or concentration and separation of molecules within miniaturized quantities of fluids [3]. Nowadays hundreds of different types of micropumps, hundreds of different types of mixers and hundreds of different types of microvalves are known [1]. This fact dramatically decreases the favourability of microfluidic and MEMS industries for new research groups and scientific organization because of necessity to make considerable investments into redevelopment and systematization of microsystems components.

Therefore it is very important to investigate common simulation and microfabrication approaches which can be applied to the majority of MEMS.

## Brief description of microfluidic switch

The microfluidic switch simulated and designed in the project is a Y microfluidic flip-flop able to switch the way of the incoming laminar flux in one of the two available directions (fig. 1). The liquid entering from the inlet is forced to choose the desired direction by providing an overpressure or an underpressure impulse close to the pipes crossroad (Control channel).

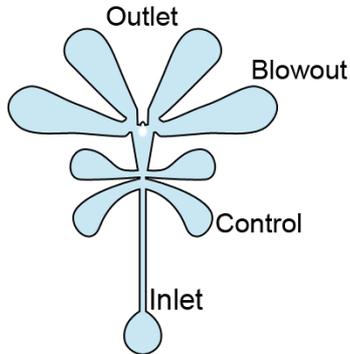


Fig. 1. Microfluidic switch based on Coanda effect

The pressure drop is also maintained by a feedback flux of two bypass valves positioned on each outlet pipe (Blowout channels). The pressure impulse needed for the commutation is generated by a buzzer: an electronically controlled pump based on a piezoelectric membrane.

The stability of the system is obtained through exploitation the Coanda effect, which sticks the flux to the attachment wall of the selected outlet pipe. The Coanda effect is the tendency of a stream of fluid to stay attached to a convex surface, rather than follow a straight line in its original direction.

The working principle on the device is described below in more details.

## The Finite Element Model

The FEM (Finite Element Model) simulation of the core of the device was performed by using the MEMS/Microfluidics Module of the COMSOL 3.2 software. In order to understand the potential of the program in terms of the effective modelling capability of the Coanda effect for different fluids several simple 2D simulations were run.

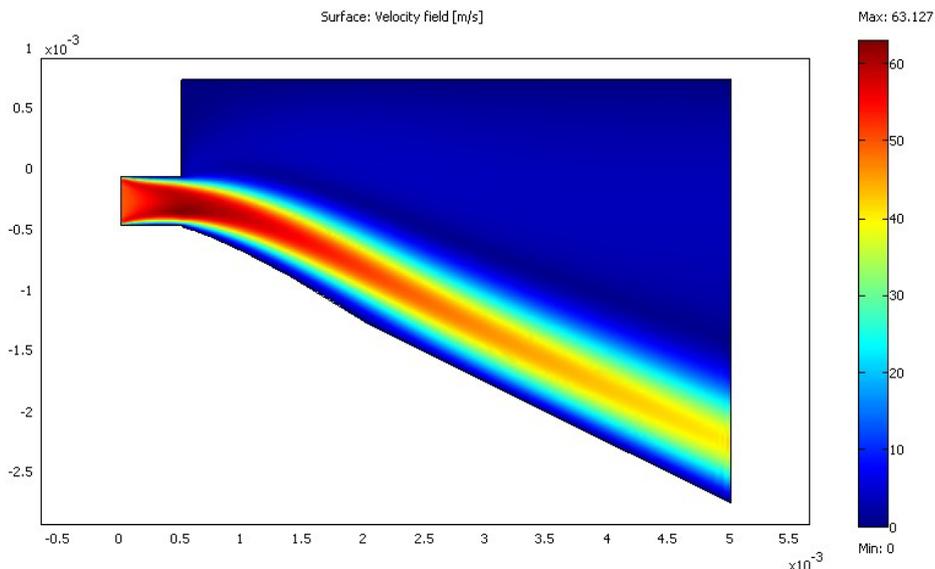


Fig. 2. Coanda effect on Nitrogen out of a 0.4 mm section pipe with inlet velocity of 50 m/s and temperature of 300K

As it may be noticed, the Coanda effect is successfully modelled by the simulation tool. By using this simple geometry, different parameters such as fluid inlet pipe velocity and pressure, tilting angle of the sidewall were investigated in order to gather useful information for the design of the device. A close up of the Coanda bubble is shown in fig. 3. Notice of the pressure field image the lower pressure region in correspondence of the position of the bubble.

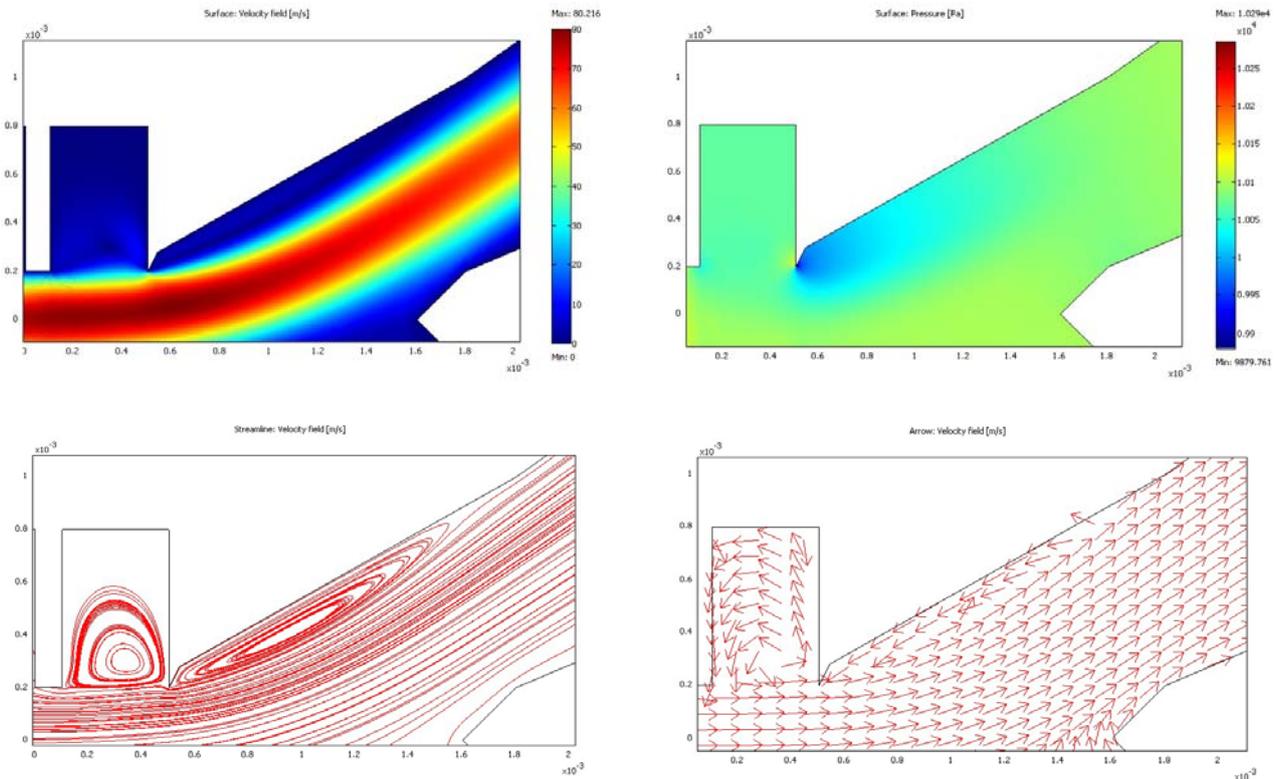


Fig. 3. Fluid inlet pipe velocity, pressure and tilting angle simulation

The aim is to develop a design which allows the formation of a Coanda bubble that drives the fluid in one of the two possible directions of the switch. The switch stability depends on the stability of the bubble, which is created and kept in stable configuration by the tangent flux of a feedback channel along the inlet. A buzzer is used for commutation, providing the pressure kick that breaks the Coanda bubble on one side of the chamber and generates it on the other one.

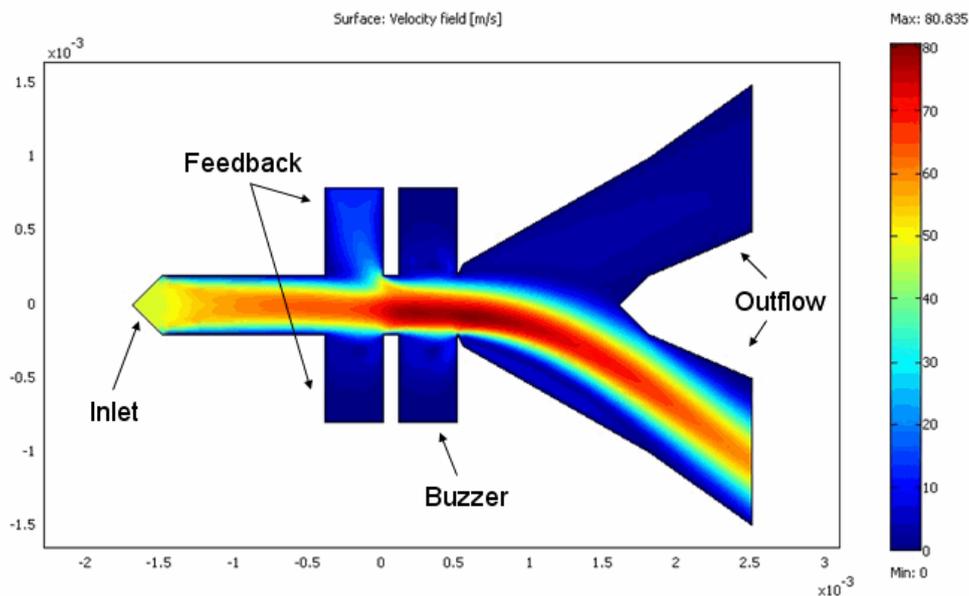


Fig. 4. Pressure change in the control chamber forces flow to choose the direction

In fig. 5 streamline analysis of the operating switch before and during commutation is presented.

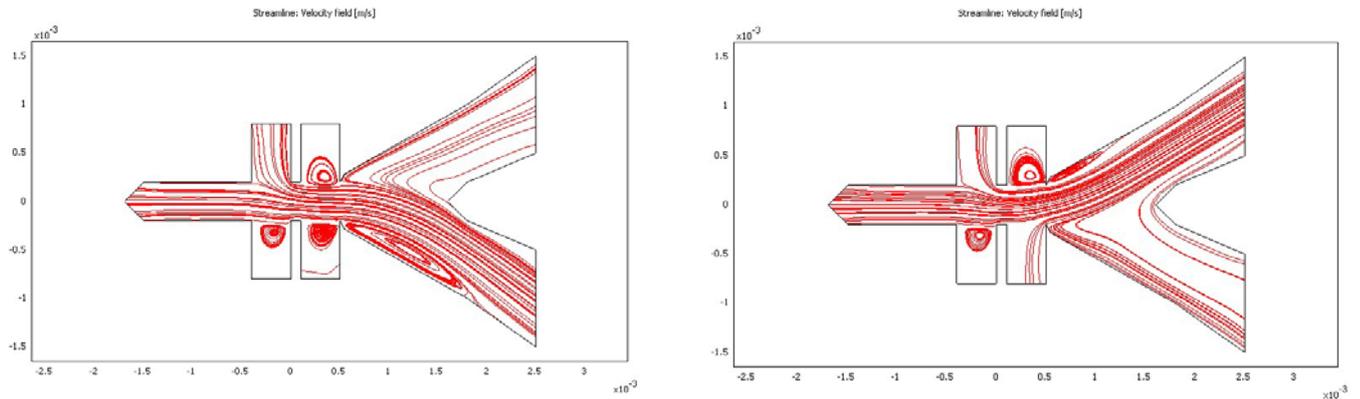


Fig. 5. Streamline analysis of the operating switch before (left) and during (right) commutation

In fig. 5 (left image) it is possible to see the Coanda bubble formation along the bottom outlet wall. The channels of the device (i.e. inlet, feedback and buzzer channels) are characterized by a width of  $0.4 \text{ mm}$ , which represents a limit to the further scaling down of the device. This is due to the fact that by further reducing the dimension of the pipes, the Coanda effect is no longer detected by the simulation software; hence the device does not perform any switching.

The working range of the device has been investigated for Nitrogen, Oxygen, Water at  $300 \text{ K}$  and  $101325 \text{ Pa}$  ( $1 \text{ atm}$ ) pressure. The parameters that have been analysed are the inlet velocity of the fluid, the minimum velocity of the feedback flux in order to guarantee switch stability, the minimum velocity of the flux coming out of the buzzer channel to perform commutation and the size of the Coanda bubble.

The volume of the control chamber, as well as the tilting angle of the chamber walls, was designed to be as little as possible, but still big enough to allow the formation of the Coanda bubble and guarantee an effective switching for fluids in a specific range of the inlet inflow velocity. Several designs were investigated in order to obtain a satisfying working range in terms of inlet fluid velocity. The design that is presented is the model that exhibited the best performance.

### The Lumped Electrical Model

The device works mainly with gases which are in a turbulent motion at least in the switching chamber, so fluid cannot be considered as incompressible and it is not possible to use Navier-Stokes equations. In order to simplify the model it was considered that the switching condition, taking in account that the pressure impulse provided by the buzzer has to overcome a threshold pressure to let the Coanda bubble collapse and recreate in the other side of the chamber.

Assuming that it is not possible to use perfect gas law and that the transformation is enough quick to consider it as isothermal, the mass conservation law links the gas volume and the pressure drop by the relation:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V_0}{P_0} \frac{dP}{dt} = q = Y(P_c - P_l), \quad (1)$$

where  $V$  is the volume,  $V_0$  is the volume with relaxed piezomembrane,  $P_0$  the gas pressure reference and  $q$  the flow rate in the pipe.

$q$  corresponds to the current, such as the temporal derivative of volume, so it is possible to substitute an admittance  $Y$  creating a pressure drop at the sides of the control pipe:  $P_l$  is the pressure close to the buzzer, while  $P_c$  is the one close to the control chamber.

In order to pass from the electrical domain of the buzzer supply to the fluidic one, spire ratio of a transformer can be used [4, 5]:

$$P = 8 \frac{h}{d^4} U \quad (2)$$

$$V = 8 \cdot 10^{-11} \frac{d^4}{h^2} U, \quad (3)$$

where  $U$  is the applied voltage,  $h$  and  $d$  respectively the membrane thickness and diameter,  $P$  the maximum reachable overpressure and  $V$  the stroked volume.

Since in the (1) there are two current terms generated by two different variables, is easier to introduce a two entrance circuit, where the respective transformers have the spire ratio showed in formulas (2) and (3) [6].

Unfortunately the volume corresponds to the charge instead of the voltage: it is possible to solve this domain ambiguity by introducing a condenser in series which derives the charge, transforming it in a current [6]. Moreover, in order to fit the first term of the equation (1) the capacity  $C_v$  must be unitary and dimensionless.

The other entrance follow the standard  $e$ - $V$  convention but again, to fit the equation (1) has also a condenser with  $C_p$  equal to the ratio between the volume and pressure constants  $V_0$  and  $P_0$ .

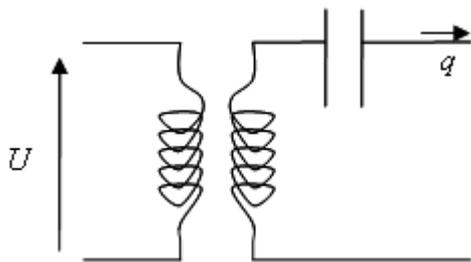


Fig. 6. Two entrance circuit for eq. (1)-(3)

The sum of two resulting currents corresponds to the flow inside the pipe. Obviously the pipe has a resistance given by its geometry and by gas viscosity; for instance, for a cylindrical pipe Hagen-Poiseuille solution can be used:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi \cdot r^4}, \quad (4)$$

where  $\eta$  is the gas viscosity,  $l$  is the pipe length and  $r$  the radius.

Now, if the access to the control chamber was closed it is possible to express the pipe capacity in terms of gas stiffness, but all the flow entering the chamber cannot be neglected because it actually create the Coanda recoiling.

However, with the constant capacitor  $C_p$  the probable behaviour of the system can be roughly estimated: a rectangular pressure impulse exponentially originates a pressure drop and, in the meanwhile, a charge is proportionally accumulating in the condenser.

Exploiting once more the correspondence charge-volume the volume of the bubble as the stored charge in the condenser can be found (fig. 7).

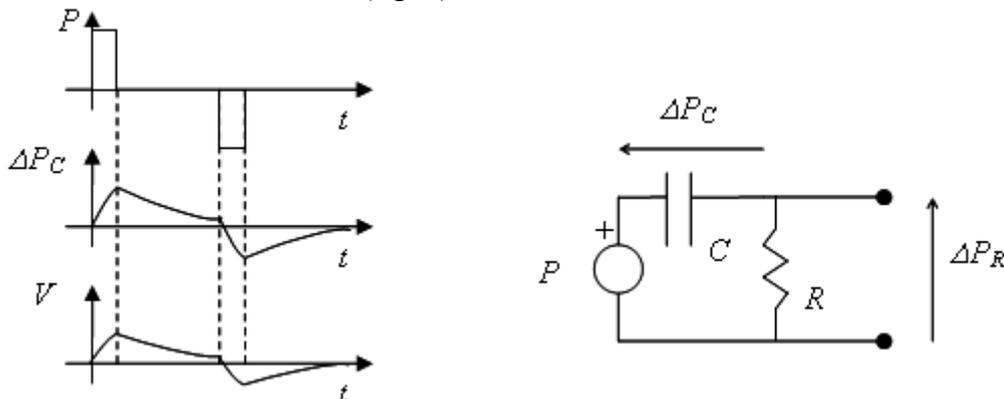


Fig. 7. Control pressure, chamber pressure, volume of the Coanda bubble behaviour and corresponding equivalent electrical circuit

After the impulse, the charge-volume is discharging, but the Coanda effect is a quite steady phenomenon. That is why a constant capacity cannot describe well a stabile condition.

If the pressure impulse is powerful enough to lead the vortex overcome a threshold volume, this bubble is supposed to be quite constant (fig. 8).

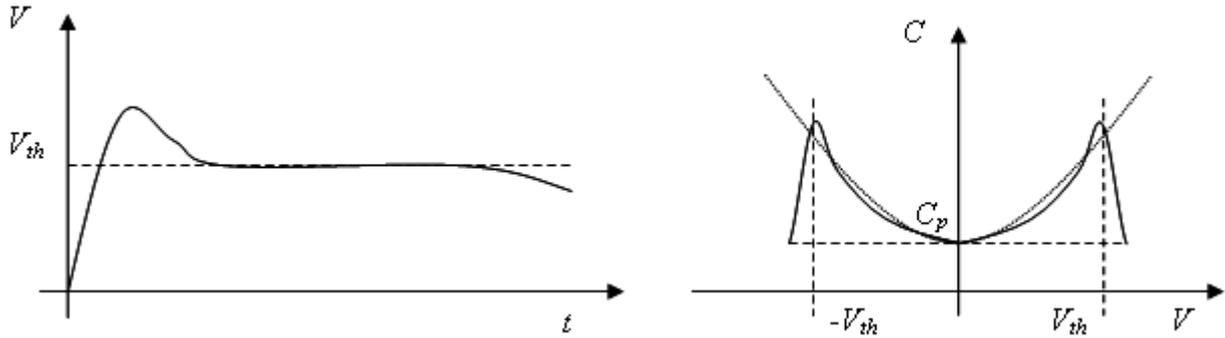


Fig. 8. Coanda bubble volume behaviour

Therefore the volume of the Coanda bubble should be near  $V_{th}$ : the capacity might have a peak in correspondence of the bubble preferred volume in order to slow down the condenser discharge, enhancing bubble lifetime. The value  $V_{th}$  can be obtained by exploiting a static finite element simulation.

The sign of the volume as the side where the bubble is forming is determined in the same way like the sign of the voltage applied defines the strain direction of the membrane. The easier way to write such behaviour is to approximate it with a parabola: so the capacity as a quadratic function of the volume.

$$C = C_p + C_b \left( \frac{V}{V_{th}} \right)^2 \quad (5)$$

In fig. 9 pressure distribution for Nitrogen flux entering at 300 K, 1 atm, 50 m/s is shown.

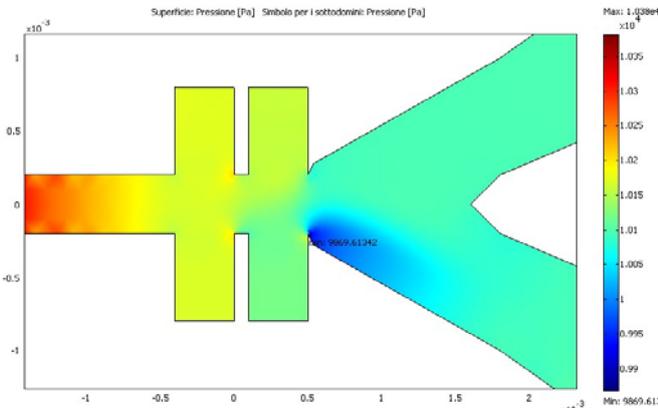


Fig. 9. Pressure distribution for Nitrogen flux entering at 300 K, 1 atm, 50 m/s

From fig. 9 it is possible to estimate approximately the bubble surface:  $\sim 0.5 \text{ mm}^2$ . Therefore if the chamber is 1 mm thick  $V_{th} = 0.5 \text{ mm}^3$ .

The constant part of the capacitance which can be obtained, represents the gas stiffness already accounted by  $C_v$ , while for the second order coefficient the expression can be written as the ratio between the typical bubble volume  $V_{th}$  and its minimal pressure  $P_b$ :

$$C_b = \left| \frac{V_{th}}{\Delta P_b} \right| \quad (6)$$

According to the simulation,  $\Delta P_b = 10200 - 9870 = 330 \text{ Pa}$ .

Considering gas mass inertial effects negligible the final equivalent circuit can be designed (fig. 10) [6].

Extracting the state equation with PSPICE, the relation between control pressure and the voltage supply can be found.

To ensure that the switching would occur, a pressure sufficient to make the bubble collapse and recreate in the other side should be  $\Delta P_{th} = 2\Delta P_b$ .

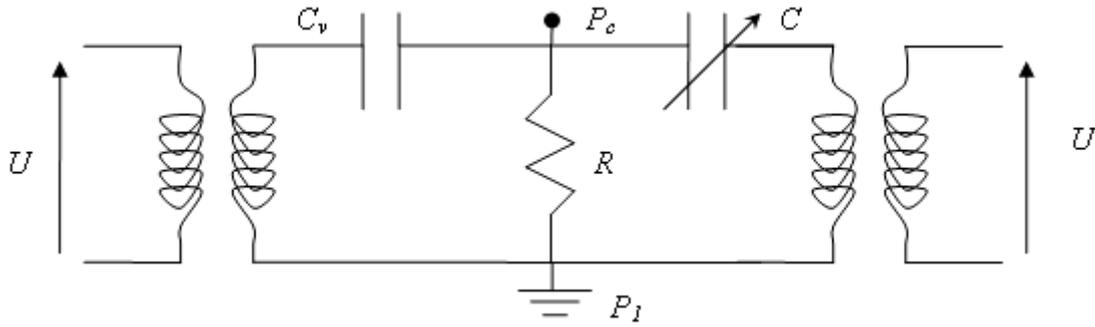


Fig. 10. Final equivalent electrical circuit

Therefore, in order to calculate the minimum switching voltage it is required to provide voltage  $U$  sufficient to satisfy:

$$|P_c - P_l| > 2 \Delta P_b \quad (7)$$

From fig. 10 it is clearly seen that the circuit is a low-pass filter. This means that the requirements for supply the buzzer are both a high enough voltage, in order to overcome the threshold, but also a frequency under the band edge. In order to guarantee the switching condition, and to wait a sufficient time to let the condenser discharging (the bubble weakening), the impulse rate cannot be too high.

### EDA Simulation

To control the pressure inside the switch and, therefore, to control the fluidic flux, piezoelectric actuator is used. It consists of 10 mm diameter piezo ceramic disc 0.2 mm thick glued directly onto a 75 μm thick brass membrane [7].

The schematic sketch is presented in fig. 11.

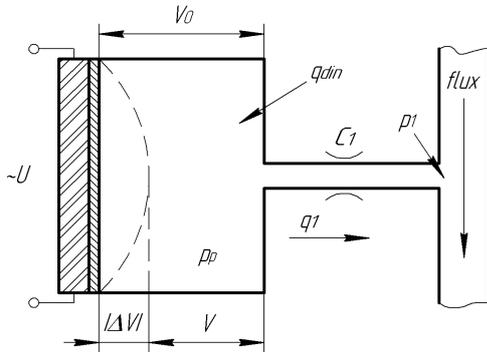


Fig. 11. Schematic sketch of piezoelectric actuator connected to switch control channel

Under applied voltage (trapezoidal shape with the amplitude  $U = 175 \text{ V}$ ) the piezoelectric disc forces metallic membrane to bend. This effect results in volume change inside the chamber ( $\Delta V$ , fig. 11) [7].  $V_0$  is dead volume – the total chamber volume occupied by membrane.  $V_0 = 4,5 \mu\text{l}$ .

The volume in chamber  $V$  after membrane bending can be estimated with the following expression:

$$V = V_0 - \Delta V \quad (8)$$

The volume change  $\Delta V$  (in  $\text{m}^3$ ) can be approximated using:

$$\Delta V = 8 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{d^4}{h^2} \cdot U, \text{ where} \quad (9)$$

$d$  – diameter of the piezo disc (in  $\text{m}$ );  $h$  – thickness of the assembly: disc + membrane (in  $\text{m}$ );  
 $U$  – applied voltage (in  $\text{V}$ );

From fig. 11:

$p_p$  – pressure inside the chamber (in  $\text{Pa}$ );

$p_1$  – pressure outside the chamber (control pressure, in  $\text{Pa}$ )

$q_{din}$  – dynamic mass flow (mass flow which is caused by membrane bending, in  $\text{kg/s}$ )

$q_1$  – static mass flow (mass flow which is caused by flux from chamber to the channel, in  $\text{kg/s}$ )

$C_1$  – channel conductivity (const which depends on channel geometrical properties and fluid properties: viscosity, density. In  $kg/(s \cdot Pa)$  ).

$$q_{din} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{d\rho}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R \cdot T} \cdot \frac{dp_p}{dt}, \text{ where} \quad (10)$$

$$\rho = \frac{p_p}{R \cdot T} - \text{fluid density} \quad (11)$$

$$q_1 = C_1 \cdot (p_1 - p_p) \quad (12)$$

Due to the Mass Conservation Law:

$$q_{din} = q_1 \quad (13)$$

and the following differential equation can be obtained:

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R \cdot T} \cdot \frac{dp_p}{dt} = C_1 \cdot (p_1 - p_p) \quad (14)$$

Solving this equation in terms of  $p_p = f(V)$  and assuming that  $p_1 = 1 \text{ atm}$  ( $101325 \text{ Pa}$ ) it is possible to find how chamber pressure depends on volume change caused by membrane bending.

In order to solve equation (14) a system block-diagram can be constructed in SIMULINK, and simulations can be performed in this environment [8]. Fig. 12 shows the block-diagram for solving equation (14).

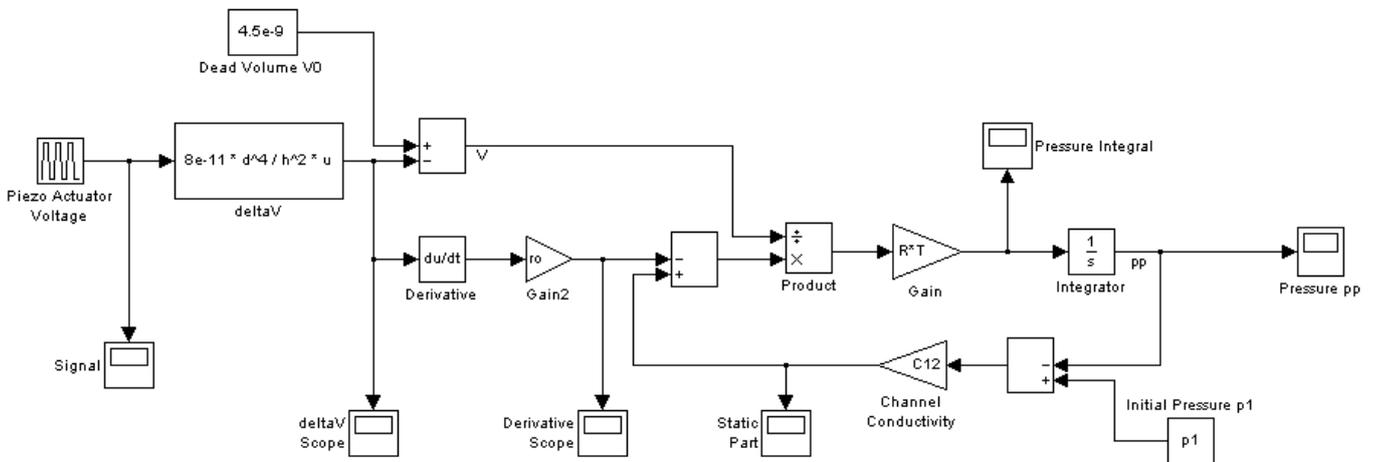


Fig. 12. SIMULINK block-diagram for solving equation (14)

The behavior of  $\Delta V$  ( $deltaV$  on block-diagram) in presented in fig. 13.

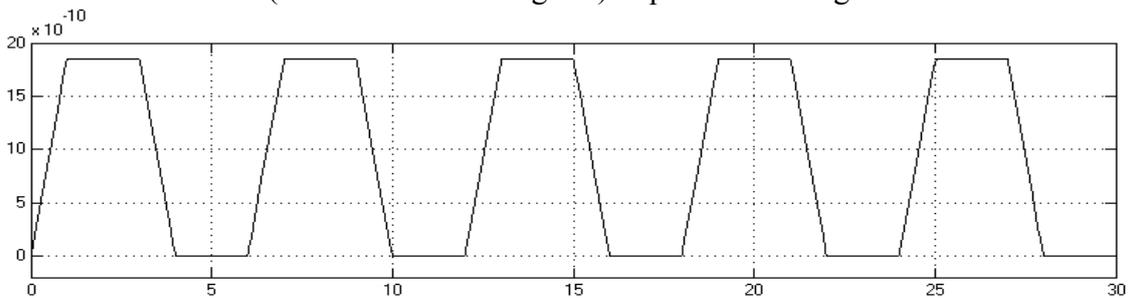


Fig. 13.  $\Delta V$  behavior

It is clearly seen that if there is no voltage applied ( $U = 0 \text{ V}$ ) there is no membrane bending and  $\Delta V = 0$ .

The initial value for pressure  $p_p$  was  $1 \text{ atm}$ . The output value of  $p_p$  is shown in fig. 14.

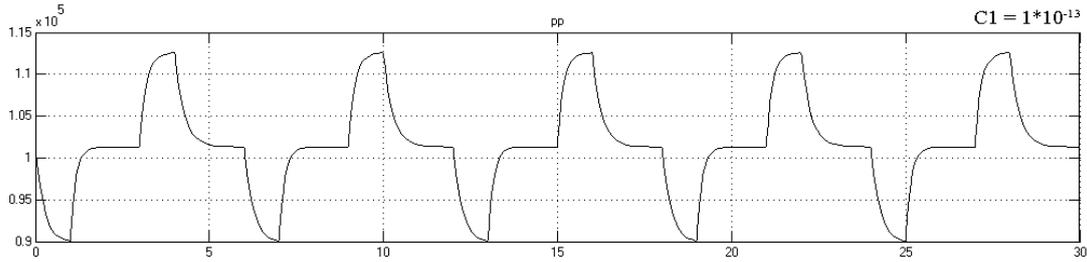


Fig. 14. Pressure  $p_p$  behavior

From fig. 13 and fig. 14 it is seen that maximum pressure  $p_p$  corresponds to minimum  $\Delta V$  (ref. to fig. 11). At the beginning the membrane bends to the left, increasing volume  $V$  and increasing pressure  $p_p$ ). It is also clearly seen that the pressure behavior does not follow precisely applied voltage behavior. This is because of fact, that during increase of pressure and after a certain value the flux begins to flow out of the chamber ( $q_1$  in fig. 11). This mass flow results in chamber pressure decrease. The same, but vice versa process takes place during decrease of pressure in the chamber.

There is an important parameter  $C_1$  with an influence on the chamber pressure threshold after which the flux begins to flow out. This parameter depends on geometrical properties of the channel (square of pipe) and fluid properties (viscosity, density, etc.). For fig. 14  $C_1 = 1 \cdot 10^{-13} \text{ kg/(s*Pa)}$ .

In order to estimate, how  $C_1$  affects the pressure behavior, it is possible to plot pressure  $p_p$  for different  $C_1$  values. The plots are shown in fig. 15.

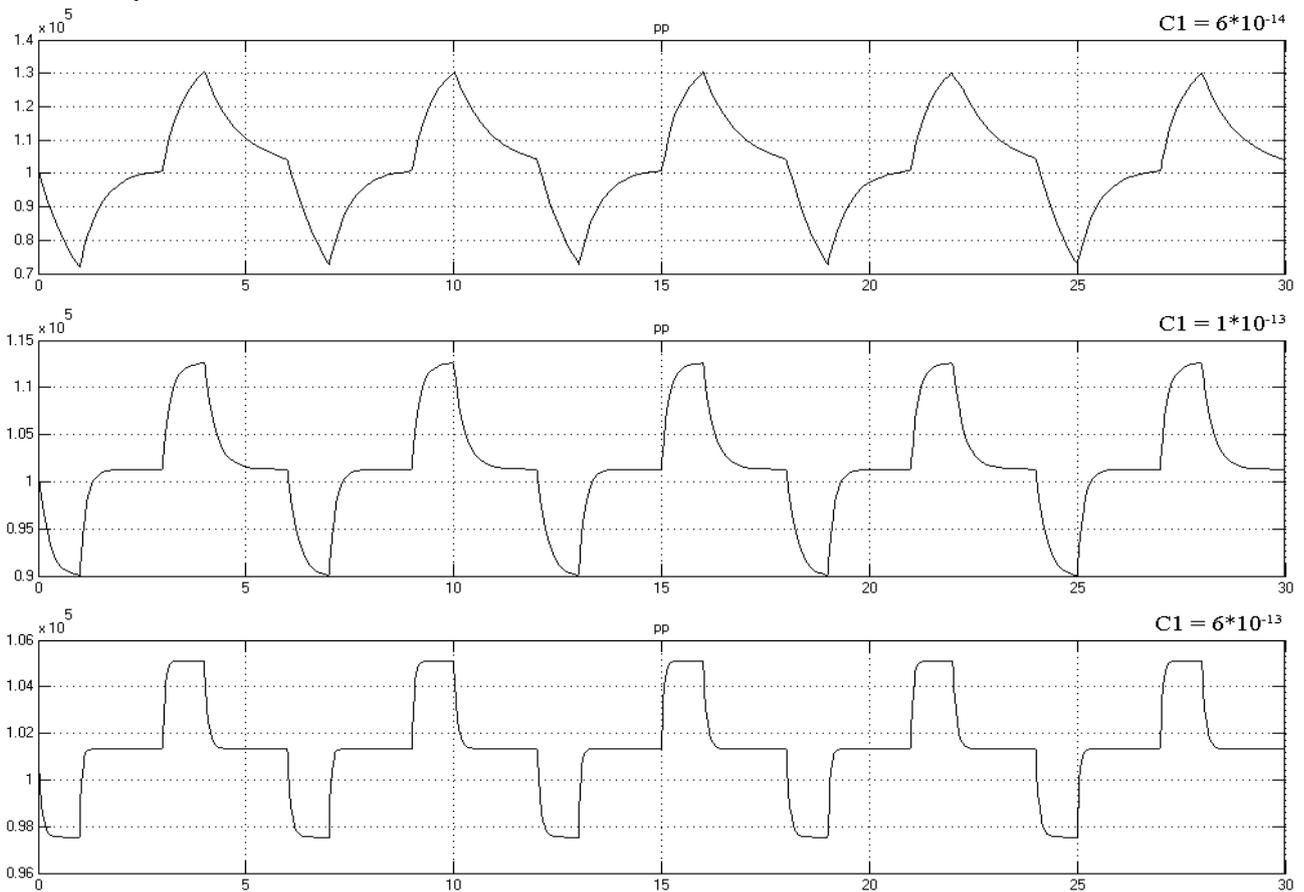


Fig. 15. Pressure  $p_p$  behavior for different values of  $C_1$

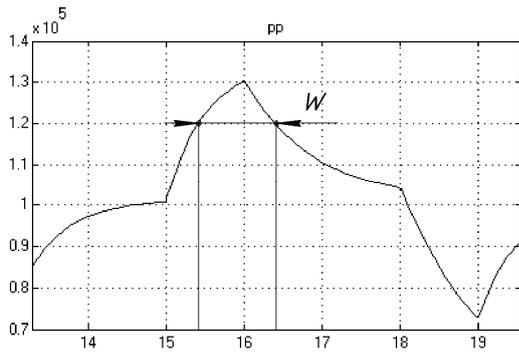


Fig. 16. Peak of pressure  $p_p$

It is seen that by increasing channel conductivity  $C_1$  the maximum value of chamber pressure decreases. The higher the conductivity  $C_1$ , the broader the peak (ref. fig. 16 for more details).

This peak plays an important role in device operation. The smaller the peak, the faster device operates: once the pressure reaches certain volume the flux begins to flow out. Wider peak worsen switching properties of the device. The width of the peak  $w$  depends on  $C_1$  parameter, therefore it is required to design the device properly.

### Microfabrication technologies

While an important part of MEMS is based on silicon and fabrication techniques similar to those used in microelectronics, the need for low-cost and disposable materials explains why plastic MEMS devices are particularly attractive.

For the further industrial development of microfluidic systems, it is necessary to produce them in an economic way and possibly out of the clean-room.

Two simple fabrications technologies for the realization of microfluidic switch based on Coanda effect (silicon micromachining and powder blasting erosion process) and two different types of buzzer (piezoelectric disc and pneumatic buzzer) will be investigated and designed below.

#### Silicon micromachining

Numerous processes are used in micromachining. Many processing techniques have originated from microelectronics, and most of the early MEMS have been fabricated using silicon-based techniques. However, also a lot of other materials and microfabrication technologies have been investigated and developed.

Historically, silicon has been the most commonly used material in microsystems. A lot of devices are still fabricated in silicon because of its well-known electrical and mechanical properties [9]. This material is also attractive because of the possible integration of MEMS devices on substrates including electronics. Silicon micromachining can be divided into:

- Bulk micromachining
- Surface micromachining

In bulk micromachining the whole thickness of the silicon wafer is structured, while in surface micromachining all the fabrication is done on the surface.

There are several technological processes used in silicon micromachining.

DRIE (Deep Reactive Ion Etching). The etching capabilities of silicon change drastically with the advent of currently available DRIE tools. These deep-siliconetching machines can easily achieve etching rates in excess of  $3 \mu\text{m}/\text{min}$ , selectivity to photomasking materials greater than 70:1 (at least twice as much for silicon dioxide), excellent profile control (fig. 18) and non-uniformities across the wafer of 5% or less.

The high-density plasma tools can use two distinct gas feeding approaches: standard and time multiplexing. In the standard approach, all gas species are flowed at the same time, and the etching results depend on the glow discharge having both one species of radicals present to proceed with the etch, and another species of radicals for protecting the sidewalls during operation.

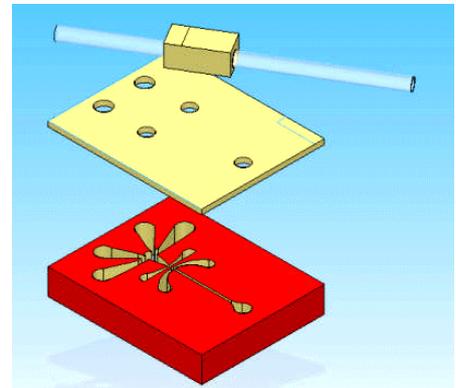


Fig. 17. Main parts of microfluidic switch: the core part (Si wafer, bottom), seal (PDMS or glass) and the buzzer

In the time-multiplexing scheme, the etching and passivating gases use flow independently one at a time and the machine alternates between an etching cycle and a passivating cycle (fig. 19).

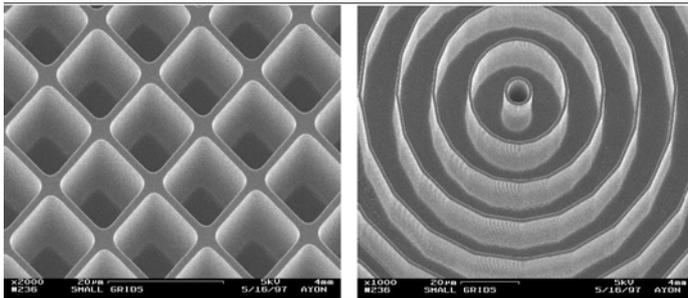


Fig. 18. High-aspect-ratio structures processed with DRIE

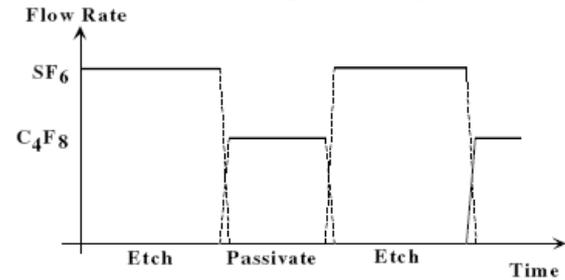


Fig. 19. DRIE technological cycle

During the etch step a shallow trench is formed in the silicon substrate, with an isotropic profile characteristic of fluorine-rich glow discharges. The typical duration of this step is 12 s. During the passivation cycle, a protective fluorocarbon film is deposited on all surfaces. The duration of this step is usually 10 s and shorter than the etching cycle. In the subsequent etch step, ion bombardment promotes the preferential removal of the film from all horizontal surfaces, allowing the profile to evolve in a highly anisotropic fashion.

Lithography. Lithography in MEMS context is typically the transfer of a pattern to a photosensitive material by selective exposure to a radiation source such as light. A photosensitive material is a material that experiences a change in its physical properties when exposed to a radiation source. By means of selective exposition of photosensitive material with radiation the pattern of the radiation on the material is transferred to the material exposed and the properties of the exposed and unexposed regions differ. In lithography for micromachining, the photosensitive material used is typically a photoresist (also called resist, other photosensitive polymers are also used). When resist is exposed to a radiation source of a specific wavelength, the chemical resistance of the resist to developer solution changes.

Bonding. Bonding is used in order to join wafers processed using both bulk and surface micromachining to obtain multi-level complex devices. The most common methods of bonding are *fusion bonding* (Si/Si) and *anodic bonding* (Si/Glass).

During the fusion bonding two silicon wafers with hydrophilic surfaces are pressed together at the room temperature after cleansing. This pre-bonding step is followed by an annealing treatment at 800 °C to achieve a permanent chemical bond.

During the anodic bonding process the bonding of a pyrex (sodium silicate glass) wafer to a Si wafer is achieved by applying a voltage difference of around 500 V between two wafers and heating to 350-500 °C.

#### Processes with plastic

In addition to silicon, alternative materials such as glass (for example, fused silica), ceramics, plastics, silicone rubber (PDMS) become popular, especially thanks to the growth of the importance of microfluidics. Main factors that have motivated these developments are: biocompatibility aspects, use of cheaper materials and/or micromachining processes (avoiding clean-room infrastructure).

Thermoplastic replication. Plastic is the material of choice for the production of high volumes at low cost. The standard processes which are used in the industry are *hot embossing* and *injection moulding*. These production methods have also triggered interest for microreplication. The production of the replication master in that case requires the use of high precision micromachining techniques.

LIGA. LIGA was developed in Germany in the 1980s and became a standard microfabrication process. LIGA is the acronym for “X-ray LIthographie Galvanoformung Abformung” which means X-ray lithography, electrodeposition and moulding. A thick X-ray sensitive resist is exposed and used as a mould for electroplating. The formed metal mould can then be used for injection moulding of plastic parts or to produce plastic moulds. This technique produces high aspect ratio structures.

**SU-8.** SU-8 is a negative, epoxy-type, near-UV photoresist based on EPON SU-8 epoxy resin which was originally developed at IBM. Very high aspect ratio ( $>20$ ) which has been demonstrated with standard contact lithography equipment renders this material as very attractive for MEMS applications. While LIGA yields better results, low-cost applications can benefit from this resist which is well suited for acting as a mould.

**Powder blasting.** Powder blasting is a technology in which a particle jet is directed towards a target for mechanical material removal (fig. 20).

The particles are accelerated towards the target with a high-pressure airflow (fig. 21). The airflow is mixed with the particles by a vibrating feeder (HP-2, Texas Airsonics). The mixture is directed through a circular nozzle (with a diameter of 1.5 mm) at the end of the tube. The particles hit the target with a speed of 80–200 m/s (depending on the air pressure) in a separate box. This box is ventilated by a cyclone, which removes the particles from the airflow. To obtain an homogeneous scan of its surface, the sample is placed on a translation stage. A dust collector recovers the used alumina powder.

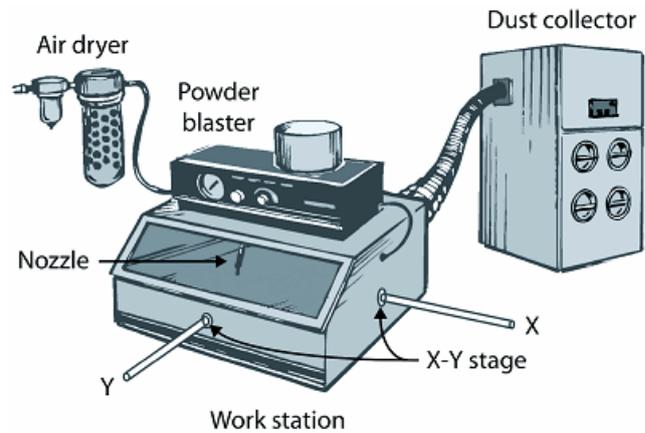


Fig. 20. Typical powder blasting system

The powder blasting machine used in the project is an Airsonics HP-213. The applied pressure can be regulated between 1 and 5 bar. A schematic diagram showing the principle of powder blasting micro-erosion process is given in fig. 21. The different elements are described below.

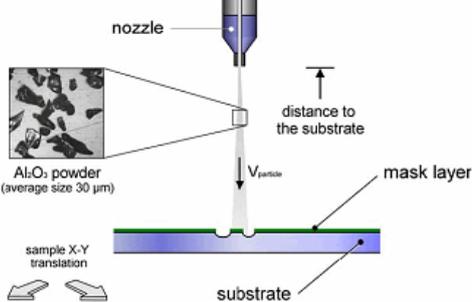


Fig. 21. Schematic diagram showing the principle of powder blasting etching

blasting was also shown as an appropriate micromachining technique for other hard, brittle materials.

**Powder.** The erosion process is due to the impact of accelerated particles on brittle materials which create cracks. Depending on the application different types of abrasive powders with various shapes and hardness can be used. Most common powders are:

- Silicon carbide.  $SiC$ , due to its hardness and high density [9], is the most efficient media used for micro-abrasive blasting.
- Crushed glass. It is a mild abrasive media which is employed when only a slight degree of abrasion is desired.
- Glass beads. The spherical shape of a glass bead keeps it from cutting into the surface of the part. It is typically used for performing light deburring or applying satin-like finish on a work piece.
- Aluminium oxide. Is the most commonly used cutting abrasive because of the sharp shape of the particles and good hardness. During experiments carried out in the project aluminium oxide ( $Al_2O_3$  or alumina) powders were used as abrasive powders. The sharp alumina particles employed have a mean size of 30  $\mu m$ . They are ejected from the nozzle at high velocities (particle velocity:  $V_{particle} = 100 \div 300$  m/s).

## Technological processes of microfluidic switch fabrication

### Process with silicon

The fabrication of microfluidic switch was performed using a Surface Technology Systems multiplex ICP. Vacuum pumping of the etching chamber was done with Balzers TMH1000C turbo pump, with a pumping speed of 880 l/s. The equipment includes two independent 13.56 MHz RF power sources: a 1000 W supply for the single-turn coil around the etching chamber to create the plasma, and a 300 W supply connected to the wafer electrode to vary the RF bias potential of the wafer with respect to the plasma. The efficient inductive power coupling of the coil to the plasma allows high-density plasmas to be maintained.

The system has a single feed for the etching and passivating gases located on top of the etching chamber, and backside helium pressurization is used to provide good heat transfer between the wafer and the electrode to maintain a constant and sufficiently low wafer temperature, which is around 40 °C. To avoid helium leaks during etching, the samples are pressed by a set of eight alumina fingers against an elastomer located on the powered electrode. In the standard mode of operation the position of the throttle or automatic pressure control (APC) valve is fixed and the pressure is determined by the respective gas flow rate.

The samples were prepared in the following fashion: 4 single-crystal silicon wafers (100), n-type with resistivity between 6 and 20  $\Omega\cdot\text{cm}$ , were coated with photoresist AZ4620 spun at 3000 rpm (thickness  $\approx 6 \mu\text{m}$ ) and baked in a convection oven at 90 °C for 30 min. Then the samples were exposed, developed and baked again at 90 °C for 30 min.

After that anodic bonding was used in order to stick a second wafer to close the channel. The use of two wafers instead of three avoids problems with alignment.

### Process with plastic

The use of powder blasting of plastic and PMMA for the fabrication of chips in PMMA (polymethylmethacrylate) and in borosilicate glass was investigated. The erosion processes for both materials are similar, except that PMMA is a more ductile material than glass, which involves a longer micropatterning time (smaller “erosion efficiency”). During the first step of the process, a metallic mask was realized by Nd:YAG laser micromachining. Then the mask was applied in contact with the PMMA and fixed on the surface of the substrate with an Apiezon wax seal, to avoid mask detachment or glass substrate in order to be patterned.

For the fabrication of microfluidic switch it is possible to take advantage of the high deformation capabilities of the PDMS elastomer material. This material has been found to be interesting for many lab-on-a-chip applications. The last steps in the assembly are:

- Glass / PDMS bonding. The PDMS membrane was plasma-bonded on the glass in order to close the device. The surface of the glass substrate was first treated with an air plasma for 60 s at 0.4 mbar and 20 mA. The PDMS membrane was subjected to the same plasma treatment, but for only 10 s. After a thermal annealing at 100 °C, a hermetic and irreversible bonding between the glass and the PDMS was obtained. In order to avoid effect of porosity a layer of metal between the device and the PDMS membrane must be grown.
- Gluing the fluidic connections. For fluidic connections to the chip surface, cylindrical glass connectors were polished and glued with an Epo-Tek epoxy solution 18 at 80 °C for 2 hours.

A solution of triethylene glycol dimethacrylate (Fluka Chemie, product number 90412) is spread on the surfaces for binding of the PMMA. Hereafter, the different layers are stacked, the alignment being ensured by guiding pins. The bonding is realized in a hot press at 70 °C under the application of a small pressure. The assembly process takes only 5 minutes for each stack of layers.

### Realization of the buzzer

In order to achieve the Coanda effect, it is required to use a buzzer, which will give the monitoring pressure. To build it two different type of buzzer were designed:

- A PZT disc (piezoelectric buzzer)
- A PDMS membrane coated with Ti (pneumatic buzzer).

#### Piezoelectric buzzer

The piezoelectric disc is used as an actuator. To provide a pressure variation in the buzzer chamber, it is required to be able to achieve a deflection of such a membrane. This will be done applying a forward or negative bias to the membrane nodes. Depending on the substrate thickness and properties, the PZT thickness which is used will change. Unfortunately, to obtain a sufficient deflection with this kind of technology, a quite thick film must be deposited according to the device dimensions. Typically, a piezoelectric material such as lead zirconate titanate PZT can provide a maximum strain ( $d$ ) of 0.001.

Moreover, all the systems found were a few millimeters large, which do not fit with the device scale. A good way to realize this actuator with PZT was not found during experiments carried out during the project. Therefore, the attention was focused on another system: pneumatic buzzer.

#### Pneumatic buzzer

The control of the membrane deflection is not achieved applying a voltage but controlling a gas flow in a tube.

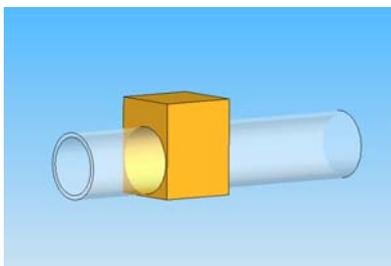


Fig. 23. Pneumatic buzzer

The working principle of this device is the following: the flow in the tube creates a deformation of the tube itself and consequently deflects the lower part of the membrane. This membrane is glued on the top of the control channel with an oxygen ion beam treatment and acts as an actuator. The disadvantage is that it is possible only to create an overpressure in the channel. It means that this will require two PDMS membranes: one on the left side of the switch and the other one on the right side. Moreover, despite the interesting properties of PDMS, this material is porous and can let flow outside the gas contained in the switch. In order to avoid this problem sealing the device with the use of *Ti* layer deposition was performed. The layer must be thick enough to seal and thin enough to deflect. A 100 or 200 Å layer should be sufficient.

The manufacturing process of this part is quite simple. Indeed, by means of heating the PDMS it is possible to make it more or less liquid (like rubber). Then by means of depositing it on a specific pattern it is possible to give it the desired shape. The control tube is a 130  $\mu\text{m}$  diameter capillary. This dimension fits well with the feasible capillaries and with the dimension of the device aperture on the sealing part.

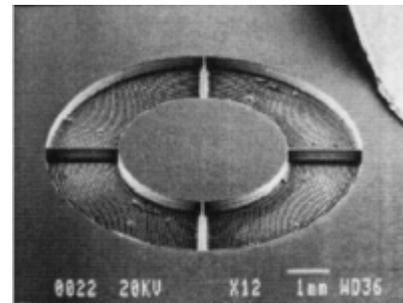


Fig. 22. SEM view showing possible membrane obtained with PZT. Problem with dimensions

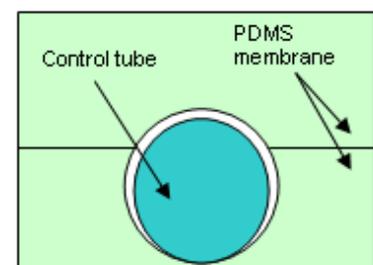


Fig. 24. Cross section of the pneumatic buzzer

### **Conclusion**

The approaches and techniques investigated in the project will allow simulating and designing of so-called microfluidic platforms [2]. Very similar to the ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) industry in microelectronics, a dedicated microfluidic platform will contain a reduced set of validated elements to perform the basic fluidic operations within a given application area. Such

basic fluidic operations are fluid transport, fluid mixing, valving and separation or concentration techniques.

The user of such a platform will be able to easily combine the basic elements for different fluidic operations within a given platform in order to implement specific devices. All elements of a given microfluidic platform will be easily fabricated within a well defined technology.

When the microfluidic platforms are available, this will easily allow to build application specific, integrated microfluidic systems.

The markets and applications incorporating microfluidic and MEMS devices are very extensive. MEMS can be found in systems ranging across automotive, medical, electronic, communication and defense applications. Current MEMS devices include accelerometers for airbag sensors, inkjet printer heads, computer disk drive read/write heads, projection display chips, blood pressure sensors, optical switches, microvalves, fluid switches and mixer, flow meters, biosensors and many other products that are all manufactured and shipped in high commercial volumes.

### References

1. Jens Ducreé, Roland Zengerle. FlowMap – Microfluidics Roadmap for the Life Sciences. IMTEK, CBC, HSG-IMIT and Yole Développement, 2005.
2. Roland Zengerle. Microfluidics 2: “Microfluidic Platforms”. HSG-IMIT, 2006.
3. David Erickson, Dongqing Li. Integrated microfluidic devices. *Analytica Chimica Acta* 507 (2004), pp. 11-26.
4. F.C.M. van de Pol, H.T.G. van Lintel, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman. A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques. *Sensors and Actuators A21 to 23* (1990), pp. 198-202.
5. H.T.G. van Lintel, F.C.M. van de Pol, S. Bouwstra. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon. *Sensors and Actuators A* 15 (1998), pp. 153-167.
6. Harrie A. C. Tilmans. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumped-parameter systems. *J. Micromech. Microeng.* 6 (1996), pp. 157–176.
7. Sebastian Böhm, Wouter Olthius, Piet Bergveld. A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials. *Sensors and Actuator* 77 (1999), pp. 223-228.
8. Stephen D. Senturia. *Microsystem Design*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
9. Kurt E. Petersen. Silicon as a Mechanical Material. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, No 5, May 1982, pp. 420-457.

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОММУТАЦИОННО-ПРЕОБРАЗУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МИКРОМОДУЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

**Лейбова М. А.**

*Научный руководитель: д. т. н., проф. каф. ИУ4 Школьников В. М.*

МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия.

## THE INVESTIGATION AND THE CHOICE OF THE MULTILEVEL SWITCH-AND-TRANSFORM MULTICHIP MICROMODULES DEVICE'S CREATING TECHNOLOGY FOR AN IC DEVICE.

**Leybova M. A.**

*The scientific chief: doctor, professor of department ICS4 Shkolnikov V. M.*

MSTU, ICS4, Moscow, Russia

### **Аннотация**

Работа посвящена исследованию технологии создания многоуровневых коммутационно-преобразующих устройств многокристальных микромодулей. Рассмотрены основные конструктивно-технологические варианты прецизионных плат МКМ, разработана технология изготовления платы многокристального модуля на основе полиимида.

### **Abstract**

This paper is devoted to the research of multichip micromodules' multilevel switch-and-transform devices creating technology. Main constructional and technological versions of precision multichip micromodule boards are considered, the technology of creating multichip module board on the basis of polyimide is developed.

### **Введение**

Многоуровневые коммутационно-преобразующие устройства многокристальных модулей (в дальнейшем МКМ) могут применяться в качестве комплектующих изделий и основ для построения узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры. МКМ представляет собой две или более (до 400) монолитные интегральные схемы любой степени интеграции, помещенные на многослойной подложке в общий корпус и соединенные между собой с помощью одно- или многоуровневой разводки.

Выбор оптимального направления создания многоуровневых коммутационно-преобразующих устройств МКМ - перспективных высокоинтегрированных электронных средств большой функциональной сложности и высокой надежности – это основная задача разработчиков.

### **Назначение и основные технические характеристики**

Основная тенденция в развитии РЭА – это дальнейшая миниатюризация, при одновременном увеличении функциональной сложности, быстродействия, помехозащищенности, надежности и снижении стоимости, массогабаритных и мощностных характеристик.

Достижения субмикронной технологии обеспечивают получение СБИС с размерами топологических элементов менее 0,1 мкм и количеством выводов 400 и более при тактовых частотах на кристаллах более 1 ГГц и рассеиваемой мощности 30-50 Вт. Но доминирующей технологией монтажа остается монтаж корпусной элементной базы на печатные платы, что принципиально снижает достижения субмикронной технологии. Применение микрокорпусов в сочетании с техникой поверхностного монтажа позволяет частично решить проблему дезинтеграции при монтаже. При этом необходимо отметить, что по мере увеличения

быстродействия СБИС и числа их выводов, ужесточения требований к массогабаритным показателям и эксплуатационной надежности, снижения уровня допустимых помех при одновременном уменьшении стоимости аппаратуры, актуальным становится вопрос о необходимости разработки новых технологических средств монтажа.

Решением проблемы применения многовыводных СБИС является создание прецизионных плат с высокой разрешающей способностью монтажной зоны, приближенной к разрешающей способности коммутации кристаллов СБИС и создание крупноформатных плат-носителей для многокристального монтажа. Одним из таких перспективных вариантов реализации изделий РЭА в микроминиатюрном исполнении на основе многовыводных СБИС является использование многокристальных микромодулей, которые претендуют стать в обозримом будущем наиболее совершенной формой изготовления комплектующих изделий и основой для построения узлов и блоков РЭА. Перспективным представляется монтаж МКМ с использованием бескорпусной элементной базы. Кристаллы СБИС не заключаются в отдельные микрокорпуса, а монтируются на плату в максимальном приближении друг к другу. Технология МКМ объединяет в себе широкий спектр методов сборки монолитных ИС, начиная от традиционной в виде ГИС и кончая модулями, почти полностью изготавливаемыми из кремния. Функциональные устройства на базе МКМ занимают в 6 раз меньшие объемы в РЭА, чем аналогичные устройства в корпусах с вертикальным размещением выводов (типа DIP), а по стоимости они в 3 раза дешевле. Плотность упаковки элементов в РЭА с использованием МКМ в 10-15 раз выше, чем в блоках на базе печатных плат, а благодаря уменьшению длины проводников в МКМ значительно снижены значения паразитных емкостей и индуктивностей.

Максимальной экономической эффективности от применения МКМ достигают при массовом производстве: основные затраты при создании МКМ идут на разработку схем разводки, изготовление подложки, испытания и монтаж негерметизированных ИС, окончательную сборку, а также на внутреннее соединение элементов.

Для монтажа кристаллов в одно- и многокристальные модули с большим количеством выводов, расположенных матрично по площади кристалла, и с высокой степенью плотности на плате возможно использование коммутационных структур на базе многослойных плат с использованием тонких слоев полиимида, выполненных по тонкопленочной технологии, совместимой с технологией полупроводниковых ИС. Определены следующие тенденции развития тонкопленочных плат МКМ с использованием полиимидов: снижение паразитных емкостей достигается за счет уменьшения относительной диэлектрической проницаемости межслойной изоляции, обеспечение планаризации структуры осуществляют методом химико-механического полирования поверхности, уменьшения числа операций техпроцесса за счет использования фоточувствительных полиимидов, а повышение надежности плат МКМ за счет улучшенной адгезии между слоями.

Повышение степени интеграции полупроводниковых ИС связано с увеличением плотности коммутации и использованием многоуровневой разводки с межслойной изоляцией диэлектрическими, в т.ч. полиимидными пленками. Повышение плотности компоновки конструкций, позволяющих монтировать СБИС, связано с развитием многокристальных модулей.

### **Конструктивно-технологические варианты прецизионных плат МКМ**

По расположению кристаллов различают МКМ с планарным (одноуровневым) размещением кристаллов, с установкой кристаллов на ребро, с кристаллами в нескольких уровнях (трехмерные модули). По количеству кристаллов подразделяют МКМ малой (от 2-4 до 20-30 ИС), средней (от 30-50 до 100 ИС) и большой (свыше 100 ИС) сложности, а по способу формирования проводников - МКМ с толстопленочными, тонкопленочными проводниками и со смешанным типом используемых проводников. Для изготовления МКМ большой сложности используются конструкции 4 типов модулей (L, C, D и Si):

- МКМ-L - с подложкой, представляющей собой многослойную печатную плату;
- МКМ-C - с подложкой, изготовленной на основе многослойной керамики;
- МКМ-D - с многослойной тонкопленочной структурой, сформированной на керамической или эмалированной металлической подложке;
- МКМ-Si - с многослойной тонкопленочной структурой на пластине кремния. В МКМ Si-типа, подложку с многослойной металлизацией монтируют на основание корпуса.

Основным элементом современных МКМ является многослойная подложка, которая в основном служит основанием корпуса. В качестве подложек МКМ чаще всего используют кремний, керамику, анодированный алюминий. Наиболее перспективным материалом таких подложек считают нитрид алюминия, поскольку керамика из нитрида алюминия отличается от других керамических материалов уникальным сочетанием физико-химических свойств (высокие теплопроводность, химическая и механическая прочность, термостойкость и электросопротивление).

Для подложек МКМ L-типа используют эпоксидные композиции, полиимиды, армированные кварцем, стеклом, кевларом, пустотелыми стеклосферами. В тонкопленочных структурах в качестве межслойного диэлектрика используют диоксид кремния, а в качестве металлизации - алюминий, однако количество слоев в таких структурах ограничено из-за внутренних напряжений в слоях и сложности обеспечения планарности их поверхности. Другим вариантом изготовления тонкопленочных многослойных структур являются структуры с термостойким полимерным диэлектриком с металлизацию на основе Cu/Cr или Cu/Ti на подложке из керамики, кремния.

В технике МКМ весьма актуальна проблема теплоотвода, поскольку требуется отводить тепло от конструкций со все большей степенью интеграции для обеспечения их работоспособности. Для решения этой задачи используют материалы подложек с высокой теплопроводностью (прежде всего металлические, например, анодированный алюминий) или применяют системы принудительного охлаждения, чаще всего жидкостного (например, встроенные теплоотводы, или радиаторы, контактирующие непосредственно с кристаллами).

Для повышения степени интеграции используют трехмерные МКМ, в которых кристаллы ИС расположены либо стопкой друг под другом, либо на отдельных подложках, которые собираются в этажерочную конструкцию, герметизированную в общем корпусе.

В зависимости от назначения для реализации МКМ используют несколько типов конструктивно-технологических вариантов:

1. Многослойные печатные платы, выполняемые на основе слоев по субтрактивной, аддитивной или полуаддитивной технологиям, толстопленочная многослойная разводка на керамике (в России три типа: многослойные платы на обожженной керамической подложке, многослойные платы с использованием сырой керамики, многослойные стеклокерамические платы на металлической подложке);
2. Тонкопленочная многослойная разводка;
3. Многослойные металлодиэлектрические платы: металлические платы с анодным окислом, стальные эмалированные платы и металлические платы с полимерной изоляцией;
4. МКМ на основе алмазных подложек;
5. Платы полимерной технологии (пленарные и профильно-рельефные конструкции);
6. МКМ на основе многоуровневой разводки на гибких полимерных основаниях.

С помощью МКМ можно резко увеличить скорость передачи сигналов между навесными элементами и тактовую частоту вычислительных устройств. Типичным примером МКМ служит разработка фирмы Digital Equipment, которая является эквивалентом четырех крупногабаритных печатных плат. Повышение степени монтажа достигнуто за счет формирования коммутации тонкопленочной технологией: в структуре подложки 9 слоев, в том числе 6 проводящих, медь нанесена осаждением в вакууме, ширина проводников -18

мкм, расстояние между ними - 50 мкм. Всего подложка позволяет монтировать до 72 БИС с помощью полиимидных носителей.

Таким образом, повышение степени интеграции полупроводниковых ИС связано с увеличением плотности коммутации и использованием многоуровневой разводки с межслойной изоляцией диэлектрическими, в т.ч. полиимидными пленками. Повышение плотности компоновки конструкций, позволяющих монтировать СБИС, связано с развитием многокристальных модулей.

Оптимальным решением монтажа МКМ, позволяющим рассчитывать на значительное уменьшение массы и габаритов, повышение функциональной сложности и эксплуатационной надежности МКМ, в последние годы явилось конструктивно-технологическое направление монтажа с применением полиимидных пленок. К достоинствам носителя на полиимидной основе относятся такие характеристики как высокая термостойкость, стабильность электрофизических и термомеханических характеристик в эксплуатации, высокая механическая прочность на разрыв, растяжение и излом в диапазоне толщин от 7 до 100 мкм, стойкость к химическим воздействиям в процессе технологической обработки. Такой носитель обеспечивает автоматизацию процессов монтажа кристаллов с большим количеством контактных площадок, поскольку токоведущие дорожки на поверхности носителя могут быть изготовлены с высокой точностью и расположены с высокой плотностью при малом строго фиксированном зазоре между ними.

Известны три основные технологии монтажа кристалла: групповая пайка методом перевернутого кристалла, проволочный микромонтаж и монтаж кристаллов на гибком носителе.

### **Разработка технологии изготовления платы многокристального модуля**

Технология изготовления платы многокристального модуля заключается в многократном нанесении и формировании топологического рисунка в последовательно сформированных слоях материала проводников (ванадий-алюминий, 4 слоя) и межслойного диэлектрика (полиимид, 4 слоя). Процесс формирования структур начинается с операции подготовки поверхности кремниевых подложек со слоем диоксида кремния (осуществляется стандартная отмывка в аммиачно-перекисном растворе с последующей промывкой деионизованной водой и сушкой пластин сжатым воздухом).

Далее на поверхность пластин наносят нитрид кремния толщиной около 2000 Å. Нанесение осуществляется осаждением из плазмы смеси моносилана с азотом в условиях электронно-циклотронного резонанса. Нитрид кремния служит в качестве защитного диэлектрического слоя, предотвращая взаимодействия материала первого слоя металлизации с полупроводниковым материалов подложки - Si, т.к. в окисле кремния часто встречаются дефекты.

Слой проводников представляет собой сформированный методом фотолитографии топологический рельеф в напыленном термовакуумным методом покрытия ванадия и алюминия. Суммарная толщина металлизации ~ 1 мкм.

В качестве межслойного диэлектрика используют термостойкий полимер - полиимид. Применение полиимидов в качестве межслойного диэлектрика обусловлено их более высокой в сравнении с другими аналогичными материалами термостойкостью и технологичностью, а также легкостью плазменной и химической модификации, поверхностного и объемного плазменного травления. Для получения рельефа в проводниковом материале используют процесс контактной фотолитографии с использованием позитивного фоторезиста. Травление системы «ванадий-алюминий» осуществляется жидкостным методом с помощью травителей специально подобранного состава.

Процесс формирования топологического рельефа в диэлектрических слоях осуществляется анизотропным плазмохимическим травлением через сформированную на

поверхности полиимида ванадиевую маску. Ванадиевая маска изготавливается с помощью фотолитографии и жидкостного травления, напыление ванадия толщиной порядка 0,2 мкм осуществляется термовакуумным методом.

Анизотропный профиль травления контактных отверстий в полиимидном слое также необходим для получения надежного контакта и предотвращения возможного утонения контактного материала проводников. Профиль отверстия для нанесения контактного материала в полиимидном слое должен выполняться с положительным клином травления. После плазмохимического травления полиимида вспомогательную маску ванадия удаляют в разбавленном растворе перекиси водорода.

### **Заключение**

Повышение степени интеграции полупроводниковых ИС связано с увеличением плотности коммутации и использованием многоуровневой разводки с межслойной изоляцией диэлектрическими, в том числе полиимидными пленками. Повышение плотности компоновки конструкций, позволяющих монтировать СБИС, связано с развитием многокристальных модулей. Многослойные подложки МКМ имеют минимальную ширину линии — 18 мкм при расстоянии 50 мкм. Дальнейшее увеличение числа слоев до 30 и уменьшение толщины полиимида до 6-8 мкм позволит монтировать СБИС с числом выводов до 300.

### **Литература**

- 1 Philip E. Garrou, Iwona Turlik. Multichip Module Technology Handbook. McGraw-Hill, 1998. 688 p
2. Школьников В. М., Фомичев А. Е., Жукова С. А., Жуков А. А. Тестовая плата многокристальных микромодулей СБИС в системах авионики // Нано- и микросхемная технология. 2006. №3
3. Грушевский А.М. Сборка и монтаж многокристальных микромодулей. Под ред. Л.А., Коледова. -М.: МИЭТ, 2003. -195 с: ил.
4. Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Жукова С. А., Четверов Ю. С., Шаповал С. Ю. Прикладная физика. 2004. №1

## МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ.

**Родионов И.А.**

*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макаrchuk В.В.*

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## THE TECHNIQUES OF OPTICAL PROXIMITY CORRECTION (OPC).

**Rodionov I.A.**

*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.*

Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

e-mail: [ilro@bk.ru](mailto:ilro@bk.ru)

### **Аннотация**

В работе рассмотрены методы и типы фигур коррекции оптического эффекта близости. Проведено моделирование процесса фотолитографии с использованием рассмотренных фигур. Результаты моделирования подтверждены экспериментом.

### **Abstract**

The different methods and types of optical proximity correction figures were considered in this work. The modeling of lithography process with OPC figures was carried out. The result of modeling was confirmed by experiment.

### **Введение**

Процесс проектирования и дальнейшего производства современной интегральной полупроводниковой микросхемы включает в себя тысячи итераций. Условно его можно разделить на две крупные части – это разработка и проектирование, и технология производства. Сегодня обе эти части неразрывно связаны – именно технология определяет и ставит перед разработчиком внушительный ряд требований и ограничений. Проектирование ведется по модульному принципу – группой разработчиков проектируются сначала простейшие логические элементы (XOR, OR, AND, NAND и т.п.), далее, используя эти субблоки, создаются логические элементы более высокого уровня (AND8X3, NA5X3, MU8X4 и т.п.), полученные группы элементов объединяются в библиотеки. Используется, так называемое, «сквозное» проектирование, когда каждая ячейка представляет собой не только топологию (технологическая модель), но и соотнесена с логической и электрической моделями.

