

СЕКЦИЯ 2

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Среда, 28 апреля 2010 г., ауд.278 (гл. корпус МГТУ).

Начало в 10.00.

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

Экспертная комиссия:

БИЛИБИН К. И., ГРИГОРЬЕВ В. П., ГРИДНЕВ В. Н., ЖУРАВЛЕВА Л. В., ИВАНОВ Ю. В., КАМЫШНАЯ Э. Н., ЛАВРОВ А. В., МАКАРЧУК В.В., МАРКЕЛОВ В. В., ПИРОГОВА Е. В., РЕЗЧИКОВА Е. В., ШЕРСТНЕВ В. В., КУРНОСЕНКО А.Е., КУЗНЕЦОВ А.С., КАРПУНИН А.А., ЧЕКАНОВ А.Н., МЫСЛОВСКИЙ Э.В., МАРТЫНОВ В.В., ШКОЛЬНИКОВ В.М., АРТЕМЬЕВ И.А., ЗИНЧЕНКО Л.А., МИХНЕНКО А.Е., СЕМЕНЦОВ С.Г.

В рамках работы секции будет осуществлен первый этап конкурсного отбора проектов в проектный инкубатор МГТУ им.Н.Э.Баумана. 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 ...
 - 1.5. Срок превращения идеи в конечный продукт с выходом его на рынок: 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.

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

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НА ЭВМ ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОРОДНЫХ СТРУКТУРАХ

Демидов Д.Е.

Научный руководитель проф., д.т.н., Назаров А.В.
МГТУ им. Баумана, Кафедра ИУ4, г. Москва, Россия.

FEATURES OF REALISATION ON THE COMPUTER PERKOLATION PROCESSES IN HOMOGENEOUS STRUCTURES

Demidov D.E.

The supervisor of studies Nazarov A.V.
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В данной работе рассмотрены особенности реализации на ЭВМ перколяционных процессов в однородных структурах. Разработан и испытан алгоритм моделирования перколяционных процессов и автоматического нахождения порога перколяции на основе метода многократной маркировки кластеров Хошена и Копельмана. При помощи разработанного алгоритма был экспериментально определен порог перколяции для квадратной решетки. Результаты данной работы будут применены для постановки лабораторной работы «Моделирование объектов «Среда-структура» по курсу «Математическое моделирование».

Abstract

In the given work features of realisation on the COMPUTER perkolation processes in homogeneous structures are considered. The algorithm of modelling perkolation processes and an automatic finding of a threshold perkolation on the basis of a method of repeated marks clusters by Hoshena and Kopelmana is developed and tested. By means of the developed algorithm the threshold of perkolation for a square lattice has been experimentally defined. Results of the given work will be applied to statement of laboratory work «Modelling of objects "Environment-structure" at the rate «Mathematical modelling».

Перколяция (от англ. percolation - просачивание) – явление протекания среды, т.е. образования в некоторой среде области, по своим свойствам отличной от остального объема, соединяющей условно-противоположные границы рассматриваемой среды.

Моделирование подобных структур на ЭВМ является важной задачей научных исследований в самых разных областях, поскольку перколяционные процессы являются неотъемлемой частью получения или эксплуатации многих перспективных материалов. Именно понимание и возможность прогнозирования зависимости макропараметров материалов от их микроструктуры позволяют реализовать требуемые функции этих материалов. А определяющее влияние на поведение или синтез данных микроструктур имеют именно проходящие в них перколяционные процессы. Например, перколяционные процессы в органическом вяжущем в процессе структурообразования дорожных покрытий автомобильных дорог из асфальтового бетона непосредственно определяют срок их эксплуатации. Закономерности структурной организации металлических расплавов и стекол до сих пор остаются ключевыми проблемами физики неупорядоченных систем, однако показано, что в основе структурной перестройки расплава при стекловании чистых металлов лежит процесс образования перколяционного кластера из контактирующих и взаимопроникающих икосаэдров. Изучение перколяционных процессов при получении металлополимерных нанокомпозитов позволило создать на их основе новые емкостные датчики температуры с тепловой памятью. Кроме того, изучение перколяционных процессов имеет значение для порошковой металлургии, производства композитов, микроэлектроники.

Целью работы было моделирование перколяционного процесса в однородной структуре и определение порога перколяции. Наибольший интерес представляла отработка алгоритма нумерации кластеров, поскольку сама структура была выбрана абстрактно, без

привязки к какой-либо физической задаче. Полученные результаты будут использованы для последующей постановки лабораторной работы по курсу «Моделирование объектов «Средоструктура».

Модель некоторой среды представлена в виде таблицы чисел (рисунок.1а), заполненной ненулевыми элементами с определённой вероятностью. Нулевое значение ячейки характеризует её как неизменённый фрагмент среды. О ненулевых значениях элементов так называемой «среды» будет сказано ниже, пока же примем их все равными единице. Кластером называется совокупность граничащих друг с другом ненулевых элементов. Для упрощения анализа диагональные элементы считать соседними не будем. Кластер, элементы которого присутствуют на любых двух противоположных краях таблицы, является перколяционным, т.е. образующим путь для «просачивания» сквозь среду (рисунок. 1б).



Рис. 1 Модель среды в виде таблицы чисел.
а) – без перколяции, б) – с перколяцией.

Порогом перколяции называется такая вероятность заполнения ячеек среды, при которой появляется первый бесконечный кластер на бесконечной решетке. Однако для конечной решетки, которую мы можем промоделировать на ЭВМ, всегда существует ненулевая вероятность того, что будет появляться соединяющий кластер, связывающий одну сторону решетки с другой. Поэтому порогом перколяции будем считать среднее значение вероятности заполнения ячеек, при которой появляется первый соединяющий кластер.