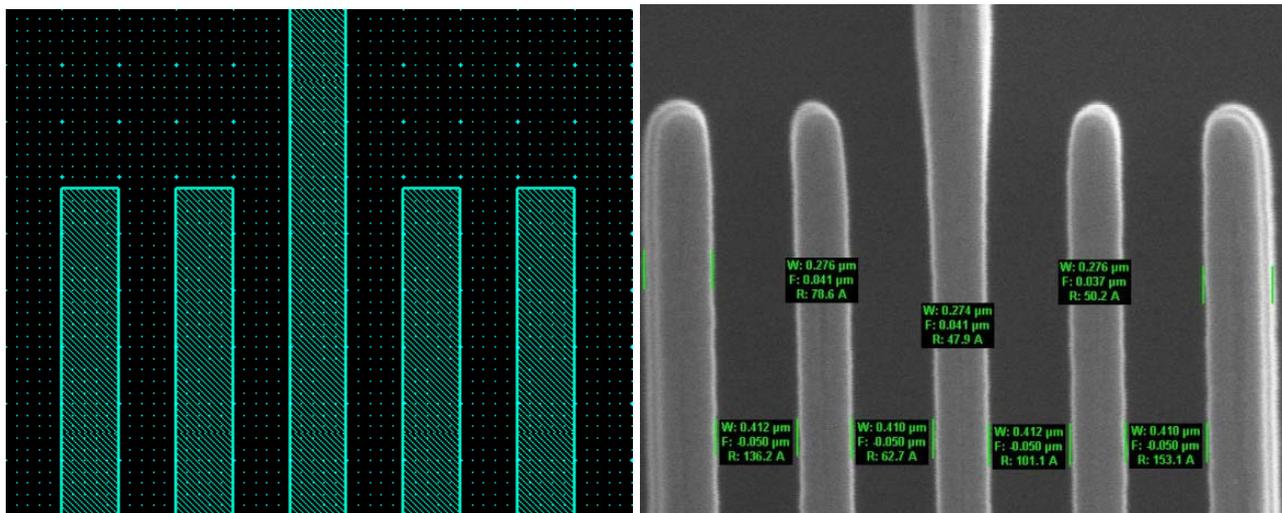
Каждая библиотека разрабатывается под конкретную технологию. Разработка подобной библиотеки возможна только при участии как разработчиков, так и технологов. Разработчики определяют логику работы, архитектуру будущей микросхемы, задают электрические параметры, а технологи помимо решения своих задач, принимают непосредственное участие в проектировании топологии. Совместно разрабатывают правила проектирования, в которых описываются возможности технологии по воспроизведению различных топологических конструкций в условиях различных технологических слоев.

После преодоления барьера в 1 мкм, стало необходимым учитывать оптические эффекты, возникающие в условиях субмикронных размеров, когда длина волны экспонирующего излучения становится сопоставима с размерами элементов на пластине. Технологические уходы в этом случае достигают десятков процентов от номинального размера. Существует два принципиально различных способа, позволяющих скорректировать эти уходы:

1. подбор технологических режимов;
2. введение коррекций на этапе проектирования микросхем.

Первый способ дает положительные результаты и, проведя анализ технологических уходов на этапах получения скрытого изображения в толще резиста, проявления (получения

изображения на фоторезистивной маске (ФРМ)) и травления (получения структур на пластине), можно сделать вывод о требуемом номинальном размере на фотошаблоне (ФШ) для получения заданных размеров на пластине. Но, при работе с субмикронными размерами, становится явным отличие в проработке одиночных и плотноупакованных структур (рис. 1).



1а. При проектировании, на ФШ

1б. После фотолитографии, на ФРМ

Рис. 1. Проработка фигуры контроля линейных размеров (КЛР)

На фотографиях отчетливо видны эти различия (при проектировании и на фотошаблоне все пять проводников имеют одинаковые номинальные размеры). Центральный проводник, отвечающий параметрам одиночной структуры, имеет больший размер и угол наклона боковой стенки профиля резиста, боковые проводники также утолщены со «свободной» стороны. Поэтому для одиночных и плотноупакованных структур необходимы различные режимы технологической обработки. Таким образом, необходимо либо обеспечить равномерную плотность структур по всему кристаллу микросхемы, либо произвести «тонкий» (очень точный) подбор технологических режимов. Обеспечить равномерную плотность структур при проектировании кристалла микросхемы невозможно на практике. Подобрать технологические режимы – возможно и данный метод используется в частных случаях, но это экономически не выгодно и требует больших временных затрат, что также недопустимо в условиях современного рынка.

Второй способ - введение коррекций на этапе проектирования микросхем является основным и используется всеми мировыми производителями полупроводниковой индустрии. Введение коррекций на этапе проектирования позволяет:

- обеспечить заданные параметры получаемых на пластине структур;
- повысить стабильность технологического процесса (ТП);
- повысить процент выгода годных кристаллов на пластине;
- исключить из производственного цикла стадию отработки ТП под конкретный тип изделия;

Введение коррекций также может осуществляться различными подходами: изменением библиотечных элементов, в этом случае библиотека элементов разрабатывается фабрикой-производителем (ФАВ-ом) и поставляется разработчикам микросхем. Вторым вариантом введения коррекций является использование специализированных САПР, которые позволяют обрабатывать топологию кристалла микросхемы целиком, изменяя ее в соответствии с требованиями технологии ФАВ-а.

## Методы коррекции оптических эффектов близости

В условиях стремительно изменяющегося рынка и появления инновационных методов в производстве КМОП СБИС, которые разрабатываются под современную планарную технологию, чтобы сохранять лидирующие позиции в индустрии, ФАВ должен обладать автоматизированной масштабируемой модульной системой проектирования, интегрированной в процесс производства. Такая система должна позволять легко и в сжатые сроки доводить инновационные идеи непосредственно до процесса производства, исключая долгосрочные этапы тестирования. Такой подход к процессу производства КМОП СБИС невозможен без использования моделирования ТП с использованием передовых САД и ТСАД. В данной работе мы попытались использовать описанный выше подход постановки эксперимента: на первом этапе было проведено моделирование и подбор типоразмеров фигур коррекции, по результатам моделирования был выбран диапазон и тип фигур коррекции, и на завершающем этапе результаты моделирования были подтверждены экспериментом.

Фигуры коррекции призваны исключить разницу в проработке на пластине элементов различной плотности, а также компенсировать эффект укорочения поликремниевых затворов в активной области транзистора, что может привести к эффекту укорочения канала, всевозможным утечкам, изменению электрических параметров транзисторов и т.п. В первом приближении выделяют три вида фигур коррекции:

1. изменение номинального размера на ФШ на величины, определяемую технологическим уходом на операциях фотолитографии и травления (Bias, рис. 2а);
2. введение дополнительных линий (assist line или auxiliary, рис. 2б);
3. введение дополнительных фигур типа serif, anti serif, barrel, hammerhead (рис. 2в-2е).

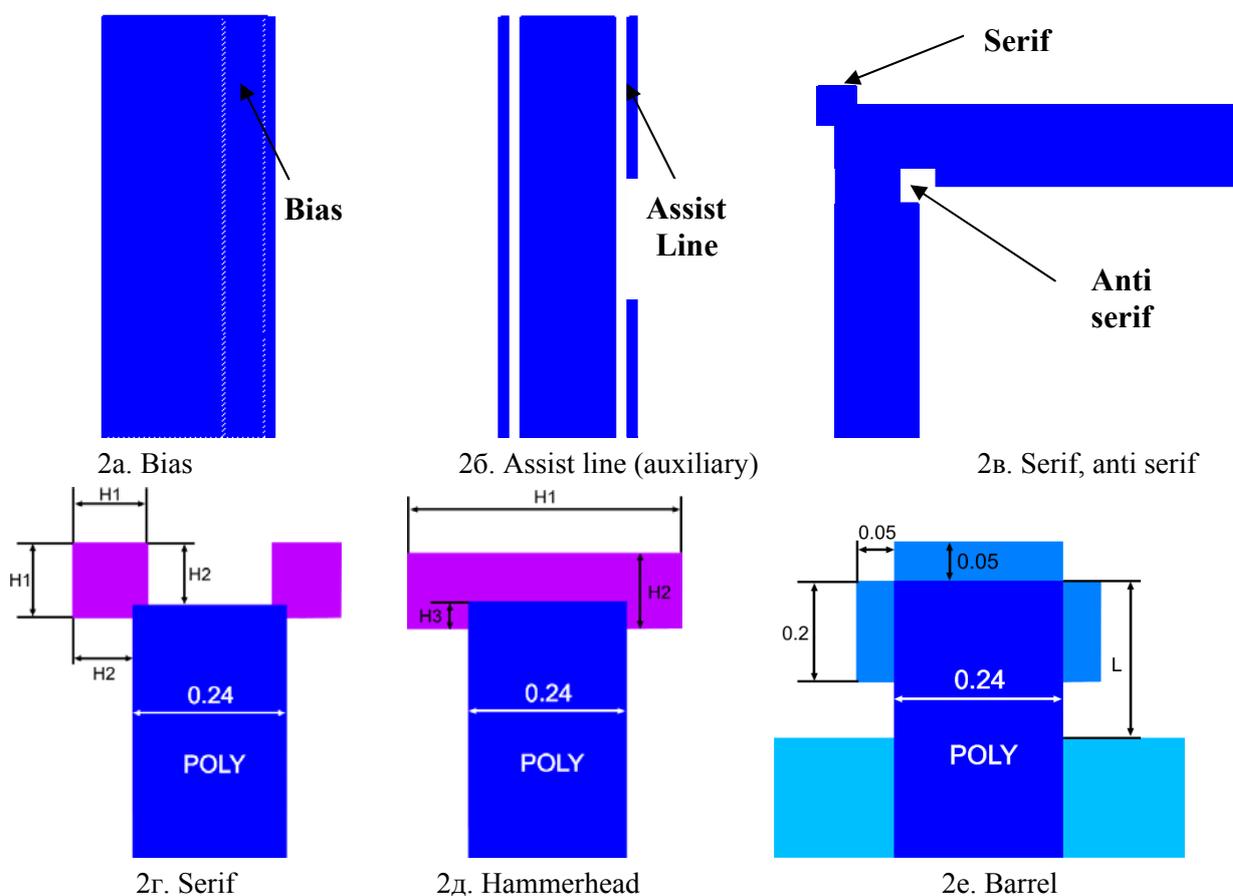
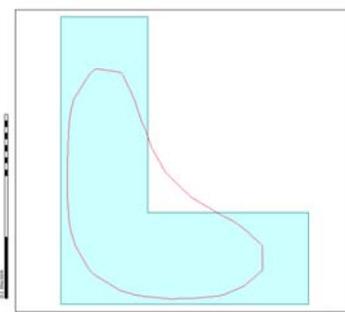


Рис. 2. Фигуры коррекции оптического эффекта близости

Рассмотрим принципы действия всех вышеперечисленных фигур коррекции. Bias – анализ уходов размеров проводников (как одиночных, так и в массиве) в процессе производства позволяет сделать вывод о том, каким должен быть номинальный размер проводника на ФШ, чтобы на пластине получился заданный по ТЗ номинальный размер.

Assist line – дополнительные линии вводятся, чтобы создавался эффект плотно упакованных структур для одиночного проводника. Различия в проработке одиночных и плотно упакованных проводников возникает в результате дифракции лучей света на соседних проводниках, в результате этого плотно упакованные структуры засвечиваются большей дозой. Дополнительные линии имеют размер 1/2 - 1/3 от проектной нормы. За счет этого эти линии не прорабатываются на пластине, но дифракция лучей света на них все же происходит, в результате на пластине получается одиночный проводник, имеющих размерные характеристики, как и плотно упакованного.

Serif – как известно проводники, расположенные под прямым углом, не прорабатываются на пластине, присутствует эффект округления. Как показано на рисунке справа L-образная фигура искажается: помимо скругления углов, также происходит укорачивание проводников со стороны «открытого» конца. Чтобы избежать этого эффекта проектировщиками вводятся фигуры коррекции типа serif, anti serif, barel, hammerhead, jogs и т.п.



В рамках разработки технологического процесса 0.25 мкм был выполнен ряд работ по разработке новых технологических процессов фотолитографии. Главной особенностью данных процессов является непосредственная близость паспортных возможностей используемого оборудования к целевым параметрам структур, получаемых в критичных слоях. В качестве фоторезиста высокого разрешения было выбрано семейство фоторезистов Ultra-i 123 компании Rohm&Haas. Для компенсации оптического эффекта близости было проведено моделирование процесса фотолитографии. На рисунке 3 показан пример полученных результатов по итогам моделирования одиночных шин с примыканием встык.

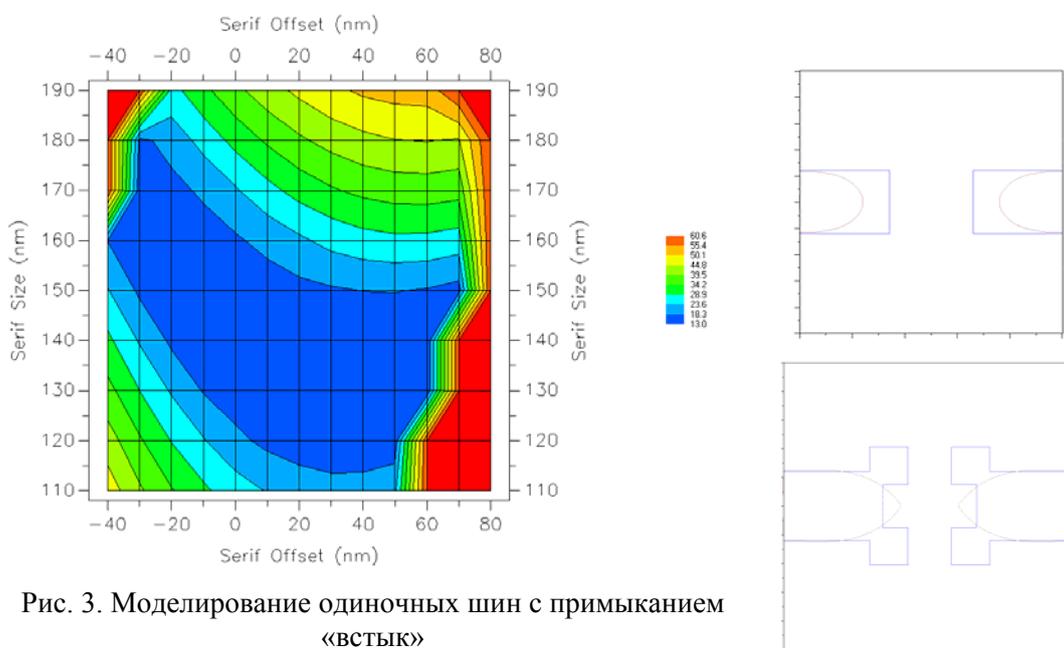


Рис. 3. Моделирование одиночных шин с примыканием «встык»

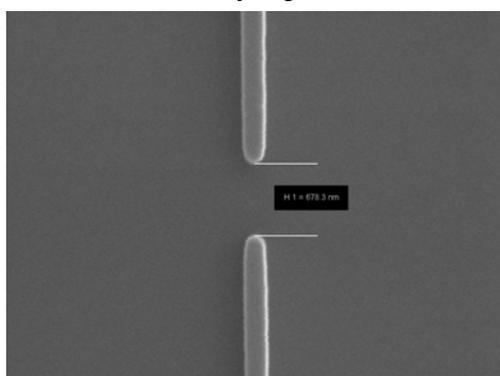
Моделирование элементов коррекции типа «serif» для одиночных шин с примыканием «встык» для шин номинальным размером 0.24 мкм показало, что оптимальный размер Serif size=130нм, Serif offset=20нм (см. рис. 2г, Serif size = H1, Serif offset = H2-(H1×0,5)).

Оценка эффективности применяемых методов коррекции – еще одна большая математическая задача, так как невозможно каким-либо образом провести сравнение

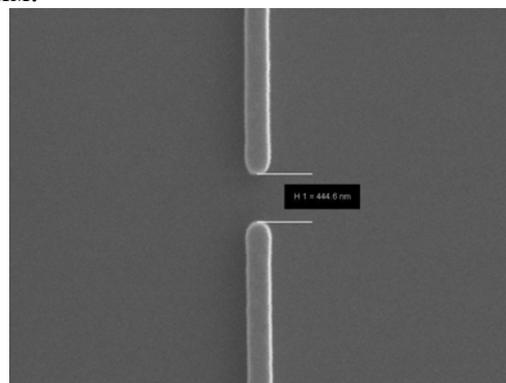
запроектированных структур со структурами, полученными на пластине. Возможными методами оценки эффективности могут служить:

- оптические методы сравнения;
- математический анализ полученных структур, например, в случае анализа L-образного проводника за образ шины можно принять исходящие проводники на расстоянии 2-3 $\lambda$  от угла. Тогда проведя по ним прямые, получим на их пересечении образ L-образного проводника. Тогда минимум разности площади образа и площади полученной структуры, которую можно посчитать, взяв интеграл, и даст наиболее эффективный результат.

Критерии оценки эффективности введения фигур коррекции оптического эффекта близости будут рассмотрены в следующих статьях. Критерием качества проработки топологии для данного типа шин было выбрано укорочение шин. При заданном на шаблоне расстоянии между расположенными встык одиночными проводниками равном 0.36 мкм, укорочение шин без элементов коррекции составило 160 нм (рис. 4а). Для шин с элементами коррекции типа «serif» укорочение составило 42 нм.



4а. Без элементов коррекции



4б. С элементами коррекции типа serif

Рис. 4. Полученные на пластине одиночные шины с примыканием «встык»

В результате эксперимента были получены, в первом приближении:

- сведения о типах и типоразмерах фигур коррекции оптического эффекта близости для одиночных и плотно упакованных структур
- проведено моделирование ТП фотолитографии для различных типичных видов топологии
- выбраны параметры фигур коррекции
- сформированы критерии оценки эффективности введения фигур коррекции.

На основании проведенных исследований был спроектирован фотшаблон отработки режимов фотолитографии и дальнейшего изучения влияния эффектов оптической близости.

## Литература

1. Pierre Sixt, Optical Proximity Correction (OPC): Technology Review, Volume 1, Issue 7, 2003.
2. J.P. Stirniman, M.L. Rieger, Fast proximity correction with zone sampling, Proc. SPIE Microlithography, 2197, 294-301 (1994)
3. W. Maurer, T. Waas, H. Eisenmann, Evaluation of a fast and flexible OPC package: OPTISSIMO, Proc. SPIE BACUS, 2884, 412-418 (1996)
4. Y. Cui, F.X. Zach, S. Butt, W.-K. Li, B. Liegl, L.W. Liebmann, Is Model-based Optical Proximity Correction Ready for Manufacturing? Study on 0.12  $\mu$ m and 0.175  $\mu$ m DRAM Technology, Proc. SPIE Microlithography, 4691, 67-75 (2002)
5. C.-H. Park, S.-U. Rhie et al., Hybrid PPC methodology and implementation to the correction of etch proximity, Proc. SPIE Microlithography, 4691, 369-376 (2002).

# ДВУХЧАСТОТНОЕ ПЕРЕНОСНОЕ НАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Антипина Е.В., Иванова Н.А.

*Руководитель: доцент, к.т.н. Макачук Владимир Васильевич*

Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, РФ

## DOUBLE-FREQUENCY HANDHELD NAVIGATIONAL EQUIPMENT

Antipina Eugenia Vladimirovna, Ivanova Natalia Andreevna

*Supervisor: associate professor, candidate of technical science Makarchuk Vladimir Vasilievich*

Chair ICS4, MSTU name of Bauman, Moscow, Russia

### Аннотация

В данной работе рассматриваются технические решения и схмотехнические принципы построения устройства, предназначенного для определения местоположения морских, воздушных, сухопутных и других видов потребителей. В настоящее время требуется надежное и недорогое оборудование, способное удовлетворить каждого пользователя не только понятным и удобным интерфейсом, но и высокими эксплуатационными характеристиками.

Переносной навигационный приемоиндикатор (ПНПИ) отвечает поставленным требованиям. Кроме того, его функциональная структура позволяет принимать навигационные сигналы, как отечественной спутниковой системы ГЛОНАСС, так и её зарубежного аналога GPS.

### Abstract

This paper examines the engineering solutions and schematic principles embedded in the construction of a device intended for localization and determination of the rate of movement of land, sea, air and other types of carriers. At present time reliable and affordable equipment capable of satisfying every user not only with an intuitive interface, but also high quality operating characteristics is needed.

The handheld navigation system meets the proposed criteria. Moreover, its functional structure allows it to receive navigation signals from both the russian GLONASS and its foreign equivalent GPS systems.

Возможность узнать свое местоположение в любой точке земного шара и определить расстояние до конечного пункта назначения еще полвека назад казалась нереальной. С появлением радио и радиолокационных станций встал вопрос о способах нахождения параметров движения объекта по излучаемому сигналу. Была установлена возможность вычисления координат приёмника по измеренному доплеровскому сдвигу сигнала, излучаемого с искусственного спутника Земли (ИСЗ), если параметры движения и координаты этого спутника известны [1].

В настоящее время широко развернуты такие сетевые радионавигационные спутниковые системы (СРНСС), как система ГЛОНАСС, разработанная по заказу Министерства Обороны России, и Global Positioning System (GPS), курируемая ВВС США. По своей структуре ГЛОНАСС и GPS считаются системами двойного действия, то есть могут использоваться как в военных, так и в гражданских целях.

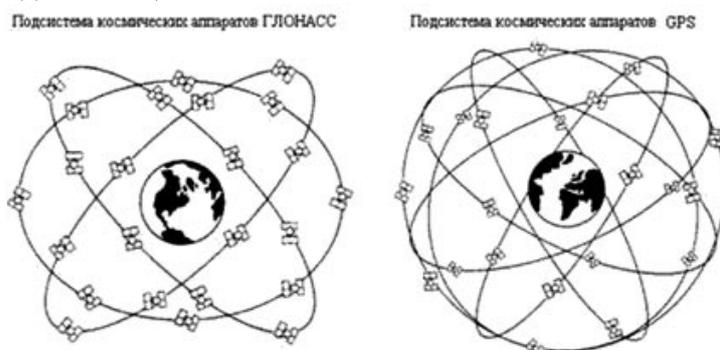


Рис.1. Космический сегмент систем ГЛОНАСС и GPS

СРНСС в целом состоит из трех сегментов:

- космический сегмент, который включает орбитальную группировку навигационных космических аппаратов;
- сегмент управления, наземный комплекс управления орбитальной группировкой космических аппаратов;
- аппаратура пользователей системы.

Последний сегмент, аппаратура пользователей, самый многочисленный. СРНСС ГЛОНАСС и GPS являются беззапросными, поэтому количество потребителей систем не имеет значения. Однако возможности систем велики: помимо навигационных определений, можно производить высокоточную взаимную синхронизацию стандартов частоты и времени на удалённых наземных объектах и взаимную геодезическую привязку, а также можно производить определение ориентации объекта.

### **Принципы построения аппаратуры потребителя спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS**

Переносной навигационный приёмник является прибором индивидуального пользования, предназначенным для определения пространственных координат, скорости и направления передвижения, текущего времени и других навигационных параметров, а также отображения навигационной и другой сервисной информации на экране дисплея.

Основные характеристики, определяющие вид структурной схемы:

- предоставление пользователю достоверной информации, в удобной для считывания форме, позволяющей отслеживать текущую ситуацию и выбирать оптимальный вариант действий;
- обеспечение возможности оперативного внесения корректив в варианты маршрутов движения, занесенных в аппаратуру при её подготовке к выполнению конкретной задачи;
- простота и удобство в обращении с аппаратурой;
- надёжность функционирования;
- обеспечение максимально возможной продолжительности непрерывной автономной работы при минимальных габаритах и массе аппаратуры.

В состав ПНПИ входят следующие системы и устройства:

- встроенная и внешняя антенные системы;
- приёмные тракты сигналов КНС «ГЛОНАСС» и «GPS»;
- устройство преобразования и предварительной обработки сигналов – коррелятор;
- вычислительная система, включая устройства управления периферией и поддержки устройства отображения информации;
- устройство отображения
- устройство хранения картографической информации;
- система электропитания и подзарядка.

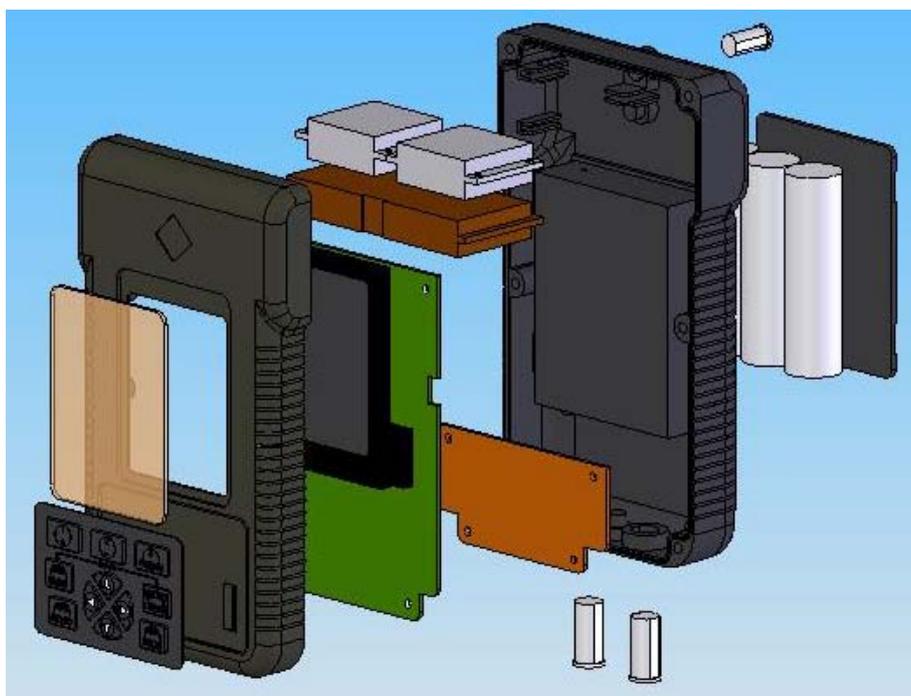


Рис2. Схема сборки ПНПИ.

Функциональная схема ПНПИ представлена на рис.3.

ПНПИ содержит приёмник, обеспечивающий одновременную обработку в широкой полосе частот сигналов систем GPS , ГЛОНАСС. Опорный генератор, производит выдачу опорных высокостабильных колебаний частотой 10 МГц и подключён к управляющему входу приёмника.

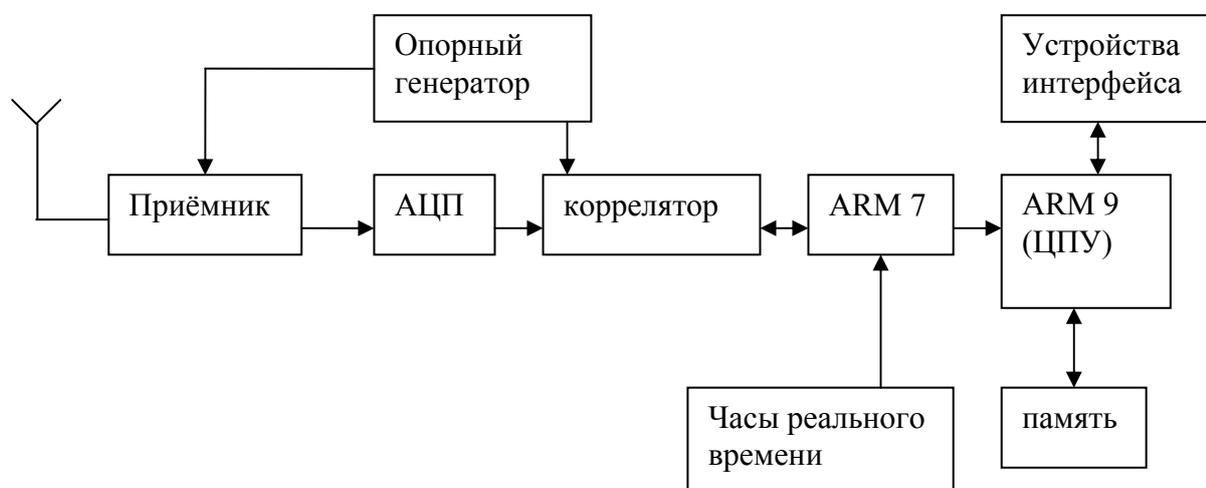


Рис.3 Функциональная схема ПНПИ.

В АЦП сигналы полученные из приёмника преобразуются в цифровые сигналы, подающиеся на первые информационные входы частотно-кодového коррелятора. Сигналы, принимаемые с космических аппаратов (КА), модулированы псевдослучайными последовательностями (ПСП) и навигационным сообщением. В ПНПИ необходимо сформировать копии этих ПСП для каждого из сигналов КА, согласовать их по временному положению, а также восстановить подавленную несущую с учётом доплеровского смещения и выдать навигационное сообщение.

Для этого опорный генератор вырабатывает кодовые последовательности, каждая из которых уникальна для любого из спутников двух систем КА. Сигналы ПСП в различных сочетаниях для двух систем КА поступают на вторую группу информационных входов коррелятора, которые вместе с ARM7 выполняет ряд функций первичной обработки

информации (слежение за кодом, слежение за сдвигом частоты, оценка соотношения сигнал/шум, инициализация и поиск кода и т.д.). Обмен информацией между ARM7 и ARM9 (ЦПУ) происходит через протокол USB. Результаты решения навигационной задачи, получаемые ARM9 (ЦПУ) с использованием информации, накопленной в памяти, поступают в интерфейсные устройства.

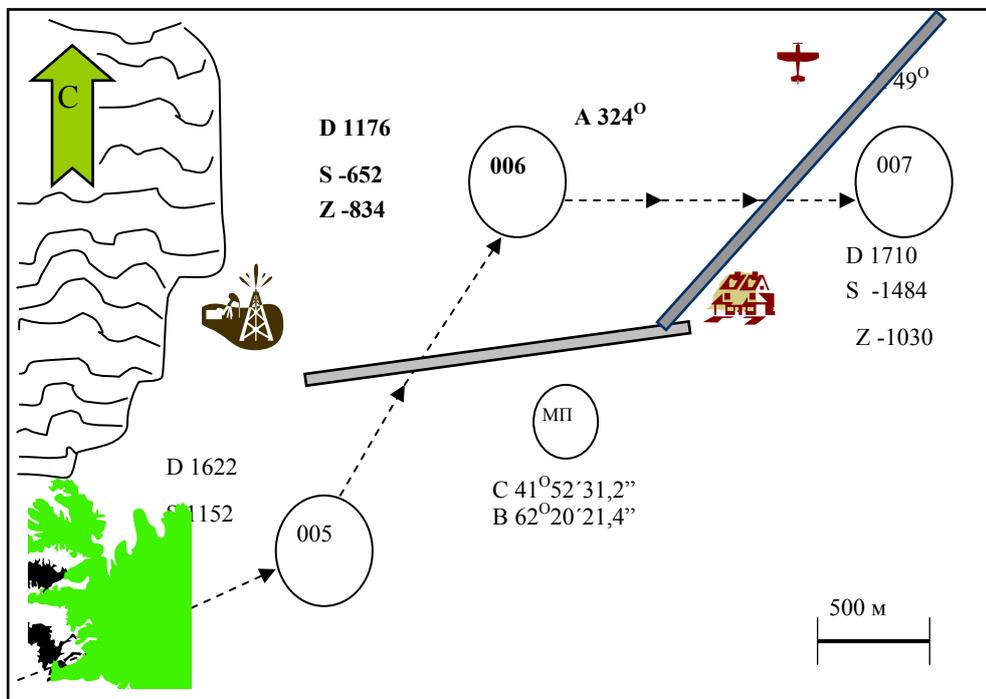


Рис.4. Дисплей обстановки на участке местности

На дисплее ПНПИ могут быть спроецированы и отображены различные элементы изображения для ориентирования в обстановке, в том числе:

- одиночные элементы или «точки» маршрута;
- линии маршрута, линии границ опасных зон, дороги, реки;
- очертания болота, озера, лесного массива.

Точечным элементом является одиночный объект. Местоположение точки (широта и долгота) преобразуется в местонахождения на дисплее, на котором индицируется условное обозначение точки. На дисплее в одинаковом масштабе индицируется положение точки и линии маршрута. Линейный элемент представляет собой ряд мест, связанных между собой одной или двумя линиями, соединяющими точки местоположений. Количество точек определяется числом изгибов и поворотов линейных элементов. Для того, чтобы точно отображать линии маршрута, промежуточные точки рассчитываются на основании расстояний между конечными точками и выбранной в данный момент масштабной линейкой дисплея.

### Литература

1. Радиотехнические системы. Под ред. Казаринова Ю.М. М.: Высшая школа, 1990.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000.

# СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ ПОЛУЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА КОМПЬЮТЕРЕ

Панченко Е.И., Буланенкова Е.С., Байкина Л.Р., Прахов К.О.

*Научный руководитель: А.В.Юдин*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИУ4, г.Москва, Россия.

## OBJECT STATEMENT DETERMINATION SYSTEM WITH FURTHER INFORMATION TREATMENT ON COMPUTER

**Panchenko E.I., Bulanenkova E.S., Baykina L.R., Prakhov K.O.**

Moscow State Technological University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia.

### Аннотация

В статье описываются концепции системы и основные принципы ее работы. Приводятся возможные варианты применения в различных областях.

### Abstract

The given article describes the conception of the system and basic principles of its work. It also includes possible versions to use it in different ways.

### Введение

При решении обобщенной задачи позиционирования робототехнических систем необходимо получить данные о положении какого-либо объекта в пространстве и передать полученную информацию в компьютер.

Для достижения поставленной задачи необходимо выполнение следующих пунктов:

- выбор принципа, на котором основывается система
- выбор некоторой неподвижной системы координат (точка отсчета) относительно которой будет определяться положение объекта
- обработка полученных данных.

Система основана на использовании свойств магнитных полей. Таким образом, удается достичь поставленной задачи с наименьшими затратами.

Положение точки в трехмерном пространстве однозначно определяется тремя координатами в декартовой системе (рис.1). Зная эти координаты, мы можем определить, где находится объект.

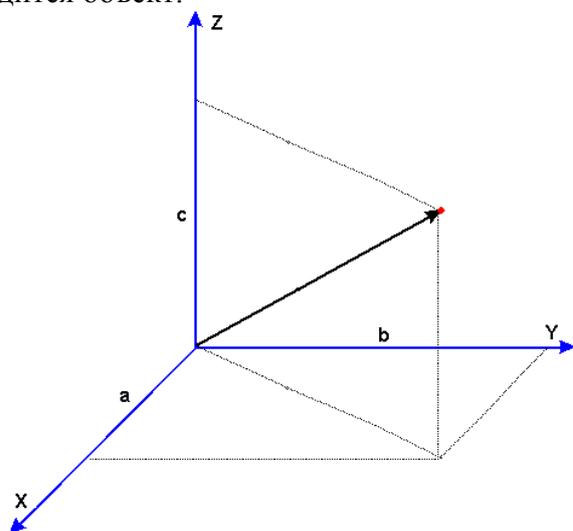
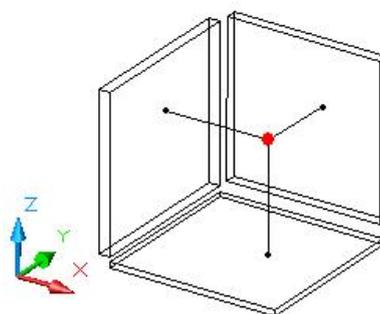


Рис.1.



● - ОБЪЕКТ

Рис.2.

Для получения этих координат применяются три излучателя электромагнитного поля. Датчик, установленный на объекте, дает информацию о текущем положении относительно каждого из излучателей, которые характеризуют координаты X, Y и Z соответственно (рис.2).

Система состоит из трех основных частей – излучателей, датчиков и устройства контроля и обработки информации.

Излучатели – «точка отсчета», электромагнитный модуль, относительно которого определяется положение объекта. Положение излучателей считается абсолютными. С ним жестко связана система координат, в которой находится объект.

Датчики – устройства, улавливающие изменения магнитного поля излучателя.

Устройство контроля и обработки информации – модуль, основой которого служит микроконтроллер. Задачи модуля:

- А) управление излучателем
- Б) получение информации с датчика
- В) оцифровка
- Г) передача данных на компьютер

Применение микроконтроллера позволило значительно упростить конструкцию модуля и повысить его функциональность.

Также в системе имеются вспомогательные модули, которые будут описаны далее.

Структурная схема системы представлена на рис.3.

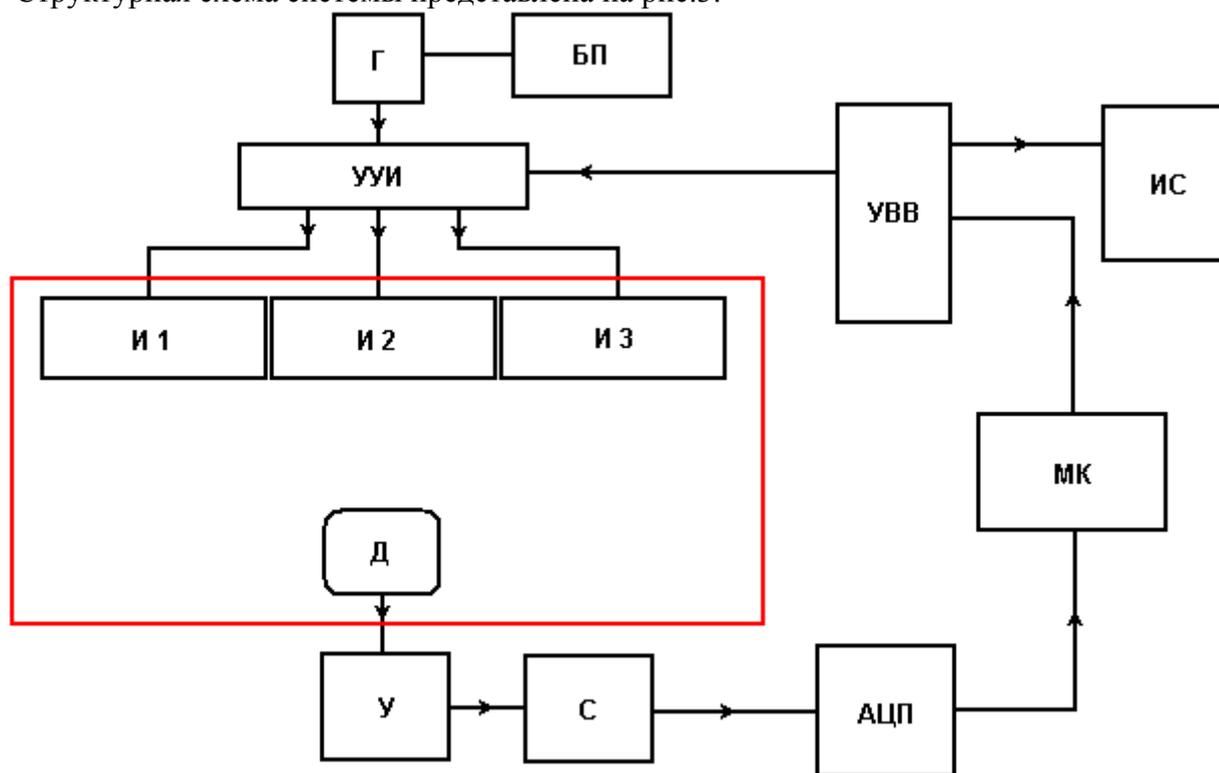


Рис.3.

Микроконтроллер (МК) посылает сигнал на устройство ввода/вывода (УВВ). УВВ, получив сигнал, посылает управляющие команды на устройство управления излучателями (УУИ). Так же УВВ через интерфейс связи (ИС) передает пакеты данных, сформированные МК, на компьютер. Сигнал с генератора подается на вход УУИ. К выходу УУИ подключены три излучателя (И), которые соответствуют трем координатам X, Y и Z. Информация с датчика (Д) поступает на усилитель (У), необходимый для повышения уровня сигнала. Далее усиленный сигнал поступает на сумматор (С). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

переводит полученную информацию в цифровую форму и передает на МК. Вся система работает от блока питания (БП).

Система может найти широкое применение в самых различных областях. Использование магнитного поля позволяет отказаться от необходимости прямой «видимости» между излучателем и датчиком, что дает возможность применять ее там, где не могут работать системы, основанные на инфракрасном излучении. Низкая стоимость системы делает ее доступной.

### Литература

1. TEXAS INSTRUMENTS. Instrumentation Amplifiers. Internet <http://www.ti.com>
2. ATMEL. ARM-based Microcontrollers. Internet <http://atmel.com>
3. FTDI. USB UART IC. Internet <http://www.ftdichip.com>
4. И. В. Савельев. Курс общей физики. Москва, «Наука» 1982г.

## АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА CRAZYBOT

**Антохин А.И., Саттаров М.Д., Тючков А.А., Якимец Д.В.**  
*Научный руководитель: бакалавр Юдин А.В.*  
каф. ИУ4, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A MOBILE ROBOT CRAZYBOT

**Antohin A I., Sattarov M.D., Tjuchkov A.A., Jakimez D.V.**  
*Scientific advisor: bachelor Yudin A.V.*  
IU4 dep., Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Аннотация

В докладе описывается робот, разработанный для участия в международных соревнованиях Eurobot Junior 2007. Дано подробное описание механических и электронных узлов робота, а также протокола команд, используемого для управления внутренними механизмами, периферией и сбора данных с датчиков. В основу разработки положен модульный принцип. Большая часть разработанных аппаратных и программных модулей является универсальной и может быть использована в других мобильных роботах.

### Abstract

In this report a robot developed for participation in the international competitions Eurobot Junior 2007 is described. Given a full description of mechanical and electronic robot components and also a command protocol used for control of the interior mechanisms, periphery and in gathering sensor data. At the heart of the development a modular principle is placed. Most of the developed hardware and software modules are universal and can be used in other mobile robots.

### 1. Постановка задачи

Задача робота - собрать и отсортировать мусор, расположенный на игровом поле. Поле представляет из себя наклонную прямоугольную площадку, на которой в заданных местах расположены элементы игры (рис. 1). Задача осложнена тем, что время для выполнения задания ограничено 90 секундами, и одновременно на поле находятся 2 робота конкурирующих команд.

Работу необходимо осуществить следующие действия:

1) Поместить в лунку своей команды стеклянные шарики, предварительно отделив их от пластиковых пробок. На поле находятся 4 кучки смешанных между собой шариков и пробок, общих для обеих команд. Баллы напрямую зависят от количества шариков в лунках команд, причем недопустимо попадание в них ни одной пробки. Максимально возможное количество очков дается за 2 правильно отсортированные кучки шариков.

2) Загнать в П-образные ворота три деревянных шайбы. У каждой команды есть свои ворота и шайбы.

3) Поместить три пластиковые бутылки с водой в желобки. Бутылки и желобки также свои для каждой команды, какое-либо влияние на элементы соперника недопустимо.

Роботы ограничены в размерах и должны управляться с проводного пульта управления. Применение радиочастот (как и других беспроводных видов сигналов) недопустимо.



Рис. 1. Поле для соревнований роботов

## 2. Механика робота

### 2.1. Редукторы

Пусть:  $n_1$  - частота вращения двигателя;  $M_n$  - номинальный момент на валу двигателя;  $R$  - радиус ведущих колёс;  $k$  - передаточное отношение;  $\eta$  - КПД редуктора.

Обозначим через  $n_2$  - частоту вращения вала колеса, тогда:

$$n_1/n_2 = k \Rightarrow n_2 = n_1/k.$$

Если радиус колеса  $R$ , то за один оборот оно пройдёт путь  $S = 2\pi R$ , следовательно максимальная скорость движения робота  $V_{\max} = S/T = \frac{S}{1/n_2} = 2\pi R \frac{n_1}{k}$

Рассмотрим одно ведущее колесо (рис. 2):

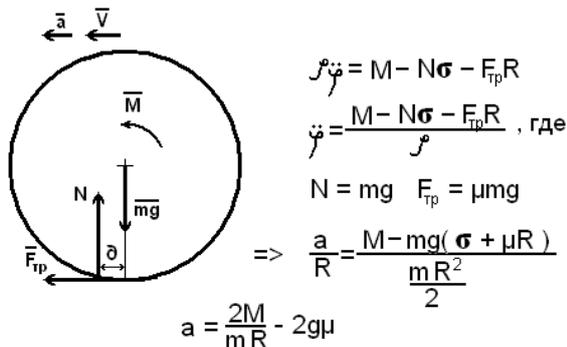


Рис. 2. Ведущее колесо

Робот имеет три колеса (два ведущих и одно свободное) будем считать что масса робота распределяется между тремя колёсами почти равномерно, тогда вместо  $m$  в формуле необходимо подставить  $1/3m_p$ , где  $m_p$  - масса робота.  $M$  - момент на валу колеса, вычисляется по формуле:

$$M = M_n k \eta$$

Полученные формулы позволяют вычислить максимальную скорость и максимальное ускорение. Управление скоростью и ускорением во время движения робота производится путём изменения режимов питания двигателей.

Коэффициент редукции и двигатель подбирались из следующих соображений: максимальная скорость движения робота должна составлять 0,85 м/с, максимальное ускорение 2,5 м/с<sup>2</sup>, диаметр ведущих колёс 50 мм, его масса составляет порядка 3 кг, а КПД редукторов составляет порядка 90%. Было получено, что коэффициент редукции должен быть примерно равен 36, а характеристики двигателя соответствовать следующим требованиям:

- частота вращения  $n_1$  примерно равна 100 об/сек (6000 об/мин);

- номинальный момент  $M_n$  должен быть примерно равен 9,49 мНм;

Для поставленной задачи был выбран электродвигатели ДПМ-30-Н1-09 ( $n_1 = 6000$ об/мин,  $M_n = 9,8$  мНм).

Проверка расчётов.

$$V_{\max} = 6.28 * 0.05\text{м} * 100\text{с}^{-1} / 36 = 0.872 \text{ м/с}$$

$$a_{\max} = 2*(9.8\text{мНм} * 36 * 0.9)/(1\text{кг} * 0.05\text{м}) - 0.5 * 9.8\text{м/с}^2 * 2 = 12.7\text{м/с}^2 - 9.8\text{м/с}^2 = 2.9\text{м/с}^2$$

## 2.2. Устройства для сбора и сортировки «мусора»

Для сборки стеклянных шариков и пробок впереди робота над полом расположен вращающийся ёршик, за ёршиком идёт «горка», над горкой установлен отражатель (для подлетевших шариков), за горкой установлены 2 отсека (рис. 3):

- отсек для сортировки, имеет решётчатое дно, с ячейками решётки в форме квадратов, расположенных в шахматном порядке (рис. 4), сторона квадрата подобрана таким образом, чтобы стеклянные шарики легко падали вниз, а пластиковые пробки оставались в этом отсеке;

- отсек для накопления стеклянных шариков, расположен под отсеком №1.

Оба отсека расположены под углом 15 градусов к горизонтальному уровню, угол подбирался из соображений, что робот должен производить сортировку независимо от положения на поле, так как стол наклонён под углом примерно 6 градусов,

то угол наклона отсеков к горизонтальному уровню изменяется в пределах 9 – 21 градусов. В нижней части каждого отсека имеется желоб с заслонкой для сброса шариков или пробок. Для избегания застревания шариков и пробок в решётке на отсеках установлены вибромашинки.

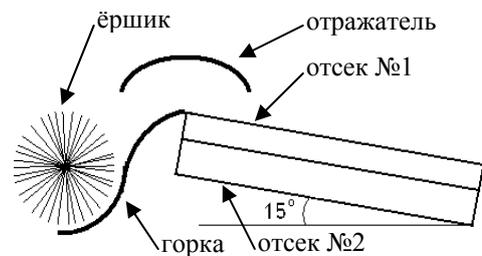


Рис. 3. Устройство для сборки и сортировки «мусора».

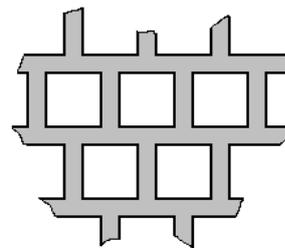


Рис.4. Фрагмент дна отсека № 1.

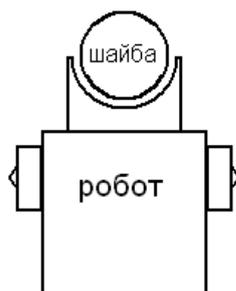


Рис. 5. Схема загона шайб в мусоросжигатели

## 2.3. Устройства для помещения шайб и бутылок в мусоросжигатели

Для загона шайб в мусоросжигатели сзади робота установлен выдвижной бампер, при помощи которого робот должен загнать шайбу в мусоросжигатель (рис.5).

Для загона бутылок в мусоросжигатель сбоку робота установлен выдвижной штифт, при помощи которого робот должен продвинуть бутылку в мусоросжигатель (рис. 6).

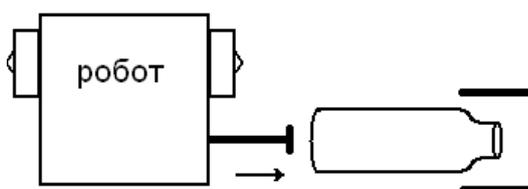


Рис. 6. Схема загона бутылок в мусоросжигатели

## 3. Система управления

Основой системы управления является управляющий блок. В основе управляющего блока стоит микроконтроллер (АТmega32). В функции блока управления входит прием сигналов с пульта

управления, их обработка и передача соответствующих команд роботу.

В роли пульта управления используется стандартный игровой джойстик (подключаемый к игровому порту (game port) персонального компьютера).

В нашем случае джойстик подсоединяется непосредственно к блоку управления. Джойстик является аналоговым устройством, при перемещении рукоятки джойстика, на выходе изменяется сопротивление. Для оцифровки сигнала используется АЦП, встроенный в микроконтроллер. После обработки полученной информации с АЦП получаются числа в пределах от -20 до 20, для оси X и для оси Y. На основе этих чисел вычисляется скорость, с которой должны вращаться двигатели робота. Для избежания влияния возможных помех, предусмотрены определенные алгоритмы, позволяющие более точно отслеживать текущее положения джойстика, а как следствие, более точное управление роботом. Предусмотрен режим более точного позиционирования робота, а именно, при нажатии одной из кнопок джойстика, максимальная скорость робота будет уменьшена вдвое, таким образом будет проще установить робот в нужное положение. При отжати кнопки будет восстановлен обычный режим управления роботом. Также микроконтроллер отслеживает состояние кнопок на джойстике, выполняя соответствующие действия при их нажатии (таблица 1).

Связь между блоком управления и роботом обеспечивается через кабель, с использованием последовательного интерфейса. Интерфейс для обмена данными между блоком управления и роботом – RS-232. Блок управления передает роботу команды и получает от робота подтверждения об успешном выполнении данных команд. Основными командами являются включение/отключения всех систем робота, установка заданной скорости вращения двигателей, управление сервомашинками и дополнительными двигателями систем захвата предметов, а также управление видеокамерой, установленной на робот.

В блок управления вмонтирован жидкокристаллический дисплей для удобства отладки интерфейса и дальнейшего использования блока управления во время подготовки робота к началу соревнований и самих соревнований.

В функции микроконтроллера входит прием команд от блока управления, их обработка и, соответственно, выполнение тех или иных действий. Наиболее важной задачей является управление двигателями робота. Микроконтроллер посредством ШИМ (Широтно-Импульсная Модуляция) регулирует скорость двигателей. Используя ШИМ можно очень точно устанавливать требуемую скорость двигателя, что позволяет точно позиционировать робот. Каждый двигатель подключается через H мост, таким образом изменить направление вращения двигателя не составляет проблем. В роли H моста выступает микросхема A3949, специально предназначенная для управления двигателями постоянного тока с помощью ШИМ. К микроконтроллеру подключен ряд датчиков (оптические и датчики Холла), позволяющие определить текущее положение элементов робота.

В качестве источника питания используется свинцово-кислотный 12-вольтовый аккумулятор, установлен стабилизатор напряжения 5В, для питания микроконтроллера и датчиков. Блок схема всей электронной части робота и системы управления выглядит следующим образом (рис. 8)

Кнопка	Действие
1	Включение/выключение более точного режима позиционирования.
2	Включение/выключение ершика и сортировочного механизма для захвата шариков.
3	Сброс накопленных в емкости шариков.
4	Управление системой захвата шайб.
Таблица 1	

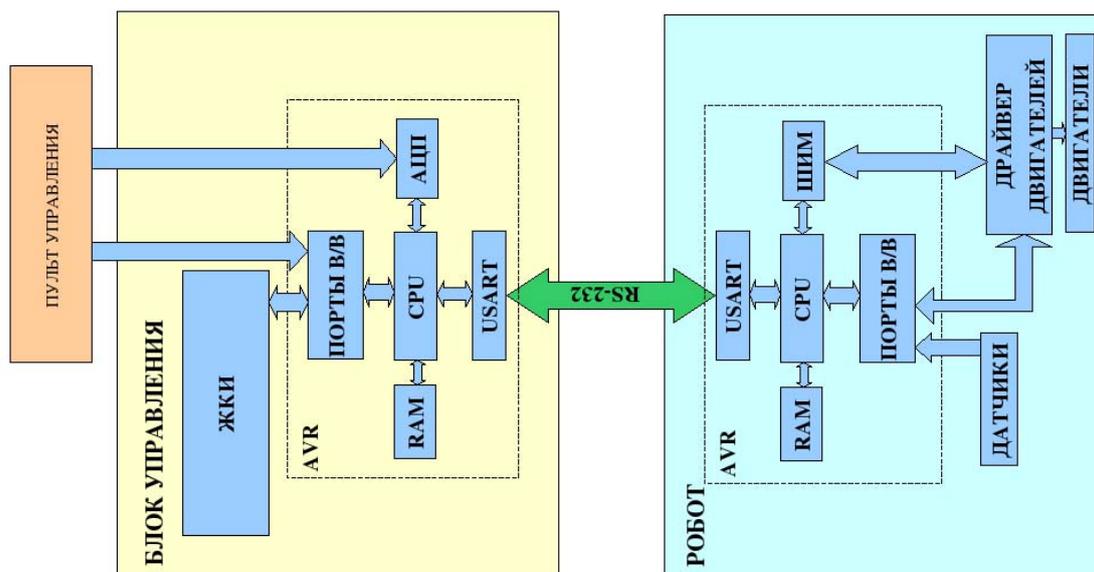


Рис. 8. Структурная схема аппаратной части робота

#### 4. Протокол передачи команд управления и данных

##### 4.1. Физический уровень

Для кодирования и декодирования сигналов используются микроконтроллеры «AVR ATmega32».

Передача информации производится с помощью Универсального Синхронного Последовательного Приемопередатчика (УСПП). Существует три основных блока УСПП: тактовый генератор, передатчик и приемник. Регистры управления используются всеми блоками. Передатчик состоит из одного буфера записи, последовательного сдвигового регистра, генератора паритета и управляющей логики, которая поддерживает различные форматы последовательной посылки. Буфер записи позволяет непрерывно передавать данные без каких-либо задержек между передачей посылок. Приемник является более сложным блоком УСПП, т.к. в его состав входят модули обнаружения данных и синхронизации. В приемник входит устройство проверки паритета, сдвиговый регистр, и двухуровневый приемный буфер (UDR). Приемник поддерживает те же последовательные форматы, что и передатчик, и может определить ошибку в посылке (кадре), переполнение данных и ошибку паритета.

УСПП поддерживает все комбинации следующих посылок:

- 1 старт-бит;
- 5, 6, 7, 8 или 9 бит данных;
- без паритета, с битом четности, с битом нечетности;
- 1 или 2 стоп-бита.

Рис. 9 иллюстрирует возможность сочетания форматов посылки. Наличие прямоугольной скобки указывает на опциональность данного формата посылки.



Рис.9. Форматы посылки

Бит паритета вычисляется путем выполнения логической операции исключающего ИЛИ над всеми битами данных. Использование данного бита существенно повышает надежность при приеме/передаче информации, что крайне важно, особенно для большой длины кабеля (>5м), т.к. возможны различные наводки. Для надёжности передачи используется 2 стоп-бита.

#### 4.2. Логический уровень

На работа должна передаваться следующая управляющая последовательность:

- команда, которую необходимо выполнить роботу;
- данные, передаваемые с командой.

На основе вышеизложенных технических возможностей был разработан следующий формат пакета:

Биты	1-8	9
Значение	Данные	Флаг

Флагом, как видно из схемы, является девятый бит. Необходимо различать пакет, в котором закодирована команда и тот, в котором содержится значение. Так вот в девятом бите передается 0 или 1. Если девятый бит нулевой, то последующий байт информации – команда. Если же 1, то значение. Девятый бит данных должен быть записан в бит TXB8 регистра UCSRB, причем, перед тем как младший байт будет записан в UDR.

В связи с большим количеством элементов на работе, которые требуют управления, на номер команды отводится 1 байт. На номер значения также выделяется 1 байт. Такая схема является оптимальной, т.к. она предполагает универсальность данного протокола для более сложных устройств, где используется до 256 команд или значений. Контроль передачи осуществляется средствами УСПП.

№ к-ды	Код к-ды	Названия команды	Описание команды	Диапазон изменения байта данных
1	0x01	Изменение скорости левого двигателя	Значение, переданное с данной командой, и число оборотов левого двигателя изменяется на соответствующее ему значение	-20..20
2	0x02	Изменение скорости правого двигателя	Значение, переданное с данной командой, и число оборотов правого двигателя изменяется на соответствующее ему значение	-20..20
3	0x03	Включение / выключение ёршика	В случае нулевого значения байта данных, двигатель ёршика выключается, если единица - включается	0,1
4	0x04	Управление захватом для шайб		0,1
5	0x05	Управление валом для бутылок	Берётся значение, переданное с данной командой и, если оно равно 0, то вал остаётся в работе, если 1 – выезжает налево, 2 – направо	0,1,2
6	0x06	Включение / выключение вибромоторов	В случае нулевого значения переданного с данной командой, вибромоторы выключаются, если единица - включаются	0,1
7	0x07	Управление заслонкой	В случае нулевого значения байта данных, заслонка для шариков остается на месте, иначе – отодвигается в сторону	0,1
8	0x08	Управление положением камеры	В результате анализа байта данных, камера на работе занимает одно из 3 необходимых положений.	1,2,3

## Выводы

В результате проделанной работы разработана модель мобильного робота для участия в соревнованиях Eurobot Junior 2007, а также разработаны основные программные, электронные и механические модули, которые могут быть использованы в других мобильных роботах.

## Литература

1. <http://www.eurobot.ru>
2. Козорезов Ю.Ю., Миронов С.В., Трушкин Ф.А., Юдин А.В. Автономный мобильный робот-гольфист: программно-аппаратный комплекс // Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы научной школы-конференции (Москва, 23-27 октября 2006 г.), с. 193-202.
3. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.: ил.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО СЛУХА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРАЦИИ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО ВЫЧИТАНИЯ

**Григорян Р.М.**

*Научный руководитель: ассистент Кузнецов А.С.*

МГТУ им. Баумана, кафедра «Проектирование и технология производства ЭВС» (ИУ-4),  
Москва, Россия

## USING HUMAN AUDITORY SYSTEM PROPERTIES IN SPECTRAL SUBTRACTION METHOD FOR NOISE SUPPRESSION IMPROVE

**Grigoryan R.M.**

*The scientific chief: assistant Kuznetsov A.S.*

Bauman MSTU, department «Design and Production Technology of Computers» (IU-4), Moscow,  
Russia

### Аннотация

Рассмотрен психо-акустический эффект слухового маскирования. Описывается его практическое применение для улучшения метода спектрального вычитания. Указываются достоинства и недостатки данного метода.

### Abstract

Psychoacoustics effect of auditory masking is reviewed. His practical use for improving spectral subtraction method is described. Advantages and disadvantages of this method are denoted.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, использование мобильных телефонов стало неотъемлемой частью повседневной жизни. Предъявляются более высокие требования к качеству передачи и воспроизведению звуковой информации. Особенности слуховой системы человека, в частности, психоакустического феномена, известного как слуховое маскирование, может помочь в решении данных задач. Модифицирование широко распространенного метода спектрального вычитания с учетом слухового маскирования позволяет добиться высокого отношения сигнал/шум при минимальных искажениях речи. Особенно эффективно этот метод проявляет себя при фильтрации квазистационарного шума, источником которого, например, может служить движущаяся автомобиль.

## СЛУХОВАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА. СЛУХОВОЕ МАСКИРОВАНИЕ

Слуховая система человека состоит из уха, слуховых нервных волокон, и определенной части головного мозга. Ухо - периферийная часть нервной системы, которое преобразует механические колебания в электрические импульсы, воспринимаемые нервными волокнами. Оно состоит из внешнего, среднего и внутреннего уха (рисунок 1).

При прохождении через ухо, механическая волна попадает, в конечном счете, на базилярную мембрану улитки внутреннего уха, в которой и трансформируется в электрические импульсы. Базилярная мембрана играет ключевую роль в восприятии звука. Каждая точка улитки может быть представлена как механическая колебательная система с резонансной частотой, уменьшающейся от основания до кончика улитки. Механическая волна вызывает колебание определенной части базилярной мембраны. Такое распределение можно представить как совокупность перекрывающихся полосовых слуховых фильтров. Их передаточная характеристика точно не известна и может меняться в зависимости от уровня сигнала, поэтому они нелинейны. Несмотря на это, нелинейностью пренебрегают. Гораздо более существенной особенностью слуховых фильтров является зависимость их полосы пропускания от средней частоты.

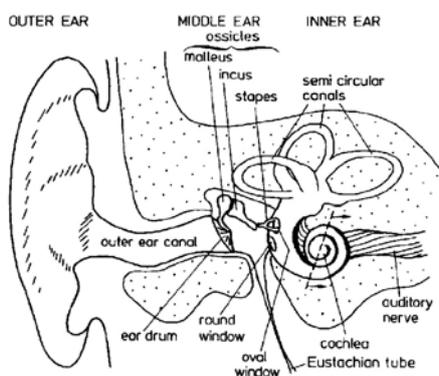


Рисунок 1. Строение человеческого уха

Экспериментальные наблюдения показывают что, двигательные нервные волокна, прямо присоединенные к покровной перепонке, могут, изменять вибрацию отдельных областей базилярной мембраны, что приводит к улучшению частотной селекции слуховой системы.

Американская Организация Стандартизации определяет слуховое маскирование, как процесс или величину (обычно измеряемую в дБ) «из-за которой увеличивается порог слышимости при наличии постороннего сигнала». Смысл слухового маскирования заключается в том, что определенный сигнал может быть не услышан при наличии другого, обычно более сильного и близкого по частоте.

Различают два типа маскирующих звуков. Сигнал шума с широким спектром и небольшой фазовой когерентностью может маскировать звуки с уровнем меньшим на 2-6 дБ уровня маскирующего. Узкополосный сигнал, например, речевой сигнал должен иметь уровень, по крайней мере, на 18-24 дБ выше уровня широкополосных маскируемых сигналов из-за фазовой насыщенности широкополосных сигналов.

Понятие критической полосы включает в себя частотную селективность маскирования. Воспринимаемый уровень громкости узкополосного шума с фиксированной спектральной плотностью мощности не зависит от ширины его спектра до тех пор, пока шум находится в пределах критической полосы. Но с расширением спектра шума, воспринимаемая громкость также увеличится.

## МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО ВЫЧИТАНИЯ

Это метод позволяющий производить очистку речи в условиях аддитивного шума (рисунок 2).

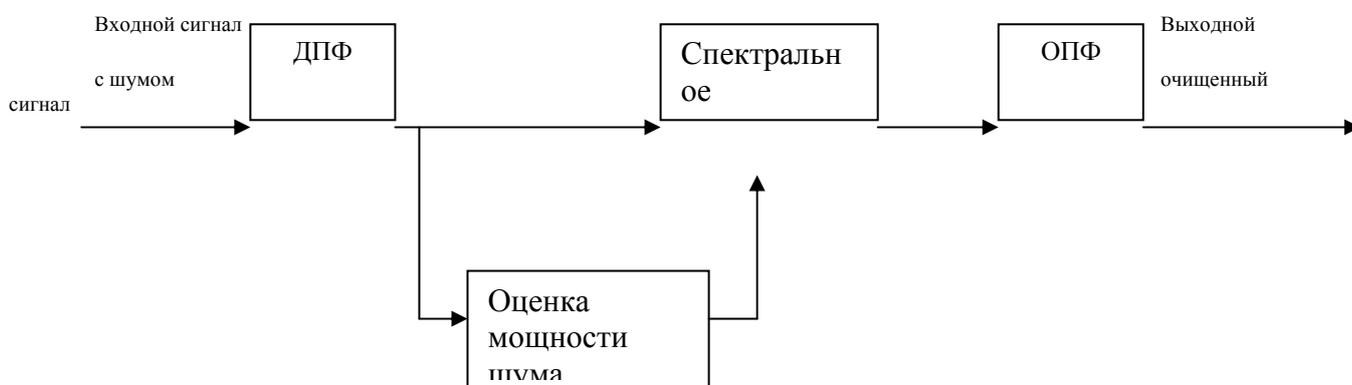


Рисунок 2. Структурная схема системы, построенной по методу спектрального вычитания

Приближенно считают, что шум является некоррелированным с полезным сигналом и стационарным. Также полагают, что человеческое ухо нечувствительно к изменению фазы. Речевой сигнал в интервале одной фонемы является относительно стационарным процессом (длительность одной фонемы примерно равно 20-40 мс). По этой причине, обработку сигналов производят на коротких промежутках времени называемыми фреймами (размер фрейма принимают равным от 5 до 50 мс), на которых речь считается стационарным процессом.

Сигнал, приходящий на вход системы, является суммой полезного сигнала и шума:

$$x(t)=s(t)+v(t) \quad (1)$$

где  $s(t)$ - полезный сигнал,  $v(t)$ - шум. В частотной области, после выполнения кратковременного ДПФ, (1) можно записать в виде (2):

$$|X(w)|^2= |S(w)|^2+|W(w)|^2 \quad (2)$$

где  $X(w)$ ,  $W(w)$ ,  $S(w)$ - кратковременное ДПФ входного сигнала, шума и полезного сигнала соответственно. Отсюда полезный сигнал можно получить в виде (3):

$$|S(w)|^2= |X(w)|^2-|W(w)|^2 \quad (3)$$

Фазу приближенного полезного сигнала получают напрямую из зашумленного сигнала (4):

$$\Phi_{s(w)}= \Phi_{x(w)} \quad (4)$$

С учетом возможной переоценки уровня шума энергетический спектр полезного сигнала можно определить из выражения (5):

$$s(w)=\left(\max(|X(w)|^2- k|W(w)|^2, 0)\right)^{0.5} \cdot \exp(j\Phi_{x(w)}) \quad (5)$$

где  $k=\text{const} \approx 1$ - коэффициент переоценки шума. Подрадикальное выражение ограничено нулевым значением из-за возможной переоценки шума, т.е. ситуацией, когда шум больше входного сигнала.

## МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО ВЫЧИТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛУХОВОГО МАСКИРОВАНИЯ

Широкое использование эффекта слухового маскирования в аудио системах началось с 1992 года, когда компания Dolby Laboratories выпустила систему Dolby Digital. Шумоподавление работает путем ослабления шума, когда нет аудио сигнала, а когда он есть, позволяя более сильному полезному аудио сигналу перекрывать более слабый шум. На этом же принципе основан метод спектрального вычитания с использованием слухового маскирования (рисунок 3).

Под порогом маскирования понимают величину, определяющую уровень шума при котором он еще не будет услышан. При использовании модифицированного метода спектрального вычитания возникает необходимость использовать дополнительные модели восприятия звука для определения порога маскирования.

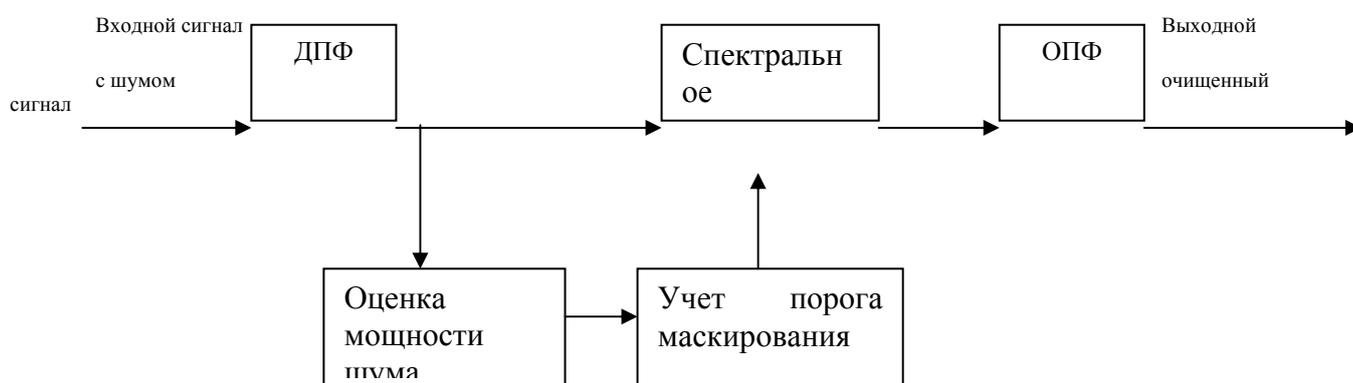


Рисунок 3. Структурная схема системы, построенной по методу спектрального вычитания с использованием слухового маскирования.

Спектральная плотность выходного очищенного сигнала в общем виде определяется с помощью выражений (6):

$$W(\omega) = \left( \max(|X(\omega)|^2 - k|W(\omega)|^2, 0) \right)^{0.5} \cdot \exp(j\Phi_X(\omega)) \quad (6)$$

$$k = f(T(\omega), k_{\min}, k_{\max})$$

где  $T(\omega)$  - приближенный порог маскирования. Здесь, коэффициент переоценки шума является величиной зависящей от порога маскирования. При этом он ограничен определенным минимальным и максимальным значением.

Описанный выше метод является достаточно эффективным для улучшения качества передаваемых или записываемых звуковых сигналов в случае квазистационарного шума. Но в целом данный метод находит широкое применение в портативных устройствах, т.к. не предъявляет высоких требования к аппаратной части.

### Литература

1. Сергиенко А.Б., Цифровая обработка сигналов, Питер 2006.
2. V. Davidek, J. Sika, J. Stusak, Implementing a Noise Cancellation System with the TMS320C31, ESIEE, Paris, September 1996.
3. Joachim Thiemann, Acoustic Noise Suppression for Speech Signals using Auditory Masking Effects, Department of Electrical & Computer Engineering McGill University Montreal, Canada, 2001.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР ПИГМЕНТИРОВАННОГО ЗУБНОГО НАЛЕТА СРЕДСТВАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.

Кульгашов Е.В., Бояркина Е.\*

*Научные руководители: проф., д.т.н. Мартынов В.В., к.т.н. Власов А.И.*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва, Россия

\*Московский Государственный стоматологический университет

## THE RESEARCH OF THE DANTAL STRIKE WITH SCANNING PROBE MICROSCOPE.

Kulgashov E.V., Boyarkina Y.\*

*Supervisors: Martynov V.V., Vlasov A.I.*

Moscow State Technological University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

E-mails: [kulgashov@mail.ru](mailto:kulgashov@mail.ru), [kboyarkina@mail.ru](mailto:kboyarkina@mail.ru)

### Аннотация

Исследовался пигментированный зубной налет средствами сканирующей зондовой микроскопии (наноуровень).

### Abstract

The dental strike are reserched with the scanning probe microscope.

### Введение

Работа посвящена исследованиям «зубного налета», а конкретно пигментированного зубного налета, средствами сканирующей зондовой микроскопии (наноуровень). Исследования проводились с использованием шлифов зубов. Ранее наноструктура зубного налета изучена мало, в литературе в основном представлена клиническая картина (может иметь мягкую или плотную консистенцию, быть различного цвета: от желтого, серого до темно-коричневого, черного).

При плохой гигиене полости рта на зубах могут появляться пигментации, связанные с активностью хромогенных бактерий.

**Объектом исследования** является зубной налет - *зубной налет (бляшка)* – плотное образование, состоящее из бактерий, расположенных внутри матрицы, которая образуется за счет белков, полисахаридов, липидов и некоторых неорганических веществ (кальция, фосфатов, магния, калия, натрия и др.).

**Целью исследований** является получение практических и теоретических сведений о структуре и свойствах эмали, поверхностных образований на зубах (в частности зубного налета), необходимых для правильного подхода к назначению средств профилактики и лечения.