Таким образом, необходимо многократно генерировать модель среды, наращивая вероятность наличия ненулевого элемента в ячейке, до появления первого перколяционного кластера. Вероятность, при которой возникла перколяция, и есть искомое экспериментальное значение. Точность получаемого результата повышается уменьшением шага возрастания вероятности, увеличением числа экспериментов и размера таблицы-среды.

Алгоритмы генерации и заполнения таблицы ненулевыми значениями являются тривиальной задачей и не требуют подробного описания. Интерес представляет алгоритм определения перколяционного кластера. Для этого был применен метод многократной маркировки кластеров Хошена и Копельмана ([1], глава 12.3). Суть его заключается в следующем: сначала производится последовательная индексация кластеров, на основании уже проиндексированных позиций, то есть предыдущей строки и предыдущего столбца. Рассматриваемой ячейке присваивается наименьший из индексов соседей (напомним, что рассматриваются только два из четырех соседей ячейки), либо новый индекс, если в соседних ячейках пусто. При такой индексации неизбежны ошибки, так как не учитываются два других соседа ячейки. Это может привести к тому, что один кластер будет в разных своих частях иметь разные индексы. Поэтому затем производится поиск ошибочных индексов – для этого создается массив, где в позиции, соответствующей неверному индексу, хранится тот, на который следует его заменить. Последовательно рассматриваются все ненулевые ячейки и их соседи, а также элементы массива исправлений для них и из всех индексов выбирается наименьший. Он записывается по адресу рассмотренной ячейки в массив исправлений. Для полного исключения ошибок, при анализе массива исправлений, для ячейки, хранящей ненулевой индекс исправления, осуществляется проверка по адресу этого индекса, и так до тех пор, пока не будет получен адрес, по которому хранится ноль.

Таким образом, при анализе очередной ячейки и её соседей мы получаем не просто наименьший из индексов этих ячеек, а наименьший из возможных индексов исправления. Причем в случае, если по адресу рассматриваемой ячейки в массиве исправлений хранится меньший индекс, чем найденный указанным выше способом, то изменяется он, то есть такая проверка несет двусторонний характер.

Далее, основываясь на содержании массива исправлений, производится переиндексация основной таблицы. Таким образом, мы получаем верно проиндексированные кластеры, удобные для вычисления всевозможных характеристик моделируемой структуры, в частности для определения наличия перколяционного кластера. Проверка перколяции проводится тривиально: поиском одинаковых индексов кластера на противоположных сторонах таблицы.

Как было сказано выше, для вычисления порога перколяции, реализована многократная генерация таблицы заданного размера, с увеличением вероятности заполнения ячеек с указанным шагом. По истечении заданного числа достижений перколяции вычисляется среднее значение вероятности, при которой появлялся первый перколяционный кластер в каждом случае.

Моделирование, проведенное с исходными условиями: таблица 100x100, шаг возрастания вероятности 0,001, число экспериментов 100, дало результат: пороговая вероятность $P_s=0,568$.

Физически это означает, что для появления в некоторой среде области, отличной по свойствам от остальной среды и при этом соединяющей условно-противоположные ее границы, необходимо, чтобы более 56,8% объема этой среды было по свойствам тождественно соединяющей области. Однако, напомним, это не означает, что соединяющая область занимает 56,8% объема среды. Согласно теоретической оценке порога перколяции для квадратной решетки (См.[2]), он должен попадать в интервал (0,509535; 0,68189). Как видно, результаты моделирования укладываются в эти рамки, что подтверждает достоверность эксперимента. Тем не менее, если целью неких технологических операций является именно получение перколяции в определенном объеме, то можно говорить о том, что 56,8% это достаточно много, так как необходимо изменить свойства более половины первоначального объема.

Для иллюстрации особенности работы изложенного выше алгоритма приведем зависимости времени и результатов моделирования от входных параметров.

На рисунке 2 представлены зависимости времени достижения перколяции от размеров поля в процессе моделирования на ЭВМ для разных шагов роста вероятности заполнения ячеек.

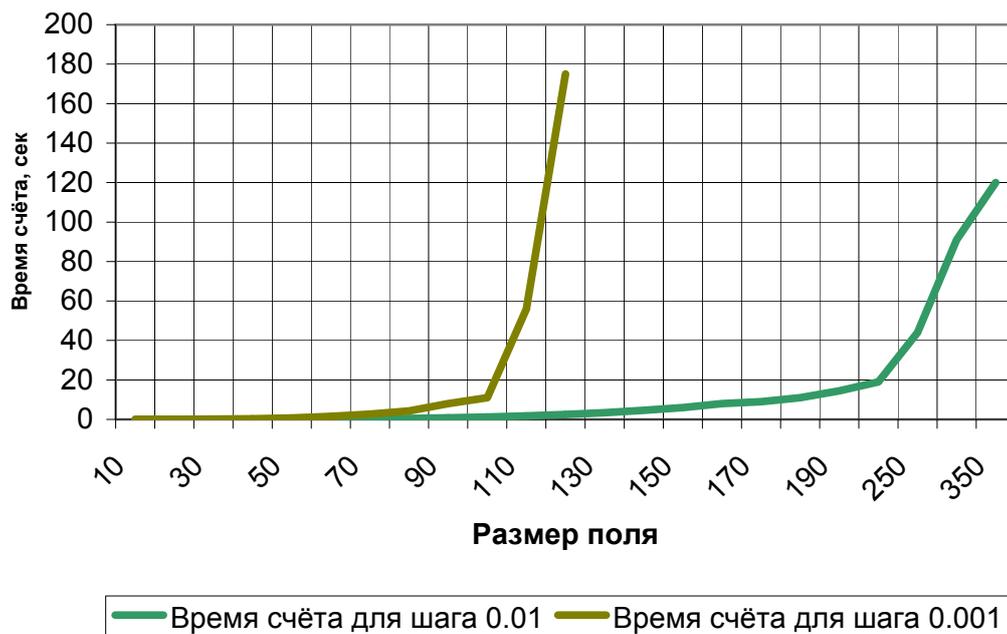


Рис.2. Зависимость времени моделирования от размеров поля.

Квази-степенной рост затрат машинного времени можно объяснить соответствующей особенностью алгоритма: последовательный перебор всех ячеек поля осуществляется несколько раз. Так как время каждого перебора возрастает пропорционально размерам поля, то в результате время всего моделирования возрастает пропорционально времени перебора в некоторой степени.

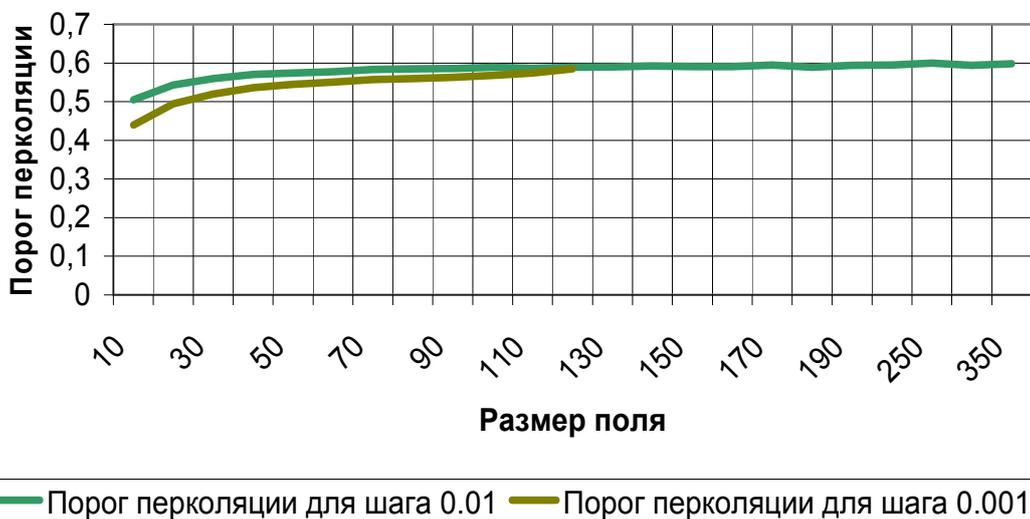


Рис.3. Зависимость порога перколяции от размеров поля.

На рисунке 3 представлена зависимость определенного порога перколяции от размеров поля. Её вид можно объяснить тем, что с увеличением объема структуры, шансов случайного возникновения перколяции при относительно небольшой для этого концентрации заполненных ячеек уменьшается. При уменьшении же поля вероятность случайного возникновения перколяционного кластера играет большую роль, особенно при медленном возрастании концентрации заполненных ячеек. Так на поле 10x10 при шаге роста концентрации заполненных ячеек 0.001 перколяция возникает при концентрации заполненных ячеек в 43,3%, что ощутимо меньше теоретически найденного нижнего порога.



Рис.4. Зависимость времени моделирования от шага роста концентрации.

На рисунке 4 представлена зависимость времени моделирования от шага роста концентрации заполненных ячеек на поле 100x100. Она схожа с зависимостью от размеров поля, но несколько более пологая. Можно сделать вывод о том что при данном размере поля исчерпывающая точность не требует исключительных затрат машинного времени.

Таким образом, для постановки лабораторной работы по курсу «Моделирование объектов «Среда-структура» был выработан удовлетворяющий требованиям быстродействия и точности алгоритм определения порога перколяции на основе метода многократной маркировки кластеров Хошена и Копельмана.

Литература

1. Х. Гулд, Я. Тобочник. «Компьютерное моделирование в физике: Часть 2». Электронная версия.
2. С.А. Зуев, «Оценки порога перколяции для квадратной решетки», ТВП, 32:3 (1987), 606-609.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

Токарев С.В.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Власов А.И.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия

SIMULATION METHODS OF NANOSTRUCTURES WITH PHOTONIC BANDGAP

Tokarev S.V.

c.t.s., associate prof. Vlasov A.I.
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

Создание любой новой структуры, в том числе создание наносистем, является достаточно трудоемким и дорогостоящим процессом. Моделирование позволяет изучать свойства структуры, без реального фактического наличия этой структуры. Таким образом, с помощью моделирования можно прогнозировать свойства систем, до их практического создания. Это позволяет уменьшить вероятность получения структур с неверными параметрами, сократить время и уменьшить затраты на изготовление новых структур материалов. В статье рассматриваются методы, используемые для расчетов наноструктур с фотонной запрещенной зоной.

Abstract

Creation of any new structure, including the creation of nanosystems, is quite time-consuming and expensive process. Modeling allows us to study the properties of the structure, with no real actual existence of this structure. Thus, with the help of simulation can predict the properties of the systems before their actual creation. This reduces the probability of obtaining structures with incorrect parameters, to reduce time and reduce costs of production of new structures of materials. The article deals with the methods used for the calculations of nanostructures with photonic bandgap.

Введение

Фотонные кристаллы являются перспективными материалами, с которыми связывают будущее оптоэлектронных устройств и фотоники в целом. Фотонные кристаллы делятся на три группы: одномерные, двумерные и трехмерные. Именно трехмерные фотонные кристаллы представляют наибольший интерес для исследователей. Но получение трехмерного фотонного кристалла с заданными свойствами довольно трудная и дорогостоящая задача. Поэтому перед созданием фотонного кристалла целесообразно провести его моделирование с целью поиска оптимального варианта структуры, которая обладает требуемыми свойствами. Это может быть выполнено при помощи различных методов.

Для расчетов фотонных кристаллов используется волновая теория и уравнения Максвелла. Методы расчета фотонных кристаллов можно разделить на два основных класса: методы для временной области и методы для частотной области [1].