**Актуальность работы** обусловлена тем, что одной из причин кариеса и болезни пародонта (комплекса тканей, окружающих зуб и обеспечивающих его фиксацию в челюстной кости) является зубной налет, природа и структура которого изучены мало. Представляет на сегодня повышенный интерес как изучение механизма образования налета, так и его микро- и наноструктуры, что крайне важно для развития методик предотвращения и профилактики этих заболеваний. Полное изучение структуры зубного налета, механизма его образования помогут создать комплексные механизмы предупреждения образования зубного налета. Это поможет снизить развитие кариеса и заболеваний пародонта и способствовать созданию новых средств и препаратов для их профилактики и лечения.

Решаемые задачи:

1. В рамках исследования проверяется предположение о возможности рассмотрения зубного налета как наноструктуры.

2. Проводится анализ и обобщение результатов исследования зубных отложений на наноуровне.

3. Исследование структур зубных налетов осуществляется на продольных и поперечных шлифах зубов, проводится экспертная оценка поверхности шлифов при разной степени увеличения.

«Зубной налет» - это одна из форм структурных зубных образований: 1) кутикула, 2) пелликула, 3) зубной налет (бляшка), 4) зубной камень, 5) пищевые остатки, 6) муциновая пленка и др.

«Зубной налет» - в большой степени «живое» динамичное образование; кислота, выделяемая микробами, действует на эмаль и на сам налет, что формирует постоянно меняющуюся клиническую картину. Исследования проводились путем сравнения шлифов с налетом со шлифами без налета на «мертвых зубах» с временем консервации более месяца, что накладывает свои ограничения на получаемые результаты: бляшка – скопление микроорганизмов, биохимии, образование, которое существует только в условиях «живой среды». Для того, чтобы изучить ее, нужно исследовать зуб сразу после удаления или исследуемый зуб должен находиться в среде, близкой к естественной (в слюне и при температуре 37°C).

Перед обработкой полученных результатов сканирования была изучена имеющаяся информация о зубной эмали, что позволило получить представление о том, что мы увидим на сканах шлифов.

### **Зубной налет и его клиническая картина**

Так как образование зубных налетов ведет к возникновению кариеса, то рассмотрим теории возникновения кариеса в классических фундаментальных работах.

В классической литературе выделяют следующие теории «разрушения зубов»: **химическая теория, химико-паразитная теория и физико-химическая теория.** Каждая из теорий ставит во главу угла те или иные причины возникновения «разрушения зубов», что необходимо учитывать при рассмотрении поверхностей зубов и тонких зубных пленок как наноструктур.

В ходе исследования нами была сформулирована **нанотеория** развития кариеса. При наличии в полости рта углеводов микроорганизмы образуют органические кислоты и в первую очередь молочную как конечный продукт ферментации углеводов, продуцируют внеклеточный полимер глюкозы (гликан) из сахарозы. Клеточные элементы налета вместе с внеклеточными образованиями создают нанопоры (ярко выраженные межкристаллические пространства, заполненные жидкостью, характерный размер которых не превышает 100 нм), что обеспечивает проникновение внутрь слюны и жидких компонентов пищи. Однако накопление в налете конечных продуктов жизнедеятельности организмов замедляет диффузию, так как закрываются межклеточные пространства в нем. В результате этого происходит накопление органических кислот (молочная, пировиноградная, уксусная, яблочная и др.) на ограниченном участке поверхности зуба. При длительном поддержании критического уровня pH 4,5 – 5,0 происходит растворение апатитов эмали. Продолжающееся образование органических кислот на поверхности эмали приводит к деминерализации и постепенному расширению **нанопор** в эмали до размеров микропор (диаметром более 100 нм). В результате этого создаются условия для проникновения микроорганизмов в образовавшиеся микропространства, при этом источник кислотообразования переносится внутрь эмали. Таким образом, в нанопорах действуют наномеханизмы разрушения, и когда пространства, возникшие в результате разрушения нанопор, становятся достаточными для проникновения в них микробов, вступает в действие физико-химическая теория.

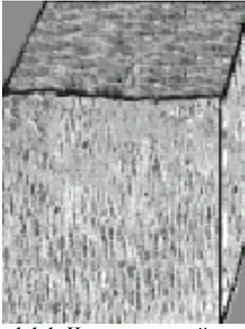


Рис. 1.1.1. Часть здоровой эмали. Поверхностный и приповерхностный слой

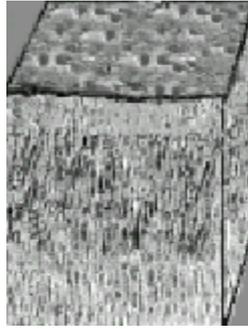


Рис. 1.1.2. Начало деминерализации. Образуются пространства в эмали, называемые пространственными порами (нанопоры). Поры растут с поверхности в приповерхностную область. Это начальные признаки повреждения эмали и образования области белого пятна. Поверхность эмали становится шероховатой и теряет блеск

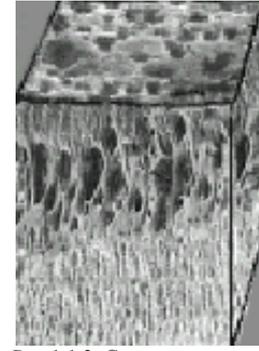


Рис. 1.1.3. С продолжением деминерализации число и размер пор увеличивается как на поверхности, так и в объеме эмали и реминерализация не происходит. Пока существует относительно здоровый слой эмали, бактерии не могут проникать внутрь.

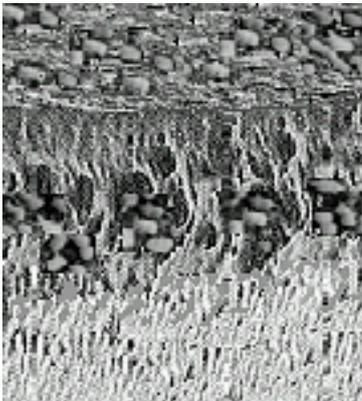


Рис. 1.1.4. С ростом пор, бактерии могут проникать в приповерхностный слой. В этих местах пораженная область уже потеряла потенциал реминерализоваться.



Рис. 1.1.5. На последнем этапе разрушается значительная часть эмали. Кариес легко обнаруживается визуально. Необходимы стоматологические реставрационные процедуры.

### СЗМ исследования «зубного налета»

Объект исследований представлен в виде поперечных и продольных шлифов зубов, погруженных в емкость с формалином. При извлечении шлифа из консерванта на нем присутствует тонкий неравномерный слой формалина вследствие смачиваемости зуба раствором. Наличие слоя жидкости на поверхности образца отрицательно сказывается на возможности проведения эксперимента, т.к. в колебательный процесс кантилевера (контактного измерительного элемента) вмешиваются непредсказуемые приповерхностные силы, в результате чего в измеряемый сигнал вносятся шумы и большие искажения. На поверхности шлифа могут также присутствовать частички пыли, которые также отрицательно влияют на результаты исследований. Таким образом, достоверную информацию о структуре поверхности получить невозможно. Для удаления пленки жидкости шлиф зуба на некоторое время помещается на салфетку. В атмосферной среде при комнатной температуре формалин испаряется.

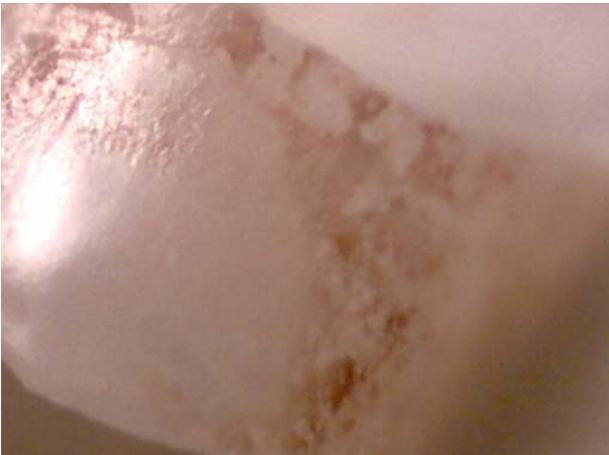
Для получения сканов поверхности образцов используется атомно-силовой микроскоп Solver P47H-PRO, производитель NT-MDT. Выбран сканер с широким пространственным диапазоном сканирования SC150 (50x50x3 мкм). Выбран метод полуконтактной микроскопии (Semi-Contact Microscopy), т.к. при этом взаимодействие зонда с образцом минимально (зонд не может изменять поверхность образца). Выбран кантилевер NSG10 для полуконтактной микроскопии с прямоугольной балкой. Для получения макроснимков шлифов зубов использовался микроскоп Intel.

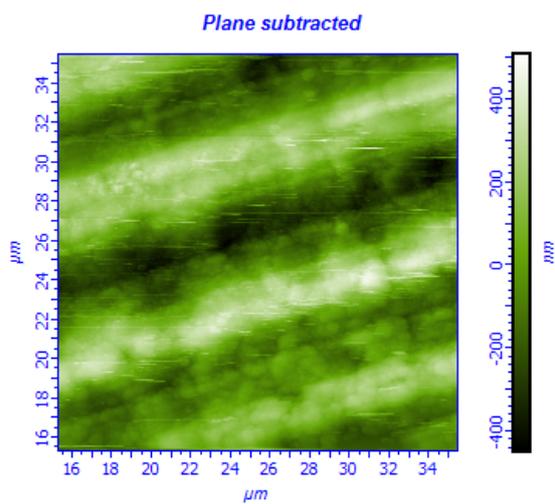
Перед началом опыта выполняется настройка, позиционирование кантилевера по отношению к лазерному лучу так, чтобы отраженный от кантилевера лазерный луч падал на

светоприемник, микроскоп калибруется на специальных калибровочных решетках с периодом 3 мкм.

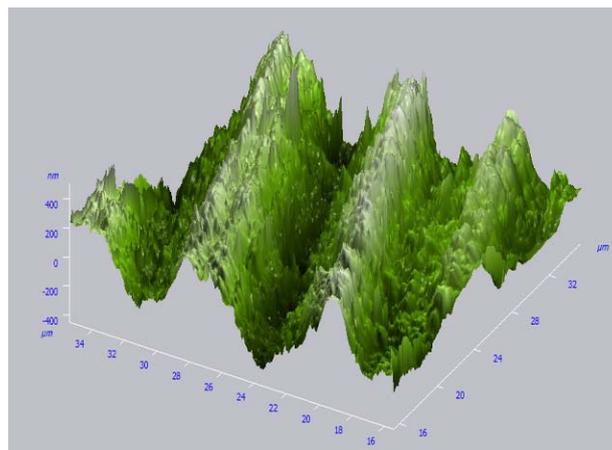
Далее образец помещается на слой двустороннего скотча, фиксируется в пластилине или воске на время сканирования. Подложка клипсами прижимается к держателю образца. После установки образца в микроскоп посредством микрометрических винтов выбирается область сканирования. Эта область должна находиться непосредственно под кантилевером. Далее идет подготовка микроскопа к работе. Выбирается резонансная частота работы кантилевера, выполняется подводка зонда к образцу. Выполняется сканирование.

### Эксперименты с образцами с «зубным налетом»

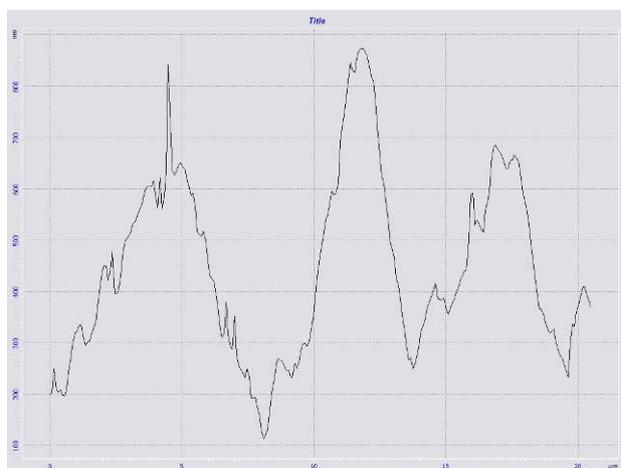
№	Результаты исследований	Результаты исследований
	 <p data-bbox="300 1084 791 1115">а) Шлиф № СН001-06 при 10х увеличении</p>	 <p data-bbox="938 1066 1430 1097">б) Шлиф № СН001-06 при 10х увеличении</p>
	 <p data-bbox="300 1599 791 1630">в) Шлиф № СН001-06 при 60х увеличении</p>	 <p data-bbox="938 1608 1430 1639">г) Шлиф № СН001-06 при 60х увеличении</p>



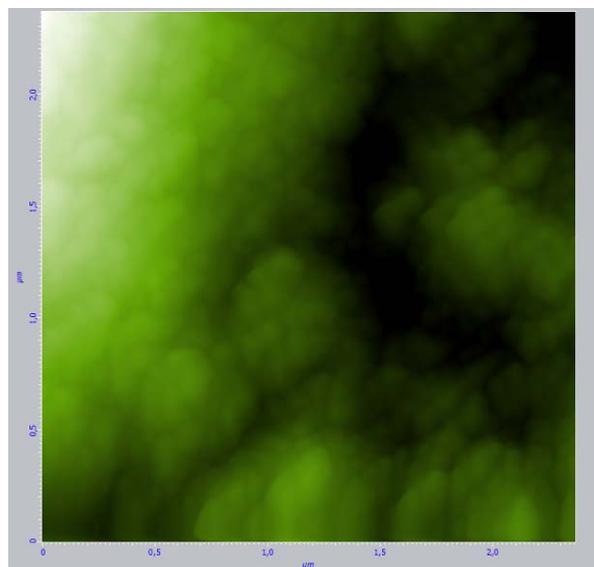
д) Шлиф № CH001-06 35x35 мкм



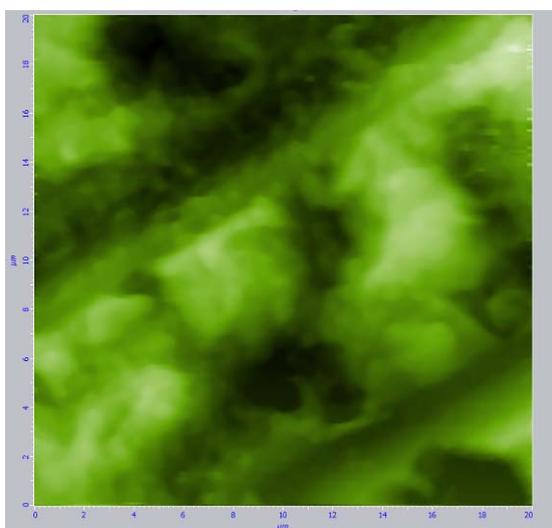
е) Шлиф № CH001-06 35x35 мкм



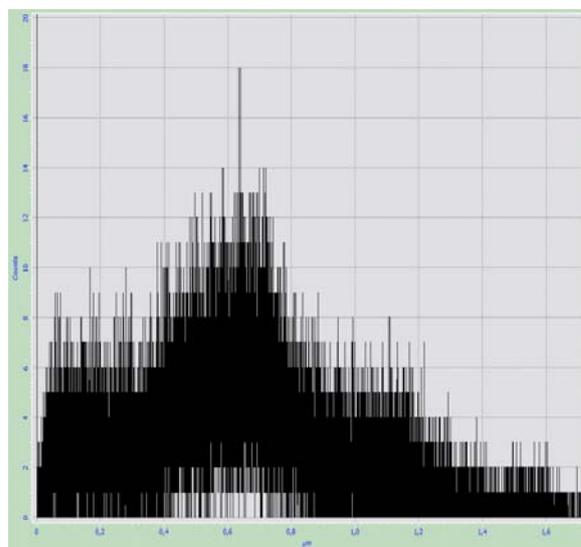
ж) Шлиф № CH001-06 35x35 мкм



з) Шлиф № CH001-06 2.5 мкм x 2.5 мкм

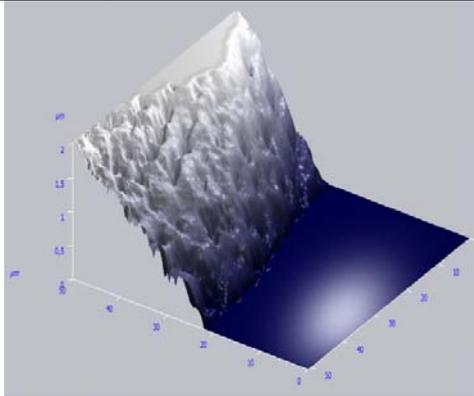
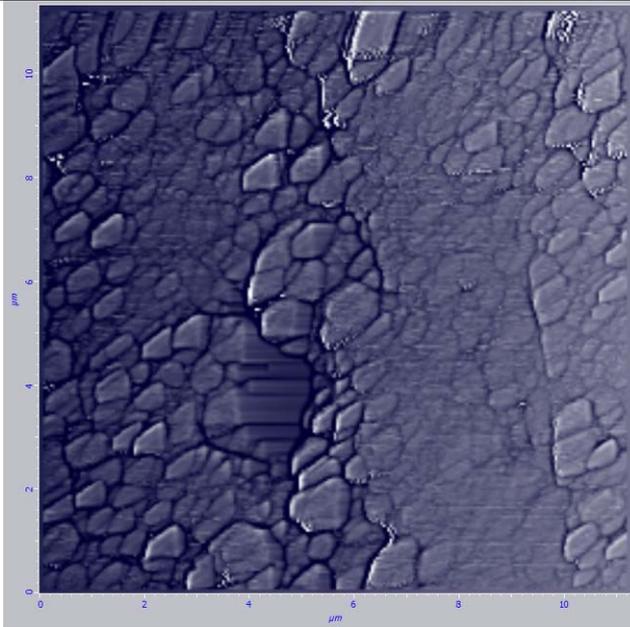
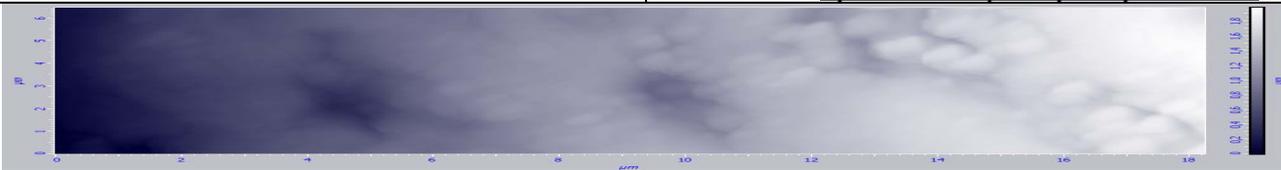
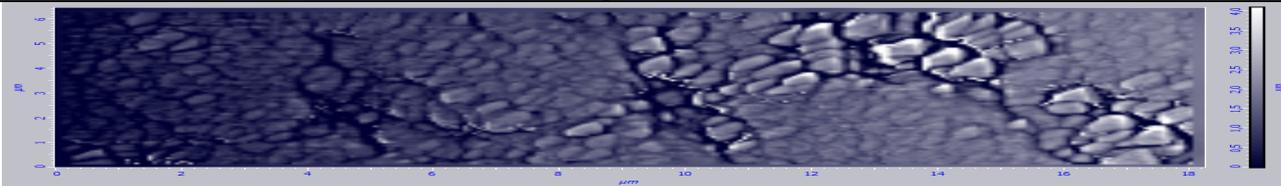


и) Шлиф № CH001-06 20x20 мкм



к) Шлиф № CH001-06, распределение точек скана по высотам

Уже при увеличении 60х (скан д) видно на поверхности шлифа зуба большое количество царапин, образующих отчетливую макроструктуру. Микроцарапины обнаруживаются и на сканах ж), особенно при анализе сечения поверхности и). Вероятно, царапины остались от инструмента для распиливания зубов. Скан ж) выполнен в области дентина. На нем можно различить зерно размером ~ 1 мкм. Сканы и) и к) выполнены в области, прилегающей к пульпе. Структура стала заметно менее упорядоченной. Зерно на скане к) имеет размер ~200 нм. На скане к) видны углубления, до дна которых зонд «не дотянулся», вероятно, перед нами дентиновые каналцы.

Результаты исследований	Результаты исследований
 <p data-bbox="245 949 703 1014">а) Шлиф № СН002-06 50x50 мкм б) Шлиф № СН002-06 12x12 мкм</p>	 <p data-bbox="954 1180 1469 1245">в) Шлиф № СН002-06 12x12 мкм. После применения фильтра Laplacian 5x5</p>
 <p data-bbox="683 1415 1054 1444">г) Шлиф № СН002-06 6x18 мкм</p>	
 <p data-bbox="395 1632 1342 1664">д) Шлиф № СН002-06 6x18 мкм. После применения фильтра Laplacian 5x5</p>	

На сканах а)-д) приведены изображения структуры налета. На левой части скана а) видно, что кантилевер «не дотянулся» до сканируемой поверхности вследствие ее кривизны. По правой части изображения можно говорить о том, что налет имеет слоистую структуру. Имеется множество регулярно расположенных впадин (пор) ~3-4 мкм, плотность которых составляет ~1 впадина/25 мкм<sup>2</sup>. Эти впадины с большим увеличением изображены на сканах в), д). Налет имеет зернистую структуру, зерна призматической формы (см. скан в) рядом со впадиной). Также надо заметить, что в порах и рядом с ними наблюдаются более крупные зерна (особенно видно на скане д)). Зерна вытянутой формы, возможно, из-за несимметричной механической нагрузки при формировании налета. Размер зерна колеблется от 150 нм до 1.5 мкм.

## Заключение

Анализ полученных сканов показал, что размер структурных элементов зубного налета не меньше 150нм. В среднем это объекты величиной ~0.8-2 мкм, т.е. их размер много больше нанотехнологической границы 100нм. Таким образом, зубной налет не относится к наноструктурированным материалам.

Отдельного исследования требуют вопросы, связанные со способом прикрепления «налета» к поверхности эмали, эти образования можно отнести к наноструктурированным образованиям, но их исследование связано с необходимостью специальной подготовки микрошлифов, а именно необходимо выполнить требования к общей форме зубных шлифов. В дальнейших планах проведение исследований свойств пломбировочных материалов, а частности, эффективности наноструктурированных пломбировочных материалов для **нанопоорного** пломбирования.

Дополнительно для исследования микро- и наноструктуры поверхности необходимо проводить ее предварительную обработку: полировку плоскости сканирования с последующим частичным ее протравливанием. Только после такой обработки можно будет говорить о различной ориентации кристаллов, градиенте плотности вещества, наличии различных структур и поверхностей разделов фаз между ними.

Исследования выполнялись при поддержке ЗАО «Нанотехнологические системы» (<http://www.nano-systems.ru>) и при использовании оборудования молодежного центра коллективного пользования «Нанотехнологические системы и наноэлектроника» кафедры Иу4 МГТУ им.Н.Э.Бумана (<http://nanotech.iu4.bmstu.ru>).

## Литература

1. Терапевтическая стоматология: /Е. В. Боровский, Ю. Ю. Барышева, Ю. М. Максимовский и др.; Под ред. Проф. Е. В. Боровского. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: /ООО/ Медицинское Информационное Агентство: /ТОО. Техлит, 1997. – 544 с. ISBN 5-89481-0003-5, ISBN 5-900990-02-8.
2. Профилактика стоматологических заболеваний – учебное пособие. Авторы: профессор Кузьмина Э. М., доценты Васина С. А., Петрина Е. С., Смирнова Т. А., ассистенты Гудкова Н. Л., Дорошина В. Ю., Зимина В. И. и др. Москва, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Московский медицинский стоматологический институт, кафедра профилактики стоматологических заболеваний, 1997.
3. <http://www.uic.edu/classes/peri/peri343/WhiteSpt/whitspt2.htm>

# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Заец М.В.**

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Власов А.И.*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4, г.Москва, Россия

## UNIVERSAL LASER SYSTEM DRIVES CONTROL BLOCK FOR 3D IMAGES FORMATION

**Zaets M.W.**

*Supervisor : Cand. Tech. Sci., the senior lecturer Vlasov A.I.*

MSTU n. a. N.E. Bauman, IU4 department Moscow, Russia

E-mail : [ztudent@gmail.com](mailto:ztudent@gmail.com)

### **Аннотация**

В работе рассматриваются проблемы создания трехмерного изображения в стекле методом координатных лазерных пробоев. В частности исследуется система позиционирования лазерного луча. Проведены исследования и доработка существующего образца лазерной установки. В результате был разработан универсальный блок управления, позволяющий увеличить производительность и надежность системы.

### **Abstract**

The project deals with the problem of 3D images formation in the glass, using coordinate laser disruption method. In particular laser beam positioning system being analyzed. Researches and existing laser system model modernization was done. As result universal control block, which can increase system productivity and reliability, was developed.

### **Введение**

Для того, чтобы обезопасить потребителя от контрафактной и не соответствующей по качеству продукции, выпускаемой в стеклянной таре, необходимо использовать высокотехнологичные методы маркировки тары. Одной из наиболее перспективных технологий маркировки является метод получения подповерхностных оптических пробоев в стекле, который при крупносерийном и массовом производстве не на много увеличивая себестоимость продукции, обеспечивает потребителю гарантированную возможность удостовериться в подлинности продукта. Защита такого уровня оправдана для:

- лекарственных препаратов в стеклянной таре
- косметических препаратов
- алкогольной продукции
- быстро портящихся продуктов питания
- продуктов детского питания
- высокотоксичных веществ.

Для создания подповерхностной маркировки используется патентованный способ формирования изображений в объеме стекла координатными лазерными пробоями [1]. Технология координатных лазерных пробоев для формирования изображений в оптически прозрачных твердотельных материалах впервые была предложена в конце 80-х годов в МГТУ им. Н.Э. Баумана. С середины 90-х годов по настоящее время технология используется для изготовления подарочной сувенирной продукции. Более широкое применение не рассматривалось.

Сфокусированное лазерное излучение производит в объеме стекла локальное разрушение (пробой), наблюдаемое как маленькая белая точка. Управляемый компьютером позиционер перемещает фокус лазерного излучения так, что множество точек, возникающее в стекле, образует изображение.

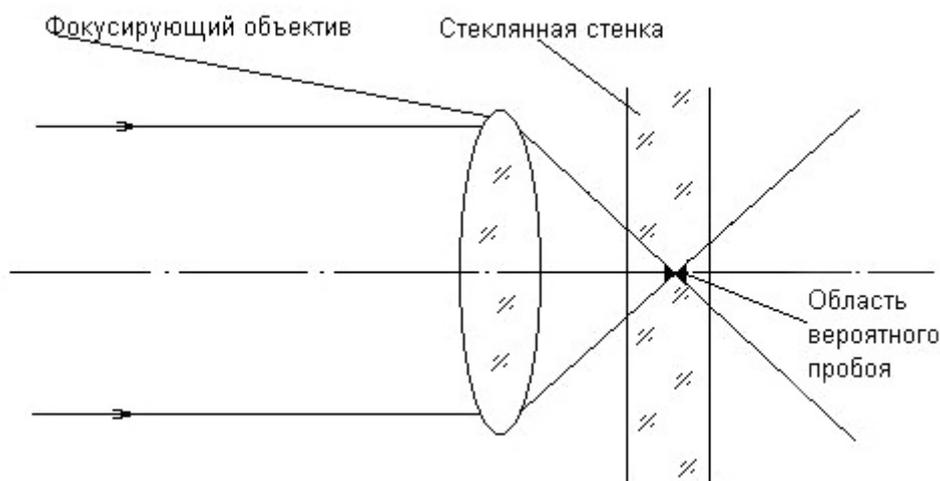


Рис.1. Принцип получения пробоя в объеме стекла.

Перемещение луча по двум координатам позволяет создать двумерное изображение. Перемещение объекта маркировки по третьей координате позволяет создать многослойное трехмерное изображение в объеме стекла. Таким образом, после формирования изображения в одной плоскости система перемещает заготовку вдоль прямой перпендикулярной плоскости формирования. Обозначим эту прямую как  $Z$ .

В плоскости  $XY$  перемещение зеркал осуществляют высокоскоростные линейные позиционеры, которые обеспечивают высокую точность позиционирования и не испытывают значительные статические нагрузки. Для из управления создается отдельный блок управления, который экранируется от остального электрооборудования системы, так как оперирует достаточно высокими напряжениями большой частоты.

Позиционер по координате  $Z$  (соосной с направлением силы тяжести) наоборот нагружается весом маркируемого объекта и удерживающих конструкций. Помимо этого он должен в течение времени формирования изображения в одной плоскости точно зафиксировать объект и исключить любые его случайные перемещения.

### Постановка и анализ задачи

Задачей является разработка структуры системы позиционирования обеспечивающей высокие точность, скорость и надежность. Точность должна быть не ниже точности позиционирования в плоскости  $XY$ . Время перемещения по координате  $Z$  должно быть сведено к минимально возможному. При высоких скоростях перемещения возникают также большие ускорения, которые могут сместить или повредить объект маркировки, поэтому должны быть предусмотрены по возможности плавные торможение и разгон двигателя. А после позиционирования необходимо жестко зафиксировать объект и исключить смещение под действием силы тяжести, толчков и вибраций, присутствующих на производстве.

Так как блок управления во время формирования изображения в плоскости бездействует, целесообразно возложить на него выполнение некоторых других задач управления.

Установка формирования может быть многоканальной, поэтому должны быть предусмотрены средства для расширения блока и подключения к нему нескольких двигателей.

## Разработка универсального блока управления приводами

За основу для разработки был взят существующий вариант системы позиционирования состоящий из униполярного четырехфазного шагового двигателя ДШ-0,4А, редуктора, подвижного стеклянного стола и микроконтроллерного блока управления.

Шаговый двигатель вполне соответствует требованиям. В качестве редуктора решено было применить последовательно червячную и винтовую пары, чтобы обеспечить достаточную точность позиционирования и надежное самоторможение. Хотя такой редуктор и имеет очень высокое передаточное отношение, однако шаговый двигатель в кратковременном режиме может разгоняться до весьма больших скоростей, поэтому применение червячной и винтовой пар вполне оправдано.

Стол оборудуется специальным устройством крепления в зависимости от размеров и формы объекта маркировки. В случае интеграции установки в конвейер, добавляется также подающее и съемное устройства.

Микроконтроллерный блок управления – наиболее важная часть установки. Подключается к компьютеру с помощью интерфейса RS-232. Использование этого интерфейса позволяет при необходимости организовать подключение по USB без серьезной модернизации аппаратного обеспечения и без каких-либо изменений в программном обеспечении. Например, с помощью преобразователей фирмы FTDI [2, 3].

Было решено совместить блок управления шаговым двигателем и блок управления затвором лазера, а так же установить обратную связь с блоком «XY» для увеличения производительности и для экономии ресурсов компьютера.



Рис.2. Структурная схема одноканального варианта установки формирования 3D изображений.

Для согласования уровней интерфейса RS-232 в уровни TTL логики используется преобразователь серии MAX232, как наиболее популярной и зарекомендовавшей себя [4]. Для повышения надежности и уменьшения габаритов пришлось отказаться от драйвера шагового двигателя на дискретных элементах в пользу универсальных однокристалльных драйверов (например L298 фирмы ST [5]). Драйвер затвора лазера представляет из себя классический блок гальванической развязки на оптронах. Для обеспечения повышенной надежности фиксации положения объекта после перемещения стола напряжение с обмоток двигателя не снимается. Таким образом фиксируется положение вала. Обратная связь с МК

обеспечивается датчиком (герконом) установленным в нижнем положении стола (нулевое положение). После анализа требуемых ресурсов был выбран МК серии PIC фирмы Microchip [6], как популярный недорогой 8-битный контроллер со встроенным периферийным модулем поддержки RS-232.

Установка работает следующим образом:

- при включении питания стол опускается в нижнюю точку, где с помощью датчика нулевого положения происходит синхронизация внутреннего счетчика МК с реальной координатой стола;
- контроллер фиксирует вал двигателя, после чего устройство переходит в ждущий режим;
- при подаче с ПК команд на формирование точек изображения позиционер XY перемещается в заданную точку, после чего выдает импульс контроллеру блока;
- контроллер блока, получив сигнал, открывает затвор лазера и генерируется один квантовый импульс;
- в результате в определенном месте объекта образуется локальное разрушение, которое выглядит как белая точка;
- при подаче с ПК команды перемещения стола в заданную точку контроллер вычисляет нужное количество шагов двигателя и скоростной режим;
- далее последовательно старт, разгон, рабочий ход, торможение, останов и фиксация двигателя (в это время позиционер XY перемещается в нужную точку заранее, а затвор лазера заблокирован);
- далее циклы повторяются, послойно образуя 3D изображение в объеме стекла.

Так как конструкция установки является модульной, достаточно просто можно увеличить число позиционеров и лазеров, добавляя необходимые драйверы. Это позволяет собирать сложные многоканальные установки без каких-либо серьезных изменений разработанных блоков. Так же можно производить замену лазеров и шагового двигателя заменой соответствующего драйвера – остальные компоненты являются универсальными. Для возможности интеграции в конвейер предусмотрена выдача сигналов завершения обработки объекта, для подачи следующего.

### **Заключение**

В результате работы были исследованы и устранены основные недостатки существующего варианта лазерной установки по формированию 3D изображений. Модульная структура разработанного блока допускает расширение и модернизацию изменением или увеличением количества необходимых блоков. Установка с новым универсальным блоком управления оптимизирована для интеграции в конвейер.

В дальнейшем планируется реализация подключения по шине USB и реализация сетевого управления с использованием технологий Ethernet. Предполагается в будущем разработать систему датчиков положения объекта на столе для дополнительного уточнения координат и для предупреждения брака в следствие смещения объекта в процессе маркировки.

### **Литература**

1. П.В. Агринский, А.Г. Григорьянц и др., Патент № 1838163 «Способ формирования изображений», 1992
2. А. Лысенко, Р. Назмутдинов, И. Малыгин, «Преобразователи интерфейса USB на микросхемах FT8U232AM, FT8U245AM», «Радио», 2002 г., №6, с. 20.
3. И.П. Копылов, Б.К. Клоков, «Справочник по электрическим машинам», том 2, Москва, Энергоатомиздат, 1988

# ПРОБЛЕМАТИКА ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

**Заворуев С.Н.**

*Научный руководитель к.т.н, доцент, Гриднев В.Н.*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

## SURFACE MOUNTING PROBLEMS OF HIGHTECHNOLOGY ELECTRONIC PACKAGE

**Zavoruev S.N.**

*Scientific adviser Candidate of Sciences (Techn.), senior lecturer, Gridnev V.N.*

BMSTU, Moscow, Russia.

[zavoruev@gmail.com](mailto:zavoruev@gmail.com)

### **Аннотация**

Статья посвящена проблемам поверхностного монтажа электронных модулей, в состав которых входят BGA микросхемы. Исследуется технология поверхностного монтажа высокотехнологичных модулей и операции по устранению брака монтажа компонентов BGA - реболлинга и деболлинга.

### **Abstract**

Article is devoted to surface mounting problems of electronic packages into which structure include BGA microcircuits. The surface mounting technology of hi-tech modules and repair operations of components BGA mounting is researched – reballing and deballing.

### **Введение**

С повышением требований к микроминиатюризации ЭМ все чаще разработчики применяют BGA/CSP микросхемы, что затрудняет процесс поверхностного монтажа и требует дополнительных технологических операций. При нарушении монтажа BGA компонентов производители вынуждены производить демонтаж и повторный монтаж BGA микросхем из-за высокой стоимости микросхем.

Reballing (реболлинг) – операция восстановления выводов BGA/CSP микросхемы.

Deballing (деболлинг) – операция удаления поврежденных выводов BGA/CSP микросхемы.

Рассмотрим типовой технологический процесс поверхностного монтажа и ремонта компонентов BGA.

### **Технологический процесс поверхностного монтажа и ремонта компонентов BGA.**

Рассмотрим техпроцесс поверхностного монтажа BGA компонентов (см. рис.1):

1. *Настройка оборудования:* включает в себя настройку ремонтной станции, настройку печи оплавления, закрепление BGA микросхемы. В случае использования рентген контроля необходимо предварительно включить и настроить рентгеновский станок.
2. *Подготовка материалов:* Важной операцией является подготовка паяльной пасты, которую предварительно необходимо нагреть до комнатной температуры и хорошо перемешать.

Все последующие операции связанные с BGA микросхемой следует производить на специально оборудованном рабочем месте с использованием защитных средств – антистатических браслетов и обуви.

3. *Выпайка BGA компонента:* Выпайка компонента производится местным нагревом печатной платы в области BGA микросхемы на ремонтной станции и включает следующие стадии:

- 3.1. Нанесение флюс-геля по периметру компонента.
- 3.2. Нагрев компонента на ремонтной станции в среде вакуума по заданному термопрофилю. Нагрев должен быть равномерным, что необходимо для равномерного расплавления массива шариков во избежании перегрева компонента.
- 3.3. Удаление компонента пинцетом с подставки, удаление платы из ремонтной станции.

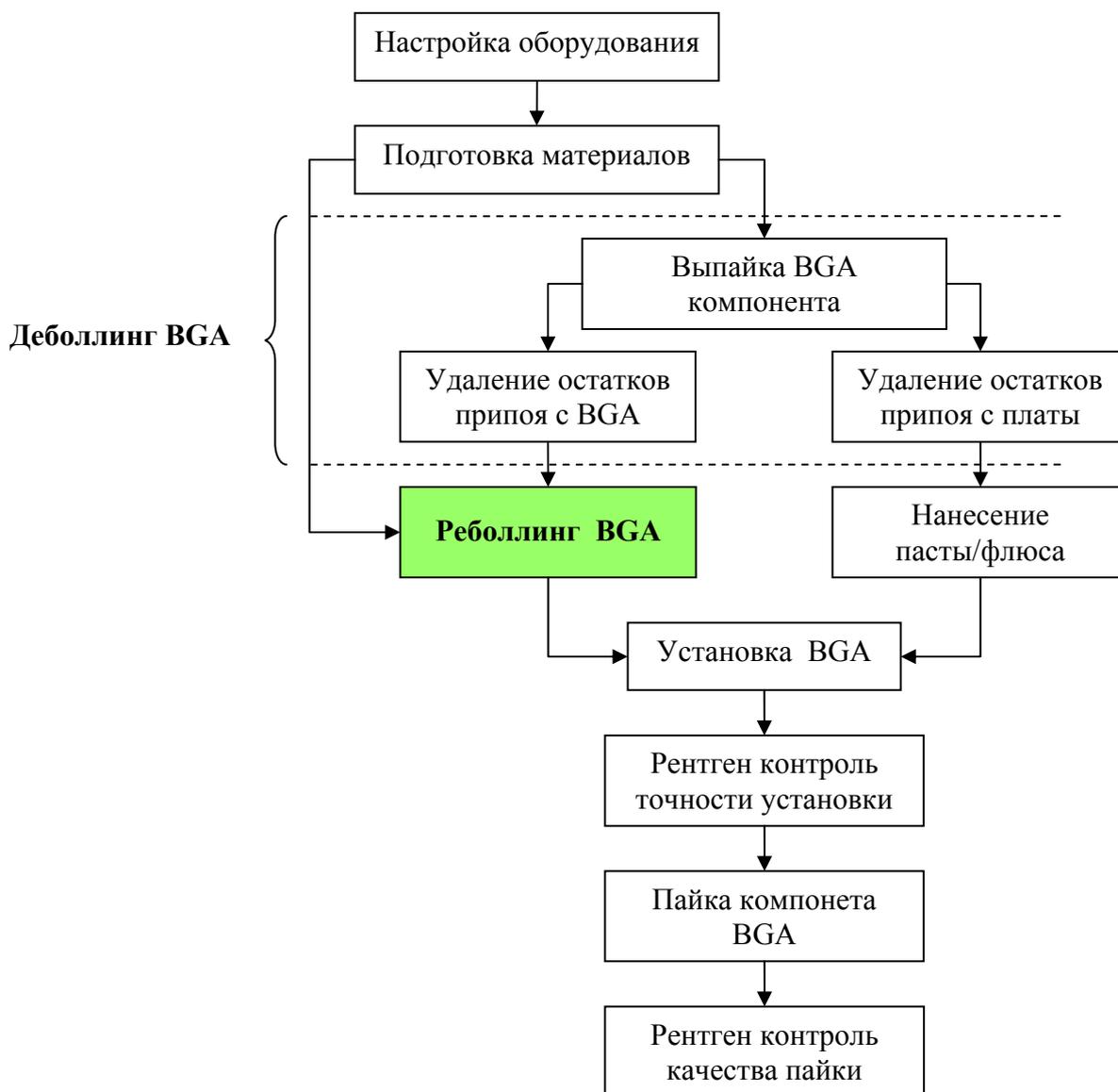


Рис.1 – Технологический процесс поверхностного монтажа BGA ИМС.

4. *Удаление остатков припоя с ПП и микросхемы.* Операцию можно производить двумя способами с помощью паяльника и с помощью термофена. В первом случае для повышения качества очистки КП следует использовать микроскоп. Остатки припоя удаляются с поверхности КП с помощью оплетки.

Произвести контроль качества работы с помощью микроскопа, удалить остатки флюса при помощи антифлюса, бязи и кисти. Продуть очищенную поверхность с помощью пневмокрana, убедиться с помощью микроскопа в отсутствии посторонних частиц на очищенных поверхностях.

5. *Реболлинг BGA*

Техпроцесс восстановления шариковых выводов с момента появления претерпел ряд улучшений.

В современном производстве используется несколько способов реболлинга.

**Способ 1. Восстановление BGA-шариков с помощью нанесения паяльной пасты через трафарет.**

1. Фиксация компонента на основании;
2. Нанесение флюса на контактные площадки печатной платы;
3. Совмещение трафарета с контактными площадками и его закрепление;
4. Нанесение паяльной пасты через отверстия трафарета на КП;
5. Оплавление паяльной пасты;
6. Съем трафарета.

**Способ 2. Нанесение BGA-шариков на площадки компонентов через гетенаксовый трафарет.**

1. Фиксация компонента/печатной платы на основании;
2. Разместить на станине рамки текстолитовую подложку таким образом, чтобы участок сплошного гладкого диэлектрика полностью перекрывал требуемые прорезы трафарета;
3. Закрывать рамку и нанести активный флюс в требуемые прорезы трафарета;
4. Дозатором нанести на центр рисунка примерно нужное количество шариков, размазывать смесь флюса с шариками по рисунку трафарета до тех пор пока шарики не займут большинство прорезей, в оставшиеся прорезы переместить шарики с поверхности трафарета тонким ручным инструментом (пинцетом);
5. Удалить с поверхности трафарета все лишние шарики в отдельную тару;
6. Произвести оплавление паяльной пасты;
7. Снять трафарет.

**Способ 3. Установка вручную BGA-шариков на площадки компонентов.**

1. Фиксация компонента/печатной платы на основании;
2. На очищенную поверхность компонента нанести активный флюс, излишки флюса удалить (толщина слоя флюса не должна превышать 1/5 диаметра устанавливаемых шариков)
3. На поверхность компонента насыпать примерно необходимое количество шариков.
4. При помощи тонкого монтажного инструмента осторожно расставить шарики по контактным площадкам, так чтобы они не отклонялись от площадки более чем на 1/3 своего диаметра, и соседние шарики не соприкасались.
5. Удалить лишние шарики с поверхности компонента в специальную тару, и убедиться что на каждой площадке установлен шарик в соответствии с предыдущим п.п. и удалены все лишние.
6. Осторожно переместить компонент на подложку для пайки и пропаять в печи конвекционного оплавления

7. *Нанесение паяльной пасты/флюса.* Нанесение пасты производится либо дозированием, либо через трафарет, имеющий апертуры только для КП BGA микросхемы

8. *Установка BGA микросхемы.* Установка микросхемы чаще производится полуавтоматическим методом с помощью установщика Fritch и специальных насадок для ИМС.

9. *Рентген-контроль точности установки.* На рентген-станке проверяют точность совмещения шариковых выводов и КП. В случае большого смещения компонента его передвигают. При небольшом смещении компонент выравнивается в процессе пайки за счет поверхностного натяжения расплавленного припоя.

10. *Пайка BGA компонента.* Пайку рекомендуется производить в конвекционной печи оплавление, чтобы избежать неравномерного нагрева компонента. Воздушный поток должен иметь вертикальное направление. Это исключит горизонтальные смещения компонентов. Ключевую роль в процессе пайки имеет термопрофиль, который выбирается исходя из особенностей паяемых компонентов и традиционно состоит из следующих основных зон: предварительный нагрев, нагрев до температуры пайки, пайка (кратковременная зона), охлаждение.

11. *Контроль качества пайки.* Контроль качества пайки производится на рентген-станке. Контролируются следующие параметры: форма галтели шарика со стороны КП печатной платы и со стороны корпуса микросхемы, смещение компонента, поры в шарике, наличие коротких замыканий.

### **Восприимчивость компонентов BGA и меры предосторожности**

1. Быстрые изменения в температуре приводят к температурному удару, вследствие неравномерного распределения внутренних температур в самом чипе. Быстрый нагрев только одной стороны BGA чипа может вызвать температурный удар на подложке чипа.
2. Повышенная температура: Пластиковые BGA чипы наиболее напоминают печатные платы. Их подложки состоят из закаленного стекла и обычно имеют Tg (температура стеклования) приблизительно 230 градусов С. Свыше температуры стеклования коэффициент термического расширения начинает возрастать, неблагоприятно влияя на внутренние температурные удары. Очень важно сохранять подложку чипа ниже данной температуры.
3. Рекомендуется, чтобы BGA компоненты никогда не нагревались более чем на 220 градусов С.
4. Внутренние удары возникают вследствие возникновения температурных градиентов и нагрузок внутри структуры чипа. Термические удары более заметны в процессе реболлинга, даже если присутствуют оба типа ударов. Для минимизации риска температурного удара тщательно следите за температурным циклом процесса. Равномерность нагрева является критичным фактором для минимизации ударов в чипе.
5. Восприимчивость к статическому заряду. Рекомендуется использовать защитные средства для предотвращения поражения компонентов статическим зарядом.

### **Заключение**

Возникший в последнее время интерес к реболлингу компонентов BGA способствует постоянному совершенствованию технологии. Следует отметить, что до настоящего момента не создана технология обеспечивающая высокую производительность для массового объема выпуска. Технология реболлинга состоит из большого количества операций и применяется для ремонтных работ по устранению производственного брака или в опытном производстве.

### **Литература**

1. С. Борисенков, Восстановление шариковых выводов микросхем в корпусах BGA|CSP, Журнал «Электроника» Наука, Технология, Бизнес, 2.2005, с.58-60.
2. Ю. Рыженко, Реболлинг (восстановление шариковых выводов) BGA компонентов (чипов), <http://www.laser-trafaret.ru>
3. А. Б. Смаков, Операции по устранению брака монтажа компонентов BGA.

# АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ.

**Родионов И.А.**

*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макаrchuk В.В.*  
Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## THE ANALYSIS OF EVOLUTION OF THE MODERN PROJECTIVE LITHOGRAPHY EQUIPMENT.

**Rodionov I.A.**

*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.*  
Russia, Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, faculty IU4  
e-mail: [ilro@bk.ru](mailto:ilro@bk.ru)

### **Аннотация**

В данной работе рассмотрены основные типы установок нанесения и экспонирования фоторезиста (ФР). На примере треков фирмы SITE приведен принцип их работы и основные рабочие модули. Проведен анализ динамики развития литографического оборудования ведущих мировых лидеров на примере оборудования компаний ASML и NIKON.

### **Abstract**

The main types of the resist make and expose installations were considered. The principles and the main modules of the SITE track were researched. The analysis of the equipment development dynamics was carried out on the example of the world leading equipment by NIKON and ASML.

### **Введение**

За всю историю микроэлектроники было предложено и опробовано множество различных систем для создания защитных масок. В основном все оборудование фотолитографии (ФЛ) можно разделить на два класса:

- установки для нанесения и проявления ФР;
- установки для экспонирования ФР.

Существует несколько принципиально различных способов нанесения пленок фоторезистов представляющих собой вязкие жидкости:

- пульверизация;
- окунание;
- центрифугирование.

Пульверизация представляет собой диспергирование жидкости в газовых потоках с высоким градиентом скорости. Ее недостатком является большая сложность получения тонких равномерных пленок при распылении на неподвижную пластину. Метод не нашел распространения, как и его разновидности: распыление на вращающуюся пластину и электростатическая пульверизация.

Окунание является наиболее простым способом получения пленок. Но поскольку получаемые пленки имеют слишком большую и сложно контролируемую толщину, то в ФЛ высокого разрешения он не применяется.

Центрифугирование является единственным методом нанесения пленок ФР, который используется при массовом производстве в современной микроэлектронной промышленности.

Среди используемых ранее и в настоящее время типов установок для экспонирования ФР существует большое разнообразие. Все они отличаются как по типу используемого в установке источника излучения, так и по принципу формирования изображения. Установки для экспонирования ФР будут рассмотрены ниже.

## Оборудование для нанесения и проявления ФР

Метод центрифугирования заключается в нанесении определенного количества ФР на быстровращающуюся пластину с последующим его перераспределением по всей площади пластины за счет центробежных сил. Используется множество разновидностей этого метода. Все они определяются различным порядком задания скоростей центрифуги, положения сопла подачи ФР над пластиной и момента его подачи.

Рассмотрим принцип действия и устройство установки для нанесения ФР центрифугированием на примере оборудования фирмы SITE. Установка представляет собой модульную конструкцию (рис. 1а) и может быть сконфигурирована по индивидуальным требованиям заказчика, установка обычно носит название «трек».



Рис. 1а. Установка для нанесения ФР SITE

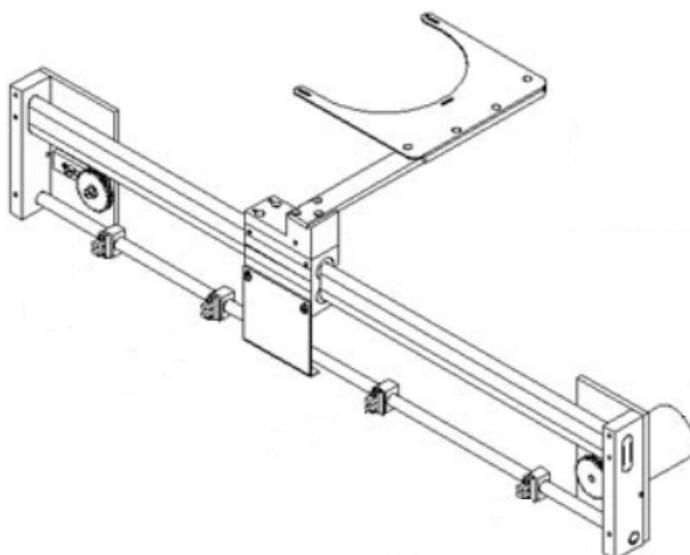


Рис. 1б. Линейная транспортная система, рука (LTA, Linear Transfer Arm)

В стандартном случае трек представлен следующими компонентами:

- холодная плита, ближняя на фото (CHILL);
- горячая плита, вторая и третья на фото (BAKE);
- центрифуга, на фото четвертая (SPIN).

Центрифуга служит для нанесения ФР непосредственно. Для получения равномерной пленки ФР требуется решить задачу динамики среды с переменной вязкостью, что влечет за собой множество технологических сложностей в практической реализации этого метода. Тем не менее, в настоящий момент этот метод позволяет получать пленки ФР толщиной от долей до единиц микрона со среднеквадратичным отклонением по толщине порядка единиц-десятков ангстрем.

Известно, что процесс нанесения ФР сопровождается поддержанием различных температурных режимов кремниевой пластины на различных его этапах. Для поддержания этих режимов предназначены холодная (обычно это 20°C) и горячая (70-150°C) плиты. Для транспортировки пластин между модулями трека используется линейная транспортная система (рис. 1б).

После нанесения концентрация растворителя в пленке ФР уменьшается от 70% по объему до 20% по объему, но этого недостаточно и требуется дополнительная сушка ФР. Для этого в треках используется горячая плита. Процесс мягкой сушки на такой плите уменьшает концентрацию растворителя примерно до 12% по объему. Дополнительно, эта сушка уменьшает напряжения в пленке ФР, улучшает плоскостность и помогает уменьшить

механические нарушения, которые могут возникнуть после нанесения. Это делает последующий перенос изображения на ФР более надежным и повторяемым.

Пластина кладется на подъемные иглы плиты в положении Above Hand (выше транспортной руки) и опускается ими на плиту. Время и скорость опускания, и нахождения пластины на плите задается программно. После пластина поднимается в исходное положение для дальнейшей транспортировки. Также программно задается расстояние между пластиной и плитой, существует три режима:

- КОНТАКТ - вакуумный контакт;
- пластина на плите, без зазора и без включенного вакуума;
- пластина на плите, с зазором (задается в дюймах).

Зависимость температуры кремниевой пластины от времени ее нахождения на плите представлена на графике (рис. 2)

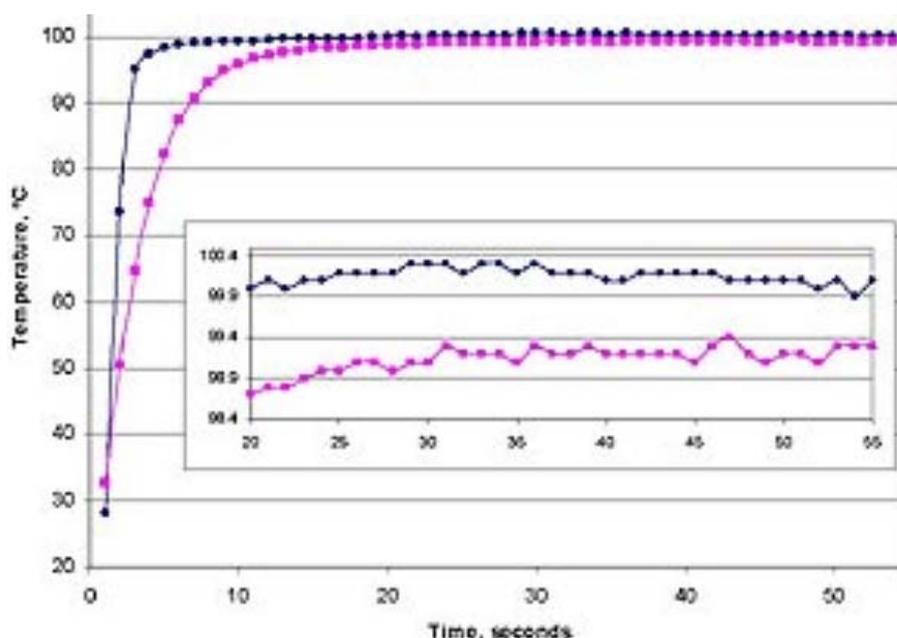


Рис.2 . Зависимость температуры пластины от времени ее нахождения на плите

Поскольку горячую пластину нельзя сразу помещать в кассету (SMIF-контейнер), то помимо горячей плиты треки содержат холодную плиту. В современных типах оборудования температура холодной плиты стабилизируется термостатом, так же как и температура горячей плиты, однако широко распространены системы, где температура холодной плиты определяется температурой воды циркулирующей в общем контуре охлаждения оборудования фабрики. Один трек может обрабатывать параллельно несколько пластин, если он оборудован соответствующим количеством центрифуг, горячих и холодных плит.

### **Анализ применяемых типов установок для экспонирования ФР**

Исторически первой методикой являлась контактная фотолитография (Contact Printing). В этом случае фотошаблон (ФС), представляющий собой стекло с пленкой хрома, в которой было заранее сформировано изображение в масштабе 1:1, накладывался на полупроводниковую пластину с нанесенной пленкой ФР. После этого производилось экспонирование с помощью лампы и конденсорной линзы формировавшей пучок параллельных лучей. Шаблон имел размеры равные размерам всей пластины. Совмещение нескольких технологических слоев выполнялось оператором вручную. При контактной литографии фотошаблоны быстро выходили из строя за счет накопления дефектов на их поверхности после каждого соприкосновения с пленкой ФР.

Модификацией этого метода стала фотолитография с зазором (Proximity Printing). В этом варианте между шаблоном и пластиной оставался небольшой зазор (рис. 3).

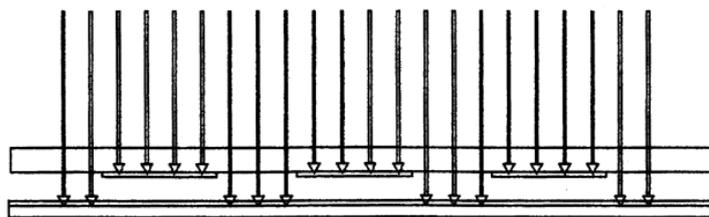
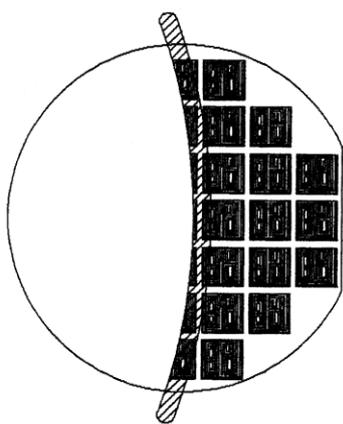


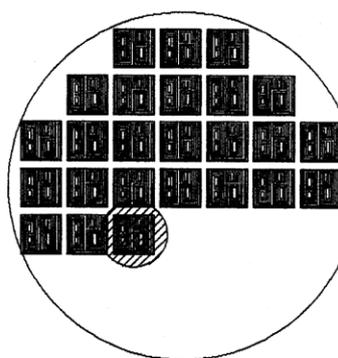
Рис. 3. ФЛ с зазором

С использованием фотолитографии с зазором удавалось получить разрешение порядка 2-3 мкм. Фотолитографию с зазором можно разделить в настоящее время на 3 вида:

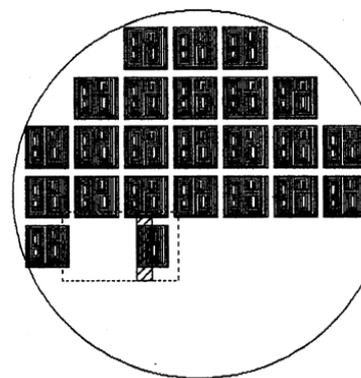
1. метод 1-х сканирующей литографии (рис. 4а);
2. степперы с n-кратным уменьшением (рис. 4б);
3. системы Step-and-Scan (рис. 4в).



4а. 1-х сканирующая литография



4б. Степперы с n-кратным уменьшением



4в. Системы Step-and-Scan

Рис. 4. Виды фотолитографии с зазором

В 1970х годах ФЛ с зазором была заменена методом сканирующей 1х фотолитографии (1x Scanner). Специальный оптический сканер проецировал изображение шаблона на поверхность пластины через систему линз. ФШ, как и при ФЛ с зазором, представляли собой хромовую маску на стекле в масштабе 1:1 размером, соответствующим размеру пластины. Использование оптической проекционной системы позволило убрать шаблон на значительное расстояние от пластины. Таким образом, возможность случайного повреждения ФШ в результате контакта с ФР была исключена. Для решения задачи проецирования изображения на пластины диаметром 100-150 мм в корпорации Perkin-Elmer была разработана система, которая синхронно перемещала пластину и шаблон через апертуру проекционных линз представляющую собой узкую дугу. Т.к. aberrации линз большого диаметра удавалось компенсировать только на каком-либо одном радиусе, то для данной оптической системы апертурной диафрагмой «вырезался» именно этот радиус линзы (рис. 4а). Т.к. числовая апертура такого сканера была равна примерно 0.17, центр широкого спектра осветителя лежал около 400 нм, то система позволяла разрешать размеры немного менее 2 мкм (в соответствии с критерием Релея).

В начале 1980х годов широкое распространение получили степперы с n-кратным уменьшением размеров (Reduction Steppers) в отечественной литературе называемые также установками прямого пошагового мультиплицирования с уменьшением изображения или мультипликаторами. В таких системах проекционная оптика позволяет экспонировать изображение только одного или нескольких близлежащих чипов одновременно. Поэтому для запечатки всей поверхности пластины она покадрово перемещается вместе с прецизионным

координатным столом (рис. 4б). Это влечет за собой увеличение суммарного времени экспонирования всей пластины, однако системы такого вида имеют большое количество достоинств.

Оптика степперов может иметь значительно более высокие апертуры. Уже самые первые степперы работавшие на g-линии излучения ртутной лампы (436 нм) с числовой апертурой 0.28 разрешали размеры порядка 1.25 мкм. Другим достоинством степперов является возможность применения фотошаблонов в масштабе от 4:1 до 10:1. Уменьшающая оптика позволила использовать ФШ с более низкими требованиями к качеству изображения, т.к. на ФШ требовалось разрешать n-кратные размеры с допустимостью больших уходов от нормы. Кроме того, допускалось наличие на ФШ дефектов больших размеров, т.к. при n-кратном уменьшении их размеров эффект присутствия дефектов нивелировался.

За всю историю существования степперов они подверглись значительной модернизации. В настоящее время широко распространены высокоапертурные степперы с числовой апертурой более 0.50. Последние модели ГУФ степперов используют в качестве источников излучения эксимерные лазеры с длиной волны 248 нм (KrF) и 193 нм (ArF). Модели, работающие на i-линии, имеют разрешение порядка 0.2-0.3 мкм, а последние разработки в области ФЛ (иммерсия) позволяют получать размеры 65 нм при использовании излучения ArF эксимерного лазера, а также усовершенствований в области проекционной оптики и методов изготовления ФШ.

Последней разработкой в области проекционного оборудования для фотолитографии стали так называемые пошаговые сканеры (Step-and-Scan). Этот тип оборудования также был впервые разработан корпорацией Perkin-Elmer. Преимущество такой системы состоит в возможности проецирования кадров больших по размеру, чем это могут позволить степперы. Это становится особенно важным при производстве микросхем памяти большой емкости. Эти чипы обычно имеют максимальные размеры по сравнению с другими видами продукции.

Системы такого типа используют уменьшающую 4x оптику и ФШ содержащие изображение одного или нескольких соседних чипов. Каждый кадр экспонируется путем синхронного сканирования ФШ и пластины через апертуру проекционной оптики (рис. 4в). Таким образом, эта система представляет собой сочетание лучших качеств сканеров без уменьшения размеров изображения и уменьшающих степперов. Такая система позволяет также повысить разрешение за счет того, что оптические aberrации объектива компенсируются тем, что каждый элемент изображения проецируется во время сканирования через различные участки линз.

Тем не менее, эта технология накладывает дополнительные требования к точности изготовления механики и всей системы в целом. Системы такого типа в последнее время получили широкое распространение и являются наиболее популярными в массовой технологии. Наиболее мощные установки имеют производительность порядка 100 пластин диаметром 300 мм в час.

В настоящее время для субмикронной фотолитографии серийно изготавливаются и применяются установки двух последних типов. В качестве источников излучения все еще применяются ртутные лампы высокого давления, но все большее распространение приобретают эксимерные лазеры, работающие в диапазоне глубокого ультрафиолета. Исследования в соответствующих областях позволили наладить серийный выпуск промышленных ГУФ лазеров имеющих достаточно высокую мощность (порядка 20Вт), чтобы обеспечить необходимую производительность установок. Таблицы 1, 2 представляет собой отражение истории развития степперов и сканеров мировых лидеров в производстве литографического оборудования ASML и Nikon.

**Анализ динамики развития литографического оборудования ведущих мировых лидеров (ASML, NIKON)**

*Таблица 1. Сравнительная характеристика различных моделей степперов и пошаговых сканеров фирмы ASML (Голландия).*

Год выпуска, производитель, модель	1977 GCA 4800 DSW	1995 i-line	1997 DUV: step&scan	1998 ASML stepper PAS5500/250C	2001 ASML step&scan PAS5500/1100	2004 ASML TWINSCAN XT:1400F
Масштаб	10:1	5:1	4:1	5:1	4:1	4:1
Источник излучения	Hg g-line	Hg i-line	KrF лазер	Hg i-line	ArF лазер	ArF лазер
Длина волны	436 нм	365 нм	248 нм	365 нм	193 нм	193 нм
Числовая апертура	0.28	0.6	0.6	0.48-0.6	0.5-0.75	0.65-0.93
Разрешение	1.25 мкм	0.4 мкм	0.25 мкм	≤0.3 мкм	≤0.1 мкм	≤65 нм
Размер кадра	10×10 мм	22×22 мм	26×32 мм	22×22 мм	26×32 мм	26×33 мм
Рассовмещение	500 нм	60 нм	30 нм	40 нм	20 нм	8 нм
Оптическая дисторсия	250 нм	50 нм	30 нм	40 нм	15 нм	5 нм
Размер пластин	3", 4", 5"	5", 6", 8"	6", 8", 12"	6", 8"	8"	8", 12"
Производительность, пластин/час	20 (4")	60 (6")	60 (6")	120 (6") 90 (8")	90 (8")	165 (8") 133 (12")

*Таблица 2. Сравнительная характеристика различных моделей степперов и пошаговых сканеров фирмы Nikon (Япония).*

Год выпуска, производитель, модель	1994 Nikon NSR-2205i11D	1995 Nikon NSR- S201A	1997 Nikon NSR- S202A	1998 Nikon NSR-S203B	2000 Nikon NSR- S205C	2005 Nikon NSR-S609B
Масштаб	5:1	4:1	4:1	4:1	4:1	4:1
Источник излучения	Hg i-line	KrF лазер	KrF лазер	KrF лазер	KrF лазер	ArF лазер
Длина волны	365 нм	248 нм	248 нм	248 нм	248 нм	193 нм
Числовая апертура	0.63	0.6	0.6	0.68	0.75	1.07
Разрешение	0.35 мкм	≤0.25 мкм	≤0.25 мкм	≤0.18 мкм	≤0.13 мкм	≤55 нм
Размер кадра	22×25.2 мм	25×33 мм	25×33 мм	25×33 мм	25×33 мм	26×33 мм
Рассовмещение	70 нм	50 нм	45 нм	40 нм	30 нм	7 нм
Размер пластин	-	-	-	-	12"	12"
Производительность, пластин/час	-	-	-	-	100 (12")	130 (12")

## Литература

1. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии — М.: Наука, 1990
2. James R. Sheats, Bruce W. Smith Microlithography: science and technology —Marcel Dekker, Inc., 1998
3. P. Rai-Choudhury Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication; volume 1: microlithography —
4. Bob Loreface, Dalton Chen, Bette Mullen, Emir Gurer, Ph.D., Richard Savage, Ph.D., Reese Reynolds How to Minimize Resist Usage During Spin Coating // Semiconductor International — 1998 — June
5. Chris A. Mack Swing curves and process window // Microlithography World — 1998 — Winter
6. Yingying Yiang, Ron Serafinowicz Swing curve simulations to simplify process optimization // Microlithography World — 1998 — Winter

## РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАРУЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЧАСОВ

Демин А.А., Климентьев А.А., Щербakov А.А., Шарикова В. В., Помигуев А.Г.,  
Полушкин С.А., Сорокин М.М.  
*Научный руководитель: профессор, д.т.н. В.А. Шахнов*  
*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.*

## DEVELOPMENT OF MULTIPURPOSE ELECTRONIC WATCH

*.Dyomin A.A., Klimentyev A.A., ShCherbakov A.A., Sharikova V.V.,  
Pomiguyev A.G., Polushkin S.A., Sorokin M.M.*  
*The supervisor of studies: the professor, d.t.s, V.A.Shakhnov*  
*BMSTU, Moscow, Russia.*

### Аннотация

Проект по разработке многофункциональных наручных электронных часов главным образом ориентирован на производство наручных часов, обладающих стильным, современным дизайном, не реализованными ранее функциями и высоким качеством. Главным нововведением проекта является интеллектуальный будильник, который определяет биологические фазы сна человека и выбирает оптимальное время срабатывания для более комфортного пробуждения человека.

### Abstract

The project of development multipurpose electronic watch is mainly focused on manufacture of the watch possessing stylish, modern design, the functions not realized earlier and high quality. The main innovation of the project is the intellectual alarm clock which defines biological sleep phases of the person and chooses optimum time of waking up for more comfortable awakening the person.

Для любого делового человека важно, чтобы его время расходовалось оптимальным образом, даже если это время сна. Известно, что продолжительность сна делится на несколько разных периодов активности организма (фаз сна), причем в определенные периоды времени человек погружен в глубокий сон и пробуждение в этот период очень затруднительно и болезненно, а в другие периоды времени, активность организма возрастает и человек находится на грани пробуждения. Эти фазы сна сменяют друг друга несколько раз в течение ночи. Если установить будильник в момент максимальной активности человека в необходимый период времени, то, даже встав немного раньше, человек будет чувствовать себя намного бодрее, чем, если бы он продолжал спать, например, лишние 15 минут.

Интеллектуальный будильник в наручных часах с помощью специального датчика будет собирать информацию об активности организма и составлять карту фаз сна, по

которой будет выбираться оптимальное время пробуждения, что позволит человеку просыпаться бодрым и максимально выспавшимся.

Разрабатываемый продукт - электронные наручные часы, позволяющие не только отслеживать время, но и обладающие также рядом уникальных функций и свойств:

- будильник, определяющий фазы сна, который срабатывает в оптимальное для пробуждения время, не позже заданного;

- программируемое расписание будильников;

- реализация высокой точности хода с автокоррекцией времени;

- автоматический обычный и лунный календари;

- определение времени восхода и заката с установкой будильника по нему;

- автоматический переход на зимнее/летнее время;

- локализация отображения информации в зависимости от региона;

- надежный металлический корпус, стойкий к царапинам и ударам;

- стильный представительский дизайн.

- Функция определение биологических фаз сна позволяет разбудить человека не только на границе между фазами, когда сон наименее глубокий, но и также в конце быстрой фазы, которая связана, в основном со сновидениями. Это позволит не забыть сон и дает возможность для его анализа.
- Функция составление карты фаз сна позволяет составить оптимальное расписание времени засыпания и просыпания на несколько дней вперед.
- Функция отслеживания активности организма позволяет разбудить человека, если он ворочается во сне пытаясь согреться из-за внезапного похолодания. Проснувшись, он сможет закрыть окно или укрыться потеплее чтобы не заболеть.

Во время собраний, презентаций или лекций, если доклад тянет ко сну, а быть в курсе все-таки надо, будильник может вывести из сонного состояния.

- Функция выбора программы пробуждения позволит разбудить человека в фазе глубокого сна, заранее подавая несколько звонков разной интенсивности до времени подъёма.

Сейчас нами разработаны все основные электронные модули, включающие в себя календарь, коррекцию времени, лунный и солнечный календарь, будильник по расписанию. В ближайшее время будет создана полная электронная эмуляция часов на языке описания электронных компонентов VHDL, по которому и будет создана оригинальная электронная схема. Структурная схема электронного модуля часов приведена на рисунке 1. Проект занял 2-е место в конкурсе бизнес проектов в рамках семинара «Гражданская смена».