Методы временной области позволяют решать динамические задачи, где существует зависимость электромагнитного поля от времени. С их помощью можно рассчитать зонные диаграммы и резонансные моды фотонных кристаллов. Их преимуществом является то, что можно рассчитать все пики одновременно с расчетом распространения в одном поле. Наиболее серьезным недостатком данных методов является то, что частотное разрешение находится в зависимости от времени моделирования. Например, если необходимо повысить разрешение зонной диаграммы в 10 раз, то время расчетов вырастет в 10 раз [1]. Другой недостаток – зависимость пространственного разрешения от временного шага. Если требуется, например, удвоить пространственное разрешение, то также необходимо удвоить количество временных шагов, что приведет к увеличению времени расчетов. Таким образом, для получения хорошего пространственного разрешения и точных результатов, уменьшения

времени расчетов при расчете данными методами необходимо использовать соответствующее аппаратное обеспечение.

Методы для частотной области наиболее подходят для расчетов зонных структур и собственных состояний фотонных кристаллов. К достоинствам данных методов стоит отнести то, что ошибка в расчетах экспоненциально уменьшается при увеличении числа итераций, а также то, что число итераций остается практически постоянным при увеличении разрешения (безусловно, оно увеличивается, но не так сильно как в методах временной области). Недостатками данных методов является невозможность описания динамики колебаний в системе, а также необходимость расчета низких собственных состояний системы для расчета более высоких. Последнее особенно проблематично в при расчете дефектов в фотонных кристаллах, при этом, обычно, необходимо рассчитать большое значение частотных полос, перед тем как будет рассчитана нужная [1].

Приведем некоторые наиболее популярные методы расчетов фотонных кристаллов и их основные концепции. Подробное рассмотрение каждого из описанных методов выходит за рамки данной статьи.

Метод плоских волн

Метод плоских волн основан на решении уравнений Максвелла. Данный метод наиболее популярен при расчете зонной структуры фотонного кристалла и применим для расчета модальных решения уравнений Максвелла. Он применялся на ранних этапах теоретического изучения фотонных кристаллов и позволяет рассчитывать разрешенных частоты в фотонных кристаллах до любой заданной точности [2].

В данном методе электрическое и магнитное поля раскладываются в ряды Фурье вдоль вектора обратной решетки системы \vec{G} (1). Диэлектрическая проницаемость, которая является периодической функцией, также раскладывается в ряд Фурье (2). Затем эти компоненты подставляются в любое ротор-ротор соотношение (3), вытекающее из уравнений Максвелла. В результате образуется система уравнений, которая решается относительно коэффициентов ряда Фурье. Точность метода зависит от количества членов в ряде Фурье, чем больше слагаемых, тем выше точность метода.

$$E(\omega, \vec{r}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} K_n^{E_y} e^{-j\vec{G}\cdot\vec{r}} e^{-j\vec{k}\vec{r}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\epsilon_r} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} K_m^{\epsilon_r} e^{-j\vec{G}\cdot\vec{r}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \nabla \times \nabla \times E(\omega, \vec{r}) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 E(\omega, \vec{r}) \quad (3)$$

На рис.1 показана зонная диаграмма одномерного фотонного кристалла, рассчитанная с помощью метода плоских волн.

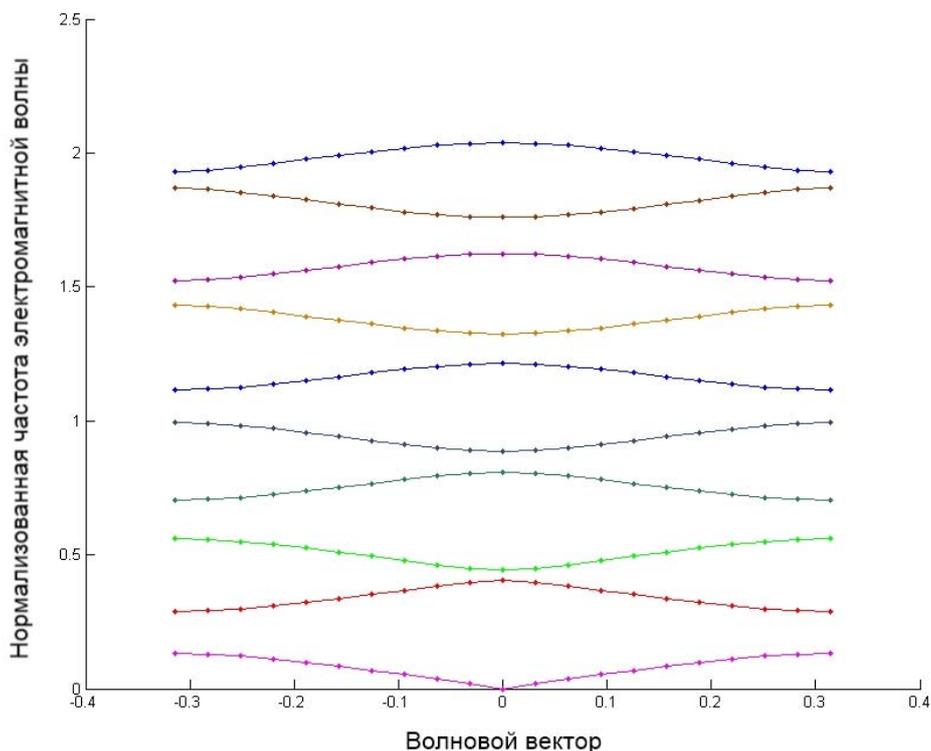


Рис. 1. Зонная структура одномерного фотонного кристалла с диэлектрическим контрастом 12.25 и отношением толщины слоев $d/a=0.8$ [3].

Метод конечных разностей во временной области

Данный метод также является наиболее популярным в области компьютерного моделирования различных систем. Он прост для понимания и его легко реализовать для машинного вычисления.

Метод конечных разностей основан на дискретизации уравнений Максвелла с использованием центрально-разностной аппроксимации по пространственным координатам и времени. Как следует из названия, метод работает во временной области, тем самым он применим для широкого диапазона частот [4].

В основе метода лежит следующее положение. Как следует из уравнения Максвелла, частная производная электрического поля по времени зависит от изменения магнитного поля в пространстве. Таким образом, значение вектора электрического поля в каждый момент времени зависит от значения вектора электрического в предыдущий момент времени и от изменения пространственного распределения вектора напряженности магнитного поля [4]. Аналогично, значение вектора магнитного поля в данный момент времени зависит от его значения в предыдущий момент времени и от изменения распределения вектора электрического поля в пространстве. Данный факт справедлив для всех пространственных систем: одномерных, двумерных и трехмерных.

При использовании данного метода вся расчетная область разбивается на сетку. Для каждой точки сетки задается материал области, его диэлектрическая и магнитная проницаемости, вычисляются вектора электрического и магнитного полей. На рис.2 показана ячейка трехмерной расчетной сетки.

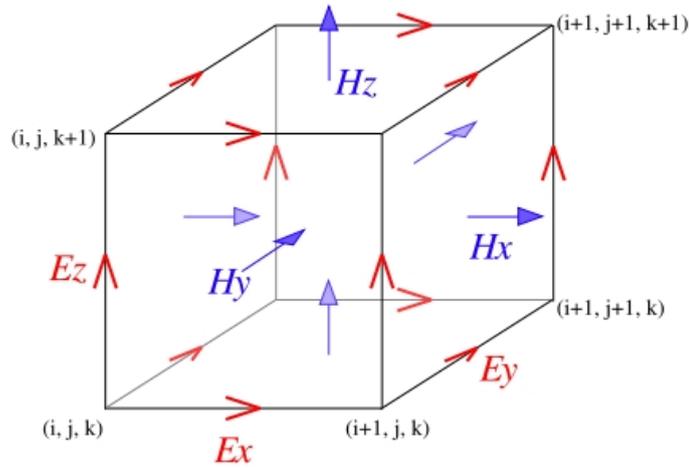


Рис. 2. Ячейка пространственной трехмерной расчетной сетки метода конечных разностей [4].

Метод конечных элементов

Преимуществом метода конечных элементов является то, что он может быть использован для решения широкого круга задач, он может быть адаптирован к проблемам высокой сложности и структурам с необычной геометрией. В методе конечных элементов расчет структуры ведется по элементарным ячейкам. Например, для случае двумерного фотонного кристалла с квадратной решеткой элементарная ячейка показана на рисунке 3, а.

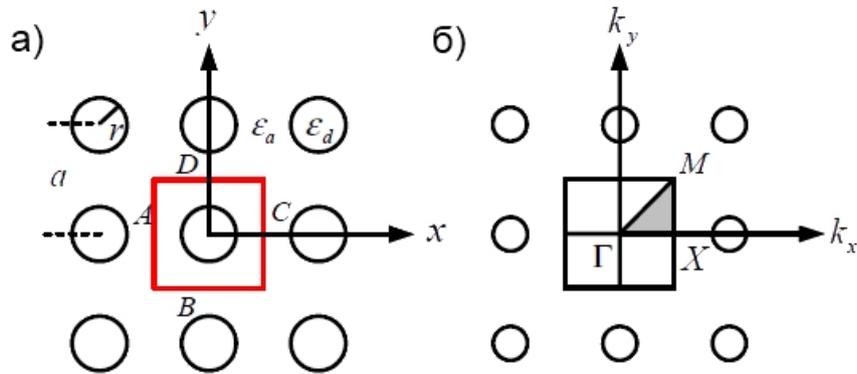


Рис. 3. Квадратная решетка фотонного кристалла с элементарной ячейкой (а) и соответствующая эквивалентная решетка с зоной Бриллюэна (б) [5].

Далее, имея информацию об изменениях в системе, например уравнения Гельмгольца для двумерного случая (4) и (5), и информацию о граничных условиях (6) и (7) получаем итоговую систему, которую и решаем [5].

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_z(x, y) + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \varepsilon_{a(d)} E_z(x, y) = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) H_z(x, y) + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \varepsilon_{a(d)} H_z(x, y) = 0 \quad (5)$$

$$E_{z, k_{\parallel}}(r_{\parallel} + R) = E_{z, k_{\parallel}}(r_{\parallel}) \exp(jk_{\parallel} \cdot R) \quad (6)$$

$$H_{z, k_{\parallel}}(r_{\parallel} + R) = H_{z, k_{\parallel}}(r_{\parallel}) \exp(jk_{\parallel} \cdot R) \quad (7)$$

В граничных условиях (6) и (7): вектор $\vec{r}_{||}$ – вектор позиции, \mathbf{R} – линейная комбинация основных векторов решетки, $k_{||} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$ – волновой вектор.

Суть адаптивного метода конечных элементов заключается в том, что регионы, где требуется более высокое пространственное разрешение, разбиваются на большее число элементов (уменьшается размер элементарных ячеек), которые удовлетворяют системе уравнений и где выполняются граничные условия.

Многошаговый многополевой метод

Многошаговый многополевой метод (multiple multipole method) применим для расчета зонных диаграмм фотонных кристаллов [6], хотя и не получил широкого распространения. Моделирование можно провести с помощью программного пакета MaX-1. Метод расчетов в этом пакете отличается от других методов прежде всего тем, что использует полную прямоугольную матрицу системы, что в некоторых случаях может приводить к дополнительным трудностям расчета [6]. В начале расчетов структура разделяется на элементарные ячейки (рис. 4).