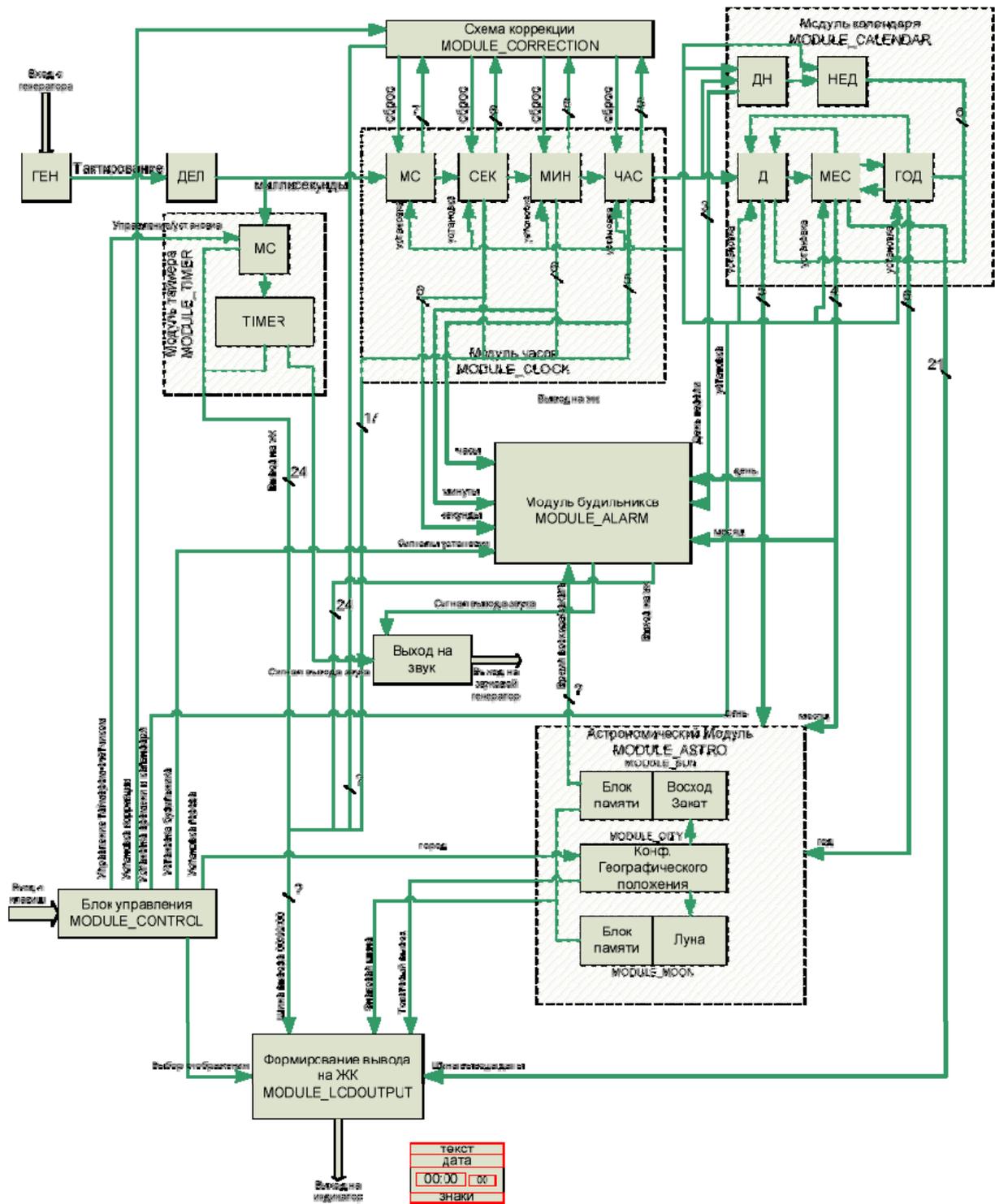


Рисунок 1. Структурная схема электронного модуля часов.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТОГРАФИИ НА МИНИМАЛЬНЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ НА КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

**Родионов И.А.**

*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макаrchuk В.В.*

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## THE INFLUENCE OF LITHOGRAPHY TECHNOLOGICAL PROCESS PARAMETERS ON THE CRITICAL DIMENSION OF THE ELEMENTS DERIVABLE ON SILICON WAFER RESEARCH.

**Rodionov I.A.**

*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.*

Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

e-mail: [ilro@bk.ru](mailto:ilro@bk.ru)

### *Аннотация*

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния параметров литографического процесса на получаемые минимальные критические размеры элементов на кремниевой пластине. Построены 4 процессных окна в координатах «фокус — доза экспозиции» (FEM). В результате сформулированы рекомендации по использованию режимов экспонирования для получения оптимальных параметров, получаемых на кремниевой пластине структур.

### *Abstract*

The research of lithography process parameters influence on the critical dimension on the silicon wafer was carried out. Four process windows in “focus – exposition doze” coordinates were built. As a result of the process windows analysis, recommendations on using the exhibition modes for getting the optimal parameters of the structures, formed on the silicon wafer were developed.

### **Введение**

Сегодня микроэлектроника является одним из основных направлений научно-технического развития наиболее развитых мировых держав. А уровень развития и объемы производства ее основных изделий - интегральных схем (ИС) во многом определяет оборонный, экономический и культурный потенциалы страны. Последнее десятилетие способность страны производить собственные ИС на современном уровне определяет ее, как научно и технически развитую. Анализ тенденций развития микроэлектроники показывает, что ключевая проблема в ближайшее десятилетие - освоение крупносерийного производства гигантских интегральных микросхем (ГИС), содержащих  $10^9$ - $5 \times 10^{10}$  транзисторов с минимальными размерами 90-32 нм и допуском  $\pm 10\%$ , систем-на-кристалле (SoC), систем-в-корпусе (SiP) с минимальными размерами элементов 500-100 нм.

В 1965 году Гордон Мур отметил, что число элементов наиболее сложной из существующих интегральных схем ежегодно удваивается. В 1959 году появился первый планарный транзистор, а в 1965-м уже выпускались микросхемы, состоящие из 50-60 элементов. Тогда Мур сделал прогноз, согласно которому эта тенденция должна была сохраниться в течение последующих 10 лет, и в 1975 году этот закон подтвердился.

В своем первоначальном прогнозе Мур предположил, что удвоение числа элементов в интегральных схемах будет происходить за счет трех факторов: на 50% – за счет увеличения разрешающей способности литографии; на 25% – за счет увеличения размера кристалла благодаря улучшению производственных процессов и литографии; и на остающиеся 25% – за счет разного рода инноваций, в частности появления новых методов формирования элементов на кристалле (из которых подавляющее число составляют транзисторы).

Основываясь на предположении, что расходы на производство кристалла будут расти медленнее, чем число элементов, Мур указал также, что результатом роста числа элементов на кристалле станет снижение стоимости на элемент. Результирующее экспоненциальное снижение стоимости на функцию и является реальной движущей силой развития полупроводниковой индустрии и информационных технологий в целом. Суть не в постоянстве темпов роста числа элементов, а в том, что темпы увеличения числа элементов (и функций, соответственно) – выше, чем темпы роста стоимости производства кристалла. Темпы удвоения в законе Мура были пересмотрены однажды в прошлом, и могут измениться вновь, но пока стоимость в пересчете на функцию падает, информационная революция будет продолжаться.

Так как в современных схемотехнических решениях основным и самым распространенным элементом является транзистор, поэтому именно стоимость его получения определяет и стоимость технологии в целом. Особенностью транзисторов является то, что их производительность увеличивается одновременно с тем, как стоимость и размеры уменьшаются. Единственное устройство, имеющее такую же особенность при сравнимых темпах уменьшения габаритов – магнитные диски. Современные транзисторы в 20 раз быстрее и в 100 с лишним раз меньше, чем те, что выпускались два десятилетия лет назад. Однако до сих пор не удается точно спрогнозировать, каким будет предельный минимальный размер транзистора, полученного при помощи проекционной фотолитографии (ФЛ). Этот прогнозируемый предел отодвигался все дальше примерно с той же скоростью, с какой уменьшались реальные размеры транзисторов. Основной частью транзистора, определяющей его частотные и мощностные характеристики, является поликремниевый затвор. Данная работа направлена на получение заданных размеров затвора.

### **Построение процессных окон «фокус-доза экспозиции»**

Для получения заданных размеров маски на кремниевой пластине необходимо рассчитать и опытно подтвердить некоторое количество параметров литографического процесса. В частности, одними из важнейших таких параметров являются настройки оптического тракта проекционной установки. В данной работе приведены результаты серии экспериментов по подбору оптимальных значений фокуса и дозы экспозиции проекционной установки для обеспечения стабильной повторяемости размеров элементов номиналом 0.35 мкм в слое поликремния.

Важнейшей технологической характеристикой является *ширина процессного окна*, т.е. диапазон изменения каких-либо процессных параметров (в данном случае фокуса и дозы экспозиции) в пределах которого получаемый результат (размер контрольного элемента) не выходит за рамки допуска.

Одной из особенностей технологического слоя поликремниевых затворов является необходимость одновременной проработки в одном размере как изолированных, так и плотно упакованных структур. В этом случае особенно важен контроль взаимного ухода размеров на структурах различной плотности заполнения от номинального значения.

Ширина линий для плотно упакованных структур уменьшается после травления, для полностью изолированных структур – увеличивается. Поэтому индивидуальные процессные окна смещаются относительно энергии экспозиции. Существует два способа борьбы с указанными проблемами: введение фигур коррекции при проектировании ФШ и настройка оптических параметров установки пошагового мультиплицирования для уменьшения влияния оптических эффектов на изменение критических размеров элементов на кремниевой пластине.

#### ***Исходные данные***

В работе использовался позитивный среднеконтрастный фоторезист ультравысокого разрешения фирмы ТОК, Япония THMR-iP3650 HP. Этот слабвязкий резист предназначен для формирования масок толщиной порядка 0.8 мкм и предельными размерами элементов < 300 нм при экспонировании излучением i-линии ртутной лампы сверхвысокого давления.

Резист отличается отличным сочетанием свойств, позволяющих получать равномерные бездефектные пленки при минимальном расходе реактива.

Сушка ФР была проведена при 90°C с выдержкой 60 секунд, задубливание – при 110°C с выдержкой 60 секунд. Для операций подготовки поверхности пластин, нанесения и проявления фоторезиста использовались треки Millennium 2000 фирмы SITE Service Inc..

Засветка ФР была проведена на установке пошаговой мультипликации фирмы ASML. При экспонировании также использовалось внеосевое анулярное освещение (рис. 1). Используемая установка пошаговой мультипликации позволяет использовать анулярное освещение без потери производительности (цифрами обозначены дифракционные порядки).

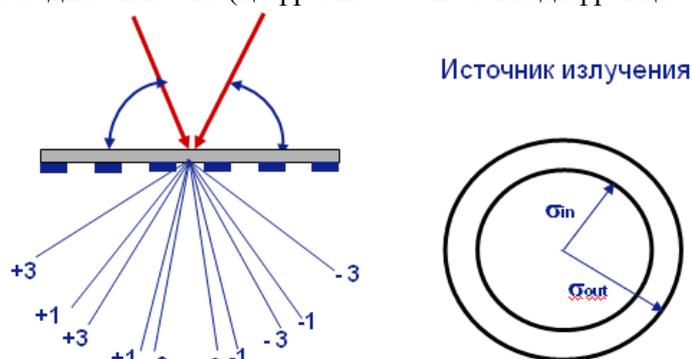


Рис. 1. Схема засветки анулярным внеосевым освещением

В статье [3] подробно рассмотрен вопрос подбора режимов работы осветителя с целью расширения процессного окна. Авторами указанной статьи были определены наилучшие значения частичной когерентности для осевого и внеосевого освещения с учетом этого фактора. Внеосевое освещение может привести к значительному взаимному уходу размеров, однако оно также расширяет глубину фокуса для плотных структур. Оптимальными значениями параметров внеосевого анулярного освещения являются:  $\sigma_{in}=0.35$  и  $\sigma_{out}=0.70$ .

Для проведения эксперимента были подготовлены две пластины с толщинами фоторезиста соответствующими минимуму (пластины №1 и №2) и максимуму (пластины №3 и №4) колебательной кривой. На каждой из пластин был дважды выполнен тест для экспонирования матрицы «фокус — доза экспозиции» (FEM).

Первый тест выполнялся с использованием осевого освещения (степень когерентности,  $\sigma=0.70$ ), второй раз — с использованием параметров внеосевого освещения, рекомендованных в статье [4] (внеосевое освещение,  $\sigma_{in}=0.35$  и  $\sigma_{out}=0.70$ ). С целью получения минимально достижимых на установке размеров, значение числовой апертуры было выбрано максимально возможным для данного степпера ( $NA=0.60$ ). Все исходные данные эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные эксперимента по построению процессных окон «фокус — доза экспозиции»

№	Толщина нанесенного резиста, нм	СКО толщины резиста, нм	Плоскостность пластины, мкм	Параметры внеосевого освещения	
				$\sigma_{in}$	$\sigma_{out}$
1	715	3	0,44	0	0,7
2			0,44	0,35	0,7
3	761	3	0,21	0	0,7
4			0,23	0,35	0,7

## Результаты экспериментального исследования результатов

Пластины были проявлены по стандартному режиму проявления. Измерение размеров элементов матриц на проявленных пластинах проводилось по контрольной мере 300 нм с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, рис. 2).

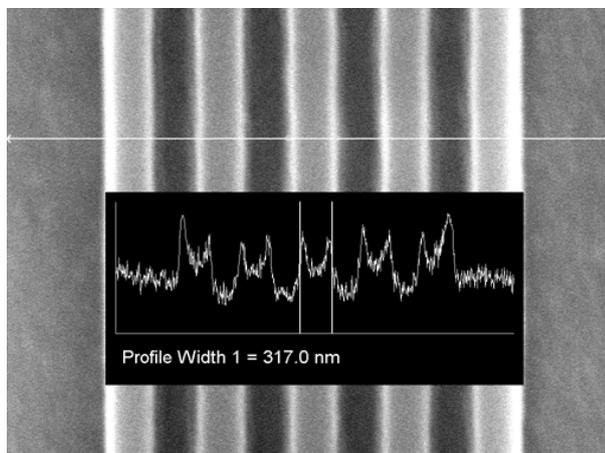


Рис. 2. Измерение контрольной меры 300 нм с помощью СЭМ.

В результате были получены четыре процессных окна. Анализ результатов измерений одного из полученных процессных окон приведен в таблице 2.

Таблица 2. Процессное окно «фокус — доза экспозиции» ( $NA=0.6$ ,  $\sigma_{in}=0$  и  $\sigma_{out}=0.70$ ) в точке максимума отражения от пленки

№3	170	175	180	185	190	195	210	215	220	225	235	240	245	260	265	270	E
-	331								257								
-									268								
-		324							295				275				
-																	
-									294								
-																	
-									294								
-																	
-	335	328		320	317			310	302			286				273	269
-									301								
-									297								
-									290								
-				324													
-									301								
0													275				
0.1									312								
0.2									333								
F																	

Процессные окна ограничены по оси дозы экспонирования 10% уходом размера от номинала в обе стороны, а по оси фокуса — также и проработкой элементов меры (углом наклона боковой стенки, сквозной проработкой). Примеры проработанного изображения измерительной меры и дефектов возникающих при выходе за пределы процессного окна приведены на рисунках 3, 4.

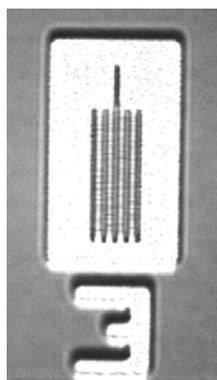
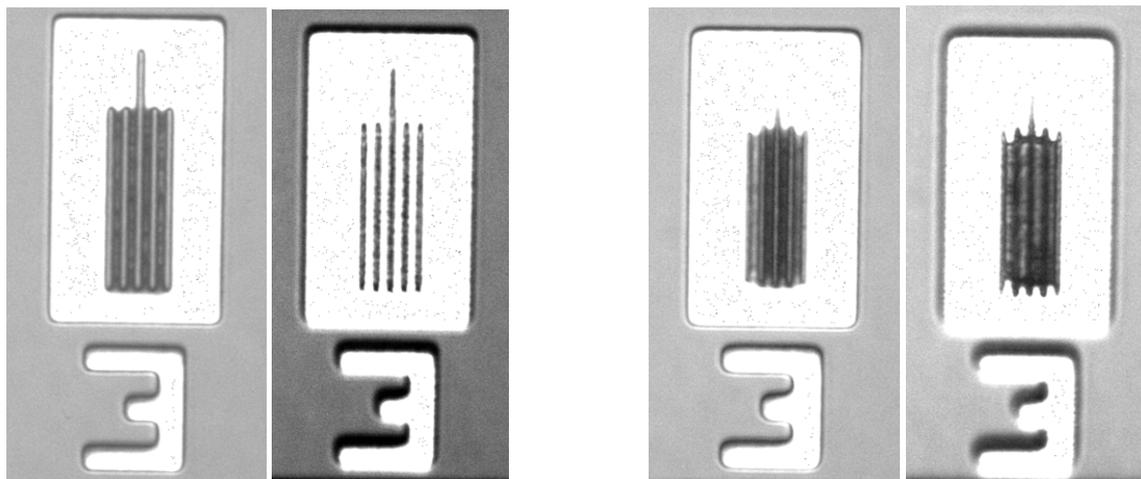


Рис. 3. Проработанная мира 0.3 мкм.



4а. недостаточная и избыточная дозы экспонирования

4б. выход за пределы глубины фокуса в обе стороны

Рис. 4. Выход за пределы процессного окна «фокус — доза экспозиции».

Использование контрольной миры для проведения подобных измерений позволяет оператору, в случае серийного производства, определить качество проработки «невооруженным» глазом.

#### Анализ полученных результатов. Рекомендации по использованию режимов экспонирования

В таблице 3 приведены процессные характеристики найденные, по процессным окнам  $E_S$  — доза необходимая для проработки номинального размера,  $E_l$  — диапазон дозы, удовлетворяющий 10% отклонению размера от номинала. Абсолютное значение фокуса  $f$  привязано к настройкам конкретной установки, величина дефокусировки определяется диапазоном, удовлетворяющим 10% отклонению размера от номинала и качественной проработкой элементов миры.

Таблица 3. Характеристики найденные по процессным окнам

№	$E_S$ , мДж/см <sup>2</sup>	$E_l$ , мДж/см <sup>2</sup>	$E_l$ , %	$f$ , мкм	$\Delta f$ , мкм
1	170	25	14,7	-0,6	1,1
2	165	20	12,1	-0,4	1,3
3	220	90	40,9	-0,5	1,2
4	220	40	18,2	-0,5	1,4

Из таблицы видно, что процессные окна, полученные на пластине покрытой пленкой резиста с толщиной соответствующей минимуму отражения излучения (№1 и №2), имеют значительно меньшую ширину процессного окна. Этот эффект связан с возникновением стоячей волны в пленке фоторезиста во время экспонирования. Стоячая волна приводит к заметному искажению профиля элементов изображения и значительно более быстрому уходу размера при изменении дозы экспозиции.

Для подбора оптимальной толщины фоторезиста, соответствующей максимально широкому процессному окну рекомендуется использовать математическую модель зависимости коэффициента отражения от многослойной структуры. Модель требует предварительной отстройки, которая должна быть однократно осуществлена для данного типа фоторезиста и оборудования. После отработки параметров модели и проведения экспериментов, подтверждающих ее практическую пригодность, она может быть использована для прогнозирования оптимальной толщины ФР. Следует выбирать точку максимума коэффициента отражения ближайшую к требуемой по технологическому маршруту толщине фоторезиста. В случае рельефного подслоя, можно рекомендовать использовать режим внеосевого освещения с оптимальными для данных условий характеристиками.

Использование внеосевого освещения показало более высокий потенциал для получения размеров  $< 300$  нм, чем осевое освещение. При использовании внеосевого освещения глубина фокуса возросла на 15%. Однако 15%-ное увеличение глубины фокуса повлекло 50%-ное сокращение ширины процессного окна, для случая максимального поглощения излучения (пластины №3 и №4).

Тем не менее, 18% ширина процессного окна (пластина №4, внеосевое освещение, максимум коэффициента отражения, максимум значения глубины фокуса) может считаться вполне достаточной и, в случае работы по рельефной подложке. Внеосевое освещение может использоваться для обеспечения максимально высокой глубины фокуса без уменьшения апертуры оптической системы.

В результате эксперимента была подтверждена возможность получения структур с критическими размерами 300 нм путем настройки процессных параметров (без введения коррекции). Для получения меньших критических размеров при равномерной проработке изолированных и плотно упакованных структур по всей поверхности кремниевой пластины, необходимо введение фигур коррекции эффектов близости (ОРС) элементов.

Полученные результаты справедливы для конкретного ТП, так как процессные параметры оригинальны и изменяются даже для двух установок пошаговой мультипликации одной модели. Процессные параметры могут быть изменены инженером-технологом при помощи модуля управления установкой пошаговой мультипликации, тогда как процесс реинжиниринга ФШ, т.е. введение правил проектирования ФШ с использованием ОРС коррекции и их применение – это долгий итерационный процесс. Поэтому актуальность и экономическая целесообразность проведенных исследований очевидны.

## Литература

6. Жабреев В.А., Основы субмикронной технологии : Учеб. пособие / В. А. Жабреев, В. И. Марголин, В. А. Мошников ; М-во образования РФ. С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т "ЛЭТИ", СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2001.
7. Лыньков Л.М., Субмикронная литография / Л. М. Лыньков, С. Л. Прищепа; М-во образования Беларусь. Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. Науч.-исслед., Минск, 1999.
8. Jo Finders, Plamen Tzviatkov, Kurt Ronse, Luc Van den hove Optimizing i-line lithography for 0.3-um poly-gate manufacturing // Solid State Technology — 1997 — March
9. Баканов Г.Ф., Фотолитография, М-во образования РФ, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.

## “HIGH-K AND METAL GATE” ТРАНЗИСТОРЫ

Егоров Д.А.

*Научный руководитель: д.т.н., профессор Мысловский Э.В.*

МГТУ им. Баумана, г. Москва, Россия

## HIGH-K AND METAL GATE TRANSISTORS

Yegorov D.A.

*Scientific adviser: Doctor of technical science, professor Myslovsky E.V.*

BMSTU, Moscow, Russia

### Аннотация

Настоящая работа посвящена отличительным особенностям и преимуществам новой технологии производства МДП транзисторов. Особое внимание уделено физическим основам различий работы «high-k and metal gate» транзисторов и классических МДП транзисторов.

### Abstract

The work is devoted to the distinctive features and advantages of the new technology of MOS transistor manufacturing. The main attention is concentrated at physical principles of differences in high-k and metal gate and classic transistors functioning.

26 января 2007 года в девять часов вечера Intel провела тайную пресс-конференцию ☺. На ней было объявлено о революционной технологии производства МДП транзисторов. Часом позже о технологическом прорыве сообщила корпорация IBM.

После почти десятилетия серьезных научных исследований наконец-то получен результат.

В Intel разработан новый технологический процесс изготовления МДП транзисторов. Это так называемые «high-k and metal gate» транзисторы, ставшие самым большим достижением с конца шестидесятых годов.

Различия в структуре классического и high-k and metal gate транзистора приведены на рисунке 1.

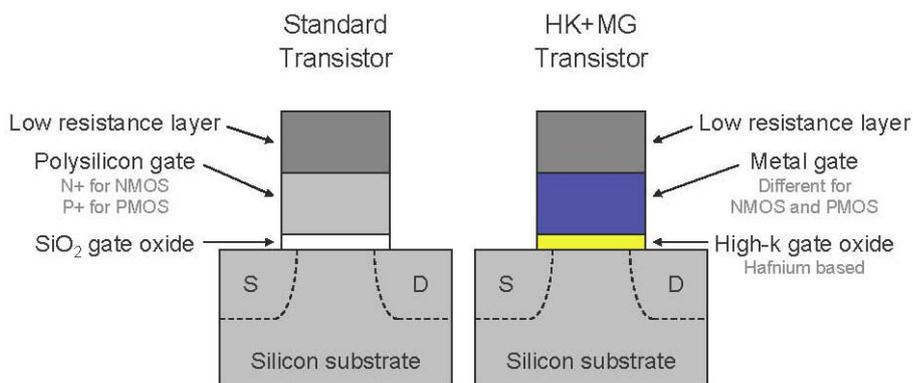


Рис. 1. Различия в структуре классического и high-k and metal gate транзистора.

Обозначения рисунка 1: low resistance layer – слой небольшого сопротивления; polysilicon gate – поликристаллический затвор; SiO<sub>2</sub> gate oxide – SiO<sub>2</sub> изолятор затвора; metal gate – металлический затвор; high-k gate oxide – диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью; S –исток; D – сток; silicon substrate – кремниевая подложка.

В обычном МДП транзисторе ток может течь по полупроводниковому каналу между истоком и стоком. С помощью изменения напряжения на затворе можно менять проводимость канала и таким образом управлять током транзистора.

Для увеличения быстродействия и плотности элементов на кристалле размеры транзисторов уменьшают. При уменьшении размеров транзистора толщина слоя изолятора затвора и длина затвора уменьшаются. В результате через слой изолятора затвора возникают утечки (рис.2).

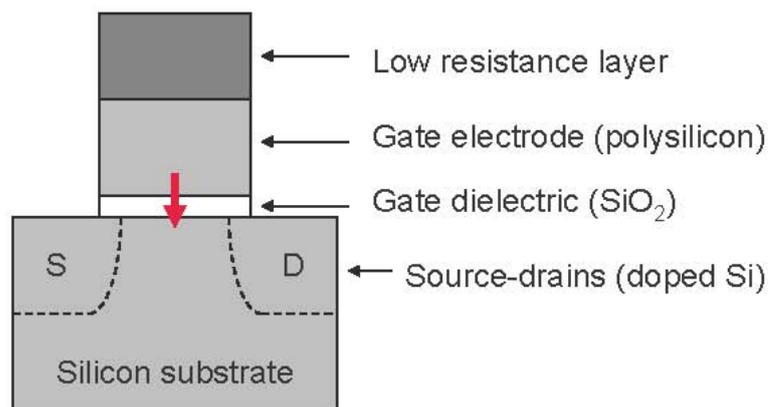


Рис. 2 Возникновение токов утечки при уменьшении толщины изолятора затвора.

Утечки приводят к дополнительному нагреву транзистора и снижают его быстродействие. К тому же во время работы транзистора в нижней части поликристаллического затвора возникает область обеднённая носителями заряда («depletion region» на рис.3).

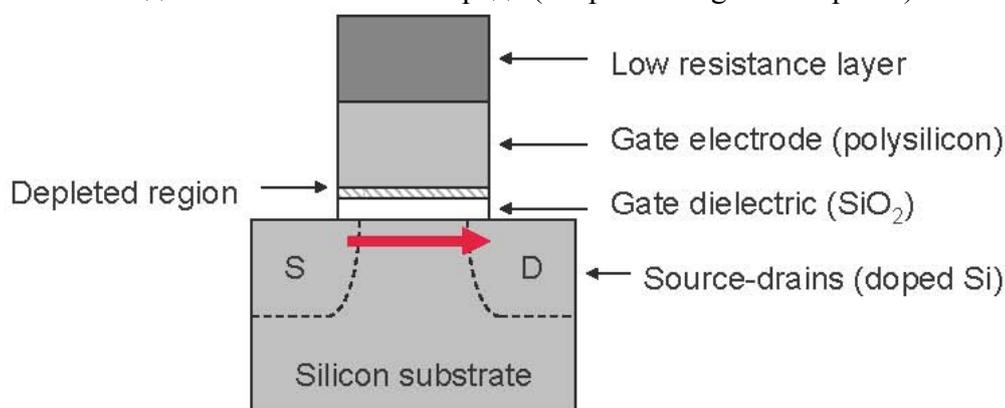


Рис.3 Возникновение области обеднённой носителями заряда.

В результате этого происходит нежелательное увеличение эффективной толщины диэлектрика затвора. Утолщение диэлектрика приводит к уменьшению тока открытого и увеличению тока закрытого транзистора, т.е. к ухудшениям характеристик транзистора.

Замена поликремниевого затвора на металлический позволяет избежать образования обеднённого слоя и негативных последствий его появления.

Замена диоксида кремния изолятора затвора слоем диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью позволяет сделать толщину слоя изолятора меньше и существенно уменьшить утечки.

Новый тип транзистора назван «high-k and metal gate» транзистором (рис. 4).

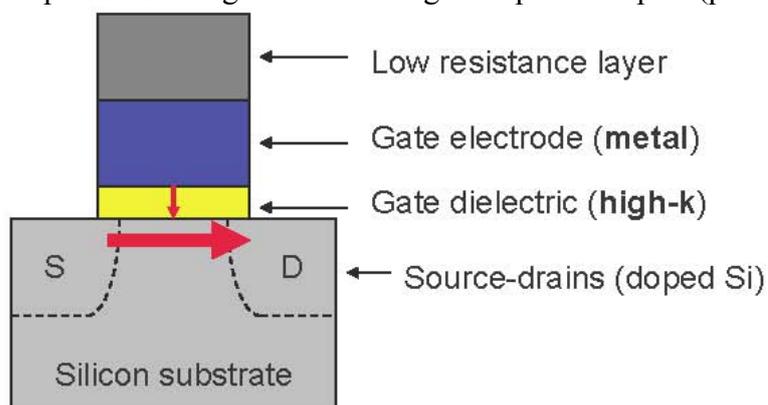


Рис.4 «High-k and metal gate» транзистор.

Новый диэлектрик обладает в несколько раз большей проницаемостью, чем диоксид кремния.

С помощью новой технологии было достигнуто:

- Двукратное увеличение плотности транзисторов на чипе.
- Уменьшение мощности, необходимой для переключения транзисторов на 30%.
- Увеличение скорости переключения транзистора на 20%.
- Уменьшение тока утечки через изолятор затвора в 10 раз.

Состав диэлектрика держится в секрете, известно лишь то, что он содержит кислород и гафний. Исследования с диоксидом и силикатами гафния (HfSiO, HfSiON) ведутся давно. Коэффициент диэлектрической проницаемости диоксида гафния (HfO<sub>2</sub>) равен примерно 25, в несколько раз выше чем у диоксида кремния (его коэффициент диэлектрической проницаемости равен 3.9) .

Материал металла затвора держится в тайне.

Необходимо отметить, что изолятор с большим значением коэффициента диэлектрической проницаемости и поликремниевый затвор невозможно использовать совместно по следующим причинам:

- Повышение уровня Ферми при контакте поликремния и диэлектрика вызывает высокие пороговые напряжения в транзисторах. Становится трудно отрегулировать пороговое напряжение на низком уровне, необходимом для достижения высоких эксплуатационных характеристик.
- Такие транзисторы показывают весьма пониженную подвижность электронов в канале из-зи эффекта фонового рассеяния.

В Intel уже созданы образцы процессоров на основе новой технологии. Новое семейство процессоров получило название «Pentium». Они изготовлены по технологической норме 45 нм и имеют 410 и 820 миллионов транзисторов для двухядерной и четырёхядерной версий соответственно. Они включают в себя новейший набор инструкций Intel SSE4.

### Литература

1. <http://www.intel.com/>
2. <http://library.corporate-ir.net/>
3. <http://www-03.ibm.com>
4. <http://www.fabtech.org>
5. Галактион Андреев «Пропавшая пятница, или Конец каменного века», Компьютерра №5 (673), 06.02.07.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА КОРПУСА ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛЕНТОЧНОГО ПИТАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Курносенко А. Е.

Научный руководитель: д.т.н., проф. каф. ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана Иванов Ю. В.  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ

## DEFINING OF ELECTRONIC COMPONENT CENTER INACCURACY WHEN USING TAPE FEEDER WITH ASSEMBLY EQUIPMENT

Kurnosenko A. E.

Scientific adviser: Doctor of technical sciences, Professor Ivanov Y. V.  
“IU-4” department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: [akurn@iu4.bmstu.ru](mailto:akurn@iu4.bmstu.ru)

### Аннотация

В статье рассматривается метод определения линейной и угловой погрешности положения центра корпуса электронного компонента при использовании ленточного питателя в качестве загрузочного устройства сборочного оборудования. Производится сравнение полученных результатов со значениями, принятыми в международных стандартах EIA для автоматизированной сборки электронных модулей.

### Abstract

Defining of electronic component center linear and angular inaccuracy when using tape feeder with assembly equipment is considered. Comparison of the results with values from worldwide electronic industry EIA standards is carried out.

Среди возможных способов подачи электронных компонентов (ЭК) в зону захвата их сборочной головкой (СГ) автомата выделяются следующие основные [1–3]:

- из ленты (при помощи устройств ее пошагового перемещения – ленточных питателей);
- из трубчатых кассет (методом виброподачи);
- из матричных поддонов (непосредственный захват ЭК из неподвижного носителя).

Ленточные питатели (рис. 1) применяются для подачи широкой номенклатуры ЭК, в частности, чипов, ЭК в корпусах MELF, SOT и ряда ИС в корпусах от SOP, SOIC, SOJ, PLCC до QFP и BGA.



а)



б)

Рис. 1 Ряд ленточных питателей, установленных на СБЦ Topaz-X фирмы Assembleon, Голландия: а) общий вид; б) вид сверху на плату питателей

Конструктивно ленточные питатели отличаются преимущественно типом привода звездочки, служащей для подачи ленты. Известны модели питателей, оснащенные электродвигателями с ременным приводом (Hoover-Davis QF) либо шаговыми двигателями и датчиками положения звездочки (т.н. «intelligent feeders», или «интеллектуальные питатели»: Universal Instruments MPTF, Assembleon ITF, Tyco ThinPRO), однако наиболее распространенными устройствами данного типа остаются питатели с пневматическим приводом, рычажным передаточным механизмом и храповым механизмом фиксации звездочки (рис. 2). Данный тип питателей отличает простота конструкции, низкая стоимость (в 2-3 раза меньшая, чем у «интеллектуальных» питателей), отсутствие электронных устройств в составе конструкции, отсутствие необходимости подачи электропитания. Разработаны конструкции питателей для подачи лент стандартных типоразмеров от 8 до 200 мм [4]. Пример устройства для перемещения 8-мм ленты показан на рис. 2.

На основе конструкции данного питателя строилась модель точности подачи ЭК из ленты в зону захвата СГ. Задачей являлось определение суммарной погрешности подачи  $\delta(X, Y, \varphi)_{п.ЭК}^л$  и ее составляющих. Технологическая размерная цепь, включающая погрешности, возникающие на этапе подачи ЭК из ленты, приведена на рис. 3.

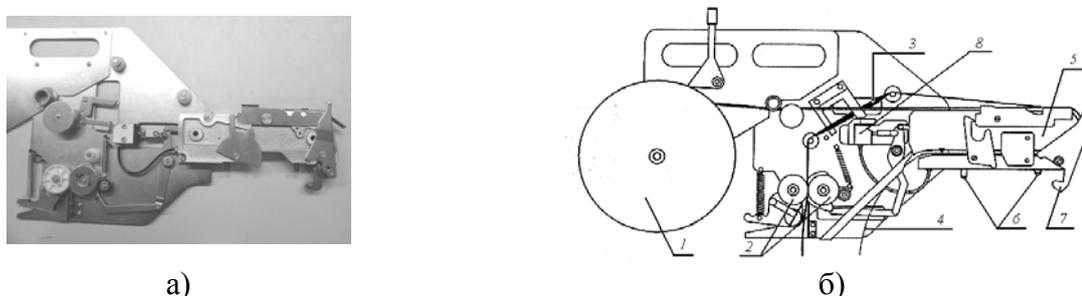


Рис. 2 Ленточные питатели с пневматическим приводом: а), б) внешний вид и конструкция 8-мм питателя; 1 – держатель бобины с лентой; 2 – механизм снятия покровной ленты; 3 – снятая покровная лента; 4 – лента-основа; 5 – механизм перемещения ленты в сборе; 6 – базовые штыри для фиксации питателя; 7 – защелка-фиксатор; 8 – пневмоцилиндр; 9 – клапан подачи воздуха с регулятором; 10 – механизм изменения шага питателя

Замыкающим размером является погрешность подачи ЭК из ленты<sup>1</sup>  $\delta(X, Y, \varphi)_{п.ЭК}^л$ , составляющими которой являются (рис. 3):

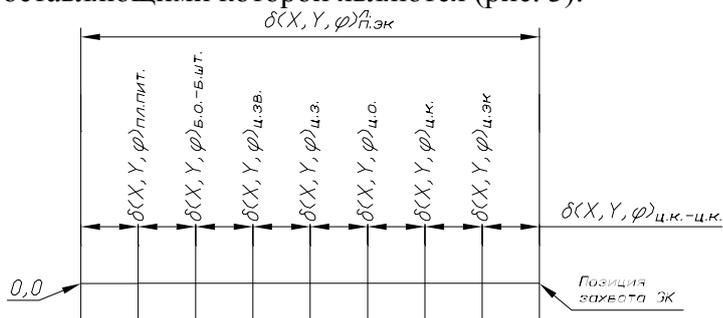


Рис. 3 Погрешности этапа подачи ЭК из ленты

- погрешность установки плиты питателей  $\delta(X, Y, \varphi)_1 = \delta(X, Y, \varphi)_{пл.пит.}$  ;
- погрешность установки базовых штырей питателя в базовые отверстия плиты  $\delta(X, Y, \varphi)_2 = \delta(X, Y, \varphi)_{б.о.-б.шт.}$  ;
- погрешность расположения центра звездочки относительно базовых штырей питателя  $\delta(X, Y, \varphi)_3 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.зв.}$  ;

<sup>1</sup> Здесь и далее обозначение X, Y, φ соответствует погрешностям, измеряемым отдельно по соответствующим координатным осям и углу поворота.

- погрешность расположения центра зуба звездочки, находящегося в контакте с отверстием в ленте, относительно центра звездочки  $\delta(X, Y, \varphi)_4 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.з.}$  ;
- погрешность расположения центра отверстия в ленте относительно центра зуба звездочки, находящегося с ним в контакте  $\delta(X, Y, \varphi)_5 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.о.}$  ;
- погрешность расположения центра кармана, из которого производится захват ЭК, относительно центра отверстия в контакте с зубом звездочки  $\delta(X, Y, \varphi)_6 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.к.}$  ;
- погрешность расположения центра ЭК относительно центра кармана, из которого производится его захват  $\delta(X, Y, \varphi)_7 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}$  ;
- погрешность расположения двух соседних карманов  $\delta(X, Y, \varphi)_8 = \delta(X, Y, \varphi)_{ц.к.-ц.к.}$  ;

При определении погрешности  $\delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}^{пл.}$  вероятностным методом с учетом неполной взаимозаменяемости и количества звеньев размерной цепи  $\delta > 6$  (многозвенная цепь) [4]:

$$\left[ \begin{aligned} \delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}^{пл.} &= t \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[ \left[ k_i^{(X, Y, \varphi)} \right]^2 \left[ \delta(X, Y, \varphi)_i \right]^2 \right]} ; \\ \delta(P)_{ц.ЭК}^{пл.} &= t \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[ \left[ k_i^{(P)} \right]^2 \left[ \delta P_i \right]^2 \right]} \end{aligned} \right. \quad (1),$$

где  $k_i^{(X, Y, \varphi)}$  ( $k_i^{(P)}$ ) – коэффициенты, характеризующие отличие распределения погрешностей  $i$ -ых звеньев от нормального,  $t$  – коэффициент риска.

В случае распределения погрешностей всех  $i$ -ых звеньев по нормальному закону  $k_i^{(X, Y, \varphi)} = k_i^{(P)} = 1/3$  и принятии коэффициента риска  $t = 3$  (при проценте риска  $P = 0,27$ )

формула (1) примет вид:

$$\left[ \begin{aligned} \delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}^{пл.} &= \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[ \delta(X, Y, \varphi)_i \right]^2} ; \\ \delta P_{ц.ЭК}^{пл.} &= \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[ \delta P_i \right]^2} \end{aligned} \right.$$

В статье рассмотрено определение составляющей  $\delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}$  суммарной погрешности – расположения центра ЭК относительно центра кармана в ленте, как одной из наиболее существенных, на примере 8-мм лент с чип-ЭК. Направление координатных осей СК питателя и глобальной СК АТО показано на рис. 4. Дальнейшие расчеты ведутся в СК питателя.

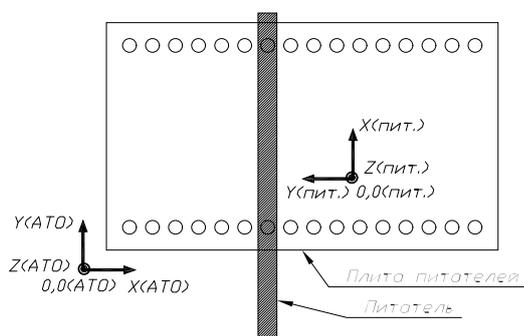


Рис. 4 Направление координатных осей СК питателя (пит.) и глобальной СК АТО (АТО)

Данная погрешность рассчитывается согласно схемам, приведенным на рис. 5 и рис. 6.

Значения  $\delta X_{ц.ЭК}^{max}$ ,  $\delta Y_{ц.ЭК}^{max}$  при  $\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^\circ$  из рис. 6а для конкретной ленты можно определить,

зная максимальные размеры кармана в ленте  $L_k^{max} = L_k + \delta L_k$  и  $B_k^{max} = B_k + \delta B_k$  :

$$\delta X_{ц.ЭК}^{max} \Big|_{\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^\circ} = L_k^{max} - L_{ЭК}^{min} \quad (1а);$$

$$\delta Y_{ц.ЭК}^{max} \Big|_{\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^\circ} = B_k^{max} - B_{ЭК}^{min} \quad (1б),$$

где  $L_{ЭК}^{\min} = L_{ЭК} - \delta L_{ЭК}$ ,  $B_{ЭК}^{\min} = B_{ЭК} - \delta B_{ЭК}$

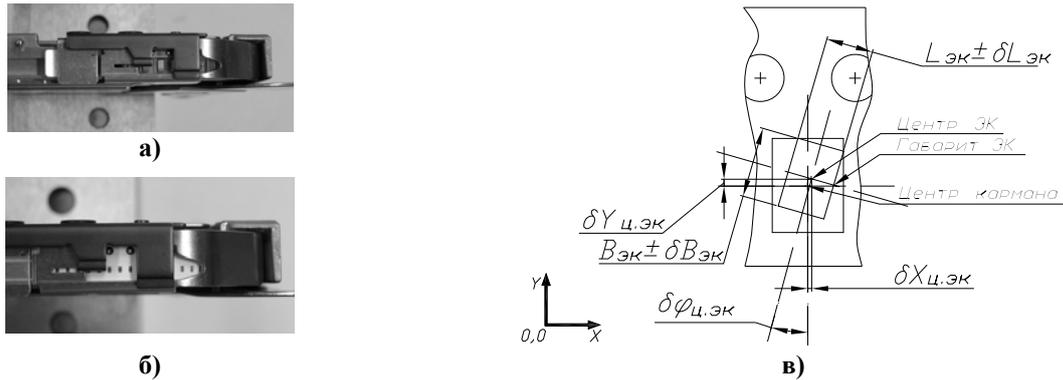


Рис. 5 К определению погрешности  $\delta(X, Y, \varphi)_{ц.ЭК}$  расположения центра ЭК относительно центра кармана в ленте: а), б) вид сверху на ленту, заправленную в питатель [а) Та-С, б) C0402]; в) расчетная схема

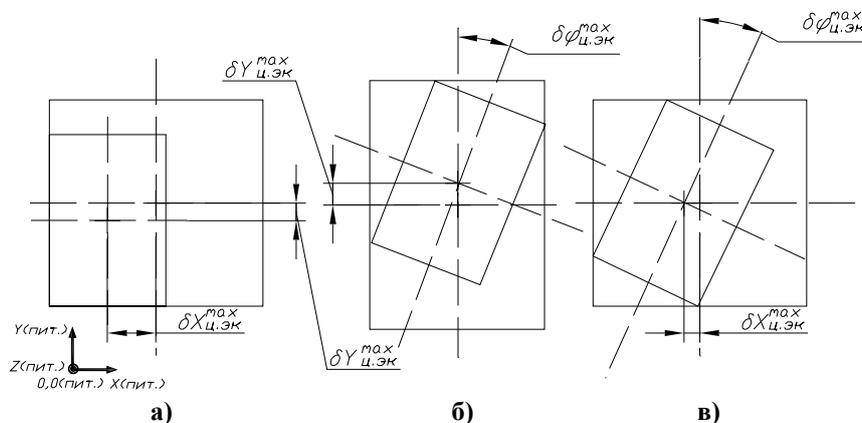


Рис. 6 Положение ЭК в кармане: а) при максимальном линейном смещении центральной оси относительно оси кармана  $\delta X_{ц.ЭК}^{\max}$ ,  $\delta Y_{ц.ЭК}^{\max}$  и  $\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^\circ$ ; б) при максимальном угловом смещении  $\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max}$ , линейном  $\delta Y_{ц.ЭК}^{\max}$  и  $\delta X_{ц.ЭК} = 0$ ; в) при  $\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max}$ , линейном  $\delta X_{ц.ЭК}^{\max}$  и  $\delta Y_{ц.ЭК} = 0$

Максимальная угловая погрешность  $\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max}$  геометрически определится согласно рис. 6 б), в) с учетом двух возможных положений ЭК в кармане по формулам:

$$\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta X_{ц.ЭК} = 0} = \arcsin \left( \frac{L_{к}^{\max} \cdot B_{ЭК}^{\min} - L_{ЭК}^{\min} \sqrt{(B_{ЭК}^{\min})^2 + (L_{ЭК}^{\min})^2 - (L_{к}^{\max})^2}}{(B_{ЭК}^{\min})^2 + (L_{ЭК}^{\min})^2} \right) \quad (2a);$$

$$\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta Y_{ц.ЭК} = 0} = \arcsin \left( \frac{B_{к}^{\max} \cdot L_{ЭК}^{\min} - B_{ЭК}^{\min} \cdot \sqrt{(B_{ЭК}^{\min})^2 + (L_{ЭК}^{\min})^2 - (B_{к}^{\max})^2}}{(B_{ЭК}^{\min})^2 + (L_{ЭК}^{\min})^2} \right) \quad (2б),$$

где  $L_{ЭК}^{\max} = L_{ЭК} + \delta L_{ЭК}$ ,  $B_{ЭК}^{\max} = B_{ЭК} + \delta B_{ЭК}$ .

При этом линейное смещение ЭК составит:

$$\delta Y_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\substack{\delta X_{ц.ЭК} = 0; \\ \delta \varphi_{ц.ЭК} < 0}} = \frac{B_{к}^{\max} - (B_{ЭК}^{\min} \cos \delta \varphi_{ц.ЭК} + L_{ЭК}^{\min} \sin \delta \varphi_{ц.ЭК})}{2} \quad (3a);$$

$$\delta X_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\substack{\delta Y_{ц.ЭК} = 0; \\ \delta \varphi_{ц.ЭК} > 0}} = \frac{L_{к}^{\max} - (B_{ЭК}^{\min} \sin \delta \varphi_{ц.ЭК} + L_{ЭК}^{\min} \cos \delta \varphi_{ц.ЭК})}{2} \quad (3б).$$

Геометрия кармана в ленте предусматривает возможность реализации одного из двух вариантов (2а) или (2б). Окончательно максимальное линейное смещение ЭК получим, сравнивая значения 1а, 3б по оси X и 1б, 3а по оси Y:

$$\delta X_{ц.ЭК}^{\max} = \max \left( \delta X_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta \varphi_{ц.ЭК}=0^{\circ}}, \delta X_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\substack{\delta Y_{ц.ЭК}=0; \\ \delta \varphi_{ц.ЭК} < > 0}} \right) \quad (4а);$$

$$\delta Y_{ц.ЭК}^{\max} = \max \left( \delta Y_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta \varphi_{ц.ЭК}=0^{\circ}}, \delta Y_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\substack{\delta X_{ц.ЭК}=0; \\ \delta \varphi_{ц.ЭК} < > 0}} \right) \quad (4б),$$

угловое – сравнивая значения 2а, 2б:

$$\delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\substack{\delta X_{ц.ЭК}=0; \\ \delta Y_{ц.ЭК}=0}} = \max \left( \delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta X_{ц.ЭК}=0}, \delta \varphi_{ц.ЭК}^{\max} \Big|_{\delta Y_{ц.ЭК}=0} \right) \quad (4в).$$

Для подачи чип-ЭК (резисторов и конденсаторов) рассматривались 8-мм бумажные ленты с геометрическими параметрами карманов, приведенными в таблица 1.

**Таблица 1. Геометрические параметры чип-R,C и карманов 8-мм бумажных лент**

Типоразмер ЭК	Параметры ЭК		Параметры ленты	
	$L_{ЭК} \pm \delta L_{ЭК}$	$B_{ЭК} \pm \delta B_{ЭК}$	$L_{к} \pm \delta L_{к}$	$B_{к} \pm \delta B_{к}$
R0603	0,85±0,10	1,55 <sup>+0,10</sup> <sub>-0,05</sub>	1,10±0,20	1,90±0,20
R0805	1,25±0,15	2,00 <sup>+0,20</sup> <sub>-0,10</sub>	1,65±0,20	2,40±0,20
R1206	1,6±0,15	3,20 <sup>+0,10</sup> <sub>-0,20</sub>	2,00±0,20	3,60±0,20
C0402	<b>0,50±0,05</b>	<b>1,00±0,05</b>	0,65±0,10	1,10±0,10
C0603	<b>0,80±0,10</b>	<b>1,60±0,15</b>	1,10±0,20	1,90±0,20
C0805	<b>1,25±0,10</b>	<b>2,00±0,10</b>	1,60±0,20	2,40±0,20
C1206	<b>1,6±0,15</b>	<b>3,20±0,20</b>	2,00±0,20	3,60±0,20

Для данных лент математический смысл имеет вариант (4б). Результаты теоретического расчета минимальной (min), номинальной (nom) и максимальной (max) угловой погрешности для чип-ЭК представлены в таблица 2.

**Таблица 2. Максимальное линейное  $\delta X(Y, P)_{ц.ЭК}$ , мм и угловое  $\delta \varphi_{ц.ЭК}$ , град смещение чип-R,C в карманах 8-мм бумажных лент**

Типоразмер ЭК	$\delta X_{ц.ЭК}$ при $\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^{\circ}$			$\delta Y_{ц.ЭК}$						$\delta P_{ц.ЭК}$			$\delta \varphi_{ц.ЭК}$ при $\delta X_{ц.ЭК} = 0$		
	min	nom	max	при $\delta \varphi_{ц.ЭК} = 0^{\circ}$			при $\delta \varphi_{ц.ЭК} < > 0^{\circ}$			min	nom	max	min	nom	max
				min	nom	max	min	nom	max						
R0603	0	0,25	0,55	0,05	0,35	0,60	0,03	0,11	0,21	0,05	0,43	0,81	0	9,7	24,3
R0805	0,05	0,40	0,75	0	0,40	0,70	0	0,09	0,20	0,05	0,57	1,03	0	12,4	27,4
R1206	0,05	0,40	0,75	0,10	0,40	0,80	0,04	0,11	0,26	0,11	0,57	1,10	0,9	7,4	15,5
C0402	<b>0</b>	<b>0,15</b>	<b>0,30</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>0,25</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,08</b>	0	0,18	0,39	0	9,0	20,2
C0603	<b>0</b>	<b>0,30</b>	<b>0,60</b>	<b>0</b>	<b>0,30</b>	<b>0,65</b>	<b>0</b>	<b>0,09</b>	<b>0,25</b>	0	0,42	0,88	0	11,4	28,1
C0805	0,05	<b>0,35</b>	<b>0,65</b>	0,10	0,40	0,70	0,03	0,10	0,20	0,11	0,53	0,96	1,4	10,7	23,0
C1206	0,05	<b>0,40</b>	<b>0,75</b>	<b>0,05</b>	<b>0,40</b>	<b>0,80</b>	<b>0,01</b>	<b>0,11</b>	<b>0,26</b>	0,07	0,57	1,10	0,8	7,4	15,5

Стандарт ANSI/EIA 481-C-2003 [4] предусматривает следующие максимально допустимые значения линейной и угловой погрешностей положения ЭК в кармане 8-мм ленты:  $[\delta X_{ц.ЭК}] = [\delta Y_{ц.ЭК}] = \pm 0,5$  мм,  $[\delta \varphi_{ц.ЭК}] = 20$  град.

Анализ полученных результатов показывает, что в заданный допустимый диапазон полностью укладываются номинальные значения погрешностей, при этом максимальные значения превышают допустимые для всех ЭК, кроме С0402 (линейное смещение) и R1206, С1206 (угловое смещение), что предъявляет повышенные требования к системе коррекции положения ЭК в СГ автомата (системе технического зрения). Для снижения погрешности необходимо применение лент с уменьшенным зазором между корпусом ЭК и стенками кармана в ленте, а также более жесткие допуски на размеры карманов и ЭК.

### Литература

1. Ray P. Prasad. Surface Mount Technology – Principles and Practice. 2<sup>nd</sup> ed. — Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 2002. — 772 p.
2. James K. Hollomon, Jr. Surface Mount Technology for PC Boards. — Prompt Publications, Indianapolis, USA, 1995. — 509 p.
3. Мэнгин Ч.-Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 276 с.: ил.
4. Замятин В. К. Технология и оснащения сборочного производства машиноприборостроения: Справочник — М.: Машиностроение, 1995. — 608 с.: ил.
5. ANSI/EIA 481-C-2003. 8 MM THROUGH 200 MM EMBOSSED CARRIER TAPING AND 8 MM & 12 MM PUNCHED CARRIER TAPING OF SURFACE MOUNT COMPONENTS FOR AUTOMATIC HANDLING — EIA, Arlington, VA, 2003 — 19 p.

# ТОНКОПЛЁНОЧНЫЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОХРОМНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Елсуков К.А, Романова Л.И., Фомина Т.В.  
*Научный руководитель: к.т.н., доцент Власов А.И.*  
МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

## THIN-FILM LIGHT-ABSORBING ELECTROCHROMIC COATINGS

Elsukov K.A, Romanova L.I., Fomina T.V.  
*Scientific adviser: candidate of technical science, docent Vlasov A. I.*  
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia.  
[meteora\\_mobile@mail.ru](mailto:meteora_mobile@mail.ru)

### Аннотация

Доклад представляет собой краткий обзор типов электрохромных покрытий, их областей применения и методов нанесения. Также описывается установка магнетронного напыления. Рассмотрены возможности применения технологии, ее перспективы.

### Abstract

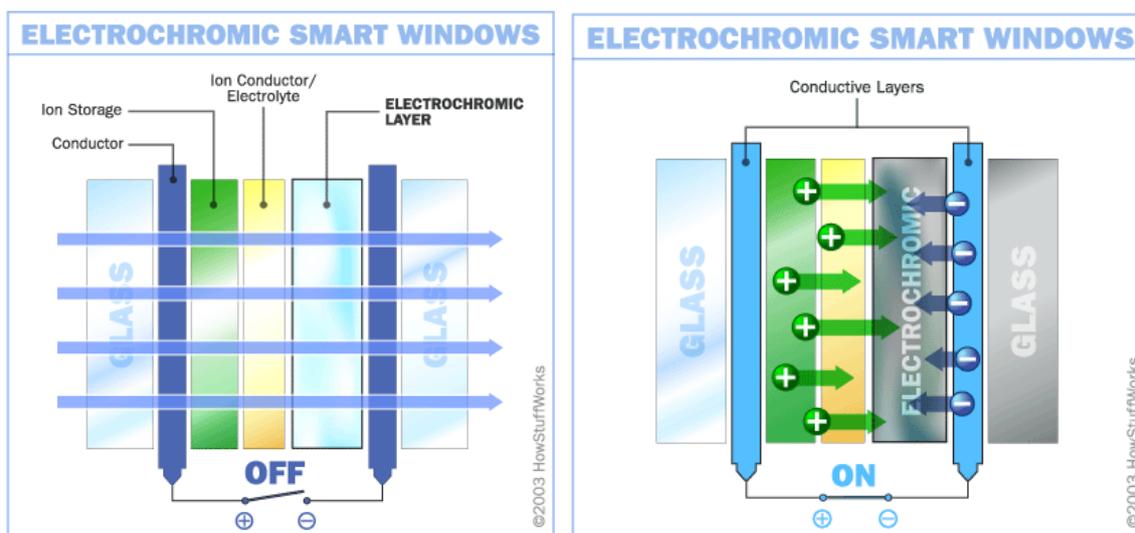
Types of electrochromic coatings, their fields of application and methods of thin-film growing are described in this report. Magnetron sputtering device also presented. Ways of realization of technology and its perspectives are considered.

### Варианты реализации

Различают несколько способов получения электрохроматических поверхностей:

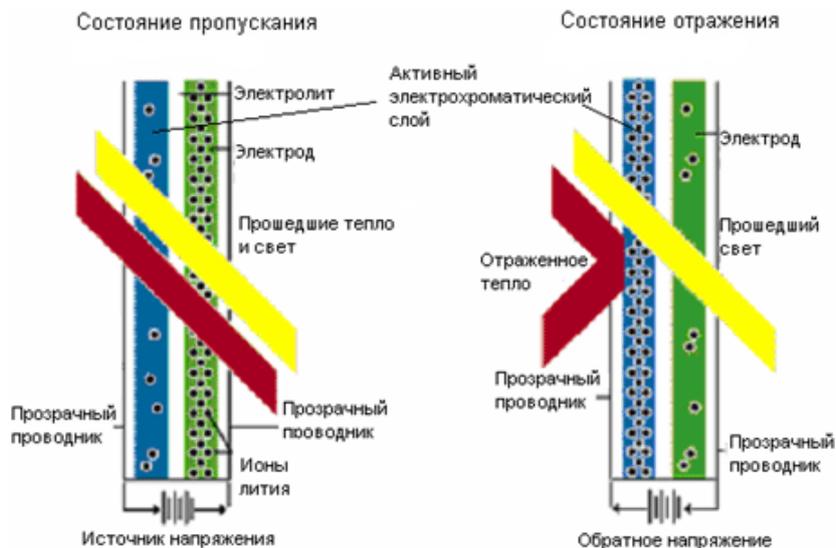
- использование неорганических соединений
- использование полимеров
- использование нанокристаллов.

В первом способе получение изменения состояния ЭМ основано на окислительно-восстановительных реакциях, происходящих между электрохроматическим слоем, электролитом и слоем аккумуляции ионов. Результатом является изменение цвета электрохромного слоя или полное затемнение стекла.



В случае использования полимеров принцип работы аналогичен. Полимеры – материалы, обладающие хорошими электроизоляционными свойствами. Одним из наиболее перспективных свойств тонких пленок из проводящих полимерных материалов является их

способность менять оптические параметры (например, цвет) в зависимости от уровня окисления.



В качестве достоинств этого метода можно назвать более качественную цветопередачу, большее время работы. Однако производство подобных соединений дорого.

В случае использования нанокристаллов для создания различных цветов используют кристаллы различного размера, от 2-х до 20-ти нм. При попадании хотя бы одного электрона в такую жидкость она меняет цвет.

### Области применения

Светоотражающие покрытия стеклянных и зеркальных систем получили общее название «электрохромная оптика». Рынки применения технологии «электрохромной оптики» включают в себя такие отрасли как архитектурную, компьютерную (индикаторных устройств и систем отображения), автомобильную, авиационную. Мировое производство «электрохромной оптики» составляет около 4,1 миллиарда кв. м в год (в 2004 году) приблизительно стоимостью в \$40 миллиардов.

Строительный рынок: строительное применение «адаптивного» остекления оказывало наибольшее влияние на исследования и разработки. Компания Flabeg Group изготовила и установила самые крупногабаритные архитектурные электрохромные окна. Производством регулируемых электрохромных застекленных крыш занимается компания SAGE Electrochromics совместно с компанией Apogee. Остекление PDLC (Polymer Dispersed Liquid Crystals - Жидкокристаллическое покрытие с дисперсным полимером) в настоящий момент производится компанией UMU-Nippon Sheet Glass (NSG) в Японии и компанией Saint-Gobain во Франции. Архитектурное остекление SPD (Suspended Particle Device - Покрытие со взвешенными частицами) изготавливает Корейская компания SPD Inc. (SPDI) в сотрудничестве с компанией Research Frontiers, Inc. (RFI).

Автомобильный рынок: электрохромные материалы с огромным успехом используются в активных противобликовых автомобильных зеркалах. Ежегодный объем продаж регулируемых зеркал составляет приблизительно \$300 миллионов, что составляет порядка 10% от общего рынка автомобильных зеркал. На сегодняшний день основным производителем является компания Gentex.

Авиационный рынок: В течение следующих 20 лет около 35% изношенных самолетов будут подлежать замене. Кроме того, мировой парк воздушных судов вырастет с 13 000 в 1999 году до 28 000 в 2018 году. Аэрокосмическая индустрия заинтересована в развитии иллюминаторов и остекления, которое сможет контролировать ослепляющий яркий свет, как в кабине пилота, так и в салоне

самолета. Компания Boeing объявила, что она тоже оснастит салоны своих будущих самолетов регулируемым остеклением.

Рынок информационных дисплеев: Технологии «электрохромной оптики» можно применять в информационных табло общего пользования и индикаторных устройствах. Главное отличие электрохромных устройств от светоизлучающих и жидкокристаллических матриц – высокий контраст, отсутствие зависимости качества изображения от угла обзора и внешней освещенности, широкий интервал температур.

### Обзор установки

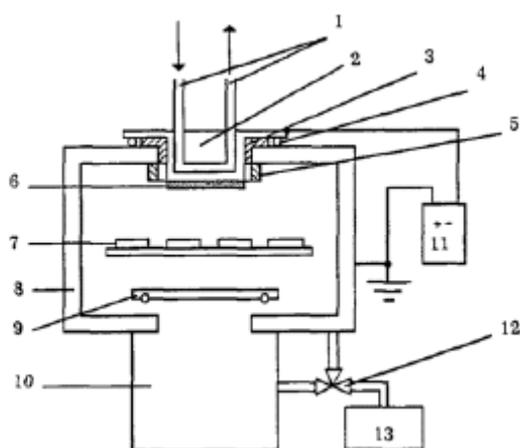
При производстве тонкопленочных структур широко используют установки магнетронного напыления. В целях ускорения процесса и максимального предотвращения внешнего воздействия на продукт, в одном и том же технологическом цикле необходимо производить напыление сразу нескольких материалов. Для осуществления этого на практике, в установки магнетронного напыления монтируют несколько мишенедержателей. Выбор распыляемого материала осуществляется с помощью панели управления установки.

LH Z550 Sputtering Plant (компания Leybold, Германия) разработана для реализации большого количества различных технологических процессов. С помощью данной установки можно осуществлять высокочастотное напыление, напыление с напряжением смещения, высокочастотное травление. Установка может применяться для получения пленок металлов, полупроводников, полупроводниковых соединений, диэлектриков, сплавов, композитов.

В рабочей камере установки поддерживается необходимое давление инертного газа (аргон), скорость вращения карусели с образцами, напряжения источника постоянного тока.

Достижение необходимого давления ( $p = 3,3 \cdot 10^{-3}$  мбар) и его поддержка осуществляется двухступенчатой вакуумной системой, состоящей из форвакуумного и турбомолекулярного насосов.

Ниже представлена схема рабочей камеры установки:



- 1 – система охлаждения (холодная вода или жидкий азот); 2 – катод;  
3 – изолирующая прокладка; 4 – вакуумное уплотнение;  
5 – защита темного катодного пространства; 6 – мишень;  
7 – подложки; 8 – вакуумная камера; 9 – высоковакуумный клапан;  
10 – высоковакуумный насос (турбомолекулярный); 11 – питание;  
12 – двухсторонний клапан; 13 – форвакуумный насос

Таблица технических параметров:

Параметр	значение
Мишень	диаметр 150 мм
Предварительная откачка рабочей камеры	до $6 \cdot 10^{-6}$ мбар
Давление внутри рабочей камеры	$3,3 \cdot 10^{-3}$ мбар
Мощность источника питания	500 Вт
Расстояние от подложки до источника	150 мм
Рабочий газ	аргон (чистота 99,998 %)
Скорость подачи рабочего газа	20 ед (при этом за один полный оборот карусели напыляется слой толщиной 2 нм)
Скорость распыления (определяется скоростью подачи рабочего газа)	0,55 нм/сек
Напряжение питание переменного тока	380(+10/-15%) В при частоте 50 Гц
Температура подаваемой холодной воды	10–25 °С
Скорость подачи холодной воды	7,5 л/мин
Температура подаваемого жидкого азота	-194 °С
температура окружающего воздуха	20±5 °С
Относительная влажность окружающего воздуха	не более 70±15 %
Атмосферное давление	760±30 мм рт.ст.

### Обзор метода катодного распыления.

Под катодным напылением обычно понимают выбивание атомов отрицательно заряженного тела или катода положительными ионами плазмы газа. (см рис 1). Как показано на рисунке 1, положительно заряженные ионы газа двигаются вперед, ударяются о катод и за счет кинетической энергии выбивают из катода атомы. Эти атомы двигаются случайным образом и осаждаются во всех возможных точках вакуумной камеры.

Причиной ионизации газа или появление плазмы являются электроны, вылетающие из катода и двигающиеся с большой энергией к положительно заряженным стенкам вакуумной камеры. На пути эти электроны ионизируют ионы газа.

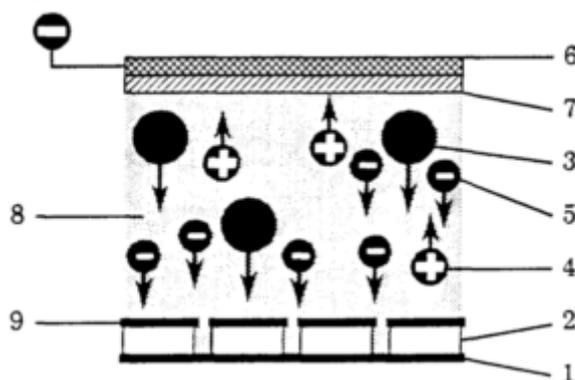


Схема катодного напыления: 1 – подложкодержатель, 2-подложки, 3-напыляемые частицы, 4-ионы плазмы, 5-вторичные электроны, 6-катод, 7-мишень, 8-плазма, 9-напыленный слой

Положительные ионы газа, в свою очередь, приложенным отрицательным напряжением ускоряются по направлению к катоду.

Чтобы иметь возможность напылять различные материалы, необязательно делать весь катод из соответствующего материала. Достаточно сделать мишень – диск, таких же размеров, что

и катод. Мишень присоединяется к основе- катоду. Если осуществляется напыление при постоянном токе, соединение должно быть проводящим.

Наиболее простой и возможный способ соединения в случае металлов – пайка, т.к. она гарантирует как хорошую проводимость, так и максимальный теплоотвод от мишени к катоду.

Требования к катоду и мишени в целом практически такие же как ко всему оборудованию для катодного напыления любых размеров. Мишени катодов больших размеров частично прикручиваются и привязываются лентами.

Чтобы предотвратить распыления материала с мишенедержателя ионами газа, мишенедержатель обеспечивается защитой. Защита имеет потенциал земли и расположена настолько близко к катоду, что плазма не может выйти из области между катодом и защитой. Обычное расстояние около 2-5 мм.

### **Перспективы**

На данный момент в развитие и улучшение технологий получения электрохромных покрытий вкладываются большие средства. Многие университеты ведут разработки по этому направлению. Снижение себестоимости в серийном и массовом производстве, повышение надёжности устройств, реализованных на основе электрохромных покрытий, - основные цели, которые ставят перед собой исследователи.

### **Литература**

1. P. M. S. Monk, R. J. Mortimer, D. R. Rosseinsky. Electrochromism: Fundamentals and Applications. VCH. Weinheim (1995).
2. <http://mrsec.uchicago.edu/Nuggets/Electrochromic/>
3. <http://www.gesimat.de/electrochromism.htm>
4. <http://electronics.howstuffworks.com/smart-window.htm>

# ПИД-РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Константинов П.А.**

*Научный руководитель: А.В.Юдин*

Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

## PID-CONTROLLER IN DC-MOTOR CONTROL SYSTEMS

**Konstantinov P.A.**

*Supervisor of studies: A.V. Yudin*

BMSTU, Moscow, Russian Federation

### **Аннотация**

ПИД-регулятор (Пропорциональный Интегральный Дифференциальный) – тип регулятора, широко используемый, в системах управления с обратной связью. В статье раскрыт принцип его работы на примере управления скоростью вращения ротора двигателя постоянного тока. Также описан практический метод настройки регулятора.

### **Abstract**

PID-controller the type of a controller widely used, in close loop control systems. In this paper describes principle of its work on an example of controlling dc-motor rotor rotation speed. Also controller tuning method is described.

### **Управление двигателями**

Как известно, при прикладывании постоянного напряжения к обмотке ротора двигателя постоянного тока, он (ротор) начинает вращаться с постоянной скоростью, которая определяется характеристиками двигателя и зависит от величины приложенного напряжения. Вращение ротора обычно передается через редуктор на выходной вал. Прикладывая момент к выходному валу можно совершать работу с помощью двигателя. Скорость вращения ротора при этом будет снижаться.

Возьмем в качестве примера мобильного робота с двумя колесами, приводимыми в движение двигателями постоянного тока. Прикладывая разные напряжения к двигателям, можно получить разные скорости вращения колес и разные траектории движения робота. Очевидно, что для точного движения робота по траектории необходимо чтобы скорости вращения колес точно соответствовали заданным.

Таким образом, зная характеристики двигателя и редуктора и прикладываемый к колесу момент, можно вычислить напряжение, которое следует приложить к двигателю для получения требуемой скорости вращения колеса, а следовательно и требуемого движения робота. Просто, не так ли? Ответ утвердительный, если вы теоретик.

При реализации на практике этой простой схемы придется столкнуться с большим количеством проблем. Не всегда известны характеристики двигателя, редуктора, материала колес, да и сами эти характеристики могут зависеть от множества параметров меняющихся со временем. Определение момента прикладываемого к колесам сопряжено с определением механических характеристик робота и исследованием материала поверхности по которой он движется. Конечно, можно пренебречь всеми нелинейными компонентами в гипотетическом уравнении связывающем реальную скорость колеса и прикладываемое напряжение, и экспериментально определить коэффициент пропорциональности. Однако коэффициент этот будет сильно зависеть от поверхности по которой движется робот, конкретного робота и даже от степени заряда аккумулятора.

Поэтому на практике для управления реальной скоростью вращения колеса используются системы управления с обратной связью. Скорость вращения измеряется

датчиком после чего система управления (регулятор) изменяет напряжение так, чтобы скорость приблизилась к заданной. Этот процесс продолжается постоянно, поэтому скорость достигает заданной за конечное время. Конечно, использование обратной связи не снимает задачи настройки. Но работоспособность настроенного регулятора слабо зависит от небольших изменений характеристик робота, мотора и редуктора, а также от поверхности, по которой движется робот. Системы управления с обратной связью обладают особенностями в работе и реализации. Описание этих особенностей выходит за рамки статьи, но заинтересованный читатель сможет получить всю необходимую информацию, ознакомившись с теорией автоматического управления.

## П-регулятор

Далее будем рассматривать дискретные регуляторы. Именно такие регуляторы реализуют с помощью микроконтроллеров. Для таких регуляторов справедливо понятие цикл работы – периодически повторяемый участок кода, собственно выполняющий регулирование.

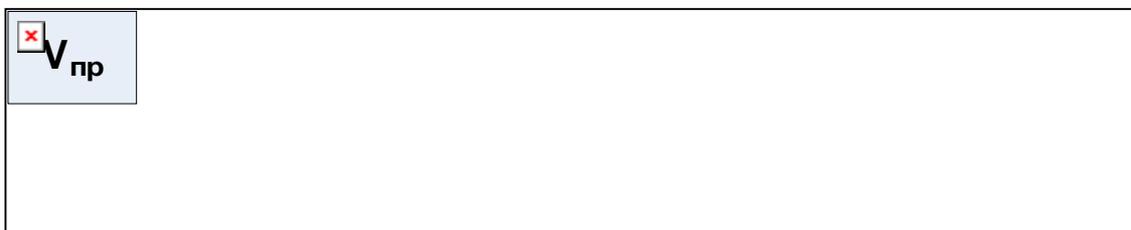


Рис. 1. Схематичное изображение П-регулятора

Пропорциональный регулятор (П-регулятор), схематично изображенный на рисунке, в начале каждого цикла работы считывает реальное значение скорости ( $V_p$ ) с датчика и сравнивает его с программной или заданной скоростью ( $V_{пр}$ ), полученная ошибка ( $e$ ) умножается на коэффициент пропорциональности ( $K_p$ ), после чего получается приращение напряжения ( $\Delta U$ ), которое складывается со значением напряжения в предыдущем цикле работы, полученное напряжение прикладывается к двигателю. Настройка П-регулятора сводится к подбору коэффициента  $K_p$ . Правильно настроенный П-регулятор стремится свести  $e$  к нулю, таким образом поддерживая  $V_p$  равной  $V_{пр}$ .

## И-регулятор

Интегральный регулятор (И-регулятор) использует в качестве ошибки интеграл разности  $V_p$  и  $V_{пр}$ , стараясь свести его к нулю. В отличие от П-регулятора И-регулятор обладает «памятью».

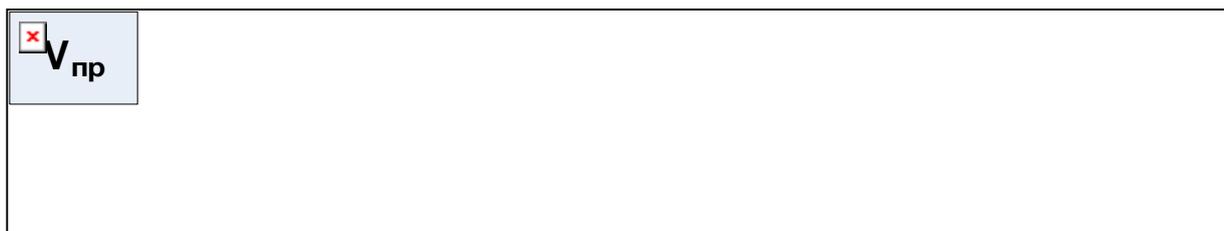


Рис.