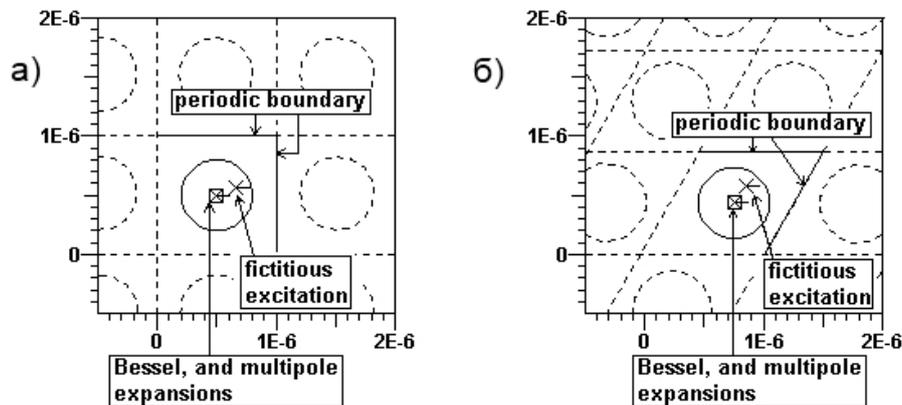


Рис. 4. Элементарные ячейки двумерных фотонных кристаллов из диэлектрических стержней, расположенных в квадратной решетке (а) и гексагональной решетке (б).

Стоит заметить, что форма границ элементарной ячейки зависит от кристаллографической структуры фотонного кристалла, но в то же время, для показанных на рисунке 4 структур, не является единственной. Форма границ может иметь любую форму, но стоит помнить, что при усложнении формы границ, граничные условия на них также будут усложняться. Для круглых или квадратных стержней, показанных на рисунке 4, прямые границы являются наиболее оптимальным вариантом. Для более сложных форм стержней можно вводить более сложные границы.

Далее необходимо ввести граничные условия. Для структуры на рис. 4,а условие для правой границы будет записано в виде (8), где параметр C_1 характеризует точку в пространстве обратной решетки [6]. Для верхней границы на рис. 4,а условие записывается аналогичным образом.

$$\vec{F}(\vec{r} + \vec{e}_1) = \vec{F}(\vec{r})e^{i(C_1\eta_1|\vec{e}_1|)} \quad (8)$$

После определения элементарных ячеек и задания граничных условий составляется программная модель рассеяния в узлах решетки. Затем амплитуды и параметры рассчитываются с использованием соответствующей техники, например, с учетом минимизации взвешенной функции ошибок, определенной вдоль реальных границ структуры и границ элементарных ячеек.

Заключение

В настоящее время разработано много новых и адаптировано уже существовавших методов для расчетов структур с фотонной запрещенной зоной. Все эти методы имеют как достоинства, так и недостатки. Наиболее известным является метод плоских волн. Он позволяет решать широкий круг задач, но в то же время имеет недостаток связанный с дискретным характером диэлектрической функции, поэтому необходимо применять дополнительные поправки, чтобы результаты, получаемые методом плоских волн были верными. Метод конечных разностей во временной области является популярным методом для моделирования. Он наиболее прост для понимания и его легко использовать в компьютерном вычислении. Он также обладает недостатками. Во-первых, данный метод достаточно требователен к аппаратному обеспечению, при расчетах больших систем для получения более точных результатов весь счетный объем должен быть разбит на большее число элементов, что может потребовать большой объем оперативной памяти. Поэтому, все методы обладают как достоинствами, так и недостатками, что необходимо учитывать при моделировании систем.

На данный момент существует много программных пакетов, которые позволяют проводить расчеты определенными методами. Так, например, метод плоских волн легко реализовать в программных пакетах Matlab или Mathematica. Пакет Rsoft Fullwave позволяет проводить расчеты с использованием метода конечных разностей. Метод конечных элементов используется в известном пакете Comsol Multiphysics. Описанный здесь и довольно специфичный многошаговый многополевой метод реализован в бесплатном пакете MaX-1, который также может быть применим для расчетов зонных структур фотонных кристаллов. Помимо этого, существуют и другие программные комплексы для моделирования фотонных кристаллов. Так, всё большую популярность приобретает бесплатный программный пакет MIT Photonic-Bands, разработанный известным ученым Массачусетского Технологического Университета С. Джонсоном (S. G. Johnson).

Существует множество различных методов расчета фотонных кристаллов и программного обеспечения, реализующего эти методы. Выбор метода и программного комплекса зависит, прежде всего, от моделируемой структуры и целей моделирования.

Литература

1. S. Johnson MPB manual (http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MPB_Introduction).
2. A.J. Danner An introduction to the plane wave expansion method for calculating photonic crystal band diagrams (электронная публикация <http://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/eleadj/planewave.htm>) // University of Illinois at Urbana-Champaign - 2005.
3. Photonic Crystal (http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic_crystal).
4. Finite-difference time-domain method (<http://en.wikipedia.org/wiki/FDTD>).
5. M.-C. Lin, R.-F. Jao Finite element analysis of photon density of states for two-dimensional photonic crystals with in-plane light propagation // Optics Express. - 2007, V.15, N1.
6. J. Smajic, C. Hafner, D. Erni Automatic Calculation of Band Diagrams of Photonic Crystals using the Multiple Multipole Method // Aces Journal. - 2004, V.19, N1a.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Михеев Г.А.

Научный руководитель: доцент Соловьев В.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, ИУ4, Москва, Россия

AUTOMATED TESTING SYSTEM OF RELIABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Mikheev G.A.

Scientific adviser: docent Soloviev V.A.

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman, Moscow, Russia

Аннотация

В работе рассматривается проблема создания программного обеспечения для расчета характеристик надежности электронной аппаратуры. В качестве методик для расчета были выбраны как стандартный коэффициентный метод, а также метод по π -факторам.