2. Схематичное изображение И-регулятора

Если во время движения возникнут короткие возмущения скорости (вызванные неровностями поверхности например), П-регулятор может не успеть их «отработать» и робот

уйдет с заданной траектории. И-регулятор в такой ситуации обязательно компенсирует «недостаток скорости» и траектория движения останется близка к заданной.



3. Схематичное изображение ПИ-регулятора

И-регулятор при всей своей точности недостаточно быстр, а П-регулятор при хорошей скорости недостаточно точен. Комбинация П и И исправляет недостатки обоих регуляторов.



Рис. 4. Схематичное изображение ПИД-регулятора

И, П и ПИ-регуляторы хорошо справляются со своей задачей, но обладают одним неприятным свойством. Представим себе ситуацию изменения скачком заданной или реальной скорости. В этом случае регулятор может очень сильно поднять напряжение на двигателе и ротор раскрутится до скорости выше требуемой, тогда регулятор в свою очередь будет стараться снизить скорость, быстро сбросив напряжение, колесо затормозится, его скорость станет ниже требуемой и процесс повторится. Такая ситуация называется перерегулированием. В зависимости от коэффициентов регуляторов, параметров управляемой системы и характера возмущения колебания скорости при перерегулировании могут быть затухающими, незатухающими и усиливающимися. Последние два случая являются неприемлимыми. Эффект перерегулирования можно минимизировать уменьшая коэффициенты в регуляторах, но это отрицательно скажется на скорости их работы. Добавление дифференциальной составляющей является компромиссным решением – значительно снижая перерегулирование она не так сильно влияет на быстродействие. ПИ-регулятор с дифференциальной составляющей принято называть ПИД-регулятором.

## Настройка ПИД-регулятора

Правильная настройка регулятора для конкретной управляемой системы крайне важна. Достаточно заметить, что ни один из описанных регуляторов не обладает устойчивостью во всем диапазоне значений коэффициентов  $K$ . При наличии удовлетворительной модели управляемой системы возможно определить значения этих коэффициентов, или хотябы интервалы которым они могут принадлежать. Однако, как было сказано ранее, сама задача построения такой модели может быть не тривиальна. Поэтому на практике чаще всего прибегают к ручной настройке регулятора. Среди подобных методов хорошо зарекомендовал себя метод Циглера-Николса [3].

Для настройки регулятора по методу Циглера-Николса:

- Отключают И и Д звенья, а коэффициент  $K_p$  оставляют сравнительно малым, для предотвращения колебаний
- Увеличивают  $K_p$  на  $K_p \sqrt{2}$  несколько раз до появления колебаний
- Подбирают  $K_p$  при котором в системе возникают автоколебания. Найденное значение  $K_p$  обозначим  $K_c$ , а период колебаний  $P_c$
- Значение коэффициентов регулятора выберем согласно выражениям:
- П-регулятор:  $K_p = 0.5 K_c$
- ПИ-регулятор:  $K_p = 0.45 K_c$ ,  $K_i = 1.2/P_c$
- ПИД-регулятор:  $K_p = 0.6 K_c$ ,  $K_i = 2/P_c$ ,  $K_d = P_c/8$

## Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления.— Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004, 656 с.
2. Handbook of PI and PID controller by Aidan O'Dwyer (Dublin Institute of Technology, Ireland) - World Scientific Publishing Co. - 2006, 564pp
3. J.G. Ziegler and N.B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers. ASME Transactions, 64:759–768, 1942.

## СПИНТРОНИКА

Полушкин С.А., Родионов И.А.

*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макаρχук В.В.*

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## SPINTRONICS

Polushkin S.A., Rodionov I.A.

*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.*

Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

e-mail: [pshkn@mail.ru](mailto:pshkn@mail.ru), [ilro@bk.ru](mailto:ilro@bk.ru)

### Аннотация

В работе кратко изложена суть спинтроники - нового направления в микроэлектронике, базирующегося на использовании такой квантово-механической характеристики электронов, как спин. Устройства, созданные на ее основе, обещают решить многие и существующие, и ожидаемые в ближайшем будущем проблемы традиционной микроэлектроники: энергонезависимость, уменьшение энергопотребления, увеличение плотности логических элементов и скорости обработки данных.

### Abstract

Fundamentals of spintronics – a new tend of microelectronic based on the quantum of electron spin were briefly considered in this work. A new class device based on the quantum electron spin, rather than on charge, may yield the next generation of microelectronics and solve traditional problems: nonvolatility, reducing power consumption, growth density of logical gates and increasing data process.

## Введение

Цифровые электронные компьютеры, широко используемые в настоящее время, созданы с помощью полупроводниковой кремниевой планарной технологий. Такие компьютеры обычно представляют собой совокупность элементов с двумя возможными значащими логическими состояниями «0» и «1» — так называемых битов (binary digits = bits), вентильных элементов, и соединений между ними. Такие компьютеры, в которых логические операции производятся с этими классическими, с точки зрения физики, состояниями в настоящее время принято называть классическими.

Несмотря на то, что производительность, частотные характеристики и параметры энергопотребления постоянно улучшается, однако доказано, что классические компьютеры принципиально не могут справиться с некоторыми очень важными задачами. Такими задачами являются поиск в неструктурированной базе данных, моделирование эволюции квантовых систем (например, ядерные реакции) и, наконец, факторизация больших чисел.

Решение последней задачи тесно связано с теорией криптографии. Для взлома уже существующего кода разрядностью 32 бита и более классическому компьютеру требуется время, которое соизмеримо с периодом актуальности зашифрованной информации (несколько лет). Однако, в случае квантового компьютера прогнозируется экспоненциальное увеличение производительности, а значит и сокращение времени расшифровки до приемлемых величин, что обеспечит открытость любой информации!

Идея квантовых вычислений впервые была высказана Ю. И. Маниным в 1980 году [1], но активно эта проблема стала обсуждаться после появления в 1982 году статьи американского физика-теоретика Р. Фейнмана [2]. В этих работах было предложено использовать для вычислений операции с состояниями квантовой системы. Каждое состояние квантовой системы в отличие от классической может находиться в состоянии суперпозиции. В терминах классического компьютера квантовый бит (quantum bit = кубит) в соответствии с законами квантовой механики может находиться одновременно в состоянии «0» и «1». Такое поведение квантовой системы можно показать на примере спина электрона.

В теории магнетизма считается, что электрон обладает квантовым свойством - спином, из-за чего он ведет себя подобно стрелке компаса, вращающейся вокруг своей оси и

соединяющей его (электрона) южный и северный полюса. Спины электронов могут быть ориентированы в направлениях (рис. 1), которые обычно называют "спин-вверх" (мажорные спины) и "спин-вниз" (минорные спины).

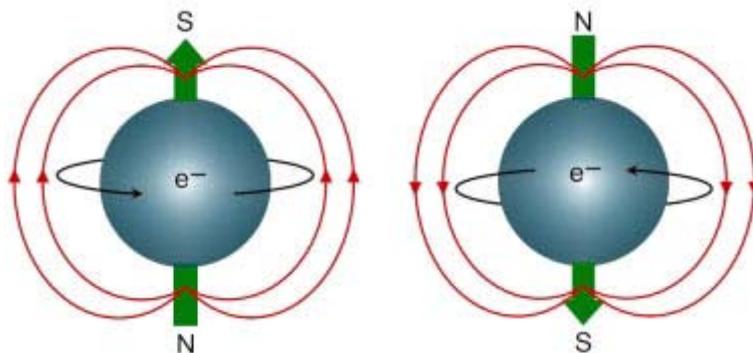


Рис. 1. Спин электрона

Если поместить электроны в магнитное поле, то их спины выстроятся вдоль направления поля. При этом они будут прецессировать (определенным образом вращаться) вокруг силовых линий - это явление можно сравнить с орбитальной прецессией нашей планеты. Если выключить поле, прецессия спина прекращается и его ориентация фиксируется. Другими словами, используя эффект прецессии, можно менять спиновое состояние электрона и тем самым изменять бит информации, переносимый электроном, с логического "0" на "1" и обратно.

Но оказывается можно показать математически, что электрон может также находиться в «призрачном» двойном состоянии, состоянии СУПЕРПОЗИЦИИ, В КОТОРОМ СПИН КАК БЫ СМОТРИТ ОДНОВРЕМЕННО ВВЕРХ И ВНИЗ. Это в свою очередь означает, что это состояние есть одновременно ноль и единица. Вычисления с использованием таких электронов будут выполняться с одновременным использованием нуля и единицы, то есть два в терминах классической системы два «такта» за время одного.

Для осуществления идеи такого квантового компьютера необходимо иметь способ осуществлять два типа вентилей:

- любые повороты вектора  $|\psi(0)\rangle$ ;
- контролируемый одним кубитом поворот другого кубита [4].

Повороты кубита выполняются под воздействием внешнего резонансного поля. Квантовая эволюция состояния кубита  $|\psi(t)\rangle$  совершается согласно уравнению Шредингера:

$$i \cdot \hbar \cdot \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = \hat{H}_1(t) \cdot |\psi(t)\rangle, \text{ где}$$

$\hat{H}_1(t) = -\mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$  - энергия взаимодействия дипольного момента  $\mu$  кубита и внешнего резонансного электрического поля (например, лазера). Приведенное уравнение легко решается и дает результат:

$$\left\{ \begin{array}{l} a(t) = \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) a(0) - ie^{i\phi} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) b(0), \\ b(t) = -ie^{i\phi} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) a(0) + \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) b(0), \end{array} \right\}$$

$$\Theta = \Omega t, \quad \Omega = \frac{\mu \varepsilon_0}{2\hbar}$$

Пусть в начальный момент кубит находился в состоянии  $|0\rangle$  (т. е.  $a(0)=1, b(0)=0$ ):

$$a(t) = \cos(\Theta/2), \quad b(t) = -ie^{i\phi} \sin(\Theta/2),$$

а вероятность найти кубит в момент  $t$  в состояниях  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  равны:

$$P_0 = |a(t)|^2 = \cos^2(\Theta/2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \Omega t,$$

$$P_1 = |b(t)|^2 = \sin^2(\Theta/2) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \Omega t.$$

Это показывает, что кубит с частотой  $\Theta$  (частота Раби) переходит из состояния  $|0\rangle$  в состояние  $|1\rangle$ , а в промежуточные моменты времени находится в состоянии, описываемом суперпозицией  $|\psi(t)\rangle = a(t) \cdot |0\rangle + b(t) \cdot |1\rangle$ . Контролируя длительность и фазу внешнего воздействия, мы можем получить кубит в состоянии, описываемом любой суперпозицией (рис. 2).

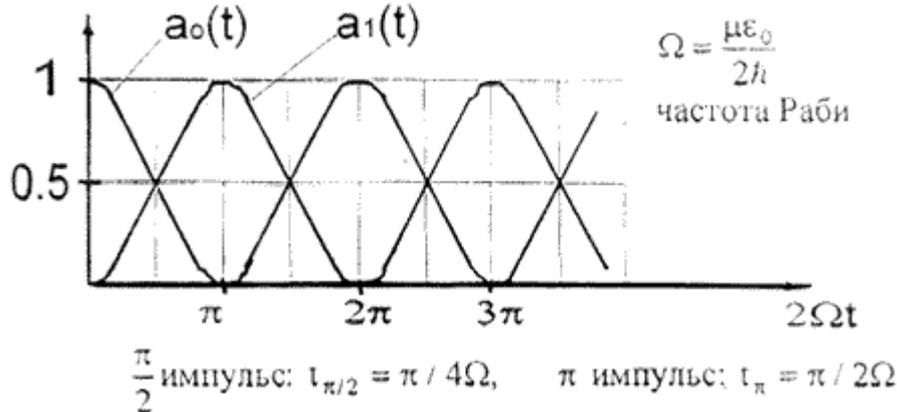


Рис. 2. Зависимость состояния кубита от длительности и фазы внешнего воздействия

Переворот спина квантово-механической двухуровневой частицы может произойти под влиянием внешнего ВЧ резонансного поля или поля лазера.

Итак, предполагаемые преимущества квантового компьютера перед классическим заключаются в том, что в отличие от последних квантовый компьютер оперирует при вычислениях не с числами, а с квантовыми состояниями. При этом возможное число состояний из  $n$  частиц образует векторное пространство размерностью  $2n$ .

В квантовой системе состояние квантовой частицы «квантового бита» (КУБИТА) может быть выражено через суперпозицию базисных состояний (суперпозицию  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ ) и поэтому квантовые состояния объединяются при помощи умножения тензоров. Результирующее пространство состояний из  $n$  квантовых частиц обладает при этом размерностью  $2n$ .

Итак, в предполагаемых квантовых компьютерах экспоненциальное увеличение пространства состояний требует всего лишь линейного увеличения физического пространства (т. е. увеличения  $n$  частиц).

## Основные положения

В устройствах, построенных на спиновом эффекте, используются ферромагнетики. Поэтому прежде чем переходить к их (устройств) более детальному рассмотрению, опишем магнитные свойства этих материалов.

Ферромагнетиками называются вещества, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле. Это объясняется существованием так называемого обменного взаимодействия, связанного с перекрытием волновых функций электронов, принадлежащих соседним атомам кристаллической решетки, а также нескомпенсированных спиновых магнитных моментов валентных электронов. Именно обменное взаимодействие заставляет спины электронов ориентироваться параллельно или антипараллельно в зависимости от того, какое из состояний является энергетически более выгодным. В первом случае говорят о ферромагнетизме, а во втором - об антиферромагнетизме.

При температуре ниже так называемой точки Кюри ферромагнетик разбивается на домены самопроизвольной намагниченности. В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов намагниченности разных доменов произвольны и результирующая намагниченность всего тела может быть равной нулю. Во внешнем магнитном поле векторы намагниченности ориентируются в преимущественном направлении, создавая сильное внутреннее магнитное поле.

Магнитную структуру кристалла антиферромагнетика можно рассматривать как состоящую из двух подрешеток, намагниченных противоположно друг другу. Если магнитные моменты подрешеток численно равны, то спонтанная намагниченность не возникает, если нет, то она появляется (ферримагнетизм). Такими свойствами обладают, например, ферриты. При низких температурах магнитная восприимчивость антиферромагнетиков ничтожно мала, т. е. они практически не намагничиваются во внешнем магнитном поле.

### Явление гигантской магниторезистивности

Начало новой электроники, базирующейся на физических эффектах, обусловленных спином, относят к 1988 г., когда было открыто явление гигантской магниторезистивности (Giant Magneto Resistance -- GMR). GMR наблюдается в искусственных тонкопленочных материалах, составленных из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоев. Сопротивление такого композита минимально, когда магнитные поля в ферромагнитных слоях направлены параллельно, и максимально, когда они антипараллельны.

В основе устройств, использующих GMR, лежит так называемый спиновый клапан (spin valve), структура которого представлена на рисунке 3а.

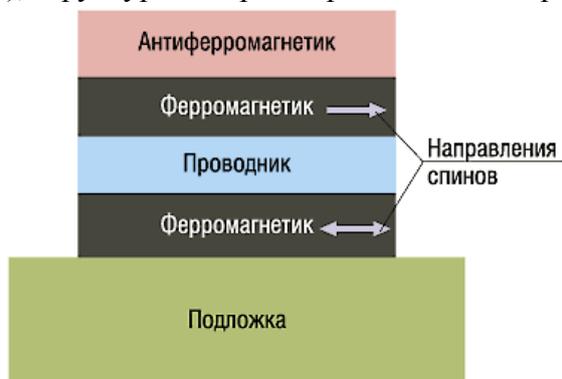


Рис. 3а. Структура спинного клапана

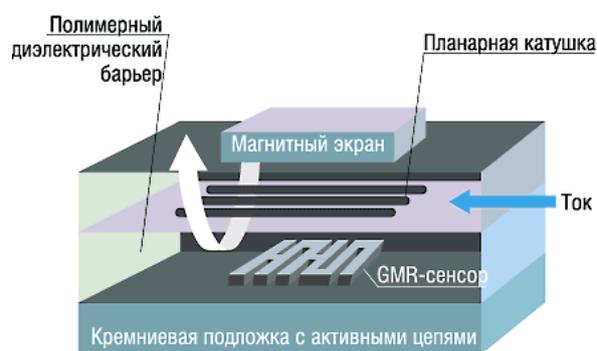


Рис. 3б. Гальванический изолятор

Он состоит из двух слоев ферромагнетика (сплавы никеля, железа и кобальта), разделенных тонким слоем немагнитного металла (обычно это медь). В одном из слоев ферромагнетика магнитное поле "закреплено", другими словами, намагниченность данного

слоя относительно нечувствительна к изменениям внешнего магнитного поля. Такая фиксация магнитного поля обычно выполняется с помощью плотно прилегающего слоя антиферромагнетика. Образующаяся граница раздела между двумя пленками препятствует изменению намагниченности в ферромагнетике. Другой слой ферромагнетика является "свободным" - его намагниченность может быть изменена внешним полем относительно малой напряженности. Сопротивление спинового клапана при антипараллельных магнитных полях в ферромагнетиках на 5-10 % выше, чем при параллельных.

Открытие ГМС позволило создать высокоточные сенсоры магнитного поля, датчики углового вращения и, самое главное, считывающие головки жестких дисков. Первые считывающие ГМС-головки были выпущены в 1997 году компанией IBM и в настоящее время используются практически во всех жестких дисках. Сфера применения GMR расширяется. Кроме прописки в технологиях чтения жестких дисков, спиновые клапаны на GMR используются в гальванических изоляторах и MRAM (Magnetoresistive RAM).

GMR-базированный гальванический изолятор выполняет ту же функцию, что и оптоэлектронный, обеспечивая развязку цепей по питанию и земляной шине. Его основными элементами являются плоская катушка и GMR-сенсор, встроенные в интегральную схему (рис. 3б). Для передачи сигнала из одной цепи в другую по катушке пропускается ток. Созданное им магнитное поле воздействует на GMR-сенсор. Такой изолятор работает в 10 раз быстрее современных оптических и это еще не предел.

### Магнитный туннельный переход.

Еще один тип спинового клапана можно построить, используя явление магнитного туннельного перехода (Magnetic Tunnel Junction - MTJ). Такие клапаны состоят из закрепленного и свободного магнитных слоев, которые разделены очень тонким слоем изолятора, обычно им служит окись алюминия (рис. 4).

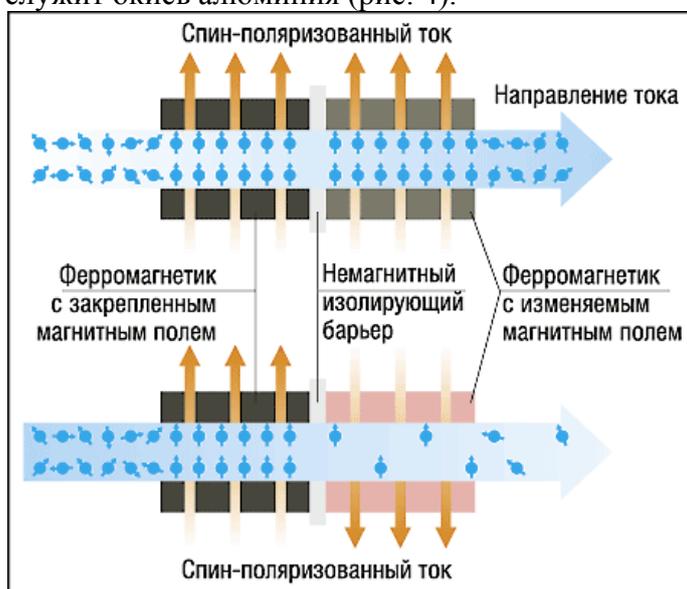


Рис. 4. Магнитный туннельный переход

Сопротивление здесь изменяется с помощью внешнего магнитного поля точно таким же способом, как и в предыдущем случае. При антипараллельных магнитных полях в ферромагнетиках его значение увеличивается на 20-40%.

На рис. 5 приведена схема ячейки магниторезистивной памяти (Motorola), основанной на магнитном туннельном переходе. Для хранения информации MRAM использует явление гистерезиса, а для считывания - MTJ. Она функционирует подобно полупроводниковой статической памяти (SRAM), однако ее важной особенностью является способность сохранять данные при выключении питания. Если такую память использовать в

персональных компьютерах, то они не будут требовать выполнения довольно длительной процедуры загрузки при включении.

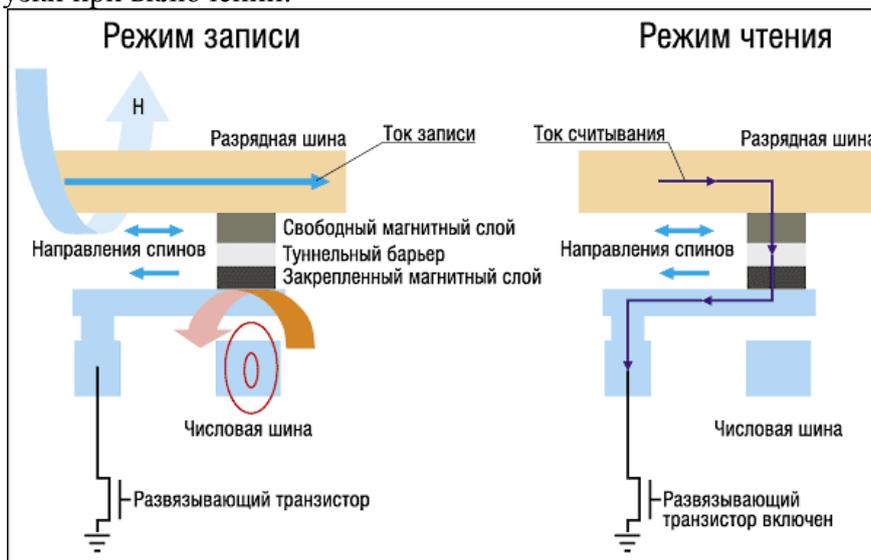


Рис. 5. Ячейка MRAM

Основными элементами ячейки памяти MRAM являются взаимно перпендикулярные разрядная (bit line) и числовая (word line) шины, между которыми располагается структура MTJ. При операции записи (рис. 5) по шинам пропускается электрический ток, создающий магнитное поле, которое меняет направление намагниченности в свободном ферромагнетике. При операции чтения открывается развязывающий транзистор и ток проходит через структуру MTJ. Изменение сопротивления ячейки может быть интерпретировано как двоичные 0 или 1. Такая память работает в 1000 раз быстрее традиционной EEPROM и не имеет ограничения по количеству циклов перезаписи.

### Спиновый полевой транзистор

В 1990 г. двое американских ученых, Суприйо Датта (Supriyo Datta) и Бисуоджит Дас (Biswajit Das), предложили модель спинового полевого транзистора (spin Field-Effect Transistor -- spin FET), основанного на релятивистском эффекте (рис. 6).

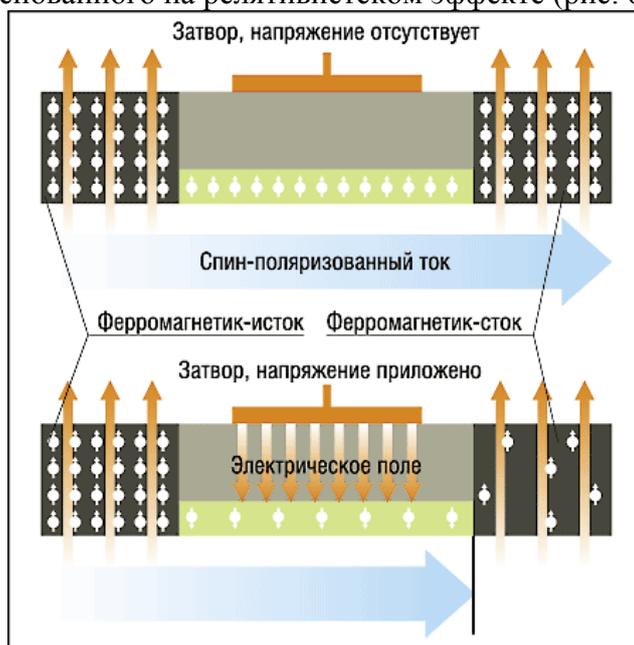


Рис. 6. Спиновый полевой транзистор

В обычном полевом транзисторе напряжение, прикладываемое к затвору, управляет величиной тока между истоком и стоком. В релятивистском полевом транзисторе истоком и стоком должны служить ферромагнетики с параллельно ориентированными спинами электронов, соединенные узким полупроводниковым каналом. Спины инжектируемых в исток электронов устанавливаются параллельно магнитным полям истока и стока. Таким образом, от истока к стоку течет спин-поляризованный ток. При этом электроны должны двигаться со скоростью, составляющей 1% от скорости света в вакууме. Величина тока регулируется посредством приложенного к затвору напряжения. Фокус состоит в следующем. Если перейти в неподвижную систему отсчета, связанную с электроном, то, согласно специальной теории относительности, в ней появляется магнитное поле, напряженность которого определяется (в гауссовой системе единиц) формулой:

$$\vec{H} = \frac{1}{c} [\vec{V} \cdot \vec{E}],$$

где  $-\vec{V}$  - скорость движения электронов,  $-\vec{E}$  - напряженность электрического поля, созданного приложенным к затвору потенциалом, а квадратные скобки обозначают векторное произведение.

При достаточной величине напряженности магнитного поля (таким образом, скорость движения электронов в данном случае весьма существенна) спины электронов изменяют ориентацию на противоположную. В результате сопротивление канала возрастает и ток уменьшается.

## Вывод

В чем состоит миссия спинтроники? Дело в том, что кремниевые процессоры в ближайшие десять-пятнадцать лет достигнут предела своих возможностей, поэтому именно сейчас необходимо искать иные физические принципы, на которых будут построены быстродействующие устройства с низкими энергопотреблением и тепловыделением. В спинтронных устройствах переворот спина практически не требует затрат энергии, а в промежутках между операциями устройство отключается от источника питания. Если изменить направление спина, то кинетическая энергия электрона не изменится. Это означает, что тепла почти не выделяется. Скорость изменения положения спина очень высока – переворот спина осуществляется за несколько пикосекунд.

## Литература

1. Ю. И. Манин, Вычислимое и невычислимое. — М. Сов. Радио. 1980, с. 128.
2. Р. Фейнман, [Моделирование физики на компьютерах](#). Сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления.» Вып.2. Ижевск. 1999. с. 53-95.
3. В.А. Садовничий, Квантовый компьютер и квантовые вычисления: Ижевск: Ижевская республиканская типография, 199, 288.
4. Э. Стин, Квантовые вычисления. 111стр. РХД. Москва-Ижевск.2000.

# КРАТКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ АРХИТЕКТУР ПРОЦЕССОРОВ

Байкова Р. Д.

*Научный руководитель: ассистент Кузнецов А. С.*  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, РФ

## SHORT ANALYSIS OF PROCESSOR ARCHITECTURE BASIC TYPES

Baykova R. D.

*Supervisor: assistant Kuznetsov A. S.*

Bauman MSTU, Department of Designing and Technology of Computer, Moscow, RF

### Аннотация

В данной работе приводится краткое описание и сравнение основных типов архитектур процессоров.

### Abstract

Short description and comparing of processor architecture basic types is presented in this work.

Под архитектурой процессора понимают набор основных сведений, необходимых для разработки этого процессора и его использования. Обычно эти сведения включают в себя структуру процессора, информацию о системе команд, системе прерывания, адресном пространстве и порядке доступа к памяти. Также к этим сведениям относятся состав и включение периферийного оборудования, организация виртуальной адресации и кэш-памяти, латентные задержки исполнения операций и доступа к памяти, множества команд, которые могут выполняться параллельно, механизмы защиты доступа к ресурсам, смены контекста, многопоточковой обработки и т.п.

Кратко рассмотрим основные типы архитектур.

**Скалярные процессоры** прошли путь от первых машин до современных суперкомпьютеров. Их развитие связано с поисками различных подходов к параллелизму. Однако основной рост производительности достигался за счет увеличения тактовой частоты. Конвейерные структуры и параллельные функциональные устройства в скалярных процессорах также повышают производительность. Но увеличение числа ступеней конвейера редко приводит к линейному росту производительности, поскольку команды сильно взаимосвязаны. А одновременная загрузка многих параллельных функциональных устройств весьма проблематична. В результате эти процессоры не способны выполнять более одной команды за такт.

Первыми наиболее известными отечественными машинами со скалярной архитектурой были БЭСМ-6 и серия ЕС ЭВМ, среди зарубежных отметим CDC 6600, CDC 7600 (Control Data Corp.) и серии IBM 360/370. Первоначально микропроцессоры также имели скалярную архитектуру. Например, CISC-процессоры – Intel 486, Motorola 68xxx, затем – RISC-процессоры: Intel 860, Motorola 88xxx.

**Суперскалярные процессоры** обеспечивают параллельную выборку и запуск двух или нескольких команд – в них несколько параллельных конвейерных устройств. Система команд таких процессоров может не отличаться от обычных скалярных, но наибольший эффект достигается при использовании RISC-архитектуры. Структура суперскалярных процессоров резко усложняется по мере увеличения числа одновременно исполняемых команд. Распараллеливание реализуют аппаратные средства динамического планирования, однако для повышения эффективности необходима оптимизация при трансляции программ.

Суперскалярная архитектура использована в микропроцессорах серии Alpha (например, Alpha 21264, 21364), PowerPC, Intel 960, IBM RS/6000 (процессоры серии Power) и т.д. Внутренняя структура серии Pentium также содержит элементы суперскалярной организации.

**Процессоры с длинным командным словом (WLIV)** в своих командах содержат явное указание на параллельную выдачу и выполнение операций. Оптимизация программ происходит статически, при трансляции. Поскольку эти процессоры не занимаются динамическим планированием, они не так резко усложняются при увеличении числа операций, задаваемых в одной команде. Кроме того, их архитектура позволяет вводить дополнительные функциональные устройства, что отражает более высокую степень модульности. Первые процессоры с длинным командным словом создала фирма Multiflow Computers. Сейчас данная архитектура используется, например, в серии 64-разрядных процессоров Intel IA-64 (первый процессор серии – Itanium).

При использовании суперскалярных процессоров и процессоров с длинным командным словом обычно не удается параллельно выполнять более четырех–восьми команд. Увеличение этого числа требует очень серьезной подготовки программ.

**Матричные процессоры** состоят из одного устройства управления и многочисленных идентичных арифметических устройств, которые выполняют одну программу над разными наборами данных. Достижение эффективности возможно только при параллелизме данных в самой программе. При этом эффективность максимальна, если параллелизм данных равен или кратен числу арифметических устройств. Модульность обеспечивает набор идентичных устройств, однако близкое действие схемотехники в данном случае ограничено.

Первыми системами, использующими матричные процессоры, были Illiac IV, DAP, а также CM-2 фирмы Thinking Machines Corp., в которой объединялось 64 тыс. простых процессорных элементов. В целом матричные процессоры явились переходным этапом к векторным процессорам.

**Векторные процессоры** также используют параллелизм на уровне данных. Наиболее распространены их реализации по конвейерным схемам. Благодаря синхронному конвейеру, множественным функциональным устройствам, зацеплению векторных операций и другим методам удается получать несколько результатов за один такт. Эффективность этих процессоров мало зависит от размерности векторов, на нее влияет лишь время разгона конвейера. Модульность обеспечивают параллельные функциональные устройства, а структурированность – детерминированность работы синхронного конвейера, в котором практически нет обычных схем управления, а само устройство управления моделирует временную диаграмму работы. В результате степень близкого действия схемотехники достаточно высока. Существенно, что на сегодня накоплен большой опыт векторизации программ и соответствующего программного обеспечения. Векторные процессоры применялись в таких суперкомпьютерах, как Cyber 205 фирмы CDC, Cray 1, в отечественной системе “Электроника СС БИС-1” и др.

**Мультиконвейерные масштабируемые процессоры** ориентированы на выполнение длинных цепочек векторных операций или параллельное выполнение взаимодействующих программ. Основа процессора – модули коммутации и обработки, соединяемые в последовательные цепочки и параллельные ветви. Каждый модуль способен одновременно выполнять несколько команд. При масштабировании возможно объединение сотен модулей, что позволяет получить соответственно сотни результатов за такт. Метакоманды для такого процессора обеспечивают согласованную работу всех модулей. Естественно, что для эффективного использования процессора требуется специальная подготовка программ.

**Систолические процессоры** являются специализированными мультиконвейерными устройствами для решения конкретной задачи. Они строятся на основе конвейерных устройств, конфигурируемых в соответствии с алгоритмом задачи. Производительность определяется числом устройств и степенью параллелизма их работы. Коммерческой системой с систолической архитектурой является Intel iWarp. Кроме того, известно немало исследовательских проектов систолических процессорных структур.

**Процессоры, управляемые потоком данных**, основаны на выявлении параллелизма с помощью поиска пары операндов для выполнения операции. Операнды,

принадлежащие к одной операции, помечаются одинаковыми метками и помещаются в ассоциативную память. Как только в памяти оказываются операнды с одинаковыми метками, инициируется соответствующая операция. Потенциально в данных процессорах возможна высокая степень параллелизма, однако для этого необходима специальная подготовка программ. Производительность процессора данного типа зависит от быстродействия ассоциативной памяти. Пока созданы только экспериментальные образцы таких процессоров, например проект Манчестерского университета, экспериментальный процессор Массачусетского технологического института (MIT) Tagged Token, проект Moonsoon и т.д.

**Мультиконтекстные процессоры** (mulithreading) предназначены для ослабления влияния задержек при обращении к памяти. Программа разбивается на независимые отрезки (threads), для каждого из которых выделяется контекстная память. Процессор последовательно обрабатывает каждый из программных отрезков, переключаясь за время одного такта с одной области контекстной памяти на другую. В англоязычной литературе для этого режима принят термин mulithreading, который можно перевести как микромультипрограммирование. При наличии нескольких параллельных функциональных устройств возможен одновременный запуск нескольких программ. Такой режим называют simultaneous multithreading, или параллельное микромультипрограммирование. Для хранения контекста и выполнения переключения программ требуются дополнительные аппаратные ресурсы, что отрицательно сказывается на тактовой частоте и времени выполнения операций. Средства контекстной замены обычно дополняют ту или иную архитектуру процессора.

Наиболее известные системы с данной организацией – НЕР фирмы Denelcor и Tera компании Tera Computer. В системе НЕР задействовано 16 процессоров, каждый из которых поддерживает до 128 процессов. В максимальной конфигурации система Tera объединяет 256 процессоров, каждый выполняет до 128 процессов (i-streams).

**Интеллектуальная память с прямым доступом** (IRAM, Intellectual Random Access Memory) также служит для сокращения потерь при обращении к памяти. Это особенно важно для ультрабольших интегральных схем. Пример реализации этой концепции – экспериментальная система Berkely V-IRAM. Важным шагом к серийной реализации IRAM является процессор Alpha 21364, у которого память занимает 90% площади кристалла.

**Процессоры с суперспекулятивной архитектурой** ориентированы на модель неявного параллелизма. Их задача – преодолеть предел параллелизма, задаваемый потоком данных при сохранении совместимости программ с другими процессорами. За счет механизмов предсказания переходов и изменения последовательности команд возможно в среднем вместо четырех команд за такт исполнять до 10, а для некоторых программ - до 19. По оценкам, процессор, выполняющий одновременно до 32 команд, будет содержать около 200 млн. транзисторов, а с учетом кэш-памяти - до 1 млрд.

# КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ. АППАРАТУРА С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Федосов А.В.

*Научный руководитель: к. т. н., доцент Шерстнёв В.В.*

Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

## POWER FACTOR. FACILITIES WITH POWER FACTOR CORRECTION

Fedosov A.V.

*Supervisor of studies: Candidate of technical science, reader Sherstnev V.V.*

BMSTU, Moscow, Russian Federation

### Аннотация

Настоящая работа посвящена коррекции коэффициента мощности и обзору аппаратуры с коррекцией коэффициента мощности.

### Abstract

This work is devoted to the power factor correction and to review of facilities with power factor correction.

### ВВЕДЕНИЕ

В прошлом большая часть электрической энергии потреблялась линейными нагрузками - лампами накаливания, нагревательными элементами и т. п. С конца 1990-х годов резко возросла доля нелинейных электропотребителей, персональных компьютеров, газоразрядных ламп и т. д.

Импульсный источник питания состоит из сетевого выпрямителя, сглаживающего конденсатора и преобразователя напряжения. Такой источник потребляет мощность, только когда напряжение, подаваемое с выпрямителя на сглаживающий конденсатор, выше напряжения на этом конденсаторе, что происходит в течение примерно четверти периода. В остальное время источник не потребляет мощности из сети, так как нагрузка питается от конденсатора. Таким образом, мощность отбирается нагрузкой только на пике напряжения, потребляемый ток имеет форму короткого импульса и содержит набор гармонических составляющих (см. рис. 1).



Рис. 1. Ток и мощность, потребляемые источником питания без коррекции и с коррекцией коэффициента мощности

Вторичный источник питания с коррекцией коэффициента мощности потребляет ток с малыми гармоническими искажениями, равномернее отбирает мощность от сети (см. рис. 1).

## КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

В цепях переменного тока принято различать четыре вида мощности. Во-первых, мгновенная мощность - произведение тока на напряжение в данный момент времени. Во-вторых, так называемая активная мощность - мощность, выделяющаяся на чисто резистивной нагрузке, измеряется она в ваттах. Активная мощность целиком идет на полезную работу (нагрев, механическое движение), и обычно именно ее понимают под потребляемой мощностью.

Так как реальная нагрузка обычно имеет еще индуктивную и емкостную составляющие, то к активной мощности добавляется реактивная. Нагрузкой реактивная мощность не потребляется: полученная в течение одного полупериода сетевого напряжения, она полностью отдается обратно в сеть в течение следующего полупериода, лишь напрасно нагружая провода. Реактивная мощность совершенно бесполезна, и с ней по возможности борются, применяя различные корректирующие устройства. Векторная сумма активной и реактивной мощностей дает полную мощность - соответственно, квадрат полной мощности равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей.

Комплексным показателем, характеризующим эффективность использования ресурсов ИП, является коэффициент мощности (КМ). Он определяется как отношение между активной (полезной) и полной (активной и реактивной) потребляемой мощностью:

$$K_{KM} = P_A / (P_A + P_P).$$

Так как разница между этими двумя мощностями появляется из-за реактивной мощности, не несущей никакой пользы, то в идеале активная мощность должна быть полной и соответственно коэффициент мощности - единица. Высокая реактивная мощность может возникать либо в результате большого сдвига фаз между напряжением и током, либо в случае, если потребление тока сильно отличается от синусоидального.

## КОРРЕКЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Для коррекции коэффициента мощности (Power Factor Correction, PFC) в настоящее время применяют два типа схем: пассивные и активные.

Пассивные схемы представляют собой один массивный дроссель, включенный последовательно с блоком питания и благодаря своей большой индуктивности сглаживающий пики потребления блока. Такая схема крайне проста, но неэффективна: если блок питания без коррекции имеет коэффициент мощности 0,65-0,7 (в зависимости от нагрузки), то пассивная коррекция позволяет увеличить его до 0,7-0,75, что на фоне достаточно заметной с точки зрения производителя стоимости мощного дросселя весьма скромный показатель. Впрочем, от пассивной коррекции есть и еще один положительный эффект - дроссель выступает как великолепный фильтр, гасящий высокочастотные помехи от блока питания.

Активный корректор коэффициента мощности должен удовлетворять трем условиям:

- Форма потребляемого тока должна быть как можно ближе к синусоидальной и - «в фазе» с напряжением. Мгновенное значение тока, потребляемого от источника, должно быть пропорционально мгновенному напряжению сети.
- Отбираемая от источника мощность должна оставаться постоянной даже в случае изменения напряжения сети. Это значит, что при снижении напряжения сети ток нагрузки должен быть увеличен, и наоборот.
- Напряжение на выходе PFC-корректора не должно зависеть от величины нагрузки. При снижении напряжения на нагрузке должен быть увеличен ток через нее, и наоборот.

Существует несколько схем, при помощи которых можно реализовать активную коррекцию коэффициента мощности. Наиболее популярна в настоящее время «схема

преобразователя с повышением» (boost converter). Эта схема удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к современным источникам питания. Во-первых, она позволяет работать в сетях с различными значениями питающего напряжения (от 85 до 270 В) без ограничений и каких-либо дополнительных регулировок. Во-вторых, она менее восприимчива к отклонениям электрических параметров сети (скачки напряжения или кратковременное его отключение). Еще одно достоинство этой схемы - более простая реализации защиты от перенапряжений. Упрощенная схема «преобразователя с повышением» приведена на рис. 2.

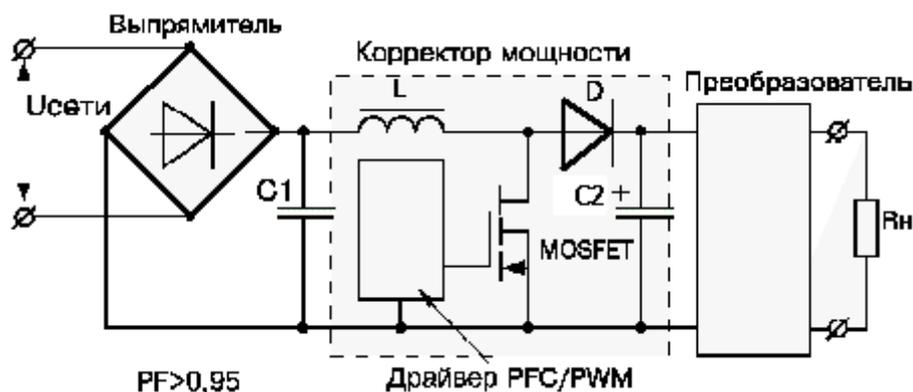


Рис. 2. Упрощённая схема «преобразователя с повышением»

Стандартный корректор коэффициента мощности представляет собой AD/DC-преобразователь с широтно-импульсной (PWM) модуляцией. Модулятор управляет мощным (обычно MOSFET) ключом, который преобразует постоянное или выпрямленное сетевое напряжение в последовательность импульсов, после выпрямления которых на выходе получают постоянное напряжение.

Временные диаграммы работы корректора показаны на рис. 3. При включенном MOSFET-ключе ток в дросселе L линейно нарастает – при этом диод заперт, а конденсатор C2 разряжается на нагрузку. Когда транзистор запирается, напряжение на дросселе L «открывает» диод, и накопленная в дросселе энергия заряжает конденсатор C2 и одновременно питает нагрузку. В приведенной схеме конденсатор C1 имеет малую емкость и служит для фильтрации высокочастотных помех. Частота преобразования составляет 50...100 кГц. В простейшем случае схема работает с постоянным рабочим циклом.



Рис. 3. Временные диаграммы работы корректора коэффициента мощности

Схема «преобразователя с повышением» может работать в трех режимах: непрерывном, дискретном и так называемом «режиме критической проводимости». В

дискретном режиме в течение каждого периода ток дросселя успевает снизиться до нуля и через некоторое время снова начинает возрастать, а в непрерывном - ток, не успев достигнуть нуля, снова начинает возрастать. Режим критической проводимости используется реже, чем два предыдущих. Он сложнее в реализации. Его смысл в том, что MOSFET открывается в тот момент, когда ток дросселя достигает нулевого значения. При работе в этом режиме упрощается регулировка выходного напряжения.

Выбор режима зависит от требуемой выходной мощности источника питания. В устройствах мощностью более 400 Вт используется непрерывный режим, а в маломощных - дискретный. Активная коррекция коэффициента мощности позволяет достичь значений 0,97...0,99 при коэффициенте нелинейных искажений THD (Total Harmonic Distortion) в пределах 0,04...0,08.

## **ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ**

### **Интегральные схемы**

Компания INTERNATIONAL RECTIFIER представила полностью интегральную и защищенную микросхему управления балластом с напряжением 600В для современных линейных флуоресцентных ламп, которая включает в себя схему активной коррекции коэффициента мощности (PFC).

На сегодняшний день, для соответствия государственным стандартам, современные балласты линейных флуоресцентных ламп используют PFC. Новая, полностью защищенная микросхема IRS2166D управления балластом с высокой степенью интеграции компании IR, дает разработчикам все необходимое при малой занимаемой площади. Новая IRS2166D объединяет PFC, управление балластом и полумостовой драйвер в компактной интегральной микросхеме. Схема PFC микросхемы работает в режиме критической проводимости с высоким коэффициентом мощности, 0.99, низким общим уровнем гармонических искажений (THD), менее 10%, а так же точным управлением шиной постоянного напряжения с допуском 2,5%.

### **Блоки питания**

Компания Corsair Memory недавно представила новую серию блоков питания Corsair HX, которые следуют высоким стандартам Hi-End класса. Новинки CMPSU-620HX и CMPSU-520HX, как видно из названия, имеют заявленную мощность 620 Вт и 520 Вт. Утверждается, что указанные блоки питания имеют значение КПД выше 80%, наделены активной системой коррекции коэффициента мощности и эффективно управляют оборотами 120мм вентилятора, шум от которого находится на одном уровне с шепотом человека. Стоимость 620 Вт модели ожидается на уровне \$170, модель с 520 Вт мощности обойдется покупателю примерно за \$130.

## **Литература**

1. [www.npk.ru](http://www.npk.ru)
2. [www.elcp.ru](http://www.elcp.ru)
3. [www.kinnet.ru](http://www.kinnet.ru)
4. [www.terraelectronica.ru](http://www.terraelectronica.ru)
5. [www.hitech-news.org](http://www.hitech-news.org)
6. [www.compitech.ru](http://www.compitech.ru)

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРА С ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Александров Р.Ю.

*Научный руководитель: доцент, к.т.н. Мешков С.А.*

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Россия, Москва

## HBT DESIGN PARAMETERS MODEL INVESTIGATION WITH INTERCONNECTION ON ITS ELECTRICAL PARAMETERS

Aleksandrov R. Yu.

*Scientific Advisor: associate professor, candidate of technical sciences Meshkov S.A.*

Bauman Moscow State University, Moscow, Russia

### **Аннотация.**

Рассмотрены проблемы моделирования параметров биполярных гетеротранзисторов, выполнен анализ существующих моделей НВТ. Используя элементы физических моделей токопереноса в НВТ и эмпирический материал, разработана модель взаимосвязи параметров конструкции транзистора с его электрическими характеристиками (на примере вольт-амперной характеристики). Намечены пути использования полученных результатов для моделирования влияния процессов деградации НВТ на его электрические характеристики.

### **Abstract.**

This work focused on problems of HBT parameters modeling and it described existing HBT models analysis realization. The interdependence model for HBT design parameters relationship with its electrical parameters has been developed using physical-based models of electron transport in HBT and some empirical data (by example of HBT current-voltage characteristic). The ways for using obtained results has been outlined for impact modeling for the purpose of HBT degradation processes modeling in section of its influence on HBT electrical parameters.

Одной из важных проблем современной полупроводниковой технологии является повышение эффективности производства и эксплуатации одних из перспективных типов полупроводниковых приборов на базе гетероструктур — биполярных гетеротранзисторов (БГТ). Для оценки эффективности может быть использован ряд информативных параметров, среди которых можно выделить ВАХ, коэффициент передачи, спектральную характеристику. ВАХ удобна для быстрой оценки самого биполярного гетеротранзистора, спектр же более чувствителен к любым изменениям параметров схемы на основе БГТ и поэтому является наиболее подходящим информационным параметром.

Для проведения исследования необходима физико-математическая модель биполярного гетеротранзистора, которая даёт связь конструктивных параметров прибора (параметров слоёв) с его электрическими характеристиками. Взаимосвязь входных и выходных параметров биполярного транзистора может быть описана различными способами, среди которых можно отметить представление в аналитической форме, посредством S-параметров, а также при помощи модели типа «эквивалентная схема». В этом случае реальные процессы в нелинейном устройстве можно заменить на набор активных (источники тока и напряжения) и пассивных (резисторы, емкости) элементов, более или менее точно описывающих взаимосвязь входных и выходных параметров. Поскольку работа ориентирована на компьютерное моделирование, модель вида «эквивалентная схема» наиболее удобна для использования в этом исследовании.

До недавнего времени моделирование работы биполярных гетеротранзисторов и, соответственно, устройств и схем с его участием, было затруднено вследствие отсутствия универсальной модели эквивалентной схемы. Проблема была связана с неприменимостью модели Гуммеля-Пуна к биполярным гетеротранзисторам за счет дополнительных эффектов, присущих НВТ и вносящих значительный вклад в распределение токов в гетероструктуре, которые не учитываются в модели Гуммеля-Пуна. Однако существуют два эффекта, которые

играют очень важную роль для моделирования биполярного гетеротранзистора. Первый — это саморазогрев, второй — зависимость тока от скорости пролёта частиц, вызванная модуляцией скорости и сильной токовой инжекцией в коллектор. Последний эффект является специфичным для биполярных гетеротранзисторов, выполненных на основе материалов групп III-V. Поэтому важен источник нелинейных искажений и им нельзя пренебрегать. Для учёта саморазогрева в рассматриваемой модели добавлена подплата, учитывающая тепловые процессы, которая основана на взаимосвязи тока и мощности, а также напряжения и температуры. Источник тока представляет собой элемент, рассеивающий мощность, эквивалентную произведению тока и напряжения. Транзистор имеет термическое сопротивление и термическую ёмкость, подключенные к внешнему температурному узлу. Кроме того, в другой более точной модели VBIC не учитывается связь теплового сопротивления БГТ с температурой кристалла, не учитывается сильная зависимость коэффициента идеальности для токов в переходах «база-коллектор» и «база-эмиттер» от температуры, что характерно для БГТ, в модели VBIC также не учтено то, что вследствие относительно низкого легирования коллектора и высоких плотностей тока БГТ весьма чувствительны к эффекту вытеснения базового тока и, наконец, в этой модели не учитывается эффект модуляции база-коллекторной барьерной емкости коллекторным током. Калифорнийский Университет в Сан-Диего (University of California San Diego, UCSD) при содействии компаний Rockwell, TRW, Hewlett-Packard, Texas Instruments, Cadence, Silvaco, Meta-Software и Иллинойского университета разработал модель эквивалентной схемы HBT UCSD, которая на настоящее время является общепризнанной и используется рядом фирм, производящих программное обеспечение для моделирования работы электронных схем. В частности, компания Agilent в своём программном продукте ADS (Agilent Advanced Design System) реализовала модель, которая выполнена на основе эквивалентной схемы UCSD. Кроме перечисленных, были разработаны другие модели, которые могут быть использованы для моделирования в различных программных средах, а также описаны на языке Verilog-A. Построение модели, что вполне очевидно, велось путем внесения указанных изменений в уже существующие модели полупроводниковых приборов, и для HBT UCSD базовой моделью являлась VBIC95.

Для проведения настоящего исследования модели UCSD биполярного гетеротранзистора недостаточно, поскольку параметры эквивалентной схемы модели HBT UCSD явно не отражают конструкцию транзистора и имеют с её параметрами лишь косвенную связь. В рамках работы разрабатывается обобщённая модель, напрямую связывающая конструктивные параметры транзистора (степень легирования, профиль легирования, толщина слоёв, их размеры) с его электрическими характеристиками (ВАХ). Для построения ВАХ транзистора из всей модели нам необходима зависимости тока коллектора  $I_{CC}(V_{CE})$  при фиксированном  $I_{bei}$ , где  $V_{CE}$  — напряжение «коллектор-эмиттер»,  $I_{bei}$  — ток базы:

$$I_{CC} = IS \cdot \frac{e^{\left(\frac{q \cdot V_{bcl}}{NF \cdot RT}\right)} - e^{\left(\frac{q \cdot V_{bcl}}{NR \cdot RT}\right)}}{D} \quad (1)$$

$$\text{где } D = qb + IS \cdot \frac{e^{\left(\frac{q \cdot V_{bcl}}{NE \cdot RT}\right)}}{ISE} + IS \cdot \frac{e^{\left(\frac{q \cdot V_{bcl}}{NA \cdot RT}\right)}}{ISA}$$

$$qb = \frac{q^1}{2} \cdot [1 + (1 + 4 \cdot q2)^{0.5}]$$

$$q1 = \frac{1}{1 - \frac{V_{bcl}}{V_{BF}} - \frac{V_{bcl}}{V_{BR}}}; \quad q2 = \frac{IS}{IR} \left( e^{\frac{q \cdot V_{bcl}}{NF \cdot RT}} - 1 \right)$$

Но для схемы с общим эмиттером имеет место соотношение

$V_{bcl} = V_{ce} - V_{bc}$ , поэтому выражение (1) преобразуется к виду  $I_{CC} = f(V_{ce}, \{IS, BF, NF, ISE, NE, BR, NR, ISC, NC\}, I_{bei} = const)$ ,

то есть мы получили модель для построения ВАХ транзистора, определяемую обобщенными параметрами IS, BF, NF и т.д. Используя эмпирические данные взаимосвязи конструкции БГТ с этими обобщенными параметрами, получаем модель взаимосвязи параметров слоев

БГТ с его электрическими параметрами. Модель может быть обращена для использования с целью формирования требований к слоям для подстройки ВАХ БГТ к желаемому виду.

Полученная методика может быть расширена для моделирования высокочастотных параметров БГТ и может использоваться для создания моделей деградации биполярных гетеротранзисторов.

### Литература

1. GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications / S. Kayali, G. Ponchak, R. Shaw. — Pasadena: California Institute of Technology, 1996. — 221 ps.
2. UCSD HBT Model Equations (<http://hbt.ucsd.edu/>).
3. A nonlinear Circuit Simulation Model for GaAs And InP Heterojunction Bipolar Transistor // Microwave Journal, pp. 126-134 Dec. 2003.
4. M. Rudolph, R. Doerner, K. Beilenhoff, P. Heymann. Scalable GaInP/GaAs HBT Large-Signal Model // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, pp. 2370 . 2376, Dec. 2000.
5. M. Rudolph, R. Doerner. Key Issues of Compact Models for GaAs Heterojunction Bipolar Transistors // IEEE Transaction, 2005.
6. M. Iwamoto, P. M. Asbeck, T. S. Low, C. P. Hutchinson, J. B. Scott, A. Cognata, X. Qin, L. H. Camnitz, D. C. D'Avanzo, .Linearity Characteristics of GaAs HBTs and the Influence of Collector Design,. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, pp. 2377 . 2388, Dec. 2000.
7. M. Lundstrom, “III-V Heterojunction Bipolar Transistors,” chapter 1 of Heterojunction Transistors and Small Size Effects in Devices, edited by Magnus Willander, Krieger, Ltd., California, 1991.
8. A. Marty, G. E. Rey, and J. P. Bailbe, “Electrical behavior of an Npn GaAlAs/GaAs heterojunction transistor,” Solid State Electronics, vol.22, pp.549-557, 1979.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АНКЕРНЫХ БОЛТОВ ЭХО - МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

**Жалкова Г.С.**

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гриднев В.Н.*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

## RESEARCH OF ANCHOR BOLT USING ECHO-METHOD OF ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE CONTROL

**Zhalkova G.**

*Supervisor: candidate of engineering science, senior lecturer Gridnev V.*

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia*

e-mail: [blessoul@gmail.com](mailto:blessoul@gmail.com)

### **Аннотация**

В статье описаны принципы контроля анкерных болтов ультразвуковым эхо - методом и результаты экспериментальных исследований работы ультразвукового дефектоскопа А1220 АНКЕР, разработанного и изготавливаемого в НИО-16 “Акустические Контрольные Системы” МНПО “Спектр”.

### **Abstract**

Principles of echo-method are described; results of work ultrasonic defectoscop А1220 ANKER are given.

## **1. Теоретические основы контроля анкерных болтов**

Принцип контроля анкерных болтов заключается в следующем: с помощью ультразвукового преобразователя в торец болта посылают ультразвуковой импульс и наблюдают характер сигналов, принятых этим же преобразователем. Ультразвуковой импульс распространяется вдоль тела болта, отражается от его противоположного конца и возвращается обратно. Если анкерный болт не замоноличен в бетон или нет адгезии его тела к бетону, то ультразвуковой импульс, почти не затухая, проходит до другого конца болта и возвращается обратно, немного изменив свою форму. Таких челночных проходов импульса по болту может быть несколько, пока вся энергия сигнала не рассеется. Ультразвуковой импульс распространяется по болту со скоростью стержневой продольной волны, значение которой зависит от марки стали. Зная эту скорость в конкретном болте, легко определить его длину, если он оборван, или оценить, на какой глубине находится сужение его поперечного сечения или другой дефект, соизмеримый с размерами поперечного сечения болта.

Если анкерный болт хорошо связан с бетоном, то энергия ультразвукового импульса рассеивается через боковую поверхность болта в бетон и обратно к преобразователю сигнал приходит сильно ослабленным. При хорошей адгезии болта к бетону и длине болта более 1 метра сигнал от противоположного конца болта можно даже не увидеть на экране из-за того, что он будет ниже уровня помех. В то же время при этом на экране можно наблюдать колебания, приходящие с расстояний, меньших длины болта. Эти колебания могут быть вызваны отражениями от мест, где хорошая связь бетона с болтом частично нарушена.

Из опыта контроля анкерных болтов также известно, что если болт только начал корродировать, то он распирает бетон и его связь с ним как бы усиливается. Поэтому на этой стадии по характеру сигналов нельзя определить степень коррозии болта. Но болт в этом случае держится в бетоне ещё очень хорошо. При более сильной коррозии, когда толщина поражённого слоя доходит до 1 – 2 мм, связь болта с бетоном ухудшается, и это уже можно определить по наличию импульса отражения от противоположного конца болта.

## 2. Экспериментальные исследования распространения ультразвуковых волн в анкерных болтах

Исследование распространения ультразвука в анкерных болтах было проведено экспериментально.

Для проведения экспериментов была использована установка, состоящая из дефектоскопа А1220 АНКЕР и прямого совмещённого преобразователя продольных волн с жидкостным акустическим контактом на частоту 25 кГц.

На рис. 1 приведена осциллограмма многократных эхо-сигналов в свободном анкерном болте, не замоноличенном в бетон. Горизонтальная шкала на этом и следующем рисунке проградуирована в метрах с учётом скорости распространения УЗ импульса по телу болта. Эта скорость была определена по известной длине свободного болта. Она равна в данном случае 5200 м/с.



Рис. 1 Осциллограмма эхо-сигналов в свободном анкерном болте.

Фронт первого эхо-импульса на рис. 2 находится на расстоянии 1 м. То есть длина болта равна 1 метру. Между началом координат и фронтом первого эхо-импульса никаких колебаний нет, за исключением собственных колебаний ультразвукового преобразователя, затухающих, практически, к моменту времени, соответствующему длине 0,5 м. Это означает, что тело болта не имеет заметных дефектов.

Рис. 2 иллюстрирует реальный вид сигналов, полученных на разных анкерных болтах, замоноличенных в фундаменты агрегатов, работающих на станции. Масштаб по вертикали на рис. 2 существенно более мелкий, чем на рис. 1, так как болты хорошо схвачены с бетоном и сигналы, принятые из них, намного меньше, чем эхо-сигналы в свободном анкерном болте. Это ещё один показатель хорошей адгезии болта с бетоном. Энергия зондирующего сигнала почти вся уходит в окружающий бетон и назад к преобразователю приходит малая её часть.

Длины болтов, сигналы из которых представлены на рис. 2, можно оценить примерно равными 0,7 м. На осциллограммах 2 и 3, рис. 2, эхо-сигналы от внутренних концов болта видны достаточно отчётливо и их фронты расположены на отметках порядка 0,7 м. На осциллограмме 1, рис. 2, фронт такого же сигнала выделить труднее. Но, судя по малой амплитуде колебаний, принятых с глубин более 0,5 м, можно с уверенностью сказать, что длина этого болта не менее 0,6 м и он хорошо схвачен с бетоном. В противном случае эхоимпульс от конца болта был бы существенно больше по амплитуде.

Беспорядочные затухающие колебания, которые видны на осциллограммах рис. 2 на глубинах более 1 метра, вызваны малой частью энергии зондирующего сигнала, которая осталась в теле болта. Важно то, что на этих осциллограммах нет сосредоточенных

повторяющихся сигналов, похожих на импульсы рис. 1. Если бы такие импульсы были, даже с более быстрым уменьшением амплитуды от импульса к импульсу, то это означало бы, что энергия зондирующего сигнала не достаточно сильно поглощается бетоном, то есть связь с бетоном не велика.

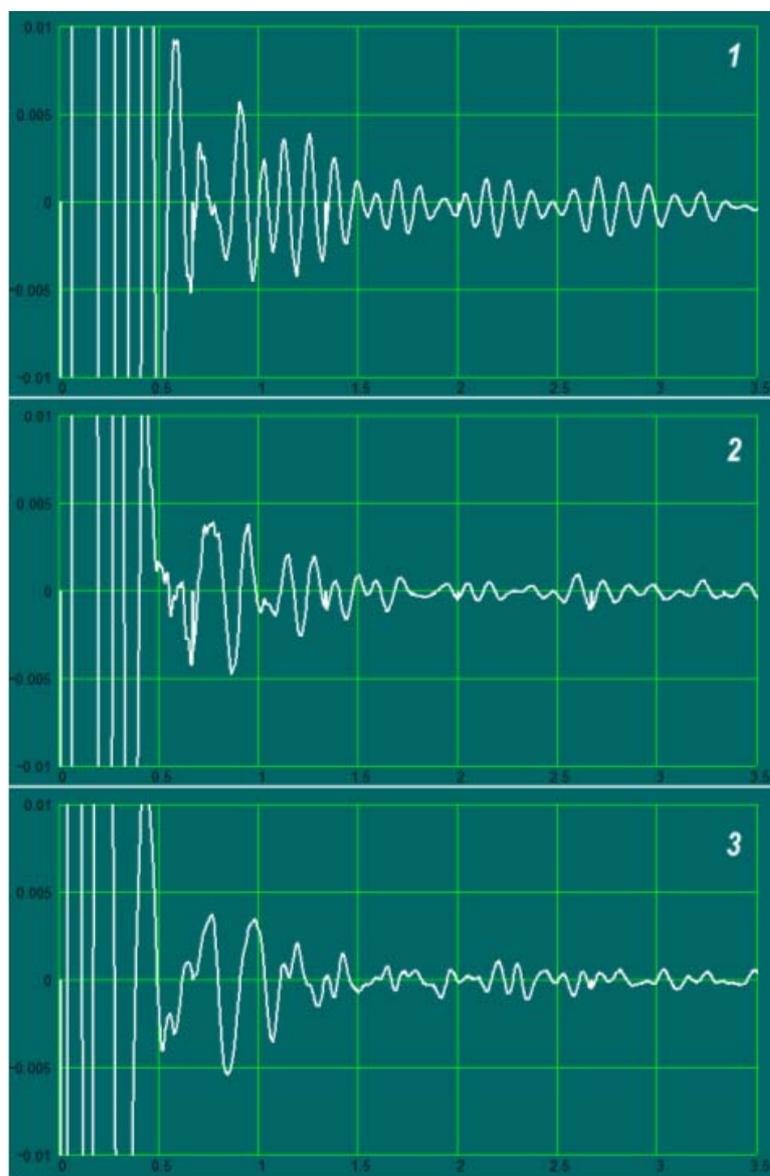


Рис. 2. Осциллограммы сигналов, полученные при контроле разных анкерных болтов.

#### Литература.

1. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом. Состояние и перспективы. – В мире НК, 2002, № 2(16), с.6-10.
2. Неразрушающий контроль. В 7 т. Т.3. Ультразвуковой контроль/ под ред. В.В. Клюева. -М: Машиностроение, 2004.-864 с.
3. Е.Ф. Кретов. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении- Радиоавионика, 1995.-334 с.
4. А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин. Оценка состояния бетонных фундаментов и анкерных болтов насосных агрегатов ультразвуковым дефектоскопом А1220. - Контроль. Диагностика, 2003, №4, с.15-19.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕЛЬСАХ.

**Жалкова Г.С.**

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гриднев В.Н.*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

## RESEARCH OF WAVEGUIDE DIFFUSION OF ULTRASONIC VIBRATIONS IN THE RAILS

**Zhalkova G.**

*Supervisor: candidate of engineering science, senior lecturer Gridnev V.*

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia*

e-mail: [blessoul@gmail.com](mailto:blessoul@gmail.com)

### **Аннотация**

В статье описаны теоретические основы волноводного метода контроля и результаты экспериментальных исследований распространения ультразвуковых сигналов в рельсах. Предоставлены результаты исследований работы ультразвукового дефектоскопа АКР1224М, разработанного и изготавливаемого в НИО-16 “Акустические Контрольные Системы” МНПО “Спектр”.

### **Abstract**

Principles of waveguide diffusion are described; results of work ultrasonic defectoscope AKR1224M are given.

### **Введение**

Проблема поиска дефектов в рельсах чрезвычайно актуальна. Для ее решения используют вагоны-дефектоскопы, позволяющие вести сплошной скоростной контроль рельсов в пути, и различные специализированные дефектоскопы ручного контроля. После обнаружения дефекта вагоном-дефектоскопом вторичный контроль выполняют механизированными приборами, прокатываемыми вручную по рельсам на многие десятки метров.

При контроле рельсового пути имеется ряд дефектоскопических задач, решение которых либо невозможно, либо весьма трудоемко при использовании существующих средств и методик. Это контроль при отрицательных температурах, вторичный контроль участков, сомнительных по показаниям мобильных средств дефектоскопии, контроль рельсов в километровом запасе без очистки, контроль стрелочных переводов, периодический контроль на участках с высокой интенсивностью движения.

Решение этих задач возможно с использованием ультразвукового низкочастотного волноводного метода контроля.

### **1. Теоретические основы контроля рельсов волноводным эхо - методом.**

Волноводный эффект распространения ультразвука в рельсах проявляется на частотах менее 200 кГц, когда длины волн акустических колебаний в рельсах соизмеримы с поперечными размерами рельса и тем более превышают их. Любое акустическое возмущение, возникшее в теле, распространяется в этом случае вдоль тела в обе его стороны в виде волн стержневого типа. Нарушения сплошности материала волновода или изменения его поперечного сечения отражают часть энергии волн в обратном направлении. Время задержки отраженного сигнала и его интенсивность являются информативными параметрами при контроле протяженных объектов волноводным эхометодом.

Рельс состоит из трех акустически связанных волноводов: головки, шейки и подошвы [2]. Поскольку у них разные формы и размеры поперечных сечений, то и параметры волн, способных в них распространяться, должны быть различны, причем существенно.

## 2. Экспериментальные исследования параметров импульсных акустических сигналов, распространяемых в рельсах.

Исследование волноводного распространения ультразвука в рельсах было проведено экспериментально.

Для определения основных параметров зондирующих сигналов была использована установка, состоящая из дефектоскопа АКР1224М с 12- элементной антенной решёткой (АР) и компьютера. Излучателями и приемниками ультразвука служили преобразователи антенной решётки с сухим точечным контактом и поперечными относительно их оси колебаниями контактного наконечника (протектора) [3]. Антенная решётка помимо приёмно-излучающих элементов содержит устройство управления и предварительный усилитель сигнала.

На рис. 1, *а* приведена одна из реализаций принятого сигнала из рельса, на рис. 1, *б* – суммарная реализация от всех элементов решетки, а на рис. 1, *в* – модуль спектральной плотности суммарной реализации. Эти сигналы получены от антенной решетки, установленной на поверхность катания рельса на расстоянии 5 м от его торца. В каждой реализации сигналов, принимаемых отдельными элементами решетки, полезный эхосигнал от торца рельса различить невозможно (см. рис. 1, *а*). Уровень его меньше уровня шума. В суммарной реализации (рис. 1, *б*) эхосигнал от торца существенно превышает шум. По времени его задержки можно легко определить групповую скорость распространения сигнала в головке рельса. Она приблизительно равна 3100 м/с. Спектр частот суммарной реализации (рис. 1, *в*) позволяет определить полосу пропускания приемного тракта, которую следует использовать для контроля рельса с поверхности катания. В данном случае это 20...60 кГц.

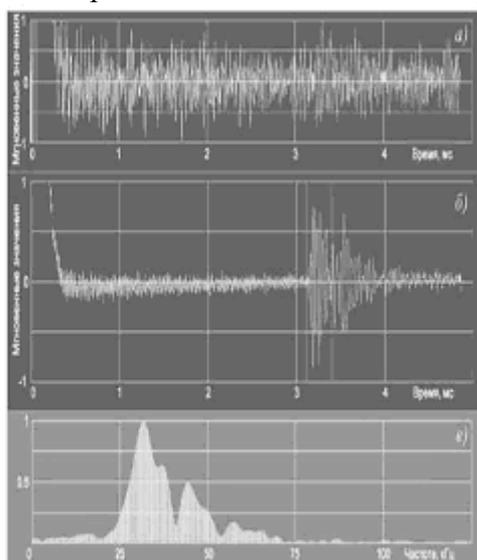


Рис. 1. Осциллограмма реализации сигнала, принятого одним из элементов антенной решетки (а), суммарная реализация эхосигналов от всех элементов решетки (б), модуль спектральной плотности суммарной реализации (в)

Результаты исследований распространения ультразвуковых сигналов в шейке, головке и подошве рельса приведены в таблице 1. Использовали метод записи всех комбинационных реализаций входных колебаний, принимаемых дефектоскопом из рельса (их общее количество равно 66), и суммирования их с различными временными задержками, обеспечивающими одностороннюю направленность АР в сторону торца рельса. Подбором значения фазовой скорости УЗ сигналов добивались максимальной амплитуды эхо-сигнала от торца рельса. Подбором значения групповой скорости добивались правильного измерения дальности до торца.

Из результатов, приведённых в табл. 1, следует, что при переходе с контроля, например, головки рельса на шейку, придётся использовать другой вариант настроек прибора.

Таблица 1

Тип рельса	Поверхность катания			Шейка			Перо подошвы			Кромка подошвы		
	Частота, кГц	Фазовая скорость, м/с	Групповая скорость, м/с	Частота, кГц	Фазовая скорость, м/с	Групповая скорость, м/с	Частота, кГц	Фазовая скорость, м/с	Групповая скорость, м/с	Частота, кГц	Фазовая скорость, м/с	Групповая скорость, м/с
Р50	36	2950	3100	53	3500	3000	49	3100	2980	48	2100	3100
Р65	37	2900	3100	56	3450	3050	55	3100	2960	53	2120	3060

Рассмотрим результаты контроля различных частей рельса ультразвуковым дефектоскопом АКР1224М. Перед контролем прибор калибруют (измеряют и запоминают опорный уровень от какого-то известного опорного отражателя, например, торца рельса). Затем производят приём сигналов, устанавливая поисковое устройство на ту поверхность рельса, на которой была выполнена калибровка (см. рис.2). Эхо-сигналы, превысившие браковочный уровень, считаются сигналами от дефектов.

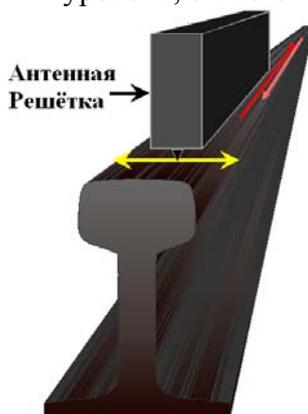


Рисунок 2. Схема контроля

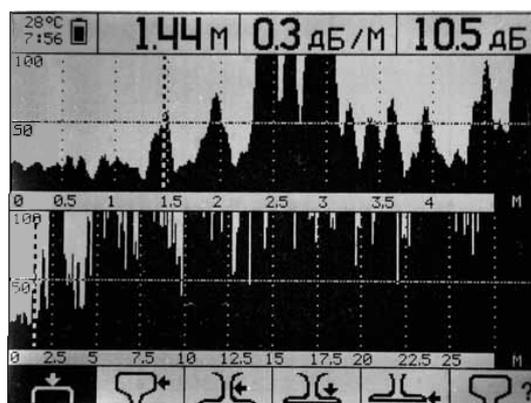


Рисунок 3. Сигналы от моделей дефектов в головке рельса

На рис. 3 показаны эхо-сигналы от моделей поперечных трещин в головке рельса длиной 2,6 м. Трещины смоделированы наклонными пропилами, заходящими на поверхность катания рельса и на боковую поверхность головки. Площади поперечного сечения пропилов равны 10 и 12 % от площади поперечного сечения головки. Они расположены на расстояниях 0,5 и 1 метр от торца рельса, соответственно. Поисковое устройство дефектоскопа было установлено на поверхности катания рельса на расстоянии в 1,4 м до ближайшего пропила. До торца рельса было 2,4 м. На рис. 3 импульсы от пропилов и от торца рельса хорошо видны. Их максимумы находятся приблизительно около отметок 1,5, 2 и 2,5 м дальности. Курсор автоматического измерения дальности остановился на переднем фронте импульса от ближайшего к поисковому устройству пропила.

Рис. 5 и 6 иллюстрируют слабое проникновение УЗ сигналов из одного пера подошвы в другое при установке поискового устройства на кромку пера. То есть для контроля всей подошвы рельса поисковое устройство нужно последовательно устанавливать на каждое перо. На рис. 5 приведено изображение сигналов на экране дефектоскопа при расположении поискового устройства на кромке пера без пропила, а на рис. 6 – на кромке с пропилом. В обоих этих случаях от поискового устройства до пропила было 1,85 м, до торца – 2,35 м.

Мешающее действие болтовых отверстий на процесс обнаружения дефектов в головке и подошве рельса было оценено сравнением изображений сигналов на экране АКР1224 при установке АР на поверхность катания, боковую грань головки, перо и кромку подошвы в трёх метрах от торца рельса Р65 в двух случаях: когда болтовые отверстия отсутствовали и при их наличии. В обоих случаях эхо-сигналы от торца рельса ничем не отличались.

При установке антенной решётки на шейку рельса, болтовые отверстия легко обнаруживаются, так как являются достаточно большими отражателями. На рис. 7 и 8 показаны осциллограммы эхо-сигналов от торца рельса при расположении АР на шейке рельса в трёх метрах от его торца.

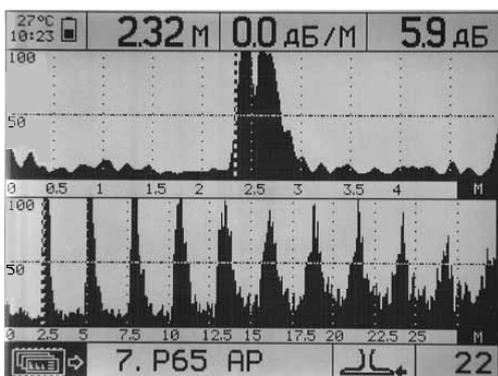


Рисунок 5 Сигналы в пере подошвы рельса без пропила

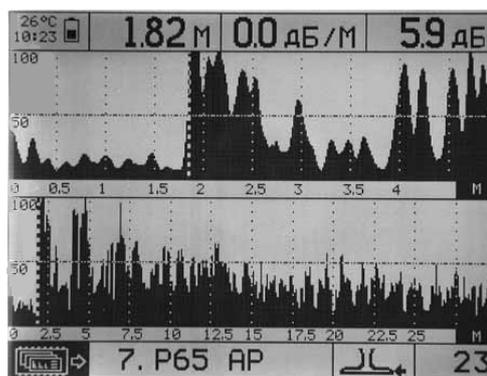


Рисунок 6 Сигналы в пере подошвы рельса с пропилом, имитирующем трещину

На рис.7 слева показаны сигналы при отсутствии болтовых отверстий, на рис.7 справа – при их наличии. Легко видно, что болтовые отверстия, не только дают вполне заметный на фоне шума отражённый сигнал, но и существенно ослабляют эхо - импульс от торца рельса.

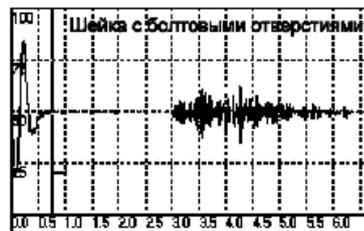
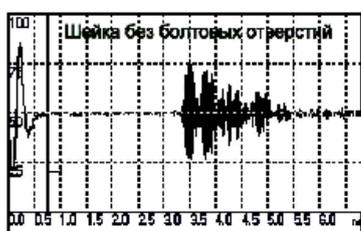


Рис.7 Эхо-сигналы от торца рельса Р65 при расстояниях между АР и торцом 3 м при контроле рельса с поверхности шейки

### Заключение:

1. Рабочие частоты сигналов для контроля головки, шейки и подошвы рельса и скорости их распространения различны, и перед контролем определенной части рельса необходимо выбрать нужный набор параметров.
2. Дефекты в головке рельса выявляются приблизительно одинаково, независимо от поверхности, с которой производят контроль (поверхности катания или любой боковой грани);
3. Дефекты в пере подошвы можно обнаружить только при контроле этого пера.
4. Болтовые отверстия при контроле головки и подошвы рельса не влияют на порог обнаружения дефектов в этих частях рельса.

### Литература

1. А. К. Гурвич, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин. Применение ультразвукового дефектоскопа АКР1224 для контроля рельсов волноводным методом. XVII Российская научно-техническая конференция с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика», Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 5 - 11 сентября 2005. Тезисы конференции. Секция П5, докл. П5-1, с. 307.
2. Гурвич А.К., Дымкин Г.Я. Способ ультразвукового контроля рельсов: а.с. СССР №540504.
3. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н. Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля. - Контроль. Диагностика, 2003, № 2, с. 30-39.
5. А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин. Ультразвуковой контроль рельсов волноводным эхометодом. - Контроль. Диагностика, 2005, №7, с.16-19.

# РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ПРИБЛИЖЕННОГО ПОСТРОЕНИЯ МНОЖЕСТВА ПАРЕТО В ЗАДАЧЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.

Котов И.О.

*Доктор физико-математических наук, профессор, Карпенко А.П.  
МГТУ им Н.Э.Баумана, Москва, Россия*

## PARALLELING OF APPROXIMATION BUILDING PARETO'S MULTITUDE METHODS FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION TASK SOLUTION.

Kotov I.O.

*Doctor of physico-mathematical science, professor, Karpenko A.P.  
BMSTU, Moscow, Russia*

### Аннотация

Рассматриваются методы построения множества Парето для решения задачи многокритериальной оптимизации. Предлагаются схемы распараллеливания этих методов. Дается оценка эффективности предложенных схем.

### Abstract

Suggests methods of construction Pareto's multitude for multi-objective optimization task solution. Offer ways to paralleling this methods. Gives rough estimate efficiency of paralleling.

**Введение.** Задачу многокритериальной оптимизации запишем в виде  $\min_{X \in D_X} \Phi(X) = \Phi(X^*)$ ,

где  $X$  - вектор варьируемых параметров, принадлежащий компактному непустому множеству допустимых значений  $D_X \subset R^n$ ,  $\Phi(X) = (\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_m(X))$  - векторный критерий оптимальности, осуществляющий отображение множества  $D_X$  в непустое критериальное множество  $D_\phi \subset R^m$ ,  $X^*$  - искомое решение задачи;  $R^n, R^m$  - арифметические векторные пространства размерности  $n \geq 1$  и  $m > 1$ , соответственно. Запись  $\min_{X \in D_X} \Phi(X)$  понимается лишь в том смысле, что лицу, принимающему решение (ЛПР),

желательно уменьшить значения частичных критериев оптимальности  $\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_m(X)$ , полагаемых однозначными функциями вектора  $X$ .

Обозначим  $Y = \Phi(X)$  и будем писать  $Y^1 \leq Y^2$ , если  $Y^1 \neq Y^2$  и  $y_j^1 \leq y_j^2$ ,  $j \in [1, m]$ . Будем также говорить, что вектор  $Y^1$  из критериального множества доминирует (по Парето) вектор  $Y^2$  из того же множества, если  $Y^1 \leq Y^2$ . Не формально, множество Парето  $D_\phi^*$  поставленной задачи многокритериальной оптимизации можно определить как совокупность векторов  $Y \in D_\phi$ , среди которых нет доминируемых. Формально,  $D_\phi^* = \{Y^* \in D_\phi : \{Y' \in D_\phi : Y' \leq Y\} = O\}$ . Множество векторов  $X \in D_X$ , которые порождают множество Парето, будем обозначать  $D_X^*$  и называть эффективным по Парето. Формально,  $D_\phi^* = \Phi(D_X^*)$ .

Актуальность приближенного построения множества Парето обусловлена тем обстоятельством, что согласно принципу Эджворта-Парето [1] при «разумном» поведении ЛПР выбор решения следует производить на основе множества Парето.

Система поддержки решения многокритериальной задачи на основе множества Парето должна обеспечивать следующие основные функции: построение некоторой конечномерной аппроксимации множества Парето  $\tilde{D}_\phi^*$ ; визуализация множества  $\tilde{D}_\phi^*$ ; выбор на этом множестве неформальными методами точки  $Y^*$ ; автоматический расчет и визуализация

решения  $X^* : \Phi(X^*) = Y^*$ . В работе рассматривается первая из перечисленных функций - построение конечномерной аппроксимации множества Парето.

В соответствии с классификацией Флина [2] выделяется два больших класса параллельных вычислительных систем - SIMD-системы и MIMD-системы. Методы распараллеливания существенно различны для систем указанных классов. Работа ориентирована на однородные MIMD-вычислительные системы, частным случаем которых являются вычислительные кластеры. Среди MIMD-систем различают системы с общей памятью и системы с распределенной памятью. Результаты работы применимы как для тех, так и для других систем.

**Методы построения конечномерной аппроксимации множества Парето.** Можно выделить четыре следующих основных метода построения конечномерной аппроксимации множества Парето [3].

Первый метод основан на покрытии множества  $D_X$  шарами, радиусы которых определяются константами Липшица частичных критериев оптимальности. Метод позволяет строить множество Парето с контролируемой точностью, однако требует знания констант Липшица и приводит к весьма сложным алгоритмам.

Второй метод (метод скаляризации) основан на свертывании векторного критерия оптимальности в скалярный критерий с помощью весовых множителей и решении большого числа задач условной глобальной однокритериальной оптимизации при разных значениях этих множителей. Точность аппроксимации множества Парето в этом случае также можно оценить с помощью констант Липшица частичных критериев оптимальности. Метод применим для построения аппроксимации только выпуклого множества Парето.

Третий метод (метод вариантных расчетов) идейно является самым простым. Метод состоит в вычислении значений векторного критерия оптимальности во многих точках множества  $D_X$  и отборе среди них недоминируемых векторов. Оценка качества решения в этом методе обычно отсутствует.

Четвертый метод основан на одновременном поиске многих векторов, принадлежащих множеству Парето или близких к нему, с использованием принципов генетической скалярной оптимизации. В работе [3] предложена вероятностная оценка точности данного метода.

В работе рассматриваются второй и третий методы построения конечномерной аппроксимации множества Парето.

При построении конечномерной аппроксимации множества Парето, полученные решения могут быть неравномерно распределены как во множестве  $D_\Phi^*$ , так и во множестве  $D_X^*$  (нерепрезентативная аппроксимация). Поэтому, с одной стороны, для уточнения решения может понадобиться несколько прогонов используемого метода, а, с другой стороны, может потребоваться кластерный анализ для удаления лишних точек, образующих сгустки. Мы далее будем полагать, что точность получаемого решения достаточна и необходимости в дополнительных прогонах нет. Исключение лишних точек существенно для ускорения процесса визуализации множества  $D_\Phi^*$ . Поэтому кластерный анализ полученных точек также далее не рассматривается.

**Метод скаляризации.** Обозначим скаляризованный критерий оптимальности  $f(X)$ , а вектор весовых множителей  $\Lambda = (\lambda_j, j \in [1, m])$ ,  $\lambda_j \in [0, 1]$ . Метод скаляризации состоит в решении для разных векторов  $\Lambda$  задач глобальной однокритериальной оптимизации

$$\min_{X \in D_X} f(X) = \min_{X \in D_X} \sum_{j=1}^m \lambda_j \bar{\phi}_j(X) = \min_{X \in D_X} \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\phi_j(X) - \phi_j^{\min}}{\phi_j^{\max} - \phi_j^{\min}} = f(X^*) = Y^*, \quad (1)$$

где  $\phi_j^{\min}, \phi_j^{\max}$  - минимальное и максимальное значения критерия оптимальности  $\phi_j(X)$  на множестве  $D_X$ , соответственно.

Обозначим  $\Omega_\Lambda$  множество допустимых значений вектора  $\Lambda$ :  $\Omega_\Lambda = \{\Lambda : \lambda_j \in [0,1], j \in [1, m]\}$ . Для построения различных векторов  $\Lambda$  может использоваться покрытие множества  $\Omega_\Lambda$  некоторой «хорошей» сеткой [4], с целью сокращения вычислительных затрат могут использоваться различные адаптивные алгоритмы построения сетки. Мы ограничимся рассмотрением неадаптивных алгоритмов построения векторов  $\Lambda$ .

Для сокращения вычислительных затрат начальный вектор  $X^0$  при решении задачи (1) целесообразно выбирать на основе предыдущего вектора  $X^*$  с использованием различных адаптивных схем.

**Метод вариантных расчетов.** Простейшая схема метода вариантных расчетов имеет следующий вид: покрываем множество  $D_X$  некоторой «хорошей» сеткой [4] с узлами  $X_1, X_2, \dots$ ; вычисляем значения частичных критериев оптимальности  $\phi_j(X_i), j \in [1, m], i = 1, 2, \dots$  и, тем самым, векторы  $Y(X_i) = Y_i$ ; среди совокупности векторов  $Y_i$  выделяем недоминируемые векторы, которые и образуют искомую конечномерную аппроксимацию множества Парето.

С целью сокращения вычислительных затрат могут использоваться различные адаптивные алгоритмы построения сетки. Мы ограничимся рассмотрением неадаптивных алгоритмов построения векторов  $X$ .

**Распараллеливание метода скаляризации.** Идея простейшей схемы распараллеливания метода скаляризации состоит в следующем: область  $\Omega_\Lambda$  разбиваем на  $N$  одинаковых  $\Omega_\Lambda^1, \Omega_\Lambda^2, \dots, \Omega_\Lambda^N$  подобластей гиперплоскостями, перпендикулярными одной из координатных осей, например, оси  $0\lambda_1$ ; вычисления, связанные с подобластью  $\Omega_\Lambda^k$ , поручаем процессору  $P_k, k \in [1, N]$ , где  $N$  – количество процессоров в системе. Заметим, что такая схема распараллеливания называется геометрической и обеспечивает статическую балансировку загрузки вычислительной системы [2].

Введем следующие обозначения:  $L_\Lambda$  – количество векторов  $\Lambda$  (одинаковое для всех подобластей  $\Omega_\Lambda^k$ ), при которых должна быть решена задача оптимизации (1);  $N_\phi$  – суммарная вычислительная сложность частичных критериев оптимальности, независящая, полагается, от вектора  $X$ ;  $\hat{I}$  – среднее количество итераций, необходимых для решения задачи (1);  $t$  – время выполнения одной арифметической операции с плавающей запятой на процессорах  $P_1, P_2, \dots, P_N$ ;  $d$  – диаметр коммуникационной сети параллельной вычислительной системы;  $S[c]$  – латентность коммуникационной сети;  $l$  – длина вещественного числа в байтах;  $R[\text{байт}/c]$  – пропускная способность каналов связи коммуникационной сети. Под вычислительной сложностью здесь понимается суммарное количество арифметических операций, необходимых для однократного вычисления значений всех частичных критериев оптимальности. Заметим, что величину  $\hat{I}$ , как правило, можно оценить только экспериментально.

Во введенных обозначениях вычислительные затраты каждого из процессоров  $P_i$  можно оценить величиной  $T_{cal} \approx L_\Lambda N_\phi \hat{I} t$ . Коммуникационные затраты процессоров складываются, в основном, из расходов на передачу host-компьютеру компонент эффективных по Парето векторов  $X^*$  и соответствующих значений частичных критериев оптимальности. Таким образом, имеет место следующая оценка коммуникационных затрат

$$T_{com} \approx S + d \frac{L_\Lambda (n + m) l}{R}. \quad (2)$$

Время решения задачи на одном процессоре можно, очевидно, оценить величиной  $T_1 \approx NL_\Lambda N_\phi \hat{I} t$ . Итого, для ускорения метода скаляризации имеет место оценка

$$S_N = \frac{T_1}{T_N} \approx \frac{NL_\Lambda N_\phi \hat{I} t}{L_\Lambda N_\phi \hat{I} t + S + d \frac{L_\Lambda (n+m)l}{R}} \approx \frac{N}{1 + d \frac{(n+m)l}{RN_\phi \hat{I} t}}. \quad (3)$$

**Распараллеливание метода вариантных расчетов.** Для распараллеливания метода вариантных расчетов также целесообразно использовать геометрическую схему распараллеливания. В простейшем случае эта схема имеет вид: область  $D_X$  разбиваем на  $N$  одинаковых  $\Omega_X^1, \Omega_X^2, \dots, \Omega_X^N$  подобластей гиперплоскостями, перпендикулярными одной из координатных осей, например, оси  $0x_1$ ; вычисления, связанные с подобластью  $\Omega_X^k$ , поручаем процессору  $P_k, k \in [1, N]$ , где  $N$  – количество процессоров в системе. Так же, как при распараллеливании метода скаляризации, такая схема распараллеливания обеспечивает статическую балансировку загрузки вычислительной системы.

В дополнение к обозначениям предыдущего раздела обозначим  $L_X$  – количество векторов  $X$  (одинаковое для всех подобластей  $D_X^k$ ), при которых должны быть вычислены значения частичных критериев оптимальности. Тогда аналогично предыдущему разделу легко получить следующую оценку ускорения метода вариантных расчетов

$$S_N = \frac{T_1}{T_N} \approx \frac{NL_X N_\phi t}{L_X N_\phi t + S + d \frac{L_X (n+m)l}{R}} \approx \frac{N}{1 + d \frac{(n+m)l}{RN_\phi t}}. \quad (5)$$

Для повышения ускорения отбор недоминируемых точек сначала целесообразно проводить параллельно на каждом из процессоров и передавать для последующей обработки на host-компьютер только недоминируемые точки.

**Заключение.** Формулы (3), (5), как и следовало ожидать, показывают близкую к линейной зависимость ускорения от числа процессоров в системе, а также при больших  $N_\phi, \hat{I}$  (что типично для реальных задач) – близость ускорения к количеству процессоров.

Рассмотренные схемы распараллеливания не учитывают дисбаланс загрузки процессоров, который может быть вызван (1) зависимостью суммарной вычислительной сложности частичных критериев оптимальности  $N_\phi$  от вектора  $X$ , (2) различными значениями среднего количества итераций  $\hat{I}$  в подобластях  $\Omega_k^\Lambda, k \in [1, N]$  и пр. Дисбаланс загрузки процессоров может значительно снизить эффективность данной схемы распараллеливания. Поэтому при решении многокритериальной задачи оптимизации на основе рассмотренных методов целесообразно использовать динамическую балансировку загрузки вычислительной системы, рассмотрение которой, однако, выходит за рамки данной работы.

## Литература

1. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход.- М. Физматлит, 2002.-176 с.
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл.,В. Параллельные вычисления. –СПб.:БХВ-Петербург, 2004.- 608 с.
3. Березкин В.Е., Каменев Г.К., Лотов А.В. Гибридные адаптивные методы аппроксимации невыпуклой многомерной границы Парето// Журнал вычислительной математики и математической физики, 2006, том 46, №11, с.2009-2023.й
4. Соболев И.М., Ситников Р.Б. выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями.- М.:Дрофа, 2006.-175 с.

# ОСОБЕННОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Панфилова С. П.

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гриднев В. Н.*  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

## SOME FEATURES OF THERMOGRAPHY OF ELECTRONIC DEVICES

Panfilova S. P.

*Supervisor: candidate of technical science, associate professor Gridnev V. N.*  
Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russia  
e-mail: s.panfilova@mail.ru

### Аннотация

В данной статье приведены особенности применения бесконтактного теплового контроля для диагностики электронно-вычислительных средств. Рассмотрены типичные дефекты, обнаруживаемые с помощью данного метода контроля. Подробно описаны некоторые проблемы, характерные для теплового контроля электронно-вычислительных средств, и даны возможные пути для борьбы с ними.

### Abstract

Some features of thermography of electronic devices are described in the article. The most typical defects are given. Some problems in the process of thermography of electronic devices are considered and the ways of solving them are suggested.

### Введение

Бесконтактный тепловой метод контроля является эффективным инструментом в диагностике электронно-вычислительных средств. Он успешно применяется для обнаружения проблем в конструкции на ранней стадии создания устройств, а также для выявления дефектов электронных ячеек при серийном производстве. Бесконтактный тепловой метод контроля имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным методом контроля тепловых полей, что сделало его неотъемлемой частью системы контроля качества и полезным инструментом при разработке на предприятиях ведущих в мире производителей электронных средств. На рисунке 1 приведена возможная схема организации теплового контроля на производстве электронно-вычислительных средств.

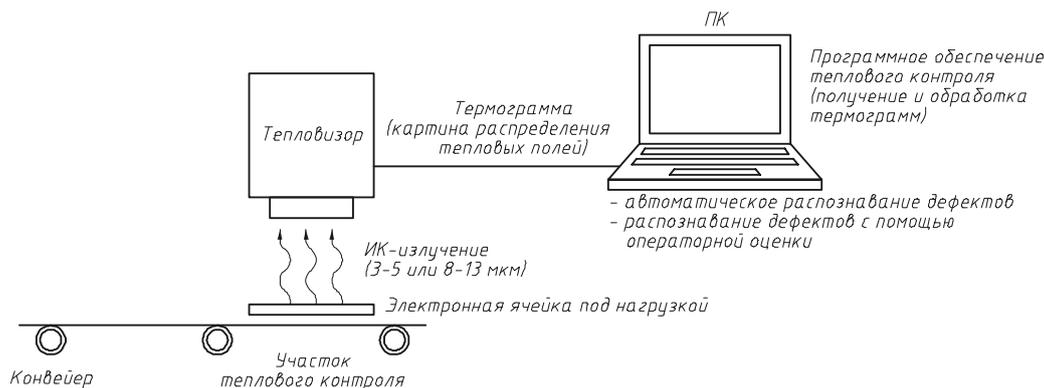


Рисунок 1. Схема теплового контроля на производстве электронных ячеек

Система теплового контроля обычно включает в себя аппаратную составляющую, главной частью которой является инфракрасная камера (тепловизор), программную составляющую, которая позволяет проводить температурный анализ полей, зарегистрированных аппаратной составляющей, а также методику проведения эксперимента, которая разрабатывается специалистами для каждого типа контролируемого прибора с учетом особенностей его конструкции, а также особенностей теплового контроля объектов электронной промышленности.

## Типичные дефекты электронно-вычислительных средств, выявляемые тепловым методом контроля

Тепловой режим электронно-вычислительного средства является одним из определяющих факторов его работоспособности. Так, температурные аномалии напрямую влияют на вероятность отказа всего электронного узла, а общий температурный режим влияет на срок службы изделия. Кроме того, измененное тепловое поле может сигнализировать о дефектах, поиск которых обычными способами (например, визуально или с помощью контактных датчиков) может быть затруднен по ряду причин или неэффективен. Например, при анализе теплового поля узла или блока радиоэлектронной аппаратуры по определенным температурным аномалиям может быть выявлено неправильное подключение элемента в схеме, некачественный монтаж, неудачное размещение элементов на плате (рисунок 2). В случае многослойной печатной платы по ее тепловому полю можно выявить проблемы утонения и коррозионного износа проводников, некачественную металлизацию, отслоения проводников.

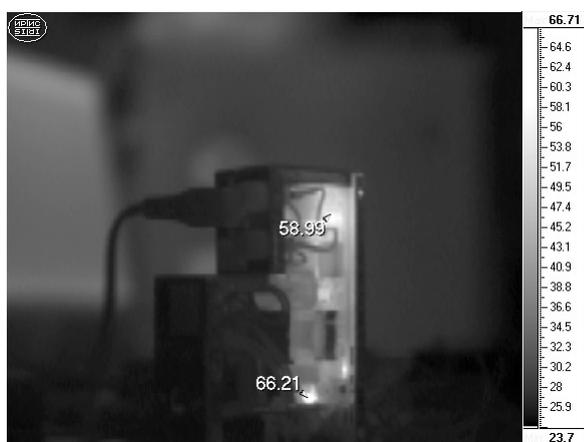


Рисунок 2. Полученная в конструкторском бюро ЗАО «Альтоника» совместно с кафедрой ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана термограмма электронного блока, наглядно отражающая перегрев микросхем



Рисунок 3. Полученная в лаборатории кафедры ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана термограмма форсированной компьютерной системы с жидкостным охлаждением, наглядно отражающая перегрев микросхем памяти видеокарты

Если говорить о микроэлектронике, то в этой области, анализируя тепловые поля, можно выявлять дефекты р-п переходов (поверхностная деградация, электромиграция, межметаллические соединения, «шнурование» тока, мезоплазма), неравномерность плотности тока, газовые пузыри между кристаллом и основанием, дефекты теплоотвода и диффузионной сварки, повреждения кристалла, обрыв проводов и короткие замыкания и другие дефекты. Посредством анализа тепловых полей интегральных схем можно контролировать качество сварки ее выводов с контактными площадками печатных плат. Качество высокотемпературных пленочных покрытий также можно проанализировать по их тепловым полям: отслоения от подложки, неравномерность толщины выявляют по конфигурации теплового поля [1].

Кроме того, несомненно важную роль играет тепловой контроль на стадии разработки устройств: визуализация теплового поля устройства позволяет выявить проблемы в конструкции устройства, оценить системы охлаждения и сделать выводы о приемлемости тепловых полей в разрабатываемом устройстве (рисунок 3).

### Особенности теплового контроля в электронной промышленности

При внедрении системы бесконтактного теплового контроля на производстве электронно-вычислительных средств следует учитывать особенности применения этого метода в электронной промышленности. Основной проблемой при тепловом контроле электронно-вычислительных средств является сложность самого объекта контроля. Обычно электронное изделие изготовлено из множества материалов с разными коэффициентами

излучения, причем плотность компоновки в них очень велика, что обуславливает усиление эффекта взаимотражений внутри объекта контроля. Если касаться микроэлектроники, то следует отметить значительное уменьшение размеров производимых изделий, что также усложняет процедуру контроля. Кроме того, следует отметить проблему организации самой процедуры контроля, которая включает в себя моделирование условий работы ячейки. Также существенной методической проблемой является то, что многие ячейки характеризуются малыми температурными сигналами. Кроме того, важным шагом при внедрении теплового контроля на производстве или в секторе разработки является выбор оборудования и поставляемого с ним программного обеспечения, так как технические характеристики выбранного тепловизора обычно помогают облегчить борьбу с некоторыми особенностями теплового контроля электронных средств. Рассмотрим некоторые из проблем более подробно.

### **Проблема выравнивания коэффициента излучения**

Исследование тепловых полей изделий радиоэлектроники осложняется значительным разбросом коэффициента излучения. Обычно такое изделие изготовлено из различных материалов, коэффициент излучения которых может значительно варьироваться, например, для электронной ячейки первого уровня — от 0,2 до 0,9. В случае такого разброса коэффициента излучения оборудование для теплового контроля не может успешно откалиброваться для корректного измерения абсолютных значений температуры — необходимо получить значения коэффициента излучения в различных точках и передать их тепловизору. При внедрении средств ТК на предприятиях электронной промышленности с указанными проблемами справляются различными способами.

Так, для выравнивания излучательной способности фирма IBM применяла в свое время белое порошкообразное покрытие оксида алюминия, которое выравнивало коэффициент излучения в пределах поверхности всего устройства, причем чувствительность теплового контроля была такова, что позволяла обнаруживать повреждение отдельного штырькового вывода 28-контактной интегральной схемы [1].

Фирма FLIR использует для этой цели программные средства: программа EQUAL предусматривает предварительный нагрев изделия, например, печатной платы, в боксе с температурой 40—50 °С, после чего составляют карту распределения коэффициента излучения. Затем снимают тепловое поле изделия в рабочем режиме и преобразуют его в карту истинных температур с учетом измеренных пиксельных значений коэффициента излучения. В этом случае важную роль играет программное обеспечение системы теплового контроля.

### **Проблема размеров контролируемых объектов**

Данная проблема касается в первую очередь изделий микроэлектронной промышленности и возникает в том случае, когда исследуется объект с размерами, меньшими размеров матрицы тепловизора. В этом случае тепловизор измеряет температуру, которая является средней для объекта и его фона. При регистрации тепловых полей объектов таких размеров всегда следует учитывать пространственное разрешение используемого тепловизора. Пространственное разрешение тепловизора получают следующим образом. Перед абсолютно черным телом устанавливаются заслонки с различными щелями, и измеряется модуляция выходного сигнала в зависимости от ширины щели. После этого пространственное разрешение тепловизора определяется как ширина щели, которая дает 50% максимального значения модуляции, из которого пользователь затем может определить размер объекта, который он может исследовать с помощью данного тепловизора. Иногда 50% модуляции являются неприемлемым значением, так как дает существенные количественные искажения в измерениях температуры. В таком случае можно использовать полевую диафрагму, устанавливаемую в плоскости изображения. Полевая диафрагма позволяет ограничить излучение от частей пространства, не занятых исследуемым объектом, что существенно снижает искажения в измерениях температуры.

## **Проблема моделирования условий работы контролируемых ячеек**

Для проведения контроля тепловых полей необходимо, чтобы исследуемое электронное изделие было нагружено и функционировало в тех условиях, в которых должно эксплуатироваться. При моделировании условий работы устройства обычно приходится решать несколько проблем.

Первая проблема заключается в обеспечении возможности тепловизора заглянуть внутрь корпуса, если речь идет о ячейке в корпусе. Указанная проблема разрешается путем удаления верхней крышки или верхней части конструкции. Сложность при этом заключается в том, чтобы не нарушить потоки воздуха через конструкцию при удалении крышки. Для примера можно привести фирму IBM, которая для удаления верхней части конструкции использует лазерный резец, затем заглаживает поверхность, а отрезанную часть заменяет прозрачным окном [2]. При этом было обнаружено, что в большинстве случаев прозрачный диэлектрик (например, обычная бытовая пищевая пленка) работает для задач бесконтактного измерения тепловых полей достаточно хорошо: материал прозрачен, может быть плотно подогнан к корпусу и не нарушает передачу ИК-излучения [2].

Второй проблемой при моделировании естественных условий работы ячейки является настройка приборов, обеспечивающих режим работы. Для проведения теплового контроля необходимо понимание работы систем охлаждения, распределения воздушных потоков. Обычно в спецификациях поток воздуха указывается в кубических футах в минуту (cubic feet per minute — CFM) или в линейных футах в минуту (linear feet per minute — LFM). Однако эти цифры обычно сложно проверить измерениями. Например, показания анемометра, измеряющего линейную скорость потока воздуха, зависимы от положения при измерении, и в зависимости от ориентации датчика анемометр может обеспечивать получение данных, которые могут отличаться даже на порядок как друг от друга, так и от реального значения скорости. Более точный способ — контроль падения давления от входа ячейки к выходу ячейки.

Во многих случаях для создания потоков воздуха используются вентиляторы или кулеры, а также различные заслонки, перераспределяющие воздушные потоки по всему объему конструкции. Для определения функции отношения падения давления к приложенному к вентилятору напряжению должна быть протестирована полная подсистема воздушного охлаждения конструкции. Затем полученная кривая может быть использована для проведения самых разных тестов с установлением нужных потоков воздуха.

Следующей сложностью является определение входных напряжений и условий нагружения. Спецификации на устройство обычно определяют диапазон входных напряжений и минимальную и максимальную нагрузку для каждого выходного напряжения. При тепловом контроле ячейка должна проверяться в различных экстремальных условиях, которые могут возникнуть во время работы системы. Для определения этих условий необходимы детальные знания работа устройства, а в некоторых случаях и некоторые исследования. Спецификации и понимание работы устройства используются для определения, какие температурные тесты должны быть выполнены на определенной ячейке. Некоторые блоки имеют больше потенциальных режимов функционирования, чем другие, и поэтому для них должно быть проведено большее количество экспериментов, для того чтобы гарантировать качество конструкции ячейки.

## **Выводы**

При внедрении бесконтактного теплового контроля на производстве электронно-вычислительных средств следует учитывать особенности, сопутствующие применению тепловизионной техники для измерения тепловых полей такого специфичного для этого вида неразрушающего контроля объекта, как изделия электронной промышленности. В частности следует тщательно выбирать оборудование теплового контроля и уделять внимание программным средствам, поставляемым производителем оборудования, так как некоторые проблемы, например, такие как выравнивание излучательной способности, могут решаться

на программном уровне. Кроме того, следует заранее определиться с размерами исследуемых объектов, особенно, если речь идет о микроэлектронной промышленности, и учитывать их при выборе тепловизора: уделять внимание пространственному разрешению, возможности применять полевую диафрагму. Также важным аспектом при внедрении бесконтактного теплового контроля является выработка методики проведения эксперимента, так как для эффективного контроля требуется детальное понимание работы устройства для выработки наиболее показательных тестов, а также внесения особых подготовительных операций перед проведением эксперимента для повышения его достоверности, например, удаление некоторых поверхностей корпуса для обеспечения возможности тепловизора заглянуть внутрь конструкции при одновременном поддержании естественных условий работы устройства или применение особых методик выравнивания коэффициента излучения на поверхности исследуемой ячейки.

### Литература

1. Неразрушающий контроль. В 7 т. Т. 5. Тепловой контроль / Под ред. Ключева В. В. — М: Машиностроение, 2004. — 688 с.
2. R. J. Fishbune, “Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification”, IBM Power Technology and Qualification, — 2000, 7 p.
3. B. Linnander, “When It's Too Hot to Touch Use Infrared Thermography”, Circuits and Devices Magazine, IEEE, Volume 9, Issue 4, July 1993 pp. 35 – 37

## ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

**Панфилова С. П.**

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гриднев В. Н.*  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

## THERMOGRAPHIC EQUIPMENT FOR ELECTRONIC DEVICES DIAGNOSTICS

**Panfilova S. P.**

*Supervisor: candidate of technical science, associate professor Gridnev V. N.*  
Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russia  
e-mail: [s.panfilova@mail.ru](mailto:s.panfilova@mail.ru)

### Аннотация

В данной статье приведено описание оборудования теплового контроля. Представлен сравнительный анализ бесконтактных средств теплового контроля с традиционными средствами регистрации тепловых полей. Рассмотрены характеристики оборудования теплового контроля и приведен анализ характерных значений для диагностики изделий электронной промышленности.

### Abstract

Thermographic equipment is described in the article. Comparative analysis of the traditional equipment for thermal fields registration and thermographic equipment is given. The main characteristics of thermographs are described and their typical values for electronic devices diagnostics are suggested.

### Введение

За последнее десятилетие бесконтактный тепловой контроль зарекомендовал себя эффективным инструментом в диагностике электронно-вычислительных средств. Он успешно применяется для обнаружения проблем в конструкции на ранней стадии создания устройств, а также для выявления дефектов электронных ячеек при серийном производстве. Преимущества бесконтактного теплового контроля по сравнению с традиционным методом контроля тепловых полей сделали его неотъемлемой частью системы контроля качества и полезным инструментом при разработке на предприятиях ведущих в мире производителей

электронных средств. Однако при этом в связи с особенностями принципа контроля приходится анализировать нюансы его применения для изделий электронной промышленности и учитывать их при выборе оборудования для этого вида неразрушающего контроля.

### Технические средства построения изображений в ИК-диапазоне

Современные устройства для регистрации ИК-излучения работают в средневолновом инфракрасном диапазоне. Атмосфера имеет два участка относительной прозрачности в средневолновом инфракрасном диапазоне: 2—5 мкм и 8—13 мкм, что соответствует температурному диапазону  $-40$ — $+1700$  °С. Устройства обычно работают в одном из этих диапазонов, однако бывают и устройства, работающие в обоих диапазонах: в их конструкции предусмотрены датчики для регистрации излучения обоих диапазонов (например, тепловизор фирмы ИРТИС 2200С).

Аппаратным средством построения изображения в ИК-диапазоне является тепловизор. Исследование пространственных распределений температуры по одной или двум координатам требует сканирования поверхности объекта, которое осуществляют либо механическим (оптико-механическим), либо электронным способом (рисунок 1).

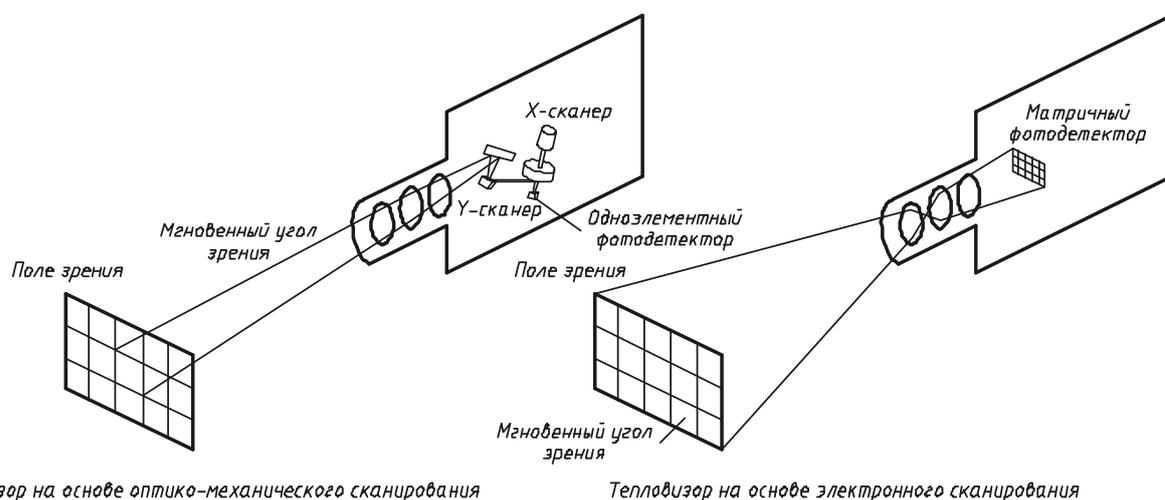


Рисунок 1 Схемы тепловизоров на основе оптико-механического и электронного сканирования [1]

В оптико-механических устройствах отклонение угла зрения производят с помощью колеблющихся или вращающихся оптических элементов (призм и зеркал). Визуализация теплового поля объекта с высоким геометрическим разрешением требует формирования многострочных кадров, поэтому при использовании единичных (или в виде линеек) приёмников отдаётся предпочтение квантовому механизму реакции на инфракрасное излучение, так как быстродействие фотонных приёмников составляет около 1 мкс. Из-за технических трудностей создания быстродействующих высокоинформативных оптико-механических сканирующих систем, сканирующие тепловизоры работают в малокадровом режиме, т. е. в основном для наблюдения неподвижных объектов. Все фотонные приёмники (InSb, CdHgTe и др.) для снижения фундаментальных шумов и достижения требуемой пороговой чувствительности по своей природе должны охлаждаться до криогенных температур (например, жидким азотом — до 77 К). К достоинствам охлаждаемых тепловизоров следует отнести высокое температурное разрешение (до 0,01 °С) и возможность непосредственного измерения абсолютной температуры объекта.

Принцип электронного сканирования был реализован в разработанных в конце XX-го века в матричных фотодетекторах нового поколения. В англоязычной литературе этот тип фотоприёмников называют матрицами, размещаемыми в фокальной плоскости объектива (Focal Plane Array — FPA). Основными преимуществами матричных систем тепловидения

являются отсутствие движущихся механических частей и одновременное визирование сцены всеми чувствительными площадками. Последнее преимущество позволяет увеличить время экспозиции каждой чувствительной площадки, т.е. уменьшить шумы, и обеспечить одновременное наблюдение быстроменяющихся тепловых событий. Современные матрицы используют как фотонные, так и тепловые ИК-приемники. Наиболее доступными по цене являются показывающие и измерительные тепловизоры, работающие на неохлаждаемых пироэлектрических и микроболометрических (в зависимости от интенсивности теплового излучения в пироэлектрических изменяется уровень поляризации каждого элемента, в болометрических внутреннее сопротивление) двумерных приёмниках теплового излучения. Для специальных применений, где требуется высокая частота смены термоизображений, повышенное температурное разрешение или спектральная селективность, разработаны тепловизоры на охлаждаемых матрицах. Наиболее распространены матрицы на основе силицида платины (PtSi), антимонида индия (InSb), тройных соединений (HgCdTe) и так называемых квив-материалов (QWIP), в частности арсенида галлия (GaAs).

### **Сравнение различных видов контроля тепловых полей электронно-вычислительных средств**

Для контроля тепловых полей электронно-вычислительных средств в настоящее время используются такие средства диагностики, как контроль с помощью контактных датчиков (например, термопара), контроль с помощью бесконтактных средств регистрации инфракрасного излучения (например, тепловизоров). Бесконтактный метод является более современным и во многих случаях более эффективным средством контроля тепловых полей электронно-вычислительных средств.

Преимущества бесконтактного метода по сравнению с контактным методом очевидны. Этот метод теплового контроля позволяет оценить тепловое поле электронного узла в целом, так как имеется возможность измерения в большом количестве точек с пространственным разрешением, ограниченным только волновым пределом. Основным преимуществом бесконтактного метода является то, что он относится к средствам неразрушающего контроля: ИК-датчики, расположенные в непосредственной близости от исследуемого объекта, фиксируют ИК-излучение и отсылают полученные данные компьютеру для их дальнейшего анализа, датчики при этом не контактируют напрямую с исследуемой ячейкой, поэтому не изменяют температурных или электрических характеристик исследуемого объекта, таким образом, получается наиболее правдоподобная картина происходящих изменений. С указанной особенностью бесконтактного метода связано еще одно его преимущество. Этот метод основан на регистрации излучения, поэтому позволяет исследовать объекты, имеющие размер порядка длины волны из диапазона, в котором работает ИК-приемник, то есть достигать микрометров, в то время как для контактных датчиков этот размер в настоящее время составляет, как правило, 1 мм.

Тепловой метод контроля для диагностики электронно-вычислительных средств впервые был применен компанией IBM в 1983 году и использовался при разработке источников питания [2]. В 1980-х годах измерения тепловых полей устройств проводились с помощью монтирования термопар на каждый компонент источника питания. Контроль каждого компонента в ячейке с помощью термопар являлся очень трудоемким процессом, т.к. типичная конструкция устройства (например, источника питания) включала более сотни компонентов. Кроме того, часто возникает сложность монтирования термопары на компонент из-за физических особенностей конструкции, когда трудно получить доступ к компоненту из-за механических особенностей корпуса. Также некоторые компоненты могут быть достаточно большими, и может потребоваться большой опыт оператора, проводящего эксперимент, для того, чтобы выбрать положение для монтирования термопары. Иногда термопары отваливаются в процессе эксперимента, что приводит к тому, что снимаются некорректные результаты и делаются неверные выводы.

Вследствие указанных недостатков контактного теплового метода со временем он стал применяться реже, а в 90-х гг., с развитием тепловизионной техники, когда на смену громоздким и малочувствительным камерам пришли более компактные чувствительные модели тепловизоров, был заменен бесконтактным методом. Контактные датчики применялись только в том случае, когда вследствие конструктивных особенностей применение бесконтактного метода было затруднено.

### **Основные характеристики тепловизоров, применяемых для контроля изделий электронной промышленности**

В связи с особенностями, которые имеет тепловой контроль в применении к изделиям электронной промышленности, следует тщательно выбирать оборудование, учитывая все его характеристики, так как они могут значительно повлиять на эффективность и достоверность результатов контроля. Рассмотрим сначала характеристики тепловизоров.

#### **Геометрическая разрешающая способность**

Геометрическая разрешающая способность изображения в матричных тепловизорах при правильно подобранной оптике соответствует числу отдельных элементов в матрице. Например, распространенный формат микроболометрических матриц  $320 \times 240$  соответствует полю зрения  $24^\circ \times 18^\circ$ . В тепловизорах с оптико-механическим сканированием геометрическая разрешающая способность определяется тем механизмом сканирования, который заложен в устройстве, и может быть совершенно разным в разных моделях. Например, в устройстве ИРТИС2000 эта величина составляет  $256 \times 256$  элементов.

#### **Частота смены изображений**

Частота смены изображений определяется полным временем, в течение которого анализируют поле зрения. Например, если выходной сигнал каждого матричного элемента сканируют электронным образом в течение  $1/30$  с, то соответствующая частота смены изображений будет 30 Гц. Последовательности ИК-изображений накапливают в аналоговой или цифровой форме. Аналоговый сигнал на выходе обычно представляется в одном из популярных форматов: PAL, NTSC или SECAM. Очевидно, что частота смены изображений в тепловизорах с оптико-механическим сканированием значительно меньше, чем в устройствах с электронным сканированием, например, может составлять 1 Гц или даже меньше.

#### **Температурное разрешение (эквивалентная шуму разность температур)**

Эквивалентная шуму разность температур (температурное разрешение) является важной энергетической характеристикой тепловизоров, которую определяют как температурный сигнал, эквивалентный уровню собственного шума фотоприемника. Величину температурного разрешения определяют как изменение температуры, которому соответствует отношение сигнал/шум, равное единице. Например,  $0,07^\circ\text{C}$  при температуре эталонного излучателя  $30^\circ\text{C}$  (в паспортных данных тепловизоров температуру эталонного излучателя часто опускают).

#### **Минимальная разрешаемая разность температур, динамический диапазон сигнала**

Минимальную разрешаемую разность температур определяют по эталонному излучателю (мире), образованному набором полос определенных толщины и температуры и рассматриваемому оператором в течение неопределенного времени. Таким образом, этот

параметр отражает как пространственное, так и температурное разрешение тепловизора. Динамический диапазон электронного устройства характеризует диапазон амплитуд сигналов между максимальным и минимальным значениями, которые передаются без искажений. Обычно динамический диапазон выражают в децибелах.

Кроме того, в паспортных данных тепловизоров обычно указывают регистрируемый температурный диапазон, а также характеристики поставляемой с тепловизором оптики. Как отмечалось выше, тепловизоры обычно работают в одном из ИК-диапазонов, поэтому в качестве характеристики также часто указывают и рабочий спектральный диапазон.

### **Особенности оборудования теплового контроля электронно-вычислительных средств**

При выборе тепловизора для контроля электронно-вычислительных средств следует учитывать конкретную область применения прибора в электронной промышленности.

Во-первых, стоит определиться с минимальными размерами исследуемых компонентов: чем меньше объект исследования или меньше детали этого объекта, подлежащие исследованию, тем большая геометрическая разрешающая способность и большее температурное разрешение необходимы для тепловизора. Например, для исследования печатных плат или ячеек в общем случае подойдет тепловизор, позиционируемый производителем как модель для исследований или как модель для проведения неразрушающего контроля. Геометрическая разрешающая способность такого тепловизора обычно составляет  $320 \times 240$ , а температурное разрешение —  $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . А для проведения диагностики изделий микроэлектроники (например, интегральных микросхем) необходимо выбирать тепловизор с большей геометрической разрешающей способностью и большим температурным разрешением. Это специальные модели тепловизоров с геометрической разрешающей способностью  $640 \times 480$ , а температурное разрешение таких тепловизоров может составлять  $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ , что позволяет визуализировать тепловое поле интегральной микросхемы. Специальные объективы позволяют добиться приемлемого увеличения объектов с размерами вплоть до  $25 \text{ мкм}$  и визуализировать их тепловые поля.

Во-вторых, важна область применения тепловизора: в серийном производстве или в секторе разработки. При разработке устройства часто требуется экспериментальная проверка его теплового режима. При этом в ходе экспериментов для определения соответствия тепловых полей заранее рассчитанным необходимо точное количественное измерение температур некоторых компонентов и областей. В этом случае тепловизор, применяемый как средство визуализации тепловых полей, должен обладать функцией измерения температуры в произвольной точке с высокой степенью достоверности. Обычно только тепловизоры на основе оптико-механического сканирования позволяют измерять температуру в произвольной точке пространства с требуемой для условий разработки достоверностью, так как системы на основе оптико-механического сканирования, как правило, не имеют объектива и не вносят, таким образом, погрешностей в измерение: ИК-излучение от объекта попадает с помощью системы зеркал непосредственно на фотодатчик, а не претерпевает многократное изменение при прохождении через систему линз. Кроме того, при прохождении излучения через объектив первоначальная картина тепловых полей претерпевает геометрические искажения, в результате чего температурная информация «размывается» по изображению не соответствующим действительности образом. Таким образом, для разработки чаще всего предпочтительнее тепловизоры на основе оптико-механического сканирования, если речь не идет о контроле быстро изменяющихся тепловых полей, где нужна достаточно высокая частота сканирования пространства. В случае же серийного производства часто необходимо только сравнение картины тепловых полей контролируемого устройства с эталонной картиной, поэтому в таких условиях подойдет тепловизор, не имеющий высокую степень достоверности количественного измерения температуры.

Кроме того, при внедрении системы бесконтактного теплового контроля в каждом конкретном случае следует учитывать и индивидуальные параметры исследуемых устройств: в зависимости от рабочей температуры исследуемого образца следует обращать внимание на регистрируемый температурный диапазон. Также могут быть важны условия эксплуатации, интерфейс взаимодействия с компьютером, а в случае когда необходимо регистрировать изменение теплового поля в динамике, важным параметром является частота смены изображений.

### **Выводы**

Бесконтактный тепловой контроль является эффективным инструментом в диагностике электронно-вычислительных средств. Он может быть успешно применен для обнаружения проблем в конструкции на ранней стадии создания устройств, а также для выявления дефектов электронных ячеек при серийном производстве. Однако все преимущества бесконтактного теплового контроля можно получить только в случае грамотного внедрения в производство или разработку: следует учитывать особенности теплового контроля электронно-вычислительных средств, вырабатывать методики контроля на основе знания работы контролируемых устройств и тщательно выбирать оборудование с учетом знания особенностей и желаемой достоверности результатов контроля.

### **Литература**

4. Неразрушающий контроль. В 7 т. Т. 5. Тепловой контроль / Под ред. Клюева В. В. — М: Машиностроение, 2004. — 688 с.
5. R. J. Fishbune, “Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification”, IBM Power Technology and Qualification, — 2000, 7 p.
6. B. Linnander, “When It's Too Hot to Touch Use Infrared Thermography”, Circuits and Devices Magazine, IEEE, Volume 9, Issue 4, July 1993 pp. 35 – 37

## НАНЕСЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА УСТАНОВКЕ УВН-1

**М.А. Сапожникова, С.В. Сидорова, А.А. Чабанов**  
*Научный руководитель к.т.н., доцент Булыгина Е.В.*  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

### DEPOSITION OF CARBONIC NANOSTRUCTURES BY UVN-1 MOUNTING

**M.A. Sapozhnikova, S.V. Sidorova, A.A. Chabanov**  
*Scientific leader Candidate of Technical Science, Professor Assistant E.V. Bulygina*  
MSTU named after N.Bauman, Moscow, Russia

#### **Аннотация**

Выявлены рациональные режимы нанесения углеродных плёнок методом плазмохимического осаждения внутрь опаловой матрицы и на поверхность металлических подложек. Проведен анализ спектров отражения полученных углеродных плёнок и оценена возможность воспроизводимости проведения экспериментов на установке УВН-1.

#### **Abstract**

Rational conditions carbon films applications by plasma-chemical vapor deposition method inside of an opal matrix and on a surface of metal substructures are determined. The analysis of reflecting spectrums of the gained carbon films is lead and the opportunity of experiments reproducibility on installation UVN-1 is evaluated.

Тонкие углеродные, или алмазоподобные, плёнки (АПП) привлекают к себе всё большее внимание благодаря своим уникальным свойствам: чрезвычайно высокая твёрдость, высокая теплопроводность, прозрачность в широком оптическом диапазоне, низкий коэффициент температурного расширения, большое удельное электрическое сопротивление, низкий коэффициент трения. Кроме того, АПП со специально введенными примесями могут использоваться в качестве полупроводниковых материалов. Алмазоподобные плёнки также находят свое применение в оптике, различных областях техники, медицине, и перспективность их использования не вызывает сомнений. [1]

Для отработки режимов нанесения углеродных плёнок используется установка вакуумного нанесения тонких плёнок периодического действия – УВН-1 (рис. 1). Установка предназначена для исследовательских работ в области технологии нанесения тонких плёнок в вакууме.

Рабочая камера установки, представляющая собой изготовленный из кварцевого стекла цилиндр, оснащена сменными фланцами, что позволяет производить нанесение плёнок различными методами и визуально контролировать процессы, происходящие в вакуумной камере, что очень важно при проведении экспериментов.

Вакуумная система установки снабжена диффузионным насосом с воздушным охлаждением и механическим насосом. Форвакуумной и высоковакуумной магистралями управляет оператор при помощи электромагнитных клапанов. Напуск воздуха в вакуумную камеру осуществляется электромагнитным натекателем. Управление питанием клапанов, диффузионным и механическим насосами производится при помощи блока управления. Для напуска рабочего газа в камеру установка оснащена натекателем и резервуаром для реагента. УВН-1 применяется в единичном или опытном производстве. Средством контроля давления в вакуумной камере является вакуумметр ВИТ-2А.

Основным достоинством установки является небольшое время откачки вакуумной камеры, что позволяет проводить большое количество экспериментов в течение рабочего дня.

Наиболее перспективным из возможных методов нанесения АПП является метод плазмохимического осаждения (ПХО) плёнок в реакторе пониженного давления. В результате образования в газовом разряде химически активных частиц протекают реакции, которые при обычных условиях неосуществимы.

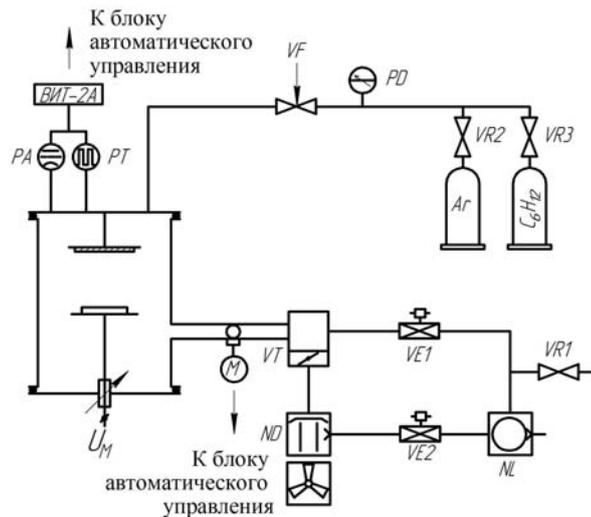


Рис. 1. Принципиальная вакуумная схема УВН-1

В самом начале образования углеродной плёнки после напуска в камеру рабочего газа и при подаче напряжения атомы водорода отделяются от молекул рабочего газа, превращая их таким образом в химически активные радикалы. Данный момент очень важен в процессе, так как полные молекулы являются химически пассивными и не могут участвовать в процессе роста плёнки. Активные радикалы, напротив, легко диффундируют на поверхности подложки и образуют связи углерод-углерод, осуществляя первую стадию образования алмазной решетки.

Далее атомы водорода останавливают появление связей углерод-углерод, предотвращая появление графитовой решетки.

Травление алмазных и графитовых кристаллов вызывается атомами водорода, однако скорость травления графита намного больше скорости травления алмаза, поэтому на поверхности подложки в итоге остаются только алмазные структуры.

С целью отработки режимов нанесения углеродных плёнок построена математическая модель зависимости ёмкости опаловой матрицы от времён откачки, напуска рабочего газа и нанесения углеродной плёнки. Ёмкость опаловой матрицы выбрана как наиболее легко контролируемый параметр, изменение которого напрямую зависит от изменения относительной диэлектрической проницаемости среды (предполагается среда в порах опаловой матрицы). Проведение эксперимента происходит в несколько этапов: измерение ёмкости опаловой матрицы при атмосферном давлении, откачка камеры, напуск рабочего газа – циклогексана ( $C_6H_{12}$ ), нанесение углеродной плёнки (горение разряда), измерение ёмкости опаловой матрицы с нанесенной АПП.

Этапы проведения эксперимента показаны на рис. 3, а его результаты в табл. 1.

Для дальнейшей отработки режимов нанесения АПП проведены эксперименты с целью оценки их воспроизводимости. Углеродная плёнка осаждалась на металлические подложки при одинаковых режимах: рабочее давление 10 Па, напряжение 700 В, время нанесения 3 минуты.

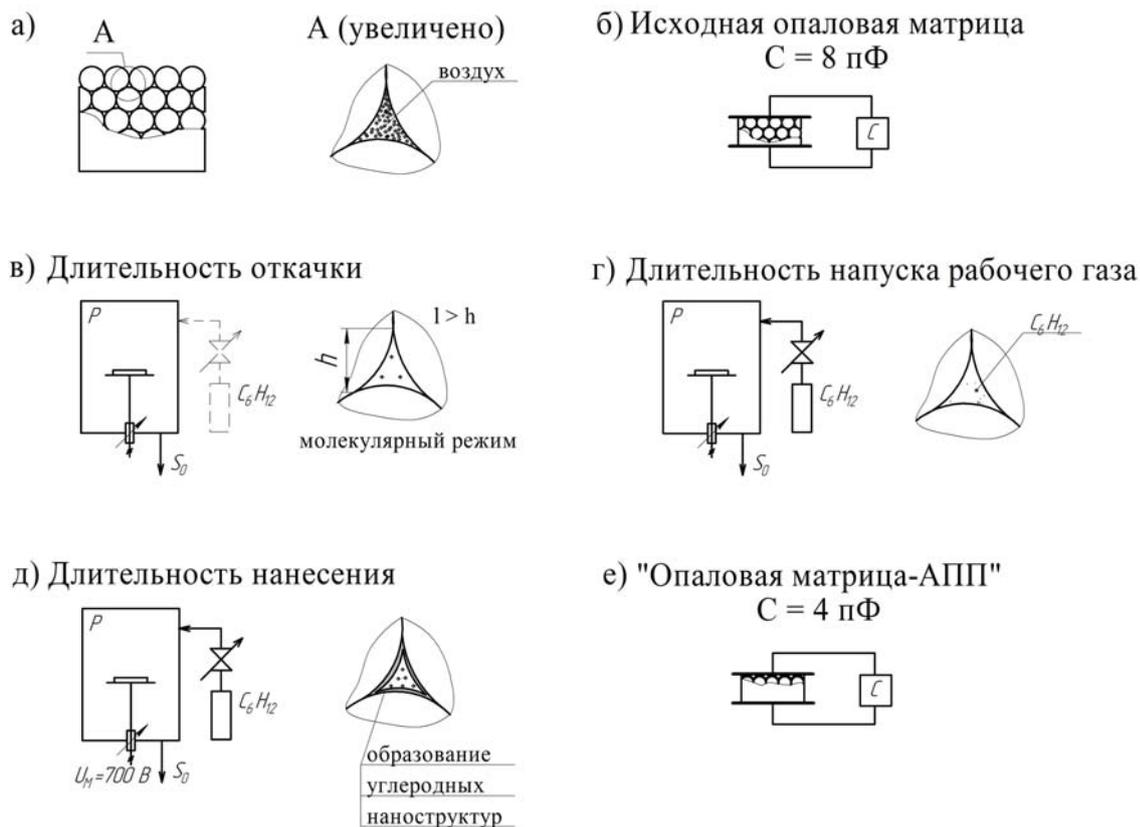


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Полученные образцы были исследованы на акустооптическом спектрофотометре с целью получения спектров отражения АПП.

Для оценки воспроизводимости посчитаны значения толщин пленок (1).

$$d = \frac{m \cdot \lambda}{2 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (1) \quad \text{где } m=1,2,3 \dots \quad d = \frac{m \lambda}{7.98}.$$

Как известно, видимый спектр длин волн света составляет 370-720 нм. Он делится на 6 частей: фиолетовый, сине-голубой, зеленый, желтый, оранжевый, красный. Но эти границы условны, т.к. цвета плавно переходят друг в друга.

Поскольку цвет полученных образцов является сочетанием нескольких цветов, то посчитаны толщины для следующих сочетаний:

1 – Фиолетово-оранжевый:  $d_1 = 0,53$  мкм;

2 – Зелено-фиолетовый:  $d_2 = 0,50$  мкм;

3 – Зелено-синий:  $d_3 = 0,35$  мкм;

4 – Красно-зеленый:  $d_4 = 0,63$  мкм.

Определена дисперсия (3) для полученных толщин АПП:

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^4 \frac{d_i}{4} = \frac{2.01}{4} = 0.5025 \text{ мкм} \quad (2) \quad S^2 = \frac{\sum (d_{cp} - d_i)^2}{4} = \frac{0.0402}{4} = 0.01 \quad (3)$$

Графики спектров отражения (рис. 5) носят одинаковый синусоидальный характер, что говорит об однородности нанесённого материала. Как видно из расчёта, погрешности установки и погрешности проведения эксперимента вызвали изменение толщины плёнки в пределах 100 нм, что объясняет сдвиг пиков спектров отражения и различие в цвете образцов.

В заключение следует отметить, что в результате заполнения пор опаловой матрицы АПП ёмкость уменьшилась с 8 пФ до 4 пФ, что может быть объяснено изменением относительной диэлектрической проницаемости композита «опаловая матрица - АПП».

В результате отработки режимов нанесения АПП методом плазмохимического осаждения были обеспечены воспроизводимые свойства плёнок.

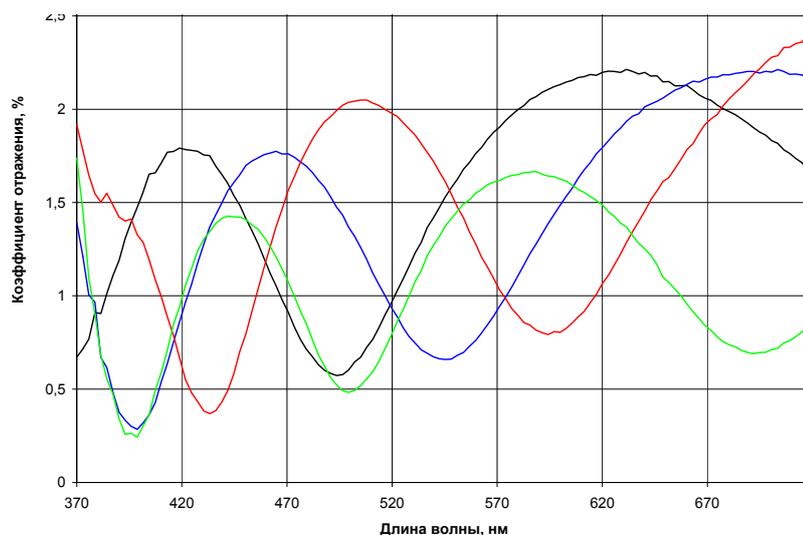


Рис. 3. Спектры отражения углеродных плёнок

### Литература

1. А.Ф. Белянин, М.И. Самойлович. Плёнки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике // Высокие технологии в промышленности России. Коллективная монография. М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш». 2003. С.19-111.

**ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННОЙ  
КРИПТОГРАФИИ.  
ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРИВЫХ**

**Спельников А.Б.**

*Научный руководитель д.т.н., профессор Червяков Н.И.*  
Северо-Кавказский Государственный технический университет,  
г. Ставрополь, Россия

**PARALLEL ARCHITECTURE IN THE DECISION OF PROBLEMS OF MODERN  
CRYPTOGRAPHY.  
CALCULATIONS IN ELLIPTIC CURVES**

**Spelnikov A.B.**

*Scientific supervisor Dr.Sci.Tech., professor Chervjakov N.I.*  
North Caucasus State Technical University,  
Stavropol, Russia

**Аннотация**

В работе рассматриваются возможности использования параллельных вычислительных структур в сравнительно новой области криптографии – вычислениях в эллиптических кривых. Приведены причины использования параллельных алгоритмов. Перечислены основные способы ускорения операций на эллиптических кривых при применении их в криптографии. Описан способ вычисления в эллиптических кривых с применением системы остаточных классов. Рассмотрены возможности практического применения.

**Abstract**

The work include basic opportunity of use the parallel computing structures in new area of cryptography - calculations in elliptic curves. The reasons of use parallel algorithms are resulted. The basic ways of acceleration the operations with elliptic curves are listed at their application in cryptography. The way of calculation with elliptic curves in system of residual classes is described. Opportunities of practical application are considered.

Проблема дефицита вычислительной мощности для выполнения ряда задач в современности стоит особо остро. Требования к скорости вычислений с каждым годом все более ужесточаются, а сложность задач растет. Решение приведенной задачи осуществляется в соответствии с двумя основными стратегиями. Во-первых, совершенствованием имеющейся и разработкой новой технической базы. Во-вторых, разработкой нестандартных математических концепций и внедрением их в вычислительный процесс, что в свою очередь вызывает очередное совершенствование аппаратно-программных комплексов.

Использование аппаратных и аппаратно-программных решений в криптографии на эллиптических кривых тоже подчиняется этим правилам.

Методы ускорения криптографических операций с эллиптическими кривыми

Для ускорения операций используются следующие методы:

1. Комплексное умножение. В общем случае это приносит выигрыш в скорости за счет уменьшения количества модульных умножений. Стойкость криптоалгоритма при использовании комплексного умножения снижается приблизительно в  $m^{1/2}$  раза, что, однако, признано безопасным.

2. Способы умножения многочленов. Арифметические операции на эллиптической кривой в расширенном поле характеристики 2 сводятся к модульным операциям сложения и умножения многочленов. В 1962 году был предложен метод умножения многочленов над полем Галуа, более эффективный, чем известный классический метод умножения [1].

3. Использование методов замены координат. В общем случае операции сложения и удвоения точки на эллиптической кривой выполняются в обычных (аффинных) координатах.

В данном случае на скорости выполнения операций значительно сказывается операция инверсии. Использование проективной замены координат позволяет перейти от операции инверсии к гораздо более быстрой операции умножения [1].

Увеличения производительности криптопреобразований в эллиптических кривых можно также использовать смешанных координат [2].

4. Ускорение операций за счет использования параллельных структур.

### **Вычислительные структуры с параллельной организацией**

Это наиболее перспективный способ. Преимущества здесь очевидны. Одно из самых важных – теоретическая возможность практически неограниченно наращивать мощность и следовательно скорость вычислителей просто их параллельным добавлением.

Параллельные системы в настоящее время разрабатываются на основе микропроцессоров или устройств сверх больших интегральных схем. Однако реализация параллельных систем обработки данных сопровождается рядом трудностей [3]:

- ограниченная область применения;
- отсутствие универсальных принципов параллельной математики;
- недостаток знаний о возможности разбиения задач на параллельные ветви;
- необходимость значительных затрат на разработку моделирующего и интерфейсного программного обеспечения.

Наиболее важным способом повышения эффективности систем обработки данных является развитие их архитектуры [3]. Максимальный эффект достигается при использовании микропроцессоров специализированной, оптимизированной именно для этого класса задач архитектуры.

В области криптографии на эллиптических кривых известна технология Fast ECDSA Verify канадская фирма Certicom. Основывается на стандарте ECDSA, представляющем собой модификацию Digital Signature Algorithm для эллиптических кривых. Ускорение вычислений в данном случае получено за счет разбиения вычислений на несколько независимых частей и параллельного их выполнения.

Исследования в вопросах реализации асимметричных криптоалгоритмов на различных вычислительных средствах (от интеллектуальных карт до параллельных вычислительных систем) фактически вылились в отдельное направление.

Важной и интересной задачей является проблема разработки протоколов безопасных распределенных вычислений.

Очень много внимания в современных исследованиях уделяется проблеме эффективной реализации арифметических операций в конечных полях.

Одним из способов естественного распараллеливания вычислительного процесса является использование системы остаточных классов.

Любопытной особенностью криптографии на эллиптических кривых является необходимость вычисления в простых конечных полях. То есть все операции над числами производятся по модулю  $p$  [ $\text{mod } p$ ], где  $p$  – большое простое число. Одной из важных задач, стоящих перед разработчиками в данной области является проблема эффективных вычислений в параллельных структурах.

Предлагается использовать структуры, основанные на системе остаточных классов. Основания: вычисления производятся над большими числами, где использование системы остаточных классов дает преимущество в быстродействии; возможно математическими методами добиться замены операций деления при вычислениях на эллиптической кривой операциями умножения и сложения (операция деления для вычислений в системе остаточных классов наиболее трудоемка).

Сложность вызывает наличие модульных операций по большому простому числу. То есть для каждой математической операции на эллиптической кривой необходимо найти  $\text{mod } p$ , где  $p$  – большое простое число, что является нетривиальной задачей.

### Алгоритм нахождения остатка по модулю простого числа

Разработан алгоритм нахождения модуля случайного числа, представленного в системе остаточных классов, по основанию, являющемуся простым числом и представленному в системе остаточных классов с тем же набором оснований. То есть нахождения модульного представления числа, выраженного в системе остаточных классов, по простому большому основанию.

Если данное число выразить через  $B$ , а простое основание представить как  $P$ , при этом в системе будет  $n$  оснований, то необходимо найти  $(b_1, b_2 \dots b_n) \bmod (p_1, p_2 \dots p_n)$ .

Алгоритм состоит из двух связанных частей. В первой части организуется цикл поиска максимального произведения простого основания на степень двух, меньшего числа  $B$ . Большая степень передается во вторую часть.

Во второй части организуется обратный цикл, на каждом этапе которого сравнивается число  $B$  с произведением  $P$  на сумму степеней числа 2, начиная с большей степени. Если на очередном этапе произведение оказывается больше, то степень отбрасывается. Сравнение осуществляется до нулевой степени.

По завершении последнего этапа полученное произведение вычитается из числа  $B$ . Результат этой операции является искомым числом.

На практике полученный алгоритм легко реализуется в любой среде программирования, что позволяет применять его при реализации арифметических операций на эллиптических кривых в системе остаточных классов. Так же полученный алгоритм с легкостью может быть реализован на аппаратном уровне, то есть с использованием специализированной микроархитектуры.

### Литература

1 Алгоритмические основы эллиптической криптографии. А.А.Болотов, С.Б.Гашков, А.Б.Фролов, А.А.Часовских. М.:МЭИ, 2000.

2 Методы увеличения скорости криптографических преобразований на эллиптических кривых. В.И.Долгов, А.В.Неласная. «Радиоэлектроника. Информатика. Управление», №2, 2004.

3 Модулярные параллельные вычислительные структуры нейро-процессорных систем /Н. И. Червяков, П. А. Сахнюк, А. В. Шапошников, С. А. Ряднов; Под ред. Н.И. Червякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. -288 с.

# ИНТЕГРАЦИЯ САПР И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА P-CAD И РАЗРАБОТАННОЙ АИС

Червинский А. С.

*Научный руководитель: ассистент кафедры ИУ4 Оя Д. Р.*

МГТУ им. Н. Э.Баумана, г. Москва, Россия

## CAD/CAM/CAE-INTEGRATION WITH ERP IN ELECTRONIC INDUSTRY ENTERPRISE PRACTICE BY THE EXAMPLE OF P-CAD CAE-SYSTEM AND SELF-DEVELOPED ERP

Chervinsky A. S.

*Supervisor: tutor of department ICS4 Oya D. R.*

Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russia

e-mail: [chervinsky@inbox.ru](mailto:chervinsky@inbox.ru)

### Аннотация

В данной статье представлена конкретная архитектура интегрированной системы, объединяющей в себе САПР P-CAD и АИС предприятия собственной разработки. Описаны основные модули P-CAD, используемые для интеграции, а также та часть АИС, которая отвечает за маршрутные технологические процессы и является наиболее важной в ходе интеграции. Представлена структура интегрированной системы.

### Abstract

The concrete architecture of integrated system uniting P-CAD and self-developed ERP is suggested. The main modules of P-CAD used for integration and the part of ERP responsible for technological routes are described. The structure of the integrated system is given.

### Введение

Интеграция САПР и АИС на предприятии дает массу преимуществ, которые носят общий характер: уменьшение количества ненужных операций. Происходит это как за счет замены ручного ввода информации в АИС предприятия автоматизированным, так и за счет более тесного взаимодействия работников производства с инженерами, что приводит к выявлению ошибок и недочетов на ранних стадиях жизненного цикла изделия.

### Программы автоматизации проектирования электроники

Из различных видов САПР, наиболее слабо развита интеграция программ автоматизации проектирования электроники (Electronic Device Automation, EDA) с автоматизированными информационными системами предприятий. К программам автоматизации проектирования электроники относят такие комплексы как P-CAD, KiCAD, Protel, EAGLE, OrCAD, gEDA.

Одним из самых распространенных пакетов автоматизации проектирования электроники является программный комплекс P-CAD. В него входят следующие основные программные модули: Symbol Editor, Pattern Editor, Library Executive, Schematic и PCB. Symbol Editor служит для создания условных графических обозначений (УГО) компонентов, Pattern Editor — для создания посадочных мест, Library Executive — для соединения УГО и посадочных мест в единые компоненты с указанием соответствия выводов, Schematic — для создания схемы устройства из УГО, PCB — для трассировки печатной платы. В других программах автоматизации проектирования электроники имеется аналогичный набор модулей.