Abstract

This paper considers the problem of creating software to calculate the reliability characteristics of electronic equipment. As techniques for the calculation were chosen the standard coefficient method and the method of π -factors.

Основным показателем качества электронного оборудования является надежность. Надежность средств закладывается на этапах проектирования и изготовления и в наибольшей степени проявляется на этапах эксплуатации. Следует учитывать, что усложнение аппаратуры резко снижает надежность современного радиоэлектронного оборудования. При этом низкая надежность приводит к тому, что стоимость эксплуатации радиоэлектронного оборудования в течение одного года иногда в несколько раз превышает стоимость самого оборудования. Важность выполняемых радиоэлектронной аппаратурой задач делает часто отказ в работе событием чрезвычайным, а в некоторых случаях и опасным, например, при использовании аппаратуры в медицине, в военном деле, при космических исследованиях, на транспорте и др. В работе рассматривается проблема создания программного обеспечения для расчета характеристик надежности электронной аппаратуры.

Коэффициентный метод расчета

Сущность коэффициентного метода состоит в том, что при расчете надежности электронного оборудования используют не абсолютные значения интенсивности отказов λ_i , а коэффициент надежности k_i , связывающий значения λ_i с интенсивностью отказов λ_b какого-либо базового элемента:

$$k_i = \lambda_i / \lambda_b \quad (1)$$

Коэффициент надежности k_i практически не зависит от условий эксплуатации и для данного элемента является константой, а различие условий эксплуатации учитывается соответствующими изменениями λ_b . В качестве базового элемента в теории и практике выбран резистор. Показатели надежности комплектующих берутся на основании справочных данных. Влияние на надежность элементов основных дестабилизирующих факторов - электрических нагрузок, температуры окружающей среды - учитывается введением в расчет поправочных коэффициентов a_i . Учет влияния других факторов - запыленности, влажности и т.д. - выполняется коррекцией интенсивности отказов базового элемента с помощью поправочных коэффициентов. Результирующий коэффициент надежности элементов электронного оборудования с учетом поправочных коэффициентов:

$$k_i' = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot k_i \cdot k_{\text{и}}, \quad (2)$$

где

k_u - номинальное значение коэффициента условий эксплуатации;

k_i - номинальное значение коэффициент надежности;

a_1 - коэффициент учитывающий влияние нагрузки по напряжению, току или мощности;

a_2 - коэффициент учитывающий влияние температуры среды;

a_3 - коэффициент снижения нагрузки от номинальной по напряжению, току или мощности;

a_4 - коэффициент использования данного элемента;

Оценка надежности по π -факторам.

Данная методика разработана в США и во многом повторяет ранее рассмотренные стандартный коэффициентный метод. Однако количество поправочных коэффициентов больше, что позволяет проводить расчеты с высокой точностью. Надежность оценивается на основе анализа нагрузки компонентов. Этот метод применим, когда большая часть проекта завершена и перечень комплектующих изделий, включающий их нагрузки, определен. Он может быть так же использован на последующих стадиях проектирования, для нахождения компромиссов по надежности в зависимости от выбора компонентов и их нагрузок.

Интенсивность отказов представлена применительно к оборудованию в нормальном рабочем состоянии, т.е. при включенном питании и при выполнении предназначенных функций, при предназначенных окружающих условиях. Основная процедура определения уровня интенсивности отказов платы (или системы) заключается в суммировании индивидуальных интенсивностей отказов каждого компонента. Эта сумма затем дополняется интенсивностью отказов электрической платы. Окончательно, эффект соединения плат вместе рассчитывается путем добавления интенсивности отказов каждого соединителя (разъема, клеммника и т.п.). Типовым примером для модели, используемой для большинства других видов компонентов, является следующая модель для дискретных полупроводников:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E, \quad (3)$$

где

λ_p – интенсивность отказов компонента;

λ_b – базовая интенсивность отказов, обычно выраженная моделью отношения к влиянию электрических и температурных нагрузок на компонент;

π_E и другие π -факторы – базовые интенсивности отказов для категорий окружающей среды применения и других параметров, которые влияют на надежность компонентов

Расчеты надежности электрорадиоизделий по λ – характеристикам

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по моделям, имеющим вид:

$$\lambda_s = \lambda'_b K_p P_n, \quad (4)$$

где

λ'_b – исходная интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, приведенная к условиям: номинальная электрическая нагрузка при температуре окружающей среды $t_{окр}=25^\circ\text{C}$;

K_p – коэффициент режима, учитывающий изменение λ'_b в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды;

P_n – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов, в зависимости от различных факторов;

n – число учитываемых факторов.

Модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов распространяются на период постоянства интенсивности отказов во времени. Значения λ'_b могут быть использованы для групп изделий, ЭРИ, объединенных по функциональному назначению, сходной технологии производства, близкому конструктивному исполнению и применяемым материалам.

Функциональное назначение

Для создания программного продукта была выбрана интегрированная среда разработки Borland Delphi как мощное и современное средство написания Windows-ориентированных программных средств. Система Delphi, относящаяся к так называемым средствам быстрой разработки приложений (Rapid Application Development-RAD), представляет собой мощный генератор кода, визуальный дизайнер приложений, средство ведения баз данных. Создание программ в Delphi базируется на объектно-ориентированной технологии. В качестве языка программирования используется Object Pascal - объектно-ориентированный язык, пригодный для написания программ любой сложности.

Программное обеспечение предоставляет возможность расчета надежности РЭА. Пользователь должен имеет возможность создать проект, соответствующий законченному изделию или отдельному блоку. Пользователь имеет возможность выбрать компоненты для вставки в созданный проект из БД, ввести их параметры самостоятельно, добавив элемент в базу данных и изменять параметры элемента и условия эксплуатации уже находящихся в проекте элементов.