## Модуль «производство» АИС

Ни одно современное предприятие, если оно хочет быть конкурентоспособным, не может обойтись без автоматизированной информационной системы (АИС), в которой учитываются бизнес процессы, связанные с такими аспектами работы предприятия как производство, логистика, дистрибуция, складирование, погрузка, выставление счетов, бухучет.

В разрезе данной статьи следует выделить часть АИС, отвечающую за производство. Ее ключевым понятием является маршрутный технологический процесс (ТП), который отражает последовательность выполнения технологических операций, содержит информацию об оборудовании, оснастке, применяемых материалах и времени выполнения каждой операции. В АИС предприятий маршрутный ТП используется для отслеживания текущего состояния процесса изготовления изделия, иными словами позволяет получить ответ на вопрос, какие операции уже выполнены и кем для данного экземпляра изделия.

Маршрутный ТП разрабатывается на основе анализа конструкторской документации. Таким образом, каждая производственная единица, будь то рабочий или специализированное оборудование, может получить свои конкретные производственные задания, которые следует выполнить для создания готового изделия. После выполнения соответствующих операций, рабочий должен проставить метку о выполнении операции над конкретным экземпляром устройства. Зачастую, для уменьшения количества времени, затрачиваемого рабочим на эти отметки, используется полуавтоматическая система со штрихкодированием устройств и операций. Такая система позволяет статистическими методами оценить скорость работы каждого рабочего и процент брака, если таковой имеется.

Таким образом, на предприятии отдел технологов занимается формированием технологических процессов из операций с указанием оборудования, оснастки и используемых материалов. Как правило, в списке технологических операций имеется специальное поле, отвечающее за хранение порядка операций. Если запросить список операций, упорядоченных по этому полю, мы получим наиболее общий маршрутный ТП, из которого путем вычеркивания ненужных для конкретного устройства операций мы получим ТП для этого устройства.

### Интеграция программного пакета P-CAD и разработанной АИС

На рисунке 1 представлена структурная схема интегрированной системы с указанием потоков информации. Интегрированная система состоит из АСУ предприятия, САПР P-CAD, а также модуля их интеграции.

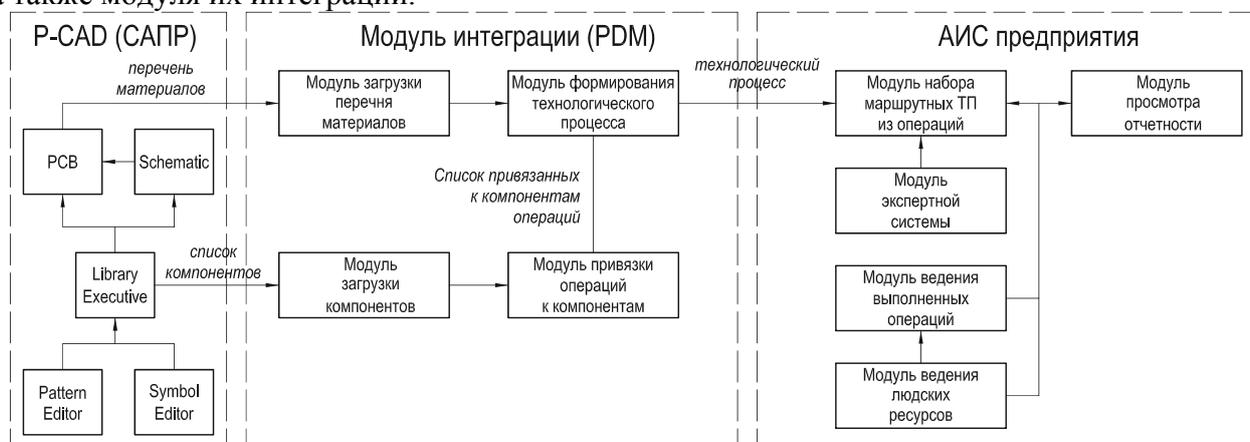


Рисунок 1 — Структурная схема интегрированной системы

Технологические процессы в основном являются типовыми и можно выделить определенный набор правил, согласно которому в ТП должна входить та или иная операция.

Ниже предлагается способ автоматизации формирования маршрутных ТП на основе данных, получаемых из программного пакета P-CAD.

В процессе разработки печатной платы для конечного изделия инженер использует библиотеку компонентов, в которой содержатся сведения о компонентах и их посадочных местах.. Для загрузки этих данных в АИС, необходим **модуль загрузки компонентов**. В качестве источника данных для этого может служить отчет в формате Microsoft Word (листинг 1), получаемый из Library Executive, содержащий сведения о названиях компонентов и посадочных местах для них.

---

Component List:           XC17S20XL, XC1802, XCR3064XL-VQ44, XCS\_XLVQ100  
 Pattern List:            SO8, SOIC8, VQ100, VQ44, VQ64

---

**Листинг 1 — Фрагмент отчета о компонентах, полученный в Library Executive**

Набор основных и дополнительных технологических операций, необходимых для установки каждого компонента, известен. Следовательно, технолог может задать эту связь в **модуле привязки операций к компонентам**. В результате образуется структура, которая в дальнейшем позволит автоматизированным образом формировать ТП.

На этапе трассировки печатной платы полный набор используемых в ней компонентов известен. Его можно получить в виде перечня материалов (Bill of Material, BOM, листинг 2), в котором содержатся сведения о компонентах и посадочных местах, используемых в данной электронной ячейке. Следовательно, для автоматизированного формирования ТП, необходим **модуль загрузки перечня материалов** в базу данных АИС.

---

P-CAD Bill of Materials           E:\IU4\master\...\3rd\_pcb.pcb

```

=====
Count  ComponentName  RefDes      PatternName  Value
-----  -
1 AD5314      DD1         MICROSOIC-10
1 AD7396      DD2         SOIC-24
1 ADM222      DA7         SOIC-18
1 ATMEGA128  DD3         TQFP64
1 BAV99       VD5         SOT-23 (A1A2K)  BAV99
1 BQ-HC49U   BQ1        HC-49U       22,1184 МГц
6 C          C2         C             0,1мк
           C7
           C12
           C14
           C19
           C34
  
```

---

**Листинг 2 — Фрагмент перечня материалов, полученный в PCB**

Таким образом, имея в наличии перечень используемых для ячейки компонентов и перечень операций, привязанных к каждому из компонентов, мы можем получить маршрутный технологический процесс, используя **модуль формирования технологического процесса**. Операции добавляются в него согласно порядку в общем списке операций. Когда маршрутный ТП сформирован, технологу остается только проверить его, и, возможно, изменить порядок операций в некоторых специальных случаях.

Особенностью предлагаемой архитектуры системы является наличие на предприятии единой для всех разработчиков библиотеки компонентов, причем данные в ней и базе данных должны быть непротиворечивы, то есть после любого изменения библиотеки, должна быть проведена синхронизация с базой данных путем использования модуля загрузки компонентов.

### **Выводы**

Предприятие электронной промышленности, интегрировавшее программу автоматизации проектирования электроники со своей АИС, получает возможность быстрее переходить к производству. Особенно это важно в условиях опытного производства, когда конструкция устройства может претерпевать множество изменений. Таким образом, возможные проблемы могут быть выявлены на ранних стадиях жизненного цикла изделия. Кроме того, она избавляет технологов от рутинной работы по составлению однотипных маршрутных ТП. На основе представленного решения возможно дальнейшее проведение интеграции для учета складских запасов. В конечном итоге предприятие электронной промышленности получает продукцию лучшего качества в более короткие сроки.

### **Литература**

1. **Серeda С.**, ИТ-катализатор [Текст] // CNews февраль/март 2006. С. 64—68
2. **Brown J.**, Can ERP speak PLM? [электрон. ресурс] // PLM Evaluation Center, 2003. 8 p.
3. PLM and ERP Integration: Business Efficiency and Value [электрон. ресурс] // CIMData, 2005. 9 p.
4. Википедия (свободная энциклопедия) [электрон. ресурс] // <http://wikipedia.org/>

# РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЧИСЕЛ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

Чунаков Д.В.

*докт. техн. наук, профессор, Червяков Н.И.*

Невинномысский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «СевКавГТУ»,  
Невинномысск, Россия

## THE REALIZATION OF THE DEVICE FOR SCALING NUMBERS OF SUBMITTED IN THE RESIDUE NUMBER SYSTEM ON FPGA

Chunakov D.V.

*Dr. Sci. Tech., Professor, Chervyakov N.I.*

Nevinnomyssk technological institute, Nevinnomysk, Russia

### Аннотация

Рассмотрена реализация устройства для масштабирования чисел представленных в системе остаточных классов на модуль системы (на основе табличной арифметики) на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Полученные схемные решения могут найти применение при реализации высокоскоростных цифровых фильтров.

### Abstract

Realization of the device for scaling numbers of submitted in the residue number system on the module of a system (on the basis of tabulated arithmetics) on FPGA is considered. The obtained circuit solutions can find application at realization of high-speed digital filters.

При реализации цифровых фильтров с применением позиционной системы счисления для представления чисел и соответствующего способа выполнения арифметических операций часто не удается обеспечить требуемого быстродействия. В связи с этим определенный практический интерес представляет переход, при реализации цифровых фильтров, от представления чисел в позиционной системе счисления к представлению чисел в системе остаточных классов (СОК). Замена позиционной системы на СОК позволяет в несколько раз повысить быстродействие выполнения таких основных для цифровой фильтрации операций, как умножение и сложение [1]. Однако реализация в системе остаточных классов операции масштабирования, которая связана с операцией деления, трудно реализуема.

Фундаментальной проблемой, возникающей при делении, является то, что в отличие от сложения и умножения, система в остаточных классах не является замкнутой относительно операции деления.

Далее рассмотрим операцию масштабирования чисел, представленных в СОК, на модуль системы, и возможность ее табличной реализации.

### Основы вычислений в СОК

Под системой остаточных классов (СОК) – следует понимать такую непозиционную систему счисления, в которой любое целое неотрицательное число  $A$  можно представить в виде набора остатков от деления этого числа на выбранные взаимно простые основания системы  $p_i$  [2], т.е.

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_i = A - \left[ \frac{A}{p_i} \right] \cdot p_i \text{ для } i = \overline{1, n}.$$

Такое представление возможно и определяется теоремой о делении с остатком в кольце целых чисел [2]: если  $A \in \mathbb{Z}$ ,  $p \in \mathbb{Z}$ ,  $p \neq 0$ , то существуют единственные  $m \in \mathbb{Z}$  и  $\alpha \in \mathbb{Z}$  такие, что

$$A = m \cdot p + \alpha, \quad 0 \leq \alpha < |p|, \quad m = \left[ \frac{A}{p} \right].$$

Принципиальная возможность применения СОК в вычислительных алгоритмах обуславливается наличием определенного изоморфизма между математическими операциями над целыми числами и соответствующими операциями над системой целых неотрицательных остатков по отдельным основаниям. Выполнение арифметических операций в модулярном коде производится независимо по каждому из оснований, что указывает на параллелизм данной системы. Это обстоятельство определяет возможность их независимой обработки.

Операции сложения и умножения над числами, представленными в СОК, сводятся к соответствующим операциям над цифрами этого представления. Эти операции являются модульными и не требуют знания позиционных характеристик обрабатываемых чисел.

Недостатком СОК является сложность выполнения немодульных операций. Операция деления в СОК относится к немодульным и лежит в основе многих других операций, входящих в состав операций вычислительных алгоритмов.

Малоразрядность обрабатываемых данных, представленных в СОК, дает возможность применять табличную арифметику. В связи с этим рассмотрим табличную реализацию операции масштабирования в СОК на модуль системы.

Представление частного в СОК имеет вид:

$$\left[ \frac{A}{B} \right] = \left( \left| \frac{A - |A|_B}{B} \right|_{p_1}, \left| \frac{A - |A|_B}{B} \right|_{p_2}, \dots, \left| \frac{A - |A|_B}{B} \right|_{p_n} \right), \quad (2)$$

где  $\left| \frac{A - |A|_B}{B} \right|_{p_i}$  – целые числа, для  $i = \overline{1, n}$ .

Если делитель  $B$  – модуль СОК, то для всех  $i$ , для которых  $(p_i, B) = 1$ . получаем:

$$\left| \frac{A - |A|_B}{B} \right|_{p_i} = \left| \frac{1}{B} \right|_{p_i} \cdot (A - |A|_B) \Big|_{p_i}, \quad (3)$$

где  $\left| \frac{1}{B} \right|_{p_i}$  – мультипликативный обратный элемент к  $B$  по модулю  $p_i$ .

По формуле (3) можно вычислить все цифры представления в СОК  $[A/B]$ , для которых  $(p_i, B) = 1$ . Для вычисления цифры по основанию равному  $B$  необходима дополнительная операция (например: расширение системы оснований), в связи с тем, что  $|1/B|_B$  – неопределен.

### Масштабирование чисел представленных в СОК на модуль системы

Если  $A < P = \prod_{i=1}^n p_i$  и частное от деления числа  $A$  на модуль СОК  $p_1$   $Y < P_i = \prod_{i=2}^n p_i$  ( $p_1 < p_2 < p_3 < \dots < p_n$ ), то алгоритм деления можно представить в виде блок-схемы представленной на рисунке 1.

Пусть число модулей СОК равно трем ( $p_1, p_2, p_3$ ), а модуль, на который происходит деление, обозначим  $p_1$ . Структурная схема устройства, реализующего операцию деления числа представленного в трехмодульной СОК ( $A = (|a|_{p_1}, |a|_{p_2}, |a|_{p_3})$ ) на модуль системы  $p_1$ , состоит из трех блоков и показана на рисунке 2. Результат деления (частное) обозначим  $Y = (|\gamma|_{p_1}, |\gamma|_{p_2}, |\gamma|_{p_3})$ .

В блоке 1 состоящем из двух таблиц LUT1 и LUT2 происходит округление делимого по модулю  $p_1$ . На адресные входы таблиц LUT1 и LUT2 поступают значения  $|a|_{p_2}$  и  $|a|_{p_3}$

соответственно, и на выходе таблиц в зависимости от величины  $|a|_{p_1}$  получаем значения  $|b|_{p_2} = \left| |a|_{p_2} - |a|_{p_1} \right|_{p_2}$  и  $|b|_{p_3} = \left| |a|_{p_3} - |a|_{p_1} \right|_{p_3}$  соответственно.

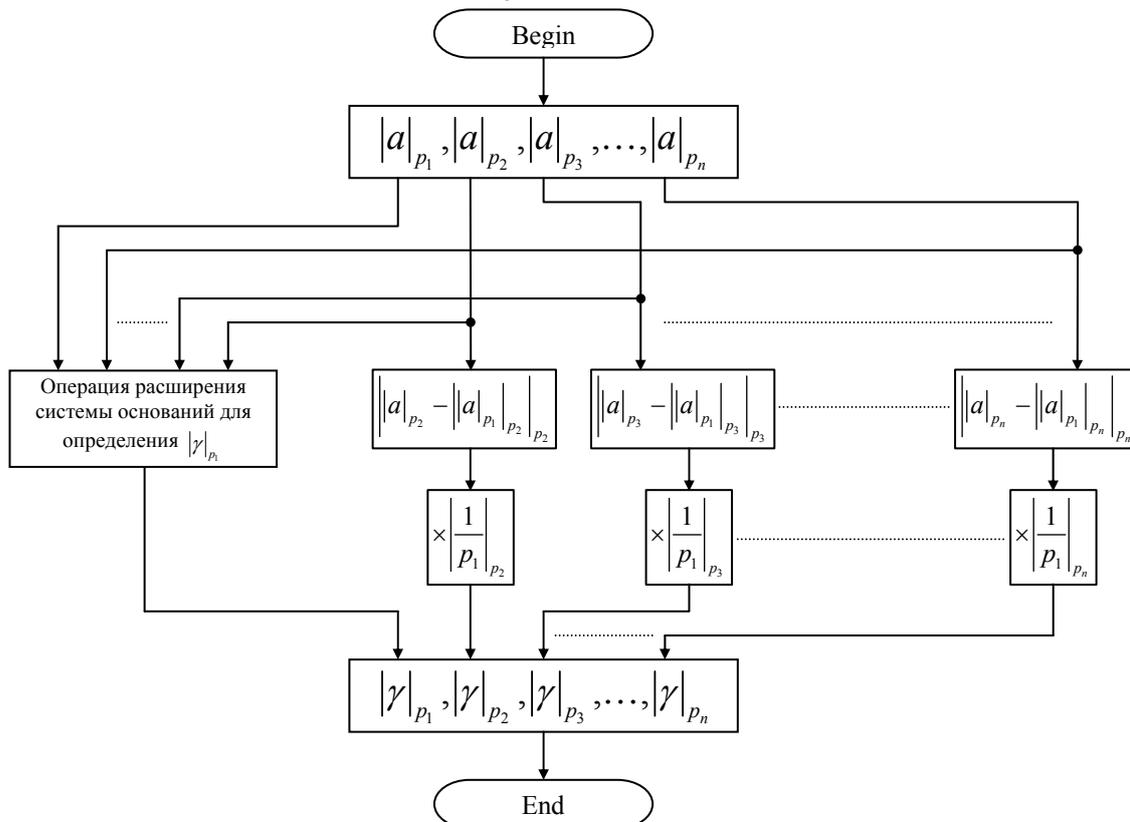


Рисунок 1 – Алгоритм масштабирования числа представленного в СОК на модуль системы  $p_1$

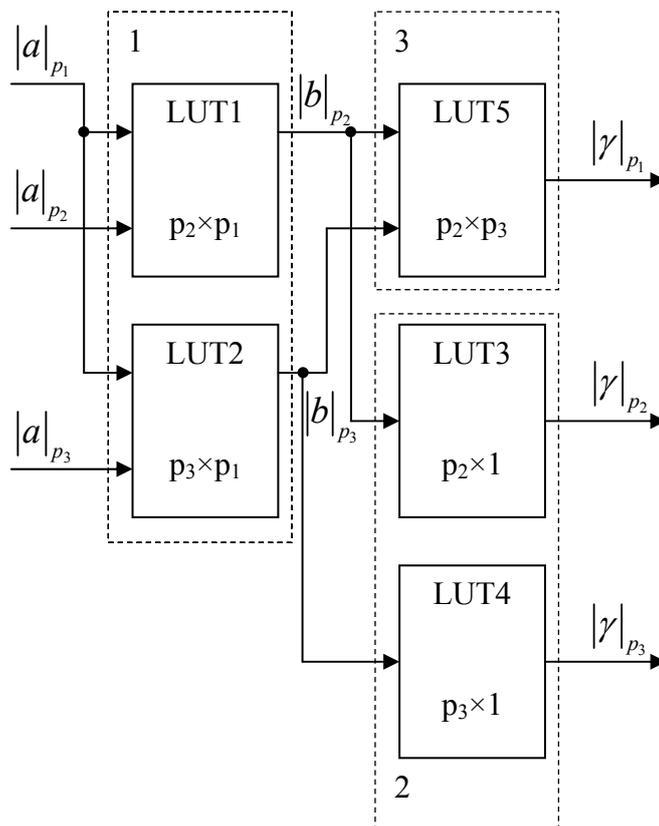


Рисунок 2 – Структурная схема устройства, реализующего операцию деления в СОК на

модуль системы  $p_1$

Далее полученные в блоке 1 значения  $|b|_{p_2}$  и  $|b|_{p_3}$  поступают на адресные входы таблиц LUT3 и LUT4 соответственно блока 2 и на адресные входы таблицы LUT5.

В блоке 2 реализуются операции умножения  $|b|_{p_2}$  (LUT3) и  $|b|_{p_3}$  (LUT4) на величины  $\left|\frac{1}{p_1}\right|_{p_2}$  и  $\left|\frac{1}{p_1}\right|_{p_3}$  соответственно, в результате которых получаем значения  $|\gamma|_{p_2}$  и  $|\gamma|_{p_3}$ .

Блок 3 необходим для раскрытия неопределенности, возникающей из-за отсутствия мультипликативной обратной к  $p_1$  величины по модулю  $p_1$ . Одним из способов раскрытия этой неопределенности является операция расширение системы оснований СОК [1], [2], [3]. В [3] представлен способ раскрытия неопределенности, основанный на непозиционной характеристике – след числа.

На выходе блока 3, состоящего из таблицы LUT5, по значениям  $|b|_{p_2}$  и  $|b|_{p_3}$  определяется значение  $|\gamma|_{p_1}$ .

Общий объем памяти, необходимый для реализации устройства, определяется суммой объемов памяти всех LUT входящих в схему (бит):

$$N_{\Sigma} = N_{LUT1} + N_{LUT2} + N_{LUT3} + N_{LUT4} + N_{LUT5} = p_1 \cdot p_2 \cdot (\text{int}(\log_2(p_2))) + p_1 \cdot p_3 \cdot (\text{int}(\log_2(p_3))) + p_2 \cdot p_3 \cdot (\text{int}(\log_2(p_1))) + p_2 \cdot (\text{int}(\log_2(p_2))) + p_3 \cdot (\text{int}(\log_2(p_3))).$$

При использовании многомодульной СОК (количество модулей больше трех) объемы памяти, необходимые для реализации устройства деления чисел на модуль системы, сильно возрастают и могут стать препятствием для построения устройств масштабирования в СОК на модуль системы.

Модулярные структуры эффективно отображаются на ПЛИС, имеющих встроенную память, логические блоки с каскадными цепями, делая их пригодными устройствами для модулярной арифметики.

По представленному выше алгоритму масштабирования чисел представленных в СОК, реализовано устройство на ПЛИС фирмы Xilinx (Virtex XCV-50). Описание устройства представляет собой VHDL-модуль, который может быть использован как составная часть при реализации цифровых фильтров на ПЛИС Xilinx. Результаты моделирования устройства, проведенного в программе ModelSim XE II 5.7, представлены в таблице.

Модули СОК / Диапазон СОК	Number of Slices	Maximum Frequency, MHz
3, 5, 7 / 105	17	56.25

Полученные схемы табличной реализации операции масштабирования в СОК на модуль системы, дают возможность построения высокоскоростных устройств с возможностью конвейерной обработки данных, что является основополагающим (высокая скорость вычислений и конвейерная обработка данных) при построении устройств реализующих алгоритмы цифровой обработки сигналов в реальном масштабе времени.

## Литература

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Советское радио, 1968. – 440 с.
2. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов; Под. Ред. Н.И. Червякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с. – ISBN 5-9221-0327-X.
3. Нейрокомпьютеры в остаточных классах. Кн. 11 (Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н.): Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 272 с.: ил.

# СОЗДАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ MEMS

**Востриков М.В.**

*Научный руководитель: д.т.н., проф. Шахнов В.А.*

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

## MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS FABRICATION BASED ON MEMS TECHNOLOGY

**Vostrikov M.V.**

*Scientific adviser: Doctor of Technical science, professor Shakhnov V.A.*

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia.

[mikevv@mail.ru](mailto:mikevv@mail.ru)

### Аннотация

В работе проанализированы основы создания микроэлементной базы на основе технологии MEMS (MicroElectroMechanical Systems – микроэлектромеханические системы). Кратко рассмотрены исторические аспекты развития MEMS, основные технологии производства MEMS устройств, преимущества в сравнении с традиционными решениями для реализации различных устройств и цели внедрения в производство. Рассмотрены возможности применения технологии, ее перспективы для создания перспективной элементной базы современных вычислительных систем.

### Abstract

Fundamentals of microelemental base fabrication based on MEMS (MicroElectroMechanical Systems) technology are analyzed in this report. Historic aspects of MEMS developing, basic technologies of MEMS fabrication, advantages over traditional ways of some devices production and aims of application of MEMS to production are briefly considered. Possibilities and perspectives of MEMS technology using for perspective element base of contemporary computer engineering manufacture.

### Введение

**MEMS (MicroElectroMechanical Systems)** – это технология интеграции механических элементов, датчиков, актуаторов и электроники на обыкновенном кремниевом субстрате (впервые нашла коммерческое применение в 1958 году в производстве компактных датчиков давления) [1-4,11]. Электронная часть производится посредством выполнения тех же операций, что и при производстве интегральных схем, микромеханические компоненты получают в процессе «микрообработки», в ходе которого часть подложки удаляется травлением либо добавляются новые структурные слои для формирования механических и электромеханических устройств. Аббревиатура MEMS также употребляется для обозначения самих микромеханизмов, выполненных по технологии MEMS. К MEMS относят механизмы, размеры которых лежат в пределах 1 мкм – 1 мм. Для механизмов меньших размеров применяется термин NEMS (NanoElectroMechanical Systems) – наноэлектромеханические системы.

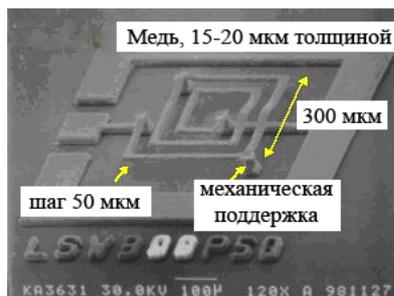


Рис.1. MEMS-катушка индуктивности, [4]

Обычно механизмы таких размеров имеют макропрообразы. Отличительной особенностью MEMS от их прототипов (кроме размеров) является то, что они имеют высокое соотношение площадь поверхности – объем, чем обусловлены большая роль в функционировании механизма поверхностных эффектов, таких как смачивание или электростатическое взаимодействие, уменьшение вклада сил инерции, тяготения. При проектировании и моделировании MEMS возникает необходимость учитывать гораздо больший круг физических явлений.

Технология MEMS эволюционировала параллельно полупроводниковой технологии. Во второй половине 40х годов прошлого столетия уже была открыта основа ключевых технологических процессов для создания MEMS-устройств и современных полупроводниковых приборов - анизотропное травление кремния.

Второй важнейшей предпосылкой MEMS стала статья от 1 апреля 1954 г. доктора Чарльза С. Смита с результатами исследований пьезорезистивного эффекта в полупроводниках германии и кремнии. Ученый открыл, что изменение электрического сопротивления кристаллов этих полупроводников при приложении механической нагрузки к ним может быть в несколько десятков раз большим, чем, например, для металлов. Через четыре года после публикации уже несколько компаний серийно выпускали полупроводниковые тензодатчики. В 1971 г. в университете Case Western Reserve была произведена фактически первая полностью твердотельная завершенная MEMS - датчик давления с цифровым выходом.

Главной идеологической предпосылкой MEMS считается речь великого физика Р. Фейнмана «There's Plenty of Room at the Bottom», произнесенная им в Калифорнийском технологическом институте на ежегодном собрании Американского физического общества в конце 1959 г. Слова Фейнмана полностью определяют два основных пути развития MEMS - снижение погрешности изготовления отдельных микродеталей за счет совершенствования технологии производства и создание основанных на совершенно иных (по сравнению с макроаналогами) физических принципах устройств. [1]

## 1. Основные технологии изготовления MEMS

Используют 3 основные технологии изготовления MEMS: объемная микрообработка (bulk micromachining), поверхностная микрообработка (surface micromachining) и технология LIGA.

### 1.1. Объемная микрообработка (bulk micromachining)

При объемной микрообработке (первая изобретенная технология производства MEMS) структура получается внутри подложки благодаря её анизотропным свойствам, то есть различной скорости травления кристалла, в зависимости от направления кристаллографических осей. Иначе, объёмная структура может быть получена методом наращивания, когда несколько подложек сплавляются и образуют вертикальные связи на атомарном уровне.



Рис.2. Структура, полученная с помощью объемной микромеханической обработки, [5]

## 1.2. Поверхностная микрообработка (surface micromachinig)

Технология поверхностной микрообработки была создана в конце 80х, чтобы сделать процесс создания MEMS планарным, т.е. более приближенным к процессу производства интегральных схем. В процессе изготовления последовательно наносятся и протравливаются структурные и вспомогательные слои. К примеру, балка может быть построена напылением на подложку вспомогательного слоя, часть которого затем вытравливают в том месте, где планируется крепление балки к субстрату. Затем поверх напыляется структурный слой, а вспомогательный окончательно удаляется травлением.

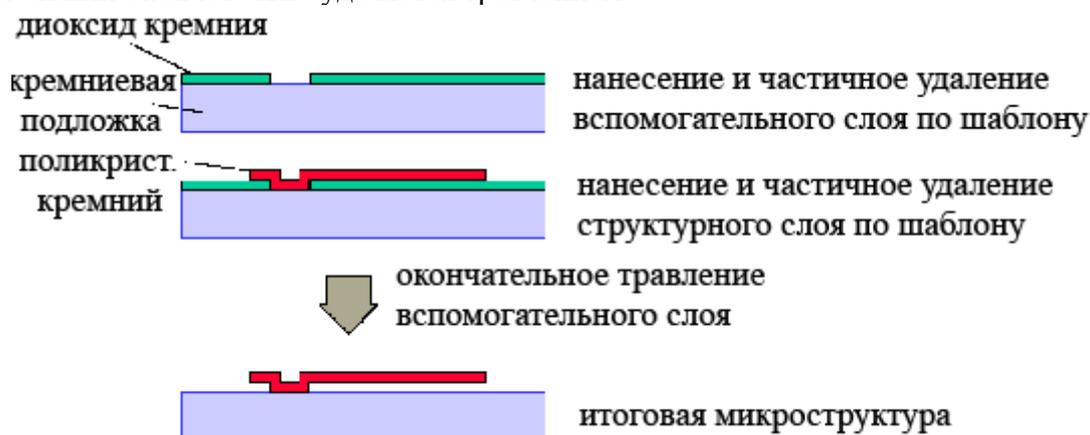


Рис.3. Технологическая последовательность, использующая поликристаллический кремний как структурный слой и диоксид кремния как вспомогательный, [6]

С помощью данной технологии стала возможной реализация идеи объединения механики и электроники в одном чипе. Технология открыла путь к дешевому массовому производству микроструктурных изделий.

Компания Analog Devices стала пионером поверхностной микрообработки, выпустив первый цифровой акселерометр, реализованный в одном чипе.

## 1.3. Технология LIGA

Название технологии LIGA происходит от немецкой аббревиатуры RoentgenLithography-Galvanik-Abformung, что означает комбинацию рентгеновской литографии, гальванотехники и формовки. Рентген-лучи отображают фотошаблон на толстый фоторезистивный слой. Засвеченные места удаляются и в оставшиеся канавки гальванически осаждается металл. Фоторезист окончательно удаляется. Полученная микроструктура может быть готовой частью микроизделия либо использоваться как форма для получения отпечатков-микроструктур на других материалах, например пластмассах или керамике.

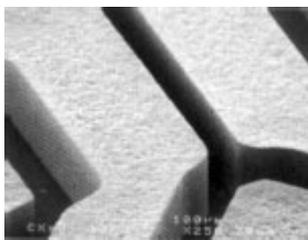


Рис.4. Копланарный делитель мощности, выполненный по технологии LIGA, [5]

Основные характеристики приведенных технологий получения микроструктур приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

	Объемная микрообработка	Поверхностная микрообработка	LIGA
Суть метода	Для получения микроструктуры используются специальные селективные травители. Травление происходит преимущественно в определенных кристаллических плоскостях.	В данном методе последовательно наносятся и протравливаются структурные и вспомогательные слои. Процесс наиболее схож с традиционным производством ИС.	Используется фотолитография с последующим гальваническим осаждением высоко профильных трёхмерных структур, которые затем могут быть использованы для литографирования на других материалах.
Достоинства метода	Получаемые микроструктуры обладают существенно правильной геометрией.	Процесс производства максимально схож с таковым для ИС, что обеспечивает простоту интеграции механики и электроники на одном кристалле, возможность серийного производства.	Объемные микроструктуры имеют высокое соотношение высота-ширина. В высоту микрообъекты могут составлять от нескольких сотен мкм до 1 мм, тогда как ширина – величина порядка нескольких мкм. Такая микромеханика работоспособна в высоком интервале температур и давлений, может передавать относительно большие силы и моменты. Возможность получения микроструктур из широкого спектра материалов.
Недостатки метода	Геометрия микроструктуры в значительной степени определяется кристаллической решеткой субстрата. Следовательно, производство сложных, взаимодействующих микросистем сильно затруднено, часто невозможно.		Высокая сложность получения микроструктур, их совмещения с микроэлектроникой.

Объемная микрообработка и технология LIGA имеют весьма специфические области применения. Технология поверхностной микрообработки не имеет существенных недостатков, ее использование позволяет наиболее просто реализовать основные идеи MEMS – миниатюризация, высокая повторяемость (возможность серийного производства), интеграция механики и электроники, именно поэтому она и получила наиболее широкое распространение.

Для проектирования MEMS создано множество постоянно развивающихся программных продуктов. Краткие описания наиболее известных можно найти на сайте <http://www.memsnet.org/links/software/>.

## 2. MOEMS

Среди всевозможных MEMS отдельно выделяют MOEMS (MicroOptoElectroMechanical Systems) – микрооптоэлектромеханические системы, дающие возможность менять или модулировать часть светового луча и в некоторых случаях фазово или спектрально модифицировать его. Базовые оптические элементы MOEMS отражают, разлагают, преломляют свет. На длину волны света, как и на размер микроэлементов в совокупности накладываются ограничения. Во избежание нежелательной дифракции размеры оптоэлементов должны быть на порядок больше длины волны. Если дифракция – требуемый эффект, ограничение снимается.

MOEMS имеют важное преимущество над своими макроаналогами – максимально точные и максимально контролируемые перемещения оптических элементов. В силу малой

инертности оптоэлементов, изменение состояния оптической системы происходит за очень короткий промежуток времени.

На смену знаменитого телескопа Хаббл в 2008 году планируется запустить телескоп NSGT, имеющий восьмиметровое зеркало, состоящее из 4 млн. микрозеркал, каждое из которых имеет подвижный сегмент, отклоняющийся с помощью микропривода на 10 градусов.

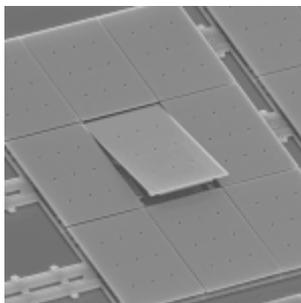


Рис.5. Фрагмент зеркала телескопа NSGT, [8]

Основное зеркало наводится на интересующий нас объект. Отраженный от образованного вспомогательного зеркала (после отклонения микрозеркал) свет поступает, например, на детекторы для анализа спектра излучения интересующего объекта.

### 3. Перспективы

На данный момент в развитие MEMS по всему миру вкладываются большие средства. Известные компании, такие как Analog Devices, Texas Instruments, Intel производят и ведут разработки MEMS – устройств.

Снижение себестоимости в серийном и массовом производстве, повышение мобильности устройств являются неоспоримыми плюсами и стимулами к внедрению MEMS технологии в производственный процесс.

### 4. Реализация MEMS-структур на примере трехслойных интерференционных фильтров Фабри-Перо

При суперпозиции большого числа волн в интерференционной картине образуются узкие максимумы. Благодаря этому многолучевая интерференция получила важные практические применения и основанные на ней спектральные приборы имеют высокую разрешающую способность. Большое число когерентных волн можно получить при многократном отражении света от двух параллельных поверхностей. Практически это реализуется в интерферометре Фабри-Перо.

Интерферометры Фабри-Перо делают в виде плоскопараллельной прозрачной пластины (спейсера), на обе поверхности которой нанесены отражающие слои, либо в виде двух пластин, у которых покрытые отражающим слоем поверхности установлены строго параллельно друг другу и разделены воздушным промежутком. Для повышения разрешающей способности интерферометра необходимо увеличивать порядок интерференции (достигается увеличением толщины спейсера), коэффициент отражения зеркальных покрытий.

MEMS реализация фильтра Фабри-Перо, предложенная Денисовым А.А. в [10], представляет собой 3х-слойную наноструктуру Al-SiO<sub>2</sub>-Al толщин 8нм – 300нм – 8нм соответственно.

Максимально быстронапыленные тонкие пленки алюминия обладают высокой отражательной способностью (получены пленки с коэффициентом отражения до 0.9), что способствует высокой разрешающей способности фильтра. Пьезоэлектрические свойства кварцевого спейсера позволяют изменять его толщину, помещая его во внешнее

электрическое поле, с помощью чего может производиться сканирование спектра падающего света.

Производство такого интерференционного фильтра может осуществляться за один технологический цикл на установке для напыления слоев веществ методом магнетронного распыления LH Z550 Sputtering Plant (компания Leybold, Германия). Три слоя: Al, SiO<sub>2</sub>, Al последовательно напыляются на стеклянную пластину.

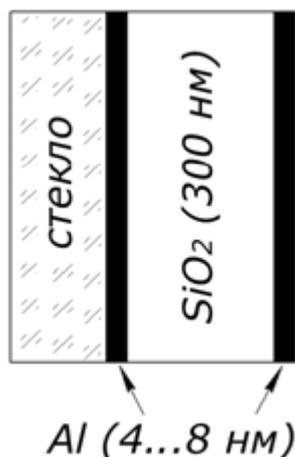


Рис.6. Трехслойный интерференционный фильтр Фабри-Перо.

На основе интерференционных фильтров Фабри-Перо может быть создано два класса устройств: датчики, регистраторы – для контроля различных параметров сред, высокочастотные переключатели – для использования в оптоволоконных вычислительных сетях.

В качестве датчиков фильтры обычно используют в сочетании с ПЗС-матрицей (линейкой). Регистрируется, к примеру, перемещение мембраны для измерения давления внутренней среды. Косвенно можно измерять факторы, влияющие на оптические свойства системы датчика, например, изменение коэф. преломления рабочего газа, спейсера, изменение его геометрических размеров в зависимости от температуры и т.д.

### Литература

1. <http://itc.ua:8101/article.phtml?ID=20147&IDw=1>
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/MEMS>
3. <http://www.mems-exchange.org/MEMS>
4. <http://heim.ifi.uio.no/~oddvar/rfmems.htm>
5. <http://www.chip-news.ru/archive/chipnews/200201/3.html>
6. <http://www.microfab.de/technologies/surfacemm.htm>
7. <http://www.darpa.mil/MTO/MOEMS/index.html>
8. [http://www.microbot.ru/modules/Static\\_Docs/data/1\\_MicroElectroMechanical\\_Systems\\_MEMS/1\\_Common/000700\\_kv\\_mems/index.htm](http://www.microbot.ru/modules/Static_Docs/data/1_MicroElectroMechanical_Systems_MEMS/1_Common/000700_kv_mems/index.htm)
9. Иродов И. Е. Волновые процессы.
10. Денисов А.А. Трехслойные наноструктуры интерференционных фильтров Фабри-Перо высокого разрешения.
11. <http://www.csa.com/discoveryguides/mems/overview.php?SID=desjr9u25qd0aa2i8q07uqag97>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИНИРОВАННОГО ПОЗИТИВНОГО МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДПП.

Климова Е.А.

*Научный руководитель: к. т. н., доцент Гриднев В.Н.*

Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

## RESEARCH PRODUCTION'S TECHNOLOGY OF COMPOSITE POSITIVE METHOD OF MAKING BPP

Klimova E.A..

*Supervisor of studies: Candidate of technical science, reader Gridnev V.N.*

BMSTU, Moscow, Russian Federation

### Аннотация

Настоящая работа посвящена особенностям комбинированного позитивного метода изготовления двухсторонних печатных плат. Особое внимание уделено различным дефектам, которые образуются в процессе изготовления.

### Abstract

This work is devoted to the features of composite positive method of making both-way printed plate. The main attention is concentrated to the different defects, which being formed at the making process.

Коротко рассмотрим основные этапы технологического процесса комбинированного позитивного метода изготовления ДПП. (Таблица 1)

Получение заготовки. Исходным материалом является лист фольгированного с двух сторон диэлектрика. Медная фольга различной толщины ( $h_f = 5; 18; 20; 35; 50$  мкм) приклеена к диэлектрическому основанию (СФ) заводом- поставщиком материала.

Основной метод получения заготовок ДПП- резка листа на гильотинных или дисковых ножницах с раскроем на полосы, а полос на заготовки. Размеры заготовки определяются ее типом: одинарная (для изготовления одной ДПП) или групповая (для нескольких ДПП), шириной технологического поля (20-30мм) по периметру и между отдельными платами групповой заготовки (5-10мм) и принятыми на предприятии оптимальным соотношением длины и ширины заготовки.

Сверление переходных и монтажных отверстий. В наружном технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия. Базовые отверстия получают на специальном станке, собрав несколько заготовок (2-6 штук) в пакет, затем сверлят и, не меняя установка пакета, штафуют. Штифты служат для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с числовым программным управления (ЧПУ). Для сверления применяют специальные одно-, двух- и четырехшпиндельные станки с точностью позиционирования в пределах  $\pm (0,001 - 0,005)$ .

Предварительная металлизация отверстий. Стенки просверленных отверстий имеют дефекты в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией, химическую обработку растворами на основе соляной и серной кислот, комбинированную химико-механическую обработку, плазмохимическое травление.

Типовой ТП предварительной металлизации диэлектрика предусматривает сенсбилизацию (адсорбция олова  $Sn^{+2}$ ), активацию (образование сверхтонкого слоя палладия Pd), химическое меднение ( $h_{xm} = 1-2$ мкм) и гальваническое меднение ( $h_{пм}$  до 5-7 мкм).

В настоящее время типовой ТП уступает место прямой металлизации диэлектрика на основе трехметального катализатора (Pd, Sn, Me). На стенках отверстий образуется металлическая пленка (Pd, Sn, Me) толщиной 60-80 ангстрем с хорошей адгезией и с высокой проводимостью. Прямая металлизация завершается гальванической затяжкой медью до  $h_{пм} =$

5-6 мкм. Приведенная ниже таблица иллюстрирует состав и длительность операций прямой металлизации, что позволяет организовать ТП предварительной металлизации отверстий на модульной линии автооператорного типа с автоматическим переносом заготовки в вертикальные ванны в соответствии с последовательностью операций ТП. Следует отметить, что одновременно медь осаждается и на фольгированные поверхности заготовок.

Таблица.2. Операции предварительного меднения сторон отверстий заготовки ДПП.

Наименование операции	Реактив и характер воздействия	Режимы	
		Время	Температура
Обезжиривание	Кондиционер DS 270 Нейтрализация отрицательного и придание положительного заряда	7 мин	65 <sup>0</sup> С
Промывка	Вода: струйная, проточная	30 сек	20 <sup>0</sup> С
		1 мин	20 <sup>0</sup> С
Активирование	Преактиватор DS 400 Активатор DS 500 Образование трехметалльного покрытия (Pd, Sn, Me)	~ 2 мин	70 <sup>0</sup> С
		7 мин	42 <sup>0</sup> С
Промывка	Вода	2 мин	20 <sup>0</sup> С
Интенсификация	Ускоритель DS 650 Образование мономолекулярной металлической пленки	7 мин	45 <sup>0</sup> С
Промывка	Вода: струйная	30 сек	20 <sup>0</sup> С
Декапирование	10% р-р серной кислоты	50 сек	18-25 <sup>0</sup> С
Промывка	Вода	2 мин	20 <sup>0</sup> С
Гальваническая затыжка	Электролит / CuSO <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , хлориды, добавка J-Plate Cu 400	~ 8 мин	18-25 <sup>0</sup> С
Промывка	Вода	~ 1 мин	20 <sup>0</sup> С
Сушка	Горячий воздух	~ 8 мин	
Реактивы DS предложены фирмой- разработчиком системы прямой металлизации SYSTEM-S			

Получение рисунка схемы. Рисунок печатной схемы на заготовке ДПП может быть получен фотографическим способом (инструменты- фоторезист, фотошаблон) или сеткографическим способом (краска, сетчатый трафарет). Рассмотрим фотоспособ, который обеспечивает большую точность проводящего рисунка, однако отличается большей трудоемкостью по сравнению с сеткографическим способом.

Изображение схемы получают с помощью сухого пленочного фоторезиста (СПФ) путем экспонирования его с инструмента- позитивного фотошаблона на заготовку и проявление. Экспонированные и проявленные участки фоторезиста прочно удерживаются на пробельных местах заготовки, оставляя открытыми все зоны будущего проводящего рисунка.

СПФ представляет собой трехслойную структуру (лавсановая основа – СПФ – полиэтиленовая защитная пленка) и наносится с двух сторон на заготовку с помощью валкового ламинатора. Адгезия обеспечивается предварительной химико-механической обработкой заготовки, подогревом (5 минут, 100<sup>0</sup>С) в термошкафу, ламинированием (скорость 1.2- 1.8 м/мин) с прижимом валков, нагретых до 115-120<sup>0</sup>С и термостабилизацией ламинированной заготовки (20<sup>0</sup>С, 30 мин).

Заготовки (2-4 шт.), ламинированные СПФ, размещают на столе установки экспонирования, совмещая каждую с фотошаблоном с помощью кнопок и базовых отверстий, полученных в технологическом поле перед операцией сверления монтажных отверстий.

Использование базовых отверстий на операциях сверления и экспонирования рисунка позволяет с достаточной точностью обеспечить совмещение центров контактных площадок с центрами монтажных и переходных отверстий ДПП.

Для проявления рисунка схемы применяют механизированную модульную линию конвейерного типа, по которой загружаемые вручную заготовки проходят модули проявления (струйная подача проявителя  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), промывки и сушки. Качество проявленного рисунка контролируют визуально или при небольшом увеличении.

Гальваническое осаждение меди (Cu) в отверстиях и одновременно в остальных зонах проводящего рисунка (пробельные места закрыты фоторезистивной маской) выполняют на программируемой автоматической линии автооператорного типа, аналогичной линии предварительного меднения. На этой же линии гальванически осаждают на проводящий рисунок олово (5-10 мкм) - металлорезист. Контроль качества рисунка визуальный.

Травление меди с пробельных мест осуществляется после удаления с заготовки фоторезистивной маски на модульной линии конвейерного типа с ручной загрузкой. Роликовый конвейер перемещает заготовки через модули травления ( $\text{CuCl}_2$ ), кислотной промывки (HCl), каскадной промывки водой, модуль визуального промежуточного наблюдения, модуль снятия металлорезиста и сушки. Химические растворы и вода подаются в рабочие зоны модулей распылением под давлением с воздействием на обе стороны заготовок ДПП. Операция завершается визуальным или оптическим контролем состояния проводящего рисунка.

Нанесение паяльной маски. Паяльная маска защищает полученный проводящий рисунок ДПП от внешних воздействий, оставляя открытыми места пайки навесных элементов, т.е. зоны контактных соединений с печатным монтажом. Применяют сухие и жидкие паяльные маски (ЖПМ), последние обладают более высокой разрешающей способностью.

ЖПМ наносят на заготовку ДПП сеткографическим способом, высушивают ( $85^\circ\text{C}$ ) экспонируют и проявляют. Окончательные защитные свойства ЖПМ приобретает в сушильном шкафу при  $T = 150^\circ\text{C}$  ( $t_{\text{о}}=60$  мин.). Геометрию рисунка паяльной маски контролируют визуально при соответствующем увеличении.

Горячее лужение осуществляют на специальной установке путём погружения и выдержки (6с.) заготовки в вертикальном положении в расплавленном припое ( $\text{Sn} - 63\%$ ,  $\text{Pb} - 37\%$ ), находящимся при температуре около  $235^\circ\text{C}$ . Сбрасывание излишков припоя и выравнивание толщины слоя лужения до 5-8 мкм. осуществляется ножами-форсунками подающими горячий ( $200^\circ\text{C}$ ) сжатый воздух с двух сторон извлекаемой из ванны заготовки.

Непосредственно перед горячим лужением на заготовку наносят водорастворимый флюс, а после лужения остатки его удаляют на установке отмывки конвейерного типа.

## Литература

1. Данная статья разработана автором после прохождения практики на предприятии ЦПТА
2. Лекции Гриднева В.Н. по курсу "Технология производства электронных средств"

# ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СБИС НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР НА ПЛАСТИНЕ

**Новосёлов А.С.**

*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макарчук В.В.*

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## EVALUATION OF RELIABILITY IC'S ON BASIS OF WLR.

**Novoselov A.S.**

*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.*

Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

e-mail: novoanton@yandex.ru

### **Аннотация**

В работе рассмотрены основные деградационные процессы, приводящие к отказам СБИС. Рассмотрены методики испытаний тестовых структур, обеспечивающие проведение исследований этих деградационных процессов.

### **Abstract**

The main degradational processes leading to failure of IC's were considered in this work. The test procedures of test structures providing research this degradational processes were considered in this work.

## **Введение**

Широкое применение микроэлектронных изделий в различных дорогостоящих и высокоответственных системах обуславливает чрезвычайно высокие требования к надежности элементной базы и, в первую очередь, предполагает наличие достоверной информации о показателях ее надежности. Последнее делает предпочтительным использование традиционных проверенных элементов. Однако тут возникает объективное противоречие, стоящее особенно остро в отношении СБИС, которые, по сути, определяют функциональные возможности систем. Это связано с тем, что одной из основных тенденций развития современной микроэлектроники является быстрая смена технологических поколений, которые характеризуются уменьшением размеров элементов и ростом уровня интеграции. Использование новых схемотехнических решений, материалов и способов изготовления поставили перед теорией надежности целый ряд новых задач, в том числе:

-разработку методов оценки надежности принципиально новых типов изделий со сроком службы 100 – 150 тысяч часов;

-разработку методов оценки надежности изделий, подвергающихся действию спец. факторов, т.е. радиационной надежности;

-разработку методов определения изменений во времени показателей стойкости изделий.

Достигнутый высокий уровень долговечности и безотказности СБИС сделал практически невозможным решение этих задач на основе традиционной методологии натуральных статистических испытаний, что обусловлено рядом причин:

-для подтверждения требуемых высоких уровней надежности необходимо испытание неприемлемо больших выборок изделий в течение длительного времени;

-проведение длительных испытаний связано со значительными временными и материальными затратами и не согласуется с современными требованиями к срокам проектирования и изготовления;

- результаты, полученные при испытаниях одного типа изделий, практически не могут быть использованы для оценки надежности изделий другого типа;

-испытания предусматривают использование корпусированных схем, что существенно ограничивает возможности разделения отказов, обусловленных дефектами кристалла и отказов, являющихся следствием самого корпусирования;

-результаты испытаний могут обеспечить лишь слабую обратную связь на этапы проектирования и изготовления;

-традиционные статистические испытания не обеспечивают достаточной точности прогнозирования количественных показателей надежности ИС для разных условий применения;

-результаты испытаний имеют скорее историческую, нежели техническую ценность, в связи с более чем вероятным уходом оцениваемого объекта с рынка потребления задолго до их окончания.

Поэтому поиск и разработка новых подходов и методов оценки показателей надежности микрoeлектронных изделий является актуальной научной и практической задачей.

Одним из перспективных подходов к решению указанных проблем является физико-статистическое направление в теории надежности. Исследование физических закономерностей протекания деградиационных процессов в материалах и структурах ИС, а также влияния внешних воздействий и дефектов на их кинетику позволит комплексно решить задачи оценки и прогнозирования показателей надежности и создаст предпосылки для управления надежностью микрoeлектронных изделий.

### **Методология ускоренных испытаний тестовых структур на пластине.**

В настоящее время принято считать, что успешный, с точки зрения обеспечения надежности, проект радиоэлектронной аппаратуры возможен лишь при использовании принципов, давно известных под названием «физика отказов» (physics-of-failure - PoF) [Cushing M.J., Moring D.E., Stadterman T.J., Malhotra A. «Comparison of Electronics Reliability Assessment Approaches», IEEE Transactions on Reliability, v.42, 1993; Watson G.F., «MIL Reliability: A New Approach», IEEE Spectrum, v.29, 1992].

Считается, что только модели, основанные на принципах «физики отказов», способны дать адекватные оценки надежности микросхем путем оценки влияния стандартной номенклатуры механизмов отказов на отказ микросхемы, изготовленной в реальном технологическом (производственном) процессе и при использовании при проектировании микросхемы в составе правил проектирования (design rules) так называемых «надежностных правил проектирования (reliability rules)», также основанных на принципах «физики отказов».

В монографии по надежности полупроводниковых микросхем [Michael G. Pecht, Riko Radojic, Gopal Rao «Guidebook for Managing Silicon Chip Reliability», CRC Press 1999] к числу основных механизмов отказов отнесены:

- деградация под влиянием горячих носителей,
- электромиграция,
- времязависимый пробой диэлектрика,
- деградация под влиянием внутренних механических напряжений,
- деградация под влиянием разряда статического электричества,
- деградация под влиянием радиационных воздействий.

Считается, что помимо указанных стандартных механизмов, имеется еще категория «прочих», менее значимых механизмов, вклад которых в интенсивность отказов также может быть оценен.

Таким образом, признано:

- надежность микросхем определяется протеканием в их материалах и структурах деградиационных процессов, т.е. процессов, определяющих изменения во времени их свойств (параметров);
- скорость этих изменений для данных условий детерминирована и определяет потенциальную долговечность элементов схемы;
- присутствие дефектов снижает надежность реальных изделий за счет ускорения характерных деградиационных процессов.

Признано, наконец, что современный уровень технологий обеспечивает хорошую воспроизводимость свойств изготавливаемых микросхем и практически исключает внесение

грубых дефектов, которые могли бы провоцировать протекание в элементах микросхем нехарактерных деградиционных процессов. Это и делает возможным, при анализе надежности микросхем, ограничиться жестко ограниченным списком процессов деградации.

Перечисленные положения сделали не только желательным, но и возможным появление нового, физико-статистического подхода к оценке надежности микросхем.

Сильными сторонами этого подхода являются:

-оперативность оценки, что обеспечивает возможность оценки надежности каждой партии или пластины в реальном масштабе времени;

-четкая граница между отказами кристалла и отказами корпусированной схемы;

-универсальность получаемых результатов (возможность оценки надежности различных типов микросхем);

-возможность использования массива информации о результатах параметрического контроля в части учета исходного разброса параметров элементов;

-широкие возможности оперативной коррекции технологического процесса на основании результатов испытаний на пластине;

-возможность оценки влияния условий применения на надежность.

Одним из основных направлений развития этого подхода является методология надежностных испытаний на пластине (Wafer Level Reliability – WLR, см. например, Приложение Н к стандарту MIL-PRF-38535E, объединенный стандарт JEDEC и EIA EIA/JESD35-1 «General Guidelines for Designing Test Structures for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics» и др.).

Необходимо отметить, что методология WLR имеет двойное назначение. С одной стороны, она может рассматриваться как продолжение и/или расширение процедуры мониторинга процесса. Параметрические мониторы и тестовые структуры WLR представляют собой комплекс инструментов единой программы непрерывного повышения качества.

Контроль параметров структур WLR на уровне пластин (а характерные времена контроля наличия / отсутствия деградации по определенному механизму лежат в пределах нескольких секунд) не позволяет дать прямую оценку интенсивности отказов, но с помощью измерения электрических параметров можно определить, когда влияние конкретного механизма на интенсивность отказов становятся значимым. Модель WLR отталкивается от понимания физических механизмов отказов с целью создания тестовых структур и алгоритмов для множества механизмов отказов для выявления разбросов и отклонений, приводящих к проблемам с надежностью готовых изделий.

В данной работе было проведен анализ физических закономерностей протекания деградиционных процессов в характерных для используемой технологии элементах, и на основе этого анализа был разработан набор специальных тестовых структур и методик их измерений(испытаний), обеспечивающих возможность оценки скорости деградиционных процессов.

Для оценки электромиграции были спроектированы следующие структуры:

Структура Ван-дер-Пау

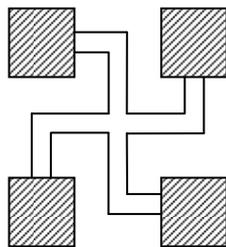


Рис.1 Структура Ван-дер-Пау

Предназначена для измерения поверхностного сопротивления проводящих слоев, а также для определения температурного коэффициента сопротивления шины. Достоинством рассматриваемой структуры является независимость определяемого сопротивления от геометрических размеров структуры.

$$R = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{I}$$

Для исключения влияния Джоулева нагрева на значение сопротивления структуры при измерениях необходимо использовать низкий уровень тока.

Структура с постоянной шириной шины

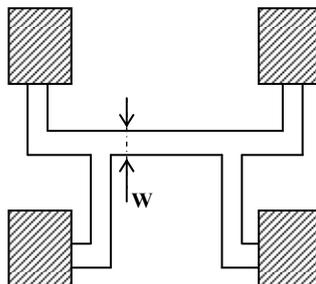


Рис.2 Структура с постоянной шириной шины

Предназначена для проведения испытаний проводящих шин в условиях наименьших неоднородностей температуры и плотности тока.

Удельное поверхностное сопротивление слоя металлизации вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{|V_3 - V_4|}{I \cdot N}$$

Структуры с переменной шириной шины

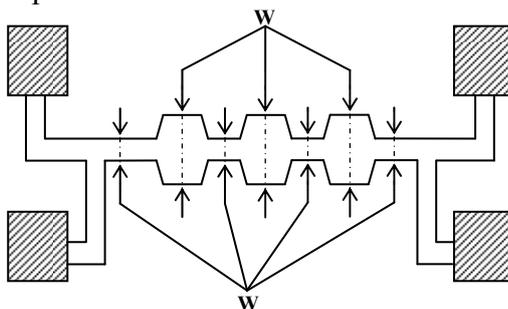


Рис.3 Структуры с переменной шириной шины

Предназначена для проведения испытаний проводящих шин в условиях действия градиента тока.

Структуры с постоянной шириной шины, имеющие нагревательный элемент

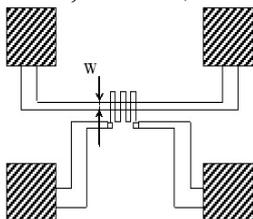


Рис.4 Структуры с постоянной шириной шины, имеющие нагревательный элемент

Предназначена для исследования влияния градиента температуры на процесс электромиграции.

В ряде случаев, при проведении ускоренных испытаний через структуру протекает значительный ток, что приводит к выделению тепла и заметному разогреву элемента относительно окружающей среды. Простым способом определения истинной температуры шины является измерение изменения при этом ее сопротивления и расчет температуры с использованием значения температурного коэффициента сопротивления. Определение указанного коэффициента предшествует проведению испытаний. Для этого проводятся измерения сопротивления структуры Ван-дер-Пау при различных температурах столика  $T_{chuck} = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  °C и токе  $I < 1$  мА. Полученная зависимость сопротивления от

температуры используется для определения температурного коэффициента сопротивления TCR.

Целью испытаний является определение зависимости времени наступления отказа от температуры и плотности тока, протекающего по шине. В качестве критерия отказа принят уровень изменения сопротивления на 50% величины.

Предварительно, до начала испытаний структур каждого типа, необходимо определить диапазон токов и температур, при которых среднее время наступления отказа лежит в диапазоне от 1 сек до 2000 сек. Нижний предел определяется возможностями оборудования, верхний – требованиями к оперативности испытаний.

Для выбранных пар значений температуры и величины тока проводятся испытания 3-7 структур для определения среднего времени наступления отказа.

Далее, строятся зависимости полученных средних значений времен до отказа от температуры и плотности тока.

Структура Кельвина для одиночного контакта

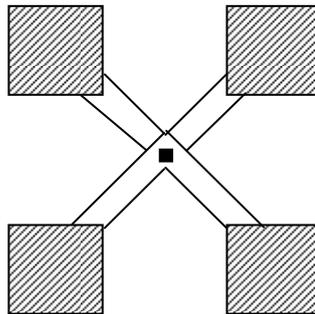


Рис.5 Структура Кельвина для одиночного контакта

Предназначена для проведения испытаний на отказ, а также для определения температурного коэффициента сопротивления контакта

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{I}$$

Структура в виде цепочки контактов

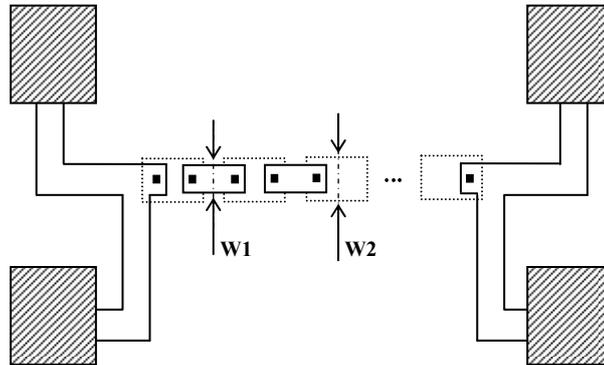


Рис.6 Структура в виде цепочки контактов

Количество контактов: 8 – для контактов между поликремнием и первым уровнем металлизации, 36 – для контактов между различными уровнями металлизации.

Предназначена для проведения испытаний на отказ.

### Методика испытаний

В ряде случаев, при проведении ускоренных испытаний через структуру протекает значительный ток, что приводит к выделению тепла и заметному разогреву элемента относительно окружающей среды. Простым способом определения истинной температуры шины является измерение изменения при этом ее сопротивления и расчет температуры с использованием значения температурного коэффициента сопротивления. Определение

указанного коэффициента предшествует проведению испытаний. Для этого проводятся измерения сопротивления структуры при различных температурах столика  $T_{chuck} = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  °С и токе  $I < 1$  мА. Полученная зависимость сопротивления от температуры используется для определения температурного коэффициента сопротивления TCR.

Целью испытаний является определение зависимости времени наступления отказа от температуры и плотности тока, протекающего через контакт. В качестве критерия отказа принят уровень изменения сопротивления на 50% величины.

Предварительно, до начала испытаний структур каждого типа, необходимо определить диапазон токов и температур, при которых среднее время наступления отказа лежит в диапазоне от 1 сек до 2000 сек. Нижний предел определяется возможностями оборудования, верхний – требованиями к оперативности испытаний.

Для выбранных пар значений температуры и величины тока проводятся испытания 3-7 структур для определения среднего времени наступления отказа. Далее, строятся зависимости полученных средних значений времен до отказа от температуры и плотности тока.

Для оценки деградации параметров транзисторов под действием горячих носителей были спроектированы следующие структуры и методики испытаний:

Одиночный транзистор

Размеры затворов транзисторов указаны в Таблицах 1 и 2

Таблица 1

Ширина затвора, мкм	Длина затвора, мкм
$L_{min} \times 80$	$L_{min}$
$L_{min} \times 80$	$L_{min} - 0.05$
$L_{min} \times 80$	$L_{min} + 0.05$
$W_{min}$	$L_{min}$

Таблица 2

Технология 0.35ЭПИ4М	Технология 0.5ЭПИ3М
$L_{min} = 0.35$ мкм	$L_{min} = 0.5$ мкм
$W_{min} = 0.8$ мкм	$W_{min} = 1$ мкм
Минимальный вылет затвора – 0.5 мкм	Минимальный вылет затвора – 0.5 мкм

Сборка из нескольких параллельно соединенных транзисторов

Количество и размеры затворов транзисторов указаны в Таблицах 2 и 3

Таблица 3

Ширина затвора, мкм	Длина затвора, мкм	Количество транзисторов
$W_{min}$	$L_{min}$	$(L_{min} \times 80) / W_{min}$

Целью испытаний является определение зависимостей порогового напряжения, крутизны и тока насыщения транзисторов различных типов от времени испытаний.

### Методика испытаний

Измерить начальные характеристики транзистора (ток насыщения, крутизна, пороговое напряжение). На сток транзистора подать напряжение 5,0 В и определить величину напряжения на затворе ( $V_{gstr}$ ), при котором ток в подложку максимален.

На контактные площадки испытываемой транзисторной структуры подать следующие напряжения: исток – 0 В, сток – 5,0 В, затвор –  $V_{gstr}$ . Выдержать структуру при заданных режимах в течении 1 сек, после чего провести измерение характеристик транзистора. Вновь подать на структуру режим испытаний, выдержать 2 сек и повторить измерения параметров. Подать на структуру режим испытаний и выдержать 7 сек, повторить измерения. Подать на структуру режим испытаний и выдержать 20 сек, повторить измерения. Подать на структуру режим испытаний и выдержать 70 сек, повторить измерения.

Принятый график изменения времени выдержки образца в режиме испытания

обеспечивает логарифмический рост накопленного времени испытаний.

Испытания повторить для трех однотипных образцов. Для каждого образца построить зависимость порогового напряжения, крутизны и тока насыщения от времени испытаний (в логарифмическом масштабе по времени). Испытания провести при температурах столлика – 25, 75, 125 и 175<sup>0</sup>С.

Для оценки времязависимого пробоя диэлектрика были спроектированы следующие структуры и методики испытаний:

Для испытаний используются структуры с тремя площадями перекрытия слоя поликремния и активного слоя: 13500 мкм<sup>2</sup>, 1365 мкм<sup>2</sup> и 135 мкм<sup>2</sup>

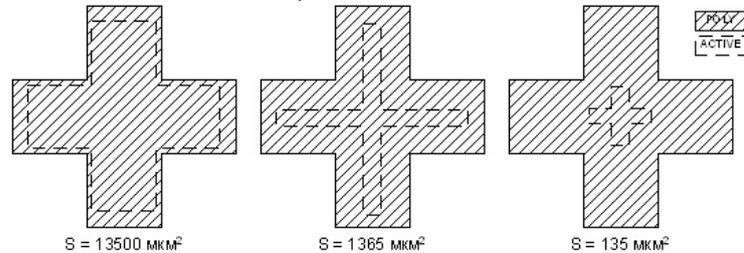


Рис.7 Структуры с тремя площадями перекрытия слоя поликремния и активного слоя

### Методика испытаний

На поликремниевый затвор структуры подается нарастающее напряжение. Скорость нарастания напряжения должна лежать в диапазоне от 0.1 до 1 МВ/см·с. Измеряется ток через подзатворный окисел. Испытания прекращаются, когда ток через структуру достигнет величины в 10 раз превышающей начальный ток через структуру. Напряжение, соответствующее этому состоянию принимается в качестве напряжения пробоя структуры.

Для построения количественной модели отказа элемента оценивается полный заряд, протекший через структуру до наступления пробоя. Оценка осуществляется путем интегрирования по времени тока через структуру за все время испытаний.

Состав разработанных тестовых структур обеспечивает проведение исследований на пластине:

- процесса электромиграции в токоведущих шинах, контактах и переходных контактах всех уровней;
- процесса деградации МОП-транзисторов под влиянием горячих носителей заряда и ионно-дрейфовых эффектов в подзатворном диэлектрике;
- процесса времязависимого пробоя подзатворного диэлектрика в центральной области транзистора и на границах затвора и активных областей;
- влияния плазменных повреждений на стабильность параметров n- и p-канальных транзисторов;
- параметров проводящих и диэлектрических слоев, диодов, транзисторов и высокоомных резисторов.

Состав и конструкция тестовых структур обеспечивают возможность идентификации дефектов, влияющих на надежность элементов СБИС.

### Литература

1. Pecht M.G., Radojcic R., Rao G. "Guidebook for Managing Silicon Chip Reliability", 1999
2. Radojcic, R. "Reliability Management for Deep Submicron ICs," *Integrated System Design*, September 1996.
3. Pecht, M., Lall, P., and Hakim, E., *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТ-ДИЗАЙНА МОДЕЛЬНОГО РЯДА «НАВИГАТОР» СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС/ГАЛИЛЕО

Д.И. Арабов , С.С.Лавин , Д.С. Иевский, А.С. Бабаджанян  
*Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Власов А.И.*  
Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4

## DEVELOPMENT of KONTSEPT-DIZAYNA of MODEL ROW is «NAVIGATOR» SYSTEMS of GPS/ГЛОНАСС/ГАЛИЛЕО

Arabov D.I., S.S.Lavin, D.S.Igevsy, A.S.Babadganajn  
*The supervisor of studies: the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Vlasov A.I.*  
Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

### **Аннотация**

Данная работа посвящена разработке концептуальной дизайнерской платформы модельного ряда GPS/ГЛОНАСС /ГАЛИЛЕО устройств торговой марки «НАВИГАТОР» (по заказу ОАО «Концерн «РТИ Системы»). В работе представлены результаты по трем направлениям исследований. Целью первого направления является анализ рынка устройств, классифицирование и формулирование к ним функциональных требований. Задачей второго направления является анализ ряда типовых моделей ГЛОНАСС/GPS устройств с точки зрения эргономики и внешнего вида, а также формулирование основных конструктивных критериев и требований к форме модели устройства в зависимости от назначения и условий использования. Третье направление носит творческий характер и демонстрирует примеры собственных наработок участников проекта по данному направлению.

### **Abstract**

Given article describes various works and researches in the field of designing concept models of GLONASS/GPS navigators. The article describes three directions of the works which are included into project. The purpose of the first direction is the analysis of the market of devices, classification and formulations functional requirements applied to them. Problem of the second direction is the analysis typical models GLONASS/GPS devices from the point of view of ergonomics and appearance, and as a formulation of the basic constructive criteria and requirements to the form of model of the device depending on purpose and conditions of use. The third direction has creative character and shows own examples of the project in the given direction.

### **Введение**

В работе предусматривается решения комплекса задач в части разработки концепт-дизайна модельного ряда «навигатор» систем gps/глонасс/галилео (работа выполнялась по заказу ОАО «Концерн «РТИ Системы»):

- Анализ рынка существующих навигаторов
- Формализация функциональных и эрго-дизайнерских требований
- Разработка концептуальных эскизов
- Создание 3D моделей
- Создание твердотельных моделей
- Предложение функционального набора по каждому из устройств

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАВИГАТОРОВ

## Формулирование функциональных требований и критериев классификации навигаторов

На данный момент рынок навигаторов довольно широк и разнообразен. Если года 3 назад данные системы были доступны только ограниченному числу потребителей (в основном за рубежом), то в нынешнее время системы спутниковой навигации GLONAS/GPS/GALILEO получили широчайшую распространенность во многих областях жизни и деятельности человека и находятся в свободной продаже. Для облегчения анализа предлагаемых на рынке устройств, предлагается следующий способ классификации (рис. 1) по функциональности и области применения.



Рис.1.1. Классификация навигаторов по функциональности и области применения

Будучи ранее проектами сугубо военного назначения, сегодня эти системы используются автомобилистами, транспортниками, геодезистами, нефтяниками, вулканологами и т.д.

## 1.2. Портативные навигаторы

### 1.2.1. Наладонные устройства

Наладонные аппараты (рис. 1.2) предназначены для мобильного использования везде, где требуется определение собственного нахождения и нет места для тяжелых и массивных аппаратов. Используются военными, пешими туристами, охотниками, рыбаками, грибниками и т. д.

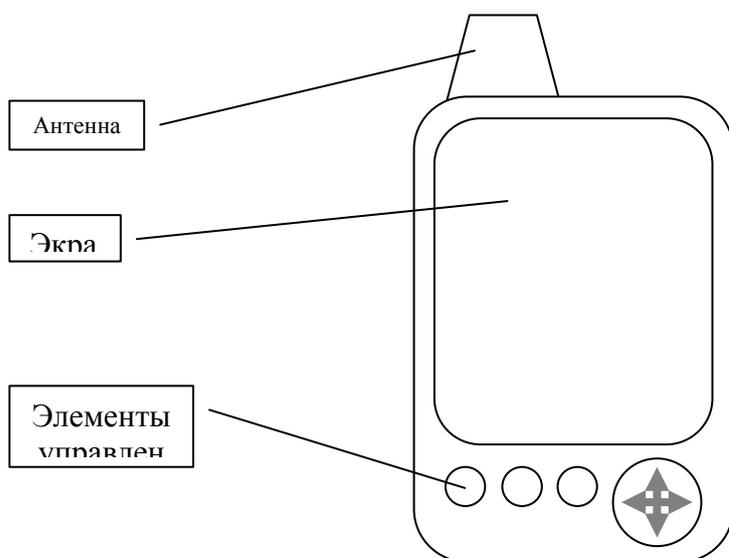


Рис.1.2. Схема наладонного навигатора.

Основные требования к этой категории - это компактность и продолжительное время автономной работы. Наряду с этими требованиями существуют ряд особо критичных функций, которые необходимы рядовому пользователю, данные требования представлены в таблице ниже:

Таблица 1.1 Перечень функциональных требований наладонных навигаторов

Функция	Описание
Путевые точки (Waypoint)	Количество сохраняемых путевых точек должно быть не менее 500. Некоторые модели содержат 2000 точек и более. Описание каждой точки включает название (не менее 6-и символов) и иконку для отображения на карте. Новые приемники поддерживают комментарии, состоящие из 24 символов, позволяющие более подробно описать каждую точку. Полезно для рыболова и грибника, так как можно отмечать грибные и рыбные места, безусловно, будет полезным также для всех остальных людей, жаждущих идентифицировать себя на матушке-Земле.
Треки (Track)	Зачастую людям, пользующимся компактными GPS устройствами, требуется не просто дойти до пункта В, но и вернуться обратно. Чтобы облегчить поиск оптимальной обратной дороги, современные приборы оснащены функцией записи треков. При переполнении памяти новые данные записываются поверх старых, т. е. стирается начало пути. Количество сохраняемых точек в треке должно быть не менее 2000. В современных моделях этот параметр увеличен до 10000. Некоторые приемники позволяют настраивать частоту записи точек, выбрав один из параметров периода записи: автоматически, по времени или по расстоянию между соседними точками. Во многих приемниках Garmin реализована оригинальная функция <b>TrakBack</b> , позволяющая пользователю повторить пройденный путь в обоих направлениях. Функция <b>TrakBack</b> пользуется особой популярностью у грибников, так как при поиске грибов можно не задумываясь и не отвлекаясь проходить в глухой лес, а затем с легкостью вернуться в начальный пункт. Зачастую на навигаторы, имеющие такую функцию, вообще

	не загружают дополнительные карты. На некоторых устройствах возможны специальные режимы для экономии заряда аккумуляторов при записи трека
Маршруты (Route)	Приемник должен поддерживать как минимум 20 маршрутов, состоящих из 50 или более путевых точек. Современные модели приемников компании Magellan позволяют конвертировать пройденный путь (трек) в готовый маршрут.
Компьютерный интерфейс	Позволяет сохранять точки, треки, маршруты на компьютере. Можно также загружать в приёмник карты, точки, маршруты, сохраненные ранее или полученные от других пользователей GPS-приёмников. Большинство приёмников, за исключением самых дешевых, имеют возможность соединения с компьютером через COM-порт. В новых моделях есть USB-интерфейс, который работает значительно быстрее. Также желательно иметь возможность пользоваться дополнительными носителями, такими как SD(microSD), CF карточки. Это позволяет менять количество памяти в зависимости от потребностей. Кроме возможности записи дополнительных тяжелых карт, на некоторых устройствах (как ни странно, не на всех) это позволяет снять ограничение на путевые точки, треки и маршруты, что может оказаться полезным для некоторых пользователей.
Чувствительная GPS антенна	В условиях густого леса некоторые приемники теряют связь со спутниками, а для грибника или охотника этот факт может оказаться печальным сюрпризом.
Водонепроницаемость	Для сохранения работоспособности приемника в условиях повышенной влажности или даже после погружения в воду необходим водонепроницаемый корпус. Эта функция является важной для всех, но для рыболова она критична. Для рыболовов выпускается большое число аксессуаров, которые не тонут в воде, в том числе навигаторы, некоторые из которых могут оставаться на поверхности воды и при этом исправно функционировать.
Путевой компьютер	Для представления полной картины пройденного или предстоящего пути необходим вывод статистической информации. При этом во многих приемниках пользователь может сам настраивать поля страниц, выбирая интересующие его данные из предложенного списка: пройденное расстояние, общее время движения, общее время стоянки, средняя и максимальная скорости, направление движения на точку, расстояние до точки, ориентировочное время прибытия в точку, угол отклонения от курса.
Картографические возможности.	Информация о текущем местоположении, представленная в виде значений широты, долготы и отображения на карте относительно других точек, не всегда понятна и удобна для навигации. Необходимо, чтобы приемник содержал электронные карты или имел возможность их загрузить. Наличие встроенной базовой карты удобно при ориентировании на незнакомой местности, для которой нет подробных загружаемых карт.

Стоит отметить и требования к ЖК-дисплеям наладонных устройств. Они должны иметь достаточно большое разрешение (более 160x270), желательным к тому же является отображение хотя бы небольшого количества цветов. Энергосберегаемость можно повысить при возможной работе дисплея от отраженного света без использования подсветки.

Поскольку вопрос с энергопотреблением стоит довольно остро, производители не обходят его стороной. Современные наладонные навигаторы способны автономно работать на протяжении более 30ти часов, работая от двух элементов питания типа «АА».

Некоторые навигаторы имеют ряд специфических функций, к примеру, некоторые из них могут подсказывать время оптимального клева, опираясь на встроенную базу подходящих условий ловли в зависимости от географического места нахождения.

К категории наладонных устройств можно добавить велонавигаторы, функции которых очень специфичны и не могут использоваться в других условиях. В качестве примера можно привести устройства, позволяющие измерять частоту вращения колес, для определения скорости движения велосипедиста. Однако многим потребностям в данных функциях покажется спорной. Велоспортом редко занимаются на неизвестной территории, а людям, занимающимся велотуризмом (многодневные поездки) и нуждающимся в навигации, параметры частоты вращения колёс и биометрические данные малоинтересны.

### 1.2.2. Автомобильные навигаторы

В современном мегаполисе становится все сложнее ориентироваться без дополнительных устройств, кроме того, постоянно увеличивающееся количество автомобилей приводит к загруженности основных магистралей. Системы спутниковой навигации способны ощутимо облегчить труд автомобилиста. Автомобильные навигаторы (рис 1.3) помогут водителю выбрать оптимальный маршрут движения, используя данные о дорожной обстановке в режиме реального времени. В памяти этих устройств могут храниться полезные для автомобилиста данные (АЗС, сервис-центры и т.д.). Предлагаемая функция называется Points of Interest, и, по большому счету, в ней могут храниться любые данные, интересные не только автомобилистам (гостиницы, точки питания, больницы и т.д.)

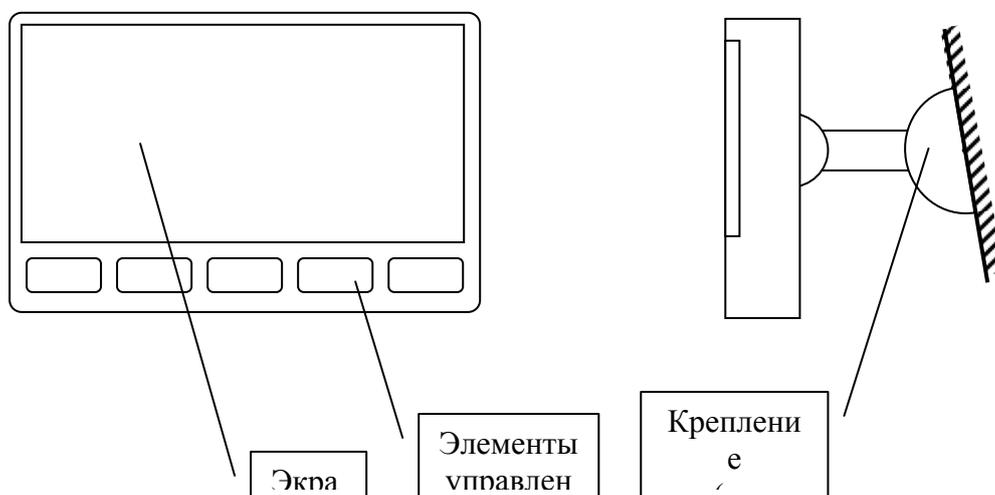


Рис.1.3. Схема автомобильного навигатора с креплением на лобовое стекло

Современные городские навигаторы в основном ориентированы на векторные карты, имеющие ряд преимуществ. За счет того, что карта хранится в виде базы данных объектов, она занимает мало места. Этот тип карт позволяет использовать широкий интервал масштабирования от одного до десятков километров на сантиметр. К тому же на открытие таких карт и непосредственную работу с ними не требуется больших аппаратных мощностей. Векторные карты позволяют применять функцию автоматического прокладывания маршрута, имеющую решающее значение в автонавигации. Сделав пару нажатий, выбрав начальный и конечный пункты, вы получите оптимальную траекторию движения. Если предложенный путь не подходит по определенным причинам, можно задать набор точек на карте, через которые нужно проехать, и маршрут будет пересчитан.

Следом за этим можно рассмотреть функцию голосового оповещения, созданную с целью не отвлекать внимание водителя от дорожной обстановки. Приятный женский голос оповещает о необходимых поворотах и других маневрах. Не стоит пренебрегать голосовыми характеристиками: некачественный звук и тембр голоса вполне могут отпугнуть пользователя. Некачественное звуковое оформление может привести к отказу потребителя от продукта. Пользователи хотят иметь возможность сменить звуковые характеристики голоса.

Ниже представлены функции (таблица 1.2), на которые обращают внимание при выборе приемника для автомобильной навигации. К сожалению, современные автомобильные навигаторы уже не обладают универсальностью более ранних моделей, которые можно было легко использовать и для активного туризма. Но взамен утраченной функциональности в одной области, этот тип навигаторов получил дополнительные возможности в другой, непосредственной в своей области применения.

Таблица 1.2 Перечень функциональных требований автомобильных навигаторов

Функция	Описание
Объем памяти	Современные карты, загружаемые в GPS приемники, обладают высоким уровнем детализации и содержат большое количество вспомогательной информации, что определяет их большие объемы. Специальные карты с поддержкой автоматической прокладки маршрута значительно больше и могут достигать нескольких десятков мегабайт. Размеры картографической памяти должны быть, не менее 64 Мб. В современных автомобильных приемниках используются недорогие съемные модули памяти (CF, MMC), которые пользователь может купить самостоятельно.
Автоматическая прокладка маршрута (AutoRouting)	Удобная и необходимая функция в условиях ориентирования на незнакомой местности. Позволяет автоматически сгенерировать маршрут от текущего местоположения до пункта назначения. В качестве точки назначения может служить определенный адрес, город, улица, POI и т.п. Функция поддерживается только при загрузке в навигатор специальных карт, которые содержат более подробную информацию о характерах дорог, развязках, знаках дорожного движения. Некоторые модели приемников позволяют выбирать характер сгенерированного маршрута: кратчайший, комфортный, по главным дорогам.
Путевые точки (Waypoint)	Количество путевых точек должно быть не менее 500. Описание каждой точки включает название (рекомендуется, не менее 6-и символов) и иконку для отображения на карте. Путевая точка может быть использована как конечный пункт назначения при расчете маршрута.
Точки интереса (Point Of Interest)	Изначально в памяти содержится несколько тысяч POI разных объектов: АЗС, посты ДПС, автомастерские, магазины, рестораны, отели, развлекательные центры и т.п. Библиотека точек может дополняться с фирменных CD. Современные базы содержат информацию не только о местоположении, точный адрес и названии объекта, но также телефон, по которому можно связаться и уточнить нужную информацию.
Компьютерный интерфейс	Несмотря на самодостаточность автомобильных GPS приборов, необходимо обеспечить их связь с ПК. Интерфейс позволяет сохранять точки, треки, маршруты на компьютере. Можно так же загружать в приёмник карты, точки, маршруты, сохраненные ранее или полученные от других пользователей GPS-приёмников. В ранних моделях использовался медленный COM-порт, но все новые модели

	оснащаются USB-интерфейсом, который работает значительно быстрее.
Внешнее питание	Использование мощных быстродействующих микропроцессоров и контрастных цветных экранов с подсветкой требует повышенного потребления энергии. Уже недостаточно 4-х и даже 6-и, пальчиковых батарей типа АА. Необходим внешний источник питания в качестве, которого используется бортовое питание автомобиля. Подключение обычно осуществляется в разъем прикуривателя.
Большой экран	Для водителя необходимо четко и быстро воспринимать выводимую GPS приемников информацию. Поэтому размеры экрана и используемых шрифтов особенно важны.
Внешняя антенна	В условиях салона автомобиля, где часть неба закрывается крышей, количества видимых спутников может быть недостаточно для подсчета позиции. Более того, многие модели современных автомобилей используют лобовые стекла со специальным слоем, которое защищает автомобиль от излишнего перегрева солнечными лучами. Эти слои, также, непроницаемые для навигационных сигналов. Для таких случаев должна быть предусмотрена возможность подключения к GPS приемнику внешней антенны. Антенна, установленная на крыше автомобиля, обеспечивает более качественный и надежный прием, позволяя определять позицию даже в густом лесу или вблизи высотных зданий.
Крепление	Для безопасной езды и комфортной навигации, GPS приемник необходимо надежно закрепить в салоне автомобиля. При этом нужно расположить приемник так, чтобы с одной стороны его экран был виден и читаем водителем, а с другой, обеспечивался прием навигационного сигнала (если используется встроенная антенна). Прямые солнечные лучи, попадающие на экран приемника, также ухудшают видимость выводимой информации. Следовательно, необходимо функциональное и надежное крепление
Дополнительные функции	
Сенсорный экран	Управление прибором может осуществляться не только с помощью клавиш на корпусе, но и непосредственно выбором соответствующих пунктов меню на экране приемника. Такая возможность стала доступна с использованием сенсорных экранов. В дорожных условиях значительно легче попасть пальцем в экран, чем нажать кнопки управления, пусть даже и не маленьких размеров. Также при наличии сенсорного экрана можно реализовать виртуальную клавиатуру, которая не занимает места на приборе, и не увеличивает его габариты. Такая клавиатура будет очень полезна при поиске объектов по их адресу и другим данным.
Цветной TFT экран	Ранее недостаток цветных экранов заключался в повышенном энергопотреблении и плохой видимости изображения в лучах яркого света. Последние достижения в этой области позволили создать лишенный этих недостатков трансрефлективный экран, который используется во всех новых приемниках Garmin и других...
Подключение датчиков (dead reckoning)	Недостаток GPS сигнала заключается в его слабой мощности и низкой помехозащищенности. Воздействие помех, окружающие условия, погодные явления могут повлиять на качество приема и в худшем случае привести к “потере” позиции. Для того чтобы избежать этой ситуации, некоторые модели навигаторов могут обрабатывать информацию с внешних датчиков, например спидометра и угла

	поворота руля. Таким образом, математически можно просчитать, пусть и с некоторой погрешностью, характер движения автомобиля, даже в отсутствии GPS сигнала. При использовании специализированных гироскопов или инерциальных датчиков, точность позиции значительно увеличивается
Поддержка WAAS/EGNOS	Использование сигналов с орбитальных спутников WAAS (на территории Америки) или EGNOS (в Европе) позволяет повысить точность определения позиции до 1-3 метров. К сожалению, такая возможность недоступна на территории России. И даже если прибор показывает, что один из спутников “в захвате”, эту функцию лучше отключить, так как определение позиции может не только не улучшиться, но и даже ухудшиться. Это связано с тем, что для расчета поправочных коэффициентов, передаваемых со спутников WAAS/EGNOS на землю и используемых в совместной математической обработке с GPS сигналом, необходима сеть базовых станций. На нашей территории таких станций нет, в виду этого поправки рассчитываются на основании теоретических выкладок и математических моделей, не подкрепленных реальными данными. Поддержка этих спутниковых систем необходима только для пользователей, путешествующих по странам Европы и Америки.

С урбанизацией городов и увеличением количества автотранспорта остро встала проблем с дорожными пробками. Городские программы по улучшению ситуации дают сомнительный выигрыш. Конечному же пользователю интересно объехать затор. На данный момент развивается система, в которой приемник работает в тандеме с мобильным телефоном. Смысл заключается в том, что, получая доступ в Интернет через телефон программа приемника подключает информацию с сервера о пробках, далее это информация может быть использована в приемнике при прокладке маршрута, что облегчит пользователю жизнь. Эта услуга в отличии от приема GPS сигнала, является платной (абонентская плата). Этим направлением, в частности для КПК занимаются компания МакЦентр с программным продуктом Pocket GPS Pro и холдинг Вессо-Линк с продуктом СМИЛИНК.

### 1.2.3. Специальная автомобильная навигация

Вышеперечисленные функции актуальны в основном для «белых воротничков». Но среди автолюбителей также встречаются и люди, которые неразрывно связывают свой досуг с активным отдыхом на машине. В основном это владельцы автомобилей повышенной проходимости. Девиз этой категории пользователей «дороги на всех не хватит» следовательно, им не нужны функции прокладки маршрута по дорогам города, так как их вообще мало интересуют дороги. К примеру, в участии в трофи-рейдах, прокладка маршрута и озвучивание (функция перекладывается на опытного штурмана) вообще теряют смысл. Но жесткие условия эксплуатации накладывают свои ограничения:

Таблица 1.3 Перечень функциональных требований спец автомобильной навигации.

Функция	Описание
Усиленное крепление	Необходимо обеспечить прочное крепление, так как на бездорожье, особенно в условиях спортивных соревнований автомобиль испытывает значительные динамические нагрузки.
Водонепроницаемость	Нередко автомобиль оказывается глубоко в воде, которая порой доходит до мест традиционного крепления навигационного оборудования.
Одометр	В связи с условиями соревнований и экспедиций штурману нужно

	не только знать точные координаты, также он должен обладать данными о скорости движения, будь то точная моментальная скорость, либо средняя скорость. Также важны функции одометра: Пройденное расстояние за все время, дневной пробег, возможность замерять расстояние, и прочее
--	---

В случае таких требований к аппаратуре пользователь выбирает в основном стационарные/бортовые навигаторы.

#### **1.2.4. КПК и портативные ПК в роли навигаторов**

В любительском сегменте навигаторов отдельно хотелось бы рассмотреть применение КПК и ноутбуков для навигации. Начиная с первых моделей наладонников Apple Newton MessagePad, КПК получили широкое распространение среди деловых людей. Со временем падение цены и расширение мультимедийных функций КПК стали распространяться среди школьников и студентов. Эволюция этих устройств, привела к тому, что они начали завоевывать свою долю и среди навигационных систем. И это не удивительно, если у пользователя имеется устройство, которое, в принципе, может работать с GPS, при этом это требует сравнительно небольшого капиталовложения, то зачем ему покупать еще одно устройство? Такой интерес к проблеме привел к тому, что многие фирмы-производители начали предлагать довольно большое количество устройств со встроенными приемниками. Для моделей, же которые не имеют встроенного аппаратного обеспечения для работы с GPS, предлагается довольно большое число дополнительного оборудования, которое позволяет изменить ситуацию. Это все возможные CF и SDIO приемники основной их недостаток заключается в том, что они занимают CF и SD слоты. Это ограничивает память устройства (критическая нехватка). Хотя на рынке есть устройства, которые кроме поддержки GPS также имеют встроенную память. Также такие виды расширения довольно хрупкие. Еще один большой минус заключается в том, что питание обеспечивается слотом, т.е. аккумулятором КПК, что, естественно приводит быстрой разрядке аккумулятором. Всех этих минусов лишены Bluetooth приемники. Эти устройства способны работать почти со всеми современными КПК. Приемник может находиться в радиусе 10 метров (Согласно стандарту Bluetooth) от КПК, что может удобно в использовании на автомобиле, поместив приемник вместо лучшего приема.

Комплекс продуктов Google Earth сделал в своем роде революцию, предоставив широкому кругу пользователей довольно подробные снимки всего земного шара. Причем продукт полу-чился весьма эргономичным и продуманным. К программе также «прикрутили» возможность работы с GPS. Такая функция привлекает людей, которым недостаточно обычных физических карт. К примеру, те же «джиперы» соединяя ноутбук к приемнику (способы связи могут быть любыми CF, PCMCIA, Bluetooth, COM и USB). Как ни странно пользователи доверяют такому хрупкому устройству как ноутбук. Но взамен он получает много полезной информации о местности.

#### **1.2.5. Мобильные телефоны с функцией навигации.**

Вслед за внедрением навигаторов в коммуникаторы интерес производителей начал падать и на менее сложные устройства, такие как смартфоны. Компания Nokia, в частности, внедряет в свои смартфоны, специальное программное обеспечение для работы с Bluetooth приемниками. Прогресс не стоит на месте и уже известны и даже имеются в продаже мобильные телефоны, имеющие частичную функциональность навигаторов. Это довольно удобно, так как у современного человека мобильный телефон уже является обязательными, и редко кто выходит из дома без него. С другой стороны аппаратные возможности мобильных

телефонов ограничены и такие устройства на данный момент не могут полностью заменить привычные навигаторы.

**Выводы:** По итогам формализации требований можно составить сводную таблицу (таблица 1.4) их значимости, применительно для каждого из перечисленного типа портативных навигаторов.

Таблица 1.4 Значимость требований портативных навигационным систем

Функции	Наладонные	Автомобильные	КПК	Моб. телефоны
Минимальный размер и масса				
Продолжительность автономной работы				
Путевые точки				
Треки				
Маршруты				
Компьютерный интерфейс				
Чувствительная GPS антенна				
Водонепроницаемость				
Путевой компьютер				
Картографические возможности				
Сенсорный экран				
Цветной TFT экран				
Большой экран				
Подключение датчиков				
Прокладка маршрута по дорогам				
Голосовая сигнализация				
Точки интереса				
Внешнее питание				
Внешняя антенна				
Пробки				

Легенда	
	В функции нет необходимости
	Функция – необходима.
	Функция – критична!
	Функция ограничено важна.

Как видно из сводки более всего требования критичны для автомобильных и КПК систем навигации. Это обусловлено наличием большого количества ограничений и условий эксплуатации. Следовательно, при разработке собственных моделей, необходимо более тщательное определение области применения и формирования функционального набора.

### 1.3. Стационарные навигаторы

Есть области, где преимущества портативных устройств весьма спорны. Да и с функциями необходимыми для этих видов деятельности некомпактные не справляются.

К стационарным устройствам можно отнести 3 типа устройств: судовые, авиационные и настольные. Принципиальной разницы в аппаратной части этих навигаторов нет. Все дело в различных, поддерживаемых картах. Исходя из названия, можно догадаться, что первые поддерживают морские карты, а вторые авиационные. К основным потребностям к стационарным устройствам можно отнести:

- Большой, качественный дисплей;
- Возможность подключения внешней антенны;
- Высокая точность;
- Требуется возможность подключение внешних датчиков, которые позволяют измерять глубину, относительную скорость. Также компания Garmin производит судовые радары, которые также легко коммутируются с картоплоттерами;
- Авиационные навигаторы также могут хранить в памяти специальные базы данных, в которых описаны возможные препятствия (высокие здания, радио и телебашни и т.д.);
- полезна функция ведение журнала;
- Некоторые судовые навигаторы имеют функцию сигнализации дрейфа относительно точки стоянки, отклонение от маршрута и т.д.;
- В случаях бортовой навигации важно не только иметь точные координаты, но и знать текущую, среднюю скорость, измерение расстояний в разных случаях (пройденное за день, от точки до точки и т.д.). Эти функции будут очень полезны в соревнованиях на джипах, и некоторых видах ралли ведь штурман ведет экипаж в основном по специальным картам и стенограммам;
- Из дополнительных функции хорошо было бы иметь возможность получать сводки погоды;

Из-за узкой функциональности (привязка карт, проверка портативных навигаторов) настольные навигационные системы не получили распространения. На рынке такие устройства не встречаются вовсе. Есть возможность использовать настольные навигаторы для обеспечения функций наземных радиомаяков, координаты которых точно известны. Данная технология позволяет увеличить точность позиционирования, вследствие того, что стационарный приемник формирует корректирующие сигналы и передает их в эфир. Эти сигналы, вместе с сигналами спутников, принимает навигатор пользователя.

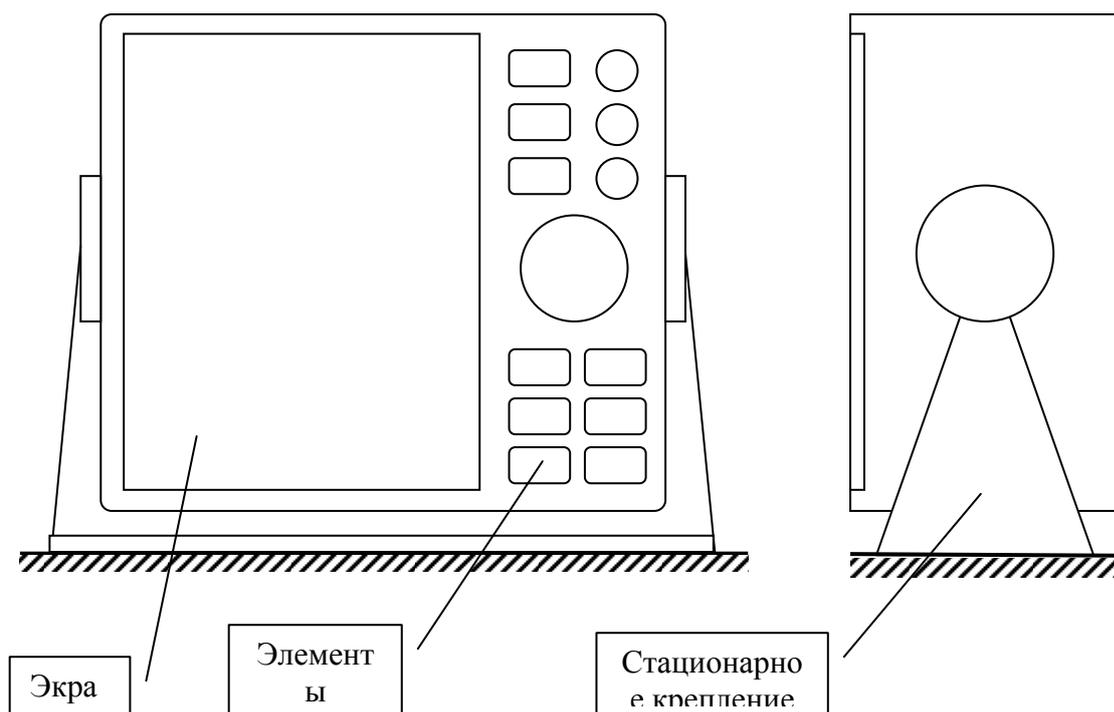


Рис.1.4. Схема стационарного GPS навигатора

Также на рынке имеются автономные GSM-GPS системы, которые позволяют следить фирме-грузоперевозчику за своим транспортом. Это помогает следить за дополнительными расходами и за своевременной доставкой грузов. Система представляет собой приемник и GSM либо (чаще) GPRS модем. GPS-приемник отправляет свои координаты (также возможно скорость «с колес») на специальный сервер, который ведет мониторинг всего транспорта. Такие системы могут значительно уменьшить расходы организации. Также возможно применение данной функции в такси.

**Выводы:** ниже представлена сводка значимости требований применительно к стационарным системам.

Таблица 1.4 Значимость требования стационарных навигационных систем.

Функции	Судовые	Авиационные	Автомоб.*	Бортовые
Большой, качественный дисплей	⚡	⚡	⚡	●
Точность	⚡	⚡	⚡	●
Базы с препятствиями	●	⚡	●	●
Путевой компьютер	⚡	⚡	⚡	●
Подключение датчиков	⚡	⚡	●	●
Сигнализация дрейфа	⚡	●	●	●
Альтиметр	●	⚡	●	●
Внешнее питание	⚡	⚡	⚡	⚡

Из представленных итоговых сведений, можно заключить, что стационарные навигационные системы обладают набором требований, на несколько порядков более критичных в отличие от портативных систем. Это обусловлено появлением узкой специализации стационарных устройств как по назначению, так и по окружению использования.

## **1.4. Профессиональное навигационное оборудование**

Профессиональное оборудование используется в основном в картографии и геодезии, но наряду с этим возможно выделить еще большой ряд пользователей. Такие навигаторы будут интересны, например сейсмологам и вулканологам, ведь им необходимо следить за движением земной коры с большой точностью, так как скорость движения коры измеряется сантиметрами в год. Также возможно использование в геологоразведке. Основное требование к устройствам этого класса это обеспечение максимальной точности порядка сантиметров или, даже миллиметров. Также нужно обеспечить высокую степень защищенности устройства, наряду с обычными опасностями, связанными с падениями и влагой, нужно учесть защищенность от агрессивных сред. В этой категории не столь важны размеры и вес, хотя совсем пренебрегать этими параметрами, так как возможно их применение и в пеших экспедициях к трудно доступным местам. Современные возможности ЭВМ привели к тому, что все больше и больше специализированных задач выполняются на компьютерах. Картография и геодезия, не является исключением. Существует довольно большое количество профессиональных пакетов, позволяющих работать над картами. Для профессиональных устройств очень важными является возможность комфортной работы с этими пакетами, что позволит увеличить производительность труда. Многие приборы реализуются уже в комплекте с программными пакетами.

В сфере профессионального навигационного оборудования было бы наиболее интересно видеть устройства позволяющие работать сразу с несколькими системами навигации, такими как: ГЛОНАСС, GPS, Galileo.

## **1.5. Эксклюзивные устройства**

К этим, весьма своеобразными, устройствам предъявляются особые требования. Основная цель этих устройств – маркетинг, т.е. привлечение к себе внимания широкой массы людей. Такие устройства можно использовать в качестве раскрутки бренда, и привлечения внимания к навигации в целом. Основное внимание должна иметь оболочка устройства, а вовсе не его функциональные способности. Так устройства такого плана размещают в куртках, часах и даже кроссовках. Полет фантазии в этой области поистине не ограничен.

## **2. Формулирование эргономических и конструкционных требований к типовым навигаторам**

Формализация требований к навигаторам заключается в определении базовых параметров и характеристик самой конструкции аппаратов с точки зрения эргономики и эстетики (рис. 2.1). В основном, форма и тип конструкции зависят от назначения устройства и условий его использования, поэтому разумно разделить все имеющиеся на сегодняшний день навигаторы по схожим типам конструкции.



Рис.2.1. Классификация GPS навигаторов по типу конструкции

Выделим сугубо конструктивные требования к устройству, пренебрегая при этом функциональной частью. Безусловно, набор функций или возможностей, особенно связанных с управлением и подключением каких-либо внешних устройств или карт, определяет форму и конструкцию навигатора. Однако далее мы будем затрагивать лишь те аспекты функционального плана, которые будут крайне необходимы для формулирования конструкторских и эргономических требований.

## 2.1. CF и SDIO модули

Требования устройствам, которые представляют из себя модули, вставляемые в разъемы переносных и настольных компьютеров, (рис. 2.2) с точки зрения дизайна практически минимальны. Главным же является компактность, которая определяется размерами и формой внутренних элементов, а также их конструктивными особенностями.



Рис.2.2. Ряд моделей CF/SDIO модулей

У некоторых моделей присутствует шарнир, который позволяет складывать их пополам для компактности при переноске и предохранении карты от повреждений.

## 2.2. Внешние модули

Внешние модули (рис. 2.2) также могут иметь практически произвольную форму, так как каких-либо жестких «рамочек» со стороны условий применения и назначения у них нет. Из

требований к ним можно выделить устойчивость устройства на столе, в том числе отсутствие скольжения по поверхности.



Рис.2.3. Ряд моделей внешних модулей

Наличие радио или Bluetooth модулей для беспроводной связи с другими устройствами накладывает определённые ограничения к габаритам и весу устройства в связи с увеличением элементов питания.

## 2.3. Портативные

Существует ряд требований, которые относятся ко всем типам портативных GPS устройств, обусловленных условиями их применения, такими как: управление одной рукой, возможность подключения карт памяти, хорошо читаемый дисплей (дополнительно – цветной дисплей), компактность. Далее следуют критерии, которые и делят портативные устройства на несколько типов.

### 2.3.1. Портативные модели мегаполисного типа

Основное место использования – города и мегаполисы. Обычно такие устройства (рис. 2.4) выполняют не только функции навигаторов, а представляют собой целые многофункциональные медиа системы. Т.е. зачастую навигационный модуль встроен либо в карманный компьютер, либо в телефон.



Рис.2.4. Портативные модели городского типа

Требования к данным устройствам схожи с теми, которые предъявляются к карманным компьютерам и их эргономике в целом. Если же отделить функции навигатора от других, входящих в устройство, то требования к ним такие же, как и ко всем портативным

устройствам, описанным в данном отчете: компактность, управление одной рукой и удобочитаемый дисплей.

### 2.3.2. Аутсайдерские

В отличие от городских, модели аутсайдерского типа (рис. 2.5) представляют собой самостоятельные устройства и используются в походных условиях бойскаутами, рыбаками, грибниками, горнолыжниками, скалолазами и другими.



Рис.2.5. Портативные модели аутсайдерского (походного) типа

Следующий критерий – это продолжительность автономной работы, и, как следствие, усиленное питание и увеличение веса и габаритов. А также к немаловажным требованиям относят цвет корпуса: он должен быть ярким и броским для того, чтобы навигатор можно было легко найти. В настоящее время широкое распространение получили аутсайдерские навигаторы со встроенной батареей. Эта опция актуальна, если путешествует группа людей, которая должно постоянно держать связь, или для связи со спасателями в случае экстренной ситуации.

### 2.3.3. Наручные

Наручные навигаторы (рис. 2.6) - самые портативные из всех представленных навигаторов. Такие устройства до недавнего времени можно было бы отнести к ряду эксклюзивных и уникальных моделей, но в настоящее время на рынке появилось довольно много подобных устройств.



Рис.2.6. Портативные наручные навигаторы

Требования к ним объединяют вышеперечисленные, а именно: компактность, прочность, устойчивость к загрязнениям, водонепроницаемость, компьютерный интерфейс, автономность работы. При этом, конечно же, приходится соблюдать компромиссы между этими требованиями.

## 2.4. Транспортируемые и стационарные

Стационарные навигаторы не так подвергаются интенсивному воздействию со стороны внешней среды, как портативные; для них важно качество выводимой информации, а точнее большой цветной дисплей. Ещё одним критерием является виброустойчивость конструкции в зависимости от условий эксплуатации.

### 2.4.1. Автомобильные

Автомобильные навигаторы (рис. 2.7) можно отнести к портативным, но у данных аппаратов другие условия применения и, как следствие, другие требования к дизайну. Первое требование - это, как было сказано выше, большой цветной дисплей. Как опцию можно добавить сенсорный дисплей.



Рис.2.7. Автомобильные навигаторы

Для автомобильных навигаторов нет необходимости в управлении одной рукой, но важным критерием является большой размер функциональных кнопок, рассчитанный на то, чтобы водитель не отвлекался на поиск элементов управления. Особое внимание нужно уделить подсветке, как дисплея, так и кнопок, это важно в ночное время вождения. Также предъявляются требования к креплению устройства для различных условий вождения, т.е., к примеру, для внедорожных условий необходимо усиленное крепление. Требования к

внешнему виду, в общем случае, выражаются в нейтральности оформления, т.е. чем нейтральнее выдержан стиль корпуса, тем к большим салонам автомобилей устройство эстетически может подойти. Для авто с точки зрения функциональности также важна возможность подключения различных внешних датчиков, и это влечёт за собой конструкционный критерий – обеспечить удобное расположение разъемов.

### 2.4.2. Авиационные и морские

Отличие авиационных и морских (рис. 2.8) навигаторов от других состоит в функциональности. С конструкционной же точки зрения они отличаются от автомобильных лишь способом крепления и габаритными размерами.



Рис.2.8. Морские и авиационные навигаторы

Остальные требования диктуются условиями эксплуатации, такими как защищенность от влаги - для морских или устойчивость к перепадам температур - для авиа (в том числе устойчивость материала корпуса).

### 2.4.3. Специальные

Специальные навигаторы не имеют массового распространения (рис.2.9.).



Рис.2.9.. Специальные GPS навигаторы различного назначения

Это может быть различное военное либо научное оборудование, требования к нему в большей степени обуславливаются назначением прибора, и формулирование для данных устройств экономических и дизайнерских критериев выходит за рамки проекта.

## 2.5. Эксклюзивные (встраиваемые)

Данная группа составлена на основе всех неординарных навигационных устройств, таких как модули, встроенные в одежду или обувь (рис. 2.10).



Рис.2.10. Эксклюзивные модели встроенных навигаторов

Есть и более полезное расположение встроенных навигаторов, например, в аптечках. Эта область не накладывает каких-либо общих для всех строгих критериев и, опять же, определяется назначением.

**Выводы:** Рассмотрение рыночных спутниковых навигаторов с точки зрения эргодизайна конструкции накладывает более неформальный (личный) подход к формированию требований. Т.е. соображение удобства является субъективным понятием и определяется каждым человеком его личными представлениями. Однако анализ позволяет составить сводку значимости тех или иных требований применительно для навигационных систем в целом.

Таблица 3 Значимость конструкционных требований навигационных систем.

Функции	CF и SDIO	Внешние модули	Портативные			Стационарные		
			городские	аутсайд	наручные	авто	авиа	морские
Компактность	⚡	●	●	●	⚡	●	●	●
Управление одной рукой	●	●	⚡	⚡	⚡	●	●	●
Подключение карт памяти	●	●	●	●	●	●	●	●
Большой дисплей	●	●	●	●	●	●	●	⚡
Цветной дисплей	●	●	●	●	●	●	●	●
Усиленная прочность корпуса	●	●	●	⚡	⚡	●	●	●
Водонепроницаемость	●	●	●	⚡	●	●	●	⚡
Яркий корпус	●	●	●	●	●	●	●	●
Размер элементов питания	⚡	●	●	●	⚡	●	●	●
Усиленные средства крепления	●	●	●	●	●	⚡	●	●
Виброустойчивость	●	●	●	●	●	⚡	⚡	●

Из представленной сводки можно заключить, что в плане эргодизайна наиболее критичны являются требования, накладываемые на портативные навигаторы, обоснованием данного факта является количество особенностей условий использования данных устройств. Иными словами полевые навигаторы должны отвечать более большому числу требований.

### 3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТ ДИЗАЙНА МОДЕЛЬНОГО РЯДА КОММЕРЧЕСКОЙ МАРКИ «НАВИГАТОР»

Проанализировав рынок навигационных устройств и сформулировав основные критерии и требования к ним как функционального, так и эргономического характера, мы решили соединить вместе плюсы рассмотренных моделей, а также учесть их недостатки. Следующим шагом проекта является создание, на основе полученных результатов исследований, собственных конструктивных проработок GPS устройств. Ниже будут представлены несколько концепт-артов навигаторов, а также будут предложены идеи не только по созданию корпуса, но и по способу использования тех или иных устройств.

#### 3.1. Модель портативных навигаторов «Булава»

Данная модель относится к портативным навигаторам аутсайдерского типа (Рис.3.1.).

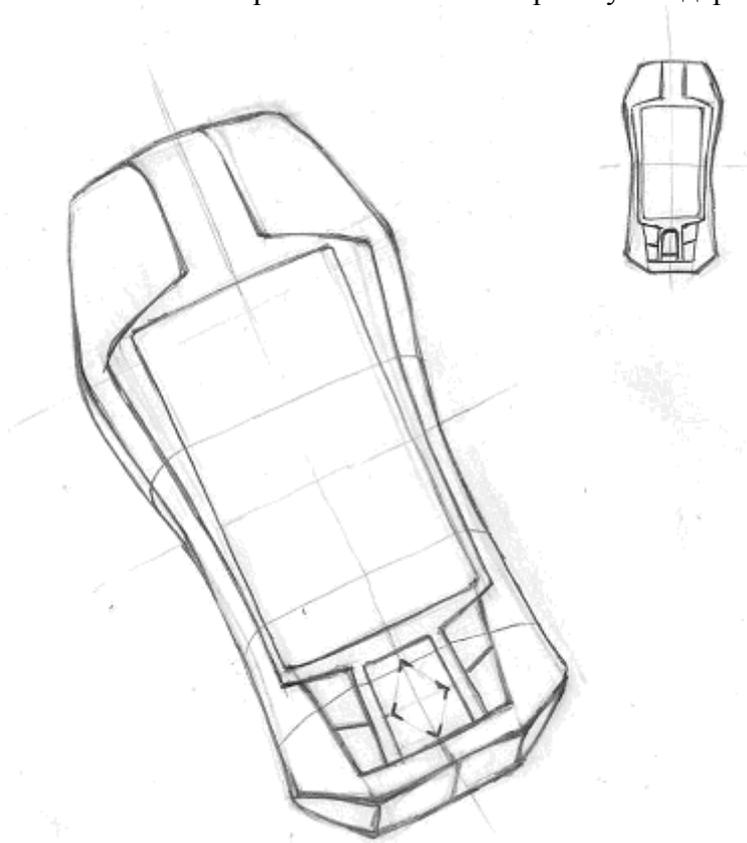


Рис.3.1. Концепт-арт модели «Булава»

Из конструктивных особенностей можно выделить расширенную верхнюю часть, где можно поместить встроенную антенну.

#### 3.2. Модель портативных навигаторов «Мираж»

Модель «Мираж» (рис. 3.2, 3.3) является представителем портативных устройств аутсайдерского типа. Эргономичный стиль позволяет этой модели удобно ложиться в руку. Модель может иметь большой экран. Особенностью модели является наличие trackball'a, который позволяет осуществлять прокручивание карт в любых направлениях.

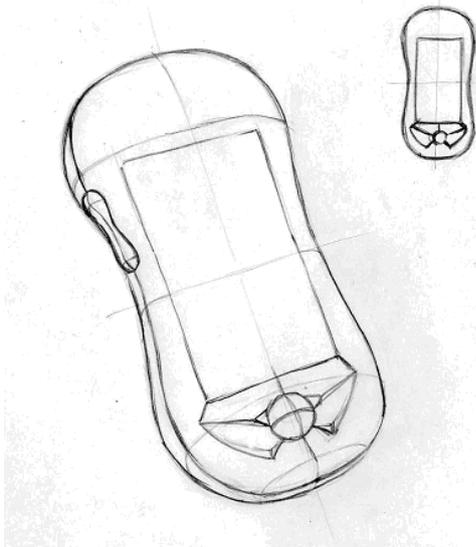


Рис.3.2. Концепт-арт модели «Мираж»



Рис.3.3. Твёрдотельная модель «Мираж»

Trackball вполне может быть заменён на пятипозиционный джойстик шарообразной формы. Для удобства управления, в торце модели, под указательным пальцем правой руки, расположены «качельки». Ориентировочные габариты устройства: 125x65x3 мм. Размер экрана: 2.5”.

### 3.3. Эргономичная модель «Компас»

Целью дизайна модели «Компас» (рис. 3.4, 3.5) был отход от традиционных форм устройств, представленных на рынке, и создание уникальной эргономичной формы в виде диска с расположением всех элементов на торцах корпуса под пальцами.

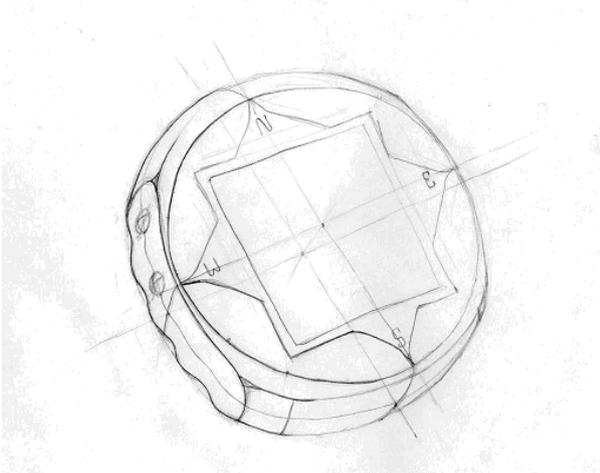


Рис.3.4. Концепт-арт модели «Компас»



Рис.3.5. Твёрдотельная модель «Компас»

Модель довольно компактна и может относиться к аутсайдерским. Ориентировочные габариты корпуса: 90x85x35 мм. Размер экрана 2.8”.

### 3.4. Мультифункциональная модель «Жук»

Модель портативного наручного «Жук» навигатора отличается оригинальностью корпуса (рис3.6.).

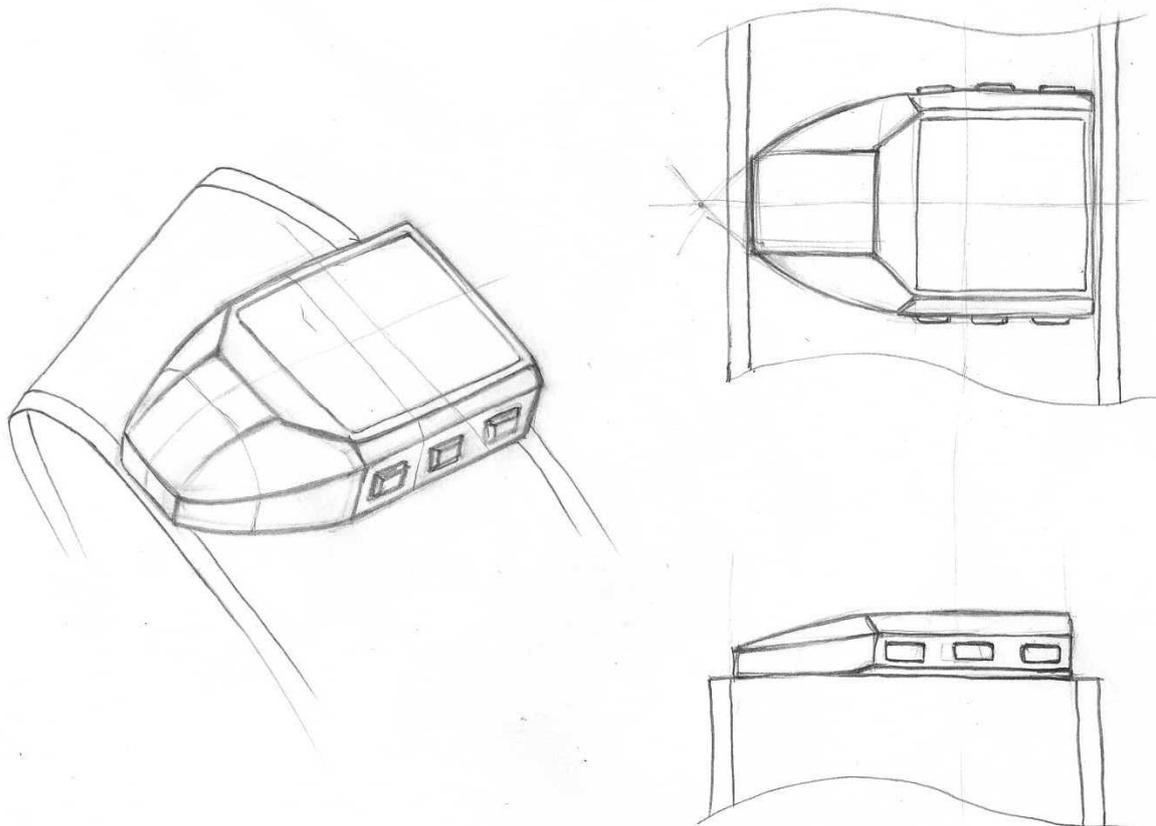


Рис.3.6. Концепт-арт модели «Жук»

Модель имеет большой по отношению к данному типу экран.

### 3.5. Система «Октопус» для транспортных средств

Каждый салон автомобиля разработан без учёта того, что его обладатель захочет в него что-то добавить. Поэтому первое, с чем сталкивается обладатель автомобильного навигатора, это проблема: куда его прикрепить? Причем так, чтобы он не мешал управлению автомобилем, не блокировал доступ к другим приборам и при этом был удобен в использовании.

Большинство существующих способов крепления такие как: наклеивание, с помощью прищепок не могут дать необходимой надежности, вакуумные присоски требуют гладкой и ровной поверхности (к примеру стекло, что ограничивает обзор водителя). Если не брать во внимание возможность “намертво” прикрутить прибор там, где захочется, существует только один способ выйти из положения - не добавлять новое, а изменить то, что уже есть. Например, зеркало заднего вида.

Почему именно его? Потому что оно есть в каждом автомобиле и водителю не приходится отвлекаться от дороги, когда он в него смотрит. Но как приспособить его под нужды навигатора? Есть два способа.

Первый способ заключается в прикреплении навигатора к зеркалу, возможный пример данного решения наглядно представлен на рисунке № 3.7. То есть основная часть прибора с помощью специальных стяжек крепится за задней стенкой зеркала, а непосредственно для навигации выведен экран.

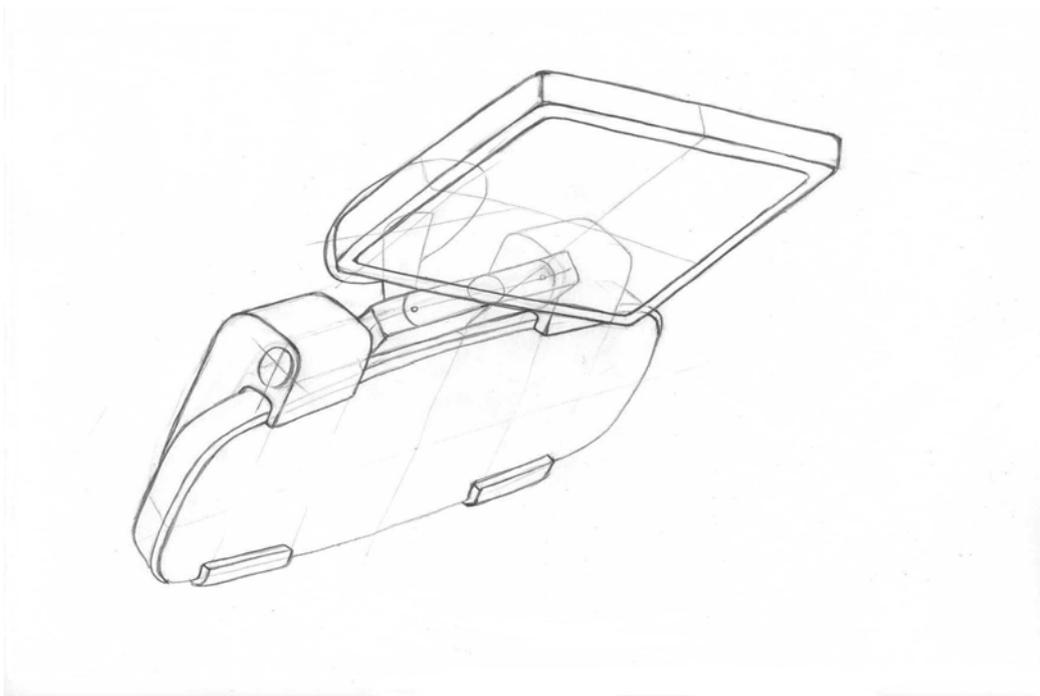


Рис.3.7. Навесной вариант устройства в положении экрана сверху

К сожалению, большинство легковых автомобилей имеют слишком низкую крышу, что является препятствием для расположения прибора над зеркалом. Тем не менее, симметричность крепления позволяет располагать экран как выше, так и ниже зеркала (см. рис. 3.8) То есть крепление является универсальным, что дает возможность использовать прибор во всех автомобилях. В другом случае, конструкция крепления может быть использована как штатив для обычного автомобильного навигатора и входит в комплект поставки.

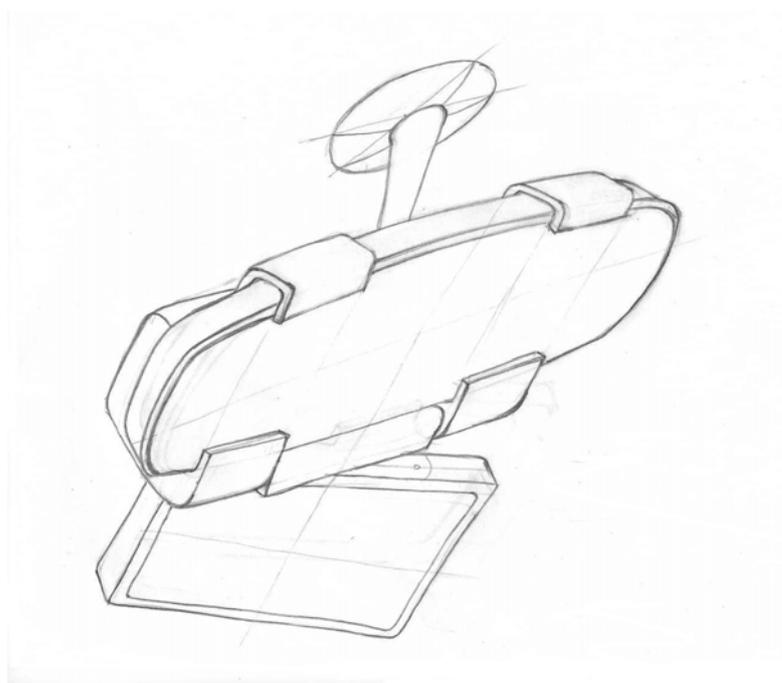


Рис.3.8. Навесной вариант устройства в положении экрана снизу

Экран имеет две степени свободы, что позволяет настроить его индивидуально для любого водителя (см. рисунок 3.9.).

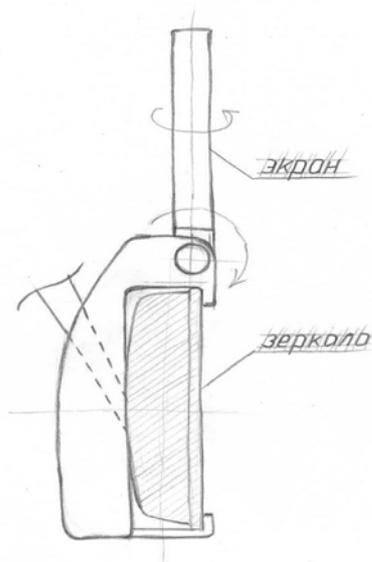


Рис.3.9. Вид сбоку

Второй способ является логическим продолжением первого. На рынке на протяжении долгих лет продаются панорамные зеркала, которые навешиваются на стандартное заводское. Почему бы не вмонтировать в подобное зеркало навигатор? Корпус подобных зеркал достаточен для того, чтобы поместить в него всё необходимое для навигации. При данном подходе значительно упрощается конструкция крепления (см. рисунок 3.10). Примеры подобных устройств изображены ниже, на рисунках.

В первом варианте (см. рисунок 3.10), навигатор полностью интегрирован в корпус зеркала и в выключенном состоянии ничем от него не отличается. К недостаткам подобного решения можно отнести обязательную подсветку дисплея. Во втором случае, дисплей имеет возможность регулировки для удобства водителя (см. рисунок 3.11). Помимо зеркала такую конструкцию можно повесить в другое место, к примеру, на козырек для защиты от солнца.

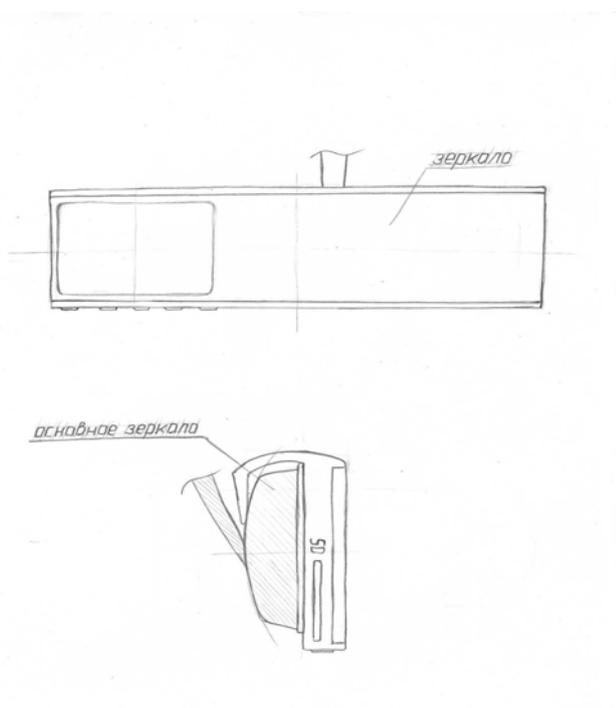


Рис.3.10. Вариант со встроенным боковым экраном

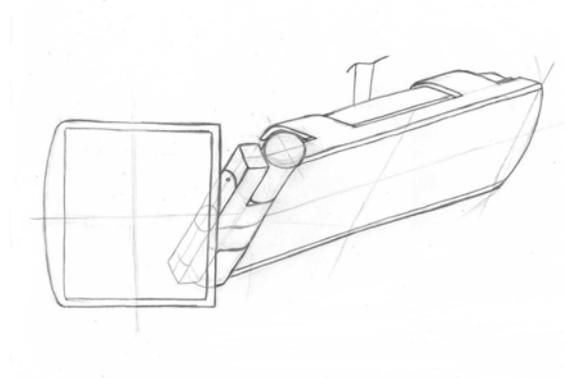


Рис.3.11. Вариант с боковым подвижным экраном

Вышеописанные способы крепления представляются наиболее рациональным и удобным способом расположения навигатора в салоне автомобиля. При тщательной проработке подобный тип приборов может получить широкое распространение и завоевать популярность у автолюбителей.

Ниже приведены общие сравнительные параметры.

Достоинства конструкции:

- Не занимает много места.
- Простота установки.
- Не мешает управлению автомобилем.
- Всегда перед глазами.
- Индивидуальная настройка.
- Надежность крепления.
- Универсален для всех автомобилей.
- Большой дисплей (возможен).

Проблемы и их возможные способы решения:

- Сложность управления, так как нажатия на кнопки могут сбивать настройку зеркала. Для решения подобной проблемы можно использовать пульт ДУ (аналогичные используются с магнитолами), который можно положить или прикрепить в любое удобное место.
- Чтобы убрать провода питания и дополнительной антенны, необходимо частично разбирать салон. Для связи с внешней антенной можно использовать Bluetooth.
- Прибор должен иметь небольшую массу, чтобы крепление зеркала могло его выдержать. Использование современных легких материалов может решить эту проблему.

Дополнительные, возможные функции (неконструкционные):

- Подсветка дисплея и клавиш.
- Поддержка карт памяти.
- Возможность подключения дополнительного оборудования (датчики, внешняя антенна).
- Наличие наиболее популярных аудио-видео кодеков, для просмотра видеороликов или фильмов, загружаемых с карт памяти (возможно только при наличии цветного дисплея и аудио системы).
- Возможность просмотра TV (при наличии необходимого оборудования, цветного дисплея и аудио системы).
- Звуковая система навигации (при наличии аудио системы).

Все указанные концептуальные модели представляют собой возможные идеи, поэтому не являются подробной проработкой. На данном этапе задача состоит в наборе базового материала, который в дальнейшем обеспечит целенаправленное движение к поставленной цели.

## Литература

1. Топография с основами геодезии. Под ред. А.С.Харченко и А.П.Божок. М - 1986
2. Занимательная геодезия. А.Н.Роцин. Киев - 1989
3. Земля и ее вращение. А.А.Михайлов. М - 1984
4. GPS - лучший друг навигатора. С.Надломов. Журнал "Шкипер" N2 - 2000
5. Таблицы для логарифмического вычисления координат Гаусса - Крюгера ...  
Ф.Н.Красовский, А.А.Изотов. М - 1946
6. Компьютерное Обозрение N42, 30 октября - 5 ноября 2002
7. Геоинформационные системы : обзорная информация. Серия: геодезия, аэросъемка, картография. - М., ЦНИИГАиК, 1992, -52с.
8. Кошкарёв А.В., Каракин В.П. Региональные геоинформационные системы. -М., Недра, 1987, -126с.
9. Коновалова Н.В., Капралов Е.Г. Введение в ГИС. Учебное пособие. - М., ООО "Библион", 1997, -160с.
10. Лисицкий Д.В. Основные принципы цифрового картографирования местности. - М., Недра, 1988, -261с.
11. DeMers M. Fundamentals of Geographic Information Systems. - John Wiley & Sons, 1996, -320 pp.
12. Bernhardsen T. Geographic Information Systems. - John Wiley & Sons, 1992, -318 pp.
13. Свободная многоязычная энциклопедия Википедия  
[http://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковая\\_система\\_навигации](http://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковая_система_навигации)
14. Яндекс маркет <http://market.yandex.ru/>
15. Гео-Планет <http://www.geo-planet.ru/stat.php?stat=11>
16. GPS Passion [http://www.gpspassion.com/forumsen/topic.asp?TOPIC\\_ID=39968](http://www.gpspassion.com/forumsen/topic.asp?TOPIC_ID=39968)

**Открытая олимпиада МГТУ им.Н.Э.Баумана по направлению  
«Проектирование и технология производства ЭС»  
19 апреля 2007 года, 9.00, ауд.278**

Открытая олимпиада МГТУ им.Н.Э.Баумана по направлению «Технология приборостроения» проводится ежегодно в рамках международной молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», проводимой кафедрами «Проектирование и технология производства ЭА» (ИУ4) и «САПР» (РК6). Конкурс проводится для команд студентов любых курсов Вузов Москвы и Московской области, обучающихся по направлению 551100 «Проектирование и технология производства ЭА» и 200100 «Приборостроение» и смежным специальностям.

**Первая премия - 30 000 рублей**

Критерием оценки качества работы, являются правильные ответы на поставленные вопросы конкурсной программы и проявление творческого подхода к поставленной задаче.

Победители олимпиады награждаются дипломами, ценными подарками и рекомендуются для участия в Всероссийской олимпиаде «ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ», которая ежегодно проводится в соответствии с приказом Министерства образования и науки РФ от 22 февраля 2005 г. № 85 «Об организации и проведении Всероссийской студенческой олимпиады» в период проведения заседания УМО «Приборостроение» (6-7 декабря 2005 г.) на базе Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

**Порядок проведения олимпиады**

Проведение олимпиады осуществляется во второй день работы международной молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» с 10.00 до 13.00. Олимпиада проходит в один тур.

Регистрация команд осуществляется в первый день конференции. Состав команды не более 5 человек, в заявке указываются: ФИО членов команды, контактные координаты капитана команды, ФИО, звание и ученая степень тренера команды (если такой имеется), кафедры, курсы и группы в которых обучаются члены команды.

Состав конкурсного задания: теоретические вопросы по предметам: «Основы технологии приборостроения», «Конструирование типовых приборов и устройств», «Технология ЭВС», «Конструкторско-технологическое проектирование ЭВС», «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС» (Приложение 1) и практическое задание по исследованию и разработке типового технологического процесса для выданного электронного изделия (на примере наборов «МАСТЕР КИТ» или аналогичных») (Приложение 2).

Для выполнения практического задания команде выдается комплект радиодеталей входящих в состав устройства, его краткое описание и предоставляется автоматизированное рабочее место.

Выполненное задание защищается командой перед членами жюри с использованием компьютерных средств представления работы (документация по работе представляется к защите в электронном виде и демонстрируется на компьютере), в которое входят ведущие преподаватели кафедры ИУ4 и представители промышленности. Оцениваются, как общий уровень выполнения задания, так и общий уровень теоретической подготовки, по вопросам, выданной команде в виде теоретических билетов.

## ПРИГЛАШАЕМ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В ПРОЕКТАХ СНО

кафедры Иу4 на 2007-2008 годы

№	Наименование исследований	сроки	Руководитель	Источники и объем финансирования/ базы практик
Молодежный центр коллективного пользования «Нанотехнологические системы и наноэлектрока»				
Студенческое конструкторское бюро "СКБ Наносистемы" (руководитель Сарымсаков Р.Г. ісқ: 296-720-961)				
1	Разработка уникального ПО NanoLab (реализация всех СЗМ методик) с возможностью удаленного доступа к оборудованию	2007-2008	Сарымсаков Р.Г. ісқ: 296-720-961	Инициативный проект (база: ЗАО «Наносистемы»)
2	Исследование принципов CMS для управления библиотекой наносканов лаборатории нанотехнологий	2007-2008	Шарипов Н. Ісқ: 179-757-101	Инициативный проект
3	Исследования применимости нанотехнологий в элементах памяти	2007-2008	Сарымсаков Р.Г. ісқ: 296-720-961	Инициативный проект
4	Система дистанционного образования в области нанотехнологий на основе технологий ADL SCORM	2007-2008	Шарипов Н. Ісқ: 179-757-101	Грант МОН РФ по программе «Научные школы»
5	Разработка активных виброзащитных систем от низкочастотной вибрации нанотехнологических измерительных комплексов (блок упр. на DSP, ПЛИС)	2007-2008	Власов А.И. ісқ: 5-752-845	Инициативный проект
6	СЗМ исследования износа деталей автотранспорта	2007-2008	Попов В.	Инициативный проект (база: ЗАО «Наносистемы»)
Лаборатория Микроэлектронных и нанотехнологий (руководитель Елсуков К. ісқ: 247-711-285 )				
1	Исследования технологии ионно-плазменного напыления тонких плёнок для создания интерферометров Фабри-Перо	2007-2008	Денисов А.А. (Ісқ: 343-281-288)	Инновационный грант АФК Система (база: ЗАО «Наносистемы»)
2	Разработка элементов МЭМС на базе многослойных наноструктур интерференционных фильтров высокого разрешения	2007 - 2008	Щербаков А.Ю. Ісқ: 175-410-034	РНТП (базы: ФТИАН, ЗАО «Наносистемы»)
3	Разработка и исследование адаптивных тонкопленочных светоотражающих покрытий оптических систем	2007-2008	Елсуков К. Ісқ: 247-711-285	Инициативный проект (базы: ФТИАН, ЗАО «Наносистемы»)

4	Разработка экспериментального стенда по получению и исследованию наноструктур из нанотрубок	2007-2008	Власов А.И. icq: 5-752-845	Инициативный проект
5	Разработка проекта нанотехнологического кластера ЦКП с доступом к уникальному оборудованию по сети интернет	2007-2008	Власов А.И. icq: 5-752-845	Инициативный проект
<b>Лаборатория Наносистемной техники и наноэлектроники</b> (руководитель Оя Д.Р. icq: 101-406-482)				
1	Разработка элементной базы для квантовых компьютеров <b>(Спинтроника)</b>	2007-2008	Родионов И. Icq: 434-569-559	Базовое предприятие: Курчатовский центр
2	Исследования перспективных микроэлектронных технологий 0.18-0.13 мкм	2007-2008	Макарчук В.В. Родионов И. Icq: 434-569-559	Базовое предприятие: НИИСИ Курчатовский центр
3	Исследования наноструктур на основе опаловых матриц	2007-2008	Оя Д.Р. Icq: 101-406-482	Инициативный проект
4	Разработка 3D моделей конструктивных реализаций навигационных систем Глонас	2007-2008	Арабов Д. Icq: 313-654-244	Инновационный грант ОАО «АФК Система»
5	СЗМ исследования в стоматологии	2007-2008	Кульгашов Евгений Icq: 324-399-877	Московский стоматологический университет
6	«Разработка научно-технических основ технологии получения и производства новых СВЧ полимерных композиционных материалов с заданными электрофизическими свойствами для изготовления сверхбыстродействующих приборов и устройств нового поколения на основе полимеров, наполненных наноструктурно модифицированными функциональными наполнителями»	2007-2008	Проф. Мысловский Э.В.	Базовое предприятие: ИТМ ВТ
7	Исследование методов контроля качества при производстве CD / DVD носителей	2007-2008	Оя Д.Р. Icq: 101-406-482	Инициативный проект
<b>Межрегиональный центр компетенции «Информационно-измерительные комплексы в микро- и наноэлектронике» (руководитель Заец М.В. icq: 274-945-868)</b>				
1	Исследования методов контроля цифровых, аналоговых и цифро-аналоговых микросхем, а также микросхем памяти (ОЗУ/ПЗУ) и систем на кристалле	2007-2008	Проф. Школьников В.	Группа компаний ФОРМ www.form.ru

2	Исследования методов высокочастотного контроля для контроля многовыводных цифровых микросхем, ОЗУ, систем на кристалле	2007-2008	Проф. Школьников В.	Группа компаний ФОРМ www.form.ru
3	Исследования методов многопостового контроля параметров транзисторов, диодов и других полупроводниковых приборов	2007-2008	Проф. Школьников В.	Группа компаний ФОРМ www.form.ru
4	Разработка программ тестирования для тестеров Формула 2К на языках низкого уровня	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Группа компаний ФОРМ www.form.ru
5	Разработка программ тестирования для тестеров Формула 200 на языках низкого уровня	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Группа компаний ФОРМ www.form.ru
6	Разработка программ тестирования для тестеров Формула ТТ на языках низкого уровня	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Группа компаний ФОРМ www.form.ru
СКБ Информационно-телекоммуникационных и CALS технологий				
1	Разработка стенда экспериментальных исследований систем передачи данных (тестеров телекоммуникационных систем)	2007-2008	Заец М.В. Icq 274-945-868	Инициативный проект
2	Создание системы IPTV вещания	2007-2008	Аверьянихин Артур Icq 194-866-580	Грант фонда новые перспективы (базы: ЗАО «Техносистемы»)
3	Разработка виртуальной видеотеки кафедры	2007-2008	Аверьянихин Артур Icq 194-866-580	Грант фонда новые перспективы (базы: ЗАО «Техносистемы»)
4	Разработка портала iu4.ru – студенческого интернет сообщества	2007-2008	Власов А.И. icq: 5-752-845	Инициативный проект
5	Разработка и создание учебных фильмов по специальности (VHS, DVD, Flash, 3D и т.п.)	2007-2008	Гриднев В.Н.	Инициативный проект
6	Разработка виртуального музея вычислительной техники	2007-2008	Власов А.И. icq: 5-752-845	Инициативный проект
7	Исследование и разработка методов визуального проектирования сложных информационных систем. Создание программы визуального проектирования на Java	2007-2008	Самоха П.А. 1-936-398 Шепель А.А. Кирбабин О.	Грант РФФИ

8	Разработка системы информационного сопровождения жизненного цикла электронных изделий (CALS системы) на основе технологий JEE+Oracle	2007-2008	Михненко А.Е. Исq: 154-381-207	Инициативный проект
9	Создание испытательной лаборатории широкополосного спутникового доступа и систем управления сетями	2007-2008	Иванов В.В. Исq: 56-541-434	База ОАО «Концерн «РТИ Системы»
10	Исследование адаптивных систем категоризации электронных текстов (поисковые системы, аннотирование и т.п.)	2007-2008	Власов А.И. исq: 5-752-845	Инициативный проект
11	Разработка экспертной системы формирования тарифных планов	2007-2008	Артемьев И. Исq: 312-932-959	ФАСИЕ
12	Разработка on-line игр	2007-2008	Карпунин А. Исq: 211-936-642	ФАСИЕ
13	Разработка интернет портала с интернет магазином по применению GPS/Глонас в оптимизации транспортных потоков	2007-2008	Попов В.	Инициативный проект
14	Разработка прикладного ПО для реализации методик «деловых игр», ТРИЗ, синтеза новых технических решений и т.п.	2007-2008	Журавлева Л.В. Резчикова Е.В.	Инициативный проект
15	Разработка стенда и ПО для систем радиочастотной идентификации (RFID)	2007-2008	Степашко К. Исq: 253-272-020	Инициативный проект
16	Разработка тематических сайтов лабораторий кафедры	2007-2008	Студенты кафедры	Инициативные проекты
<b>СКБ Конструкторско-технологического проектирования</b>				
1	Исследование методов и средств поверхностного монтажа электронных компонентов	2007-2008	Антохин А.	Инициативный проект Координатор работ Гриднев В.Н.
2	Исследование методов и средств управления робототехническими технологическими комплексами (лабор установки)	2007-2008	Юдин А.В. Исq: 99-269-411	Инициативный проект
3	Разработка систем нейросетевого анализа состава газовых и водяных сред (искусственный нос)	2007-2008	Финаев В. Исq: 228-287-093	Инициативный проект

4	Разработка методов нейросетевого тепловизионного контроля проводящих микро- и наноструктур с элементами искусственного интеллекта (разработка ПО на VC, разработка стендов по разгону и т.п.)	2007-2008	Власов А.И. icq: 5-752-845 Панфилова С. (Icq: 166-904-683)	РНТП
СКБ Микросистемотехники				
1	Разработка виртуальных измерительных приборов	2007-2008	Семенцов С.Г. Icq 177-778-462	Инициативный проект
2	Разработка и исследования систем адаптивной фильтрации шума	2007-2008	Кузнецов А.С. Icq 293-448-753	Инициативный проект
3	Исследования и разработка перспективных ламповых усилителей нового поколения	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Инициативный проект
4	Отработка учебно-методических комплексов по проектированию на базе ПЛИС Altera (Xilinx)	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Инициативный проект Координатор работ Макарчук В.В.
5	Отработка учебно-методических комплексов по проектированию на базе перспективных микроконтроллеров	2007-2008	Заец М.В. icq: 274-945-868	Учебный проект
6	Разработка цифровых систем управления мобильными роботами Подготовка студенческих команд к соревнованиям Евробот и мобильные роботы	2007-2008	Юдин А.В. Icq: 99-269-411	ЗАО «Робототехнические системы» Объединенный робототехнический клуб МГУ-МГТУ www.unirc.ru
7	Разработка экспериментального стенда Hi End акустики (3D)	2007-2008	Семенцов С.Г. Icq 177-778-462	Инициативный проект
СКБ «Надежность, испытания и сертификация ЭА» (руководитель: Сорокин М.)				
1	Исследования систем активного снижения шума в коротких волноводах	2006-2007	Саффиулин Р.Р.	Инициативный проект
2	Исследования систем активного снижения шума в коротких волноводах	2006-2007	Быков К.В.	Инициативный проект
3	Разработка multifunctional компьютерного измерительного стенда	2006-2007	Власов А.И. icq: 5-752-845	Инициативный проект
5	Отработка методик виброиспытаний ЭА	2006-2007	Сорокин М.	Инициативный проект
6	Разработка matlab программ моделирования тепловых, вибрационных, элмаг. и т.п. волновых полей	2006-2007	Проф. Парфенов Е.М.	РНТП