Интенсивность отказов рассчитывается для каждого элемента. Для системы в целом рассчитывается интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ. После моделирования и расчета характеристик надежности системы, производится их сравнение с требуемыми для данного устройства. Если рассчитанные характеристики надежности не удовлетворяют требованиям, предъявляемым разработчиком, система производит поиск потенциально ненадежных узлов и предлагает методы повышения их надежности. Результаты расчетов отражаются как в текстовом, так и в графическом виде. Доступ к расчетам имеют только авторизованные пользователи. Пользователь имеет возможность сохранения всех данных о проекте, формирования отчета по проведенным расчетам.

Входные данные

На входе в программу имеем данные о элементах, составляющих проект: количество, условия эксплуатации, электрические параметры, способы установки и соединения и т.д.

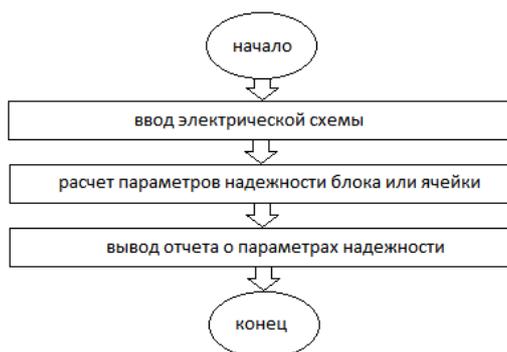


Рис. 1. Обобщенный алгоритм работы программы

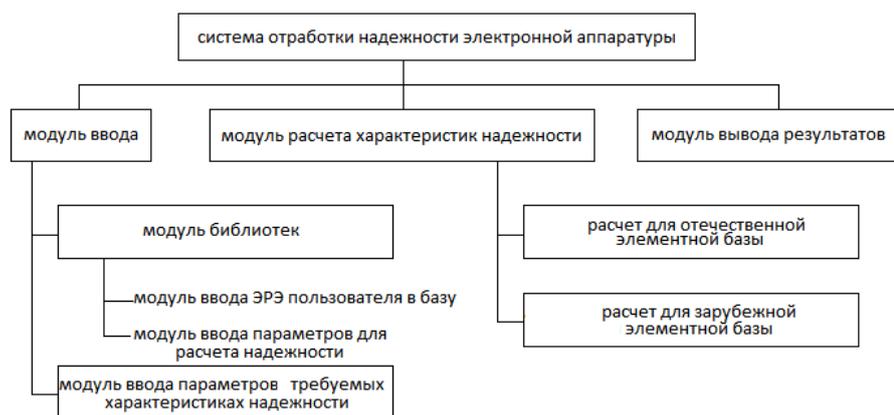


Рис. 2. Обобщенная структура программы

Выходные данные

На выходе имеем файл проекта, файл с отчетом о проведенных исследованиях, интенсивность отказов каждого элемента, групп элементов и системы в целом, вероятность безотказной работы и время наработки на отказ. Обобщенный алгоритм работы программы представлен на рис. 1. Обобщенная структура программы показана на рис. 2.

Основные результаты работы

В работе были рассмотрены положения теории надежности электронных средств; проанализированы основные методики расчета характеристик надежности электронной аппаратуры: коэффициентный метод и метод по π -факторам; разработано алгоритмическое и математическое обеспечение программного продукта — автоматизированной системы расчета надежности электронного оборудования.

Литература

1. Военный справочник «Прогнозирование надежности электронного оборудования», - Министерство обороны США, 1991. – 12с.
2. Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Программное обеспечение конструкторских расчётов РЭС и ЭВС. Часть 4: Методические указания для курсового и дипломного проектирования, — М.: МГТУ, 2000. – 7с.
3. Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Программное обеспечение конструкторских расчётов РЭС и ЭВС. Часть 7. Программный комплекс конструкторских и технологических расчетов: Методические указания для курсового и дипломного проектирования— М.: МГТУ, 2001. – 2с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Глушко А.А.

Научные руководители: член-корр. РАН, Шахнов В.А.,

МГТУ им. Баумана, Москва, Российская Федерация

к. ф.-м. н. Амирханов А.В.,

НИИСИ РАН, Москва, Российская Федерация

THE SIMULATION OF RESISTIVE STRUCTURES BASED ON POLYCRYSTALLINE SILICON

Glushko A.A.

Supervisors of studies: RAS Corresponding Member, Shakhnov V.A.,

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Candidate of physicomathematical science Amirkhanov A.V.,

SRISA RAS, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Работа посвящена анализу механизма проводимости в поликристаллическом кремнии. Определены параметры модели подвижности через границу кристаллитов. Проведено моделирование резистора на основе поликристаллического кремния и определены температурные коэффициенты сопротивления, предназначенные для последующего SPICE-моделирования.

Abstract

This work is devoted to the analysis of polycrystalline silicon conductivity mechanism. The parameters of conductivity model are determined. Also the simulation of polycrystalline resistor is carried out and the resistive temperature coefficients for the subsequent SPICE-modeling are determined.

При проектировании аналоговых СБИС обеспечение температурной стабильности – один из вопросов, с которым постоянно сталкиваются разработчики СБИС. В большинстве случаев эта задача решается с помощью резисторов, обладающих отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. К такому типу резисторов относятся резисторы на основе поликремния. Параметры этих резисторов во многом определяют температурную стабильность микросхемы, поэтому разработчикам СБИС важно уметь определять температурные коэффициенты поликремниевых резисторов как можно более точно. Наиболее эффективным методом оценки температурных коэффициентов является моделирование.

Температурная зависимость сопротивления резисторов на поликремнии обусловлена, в основном, уменьшением подвижности движущихся зарядов на границе поликристаллического зерна (кристаллита) [1]. Уменьшение подвижности связано с возникновением на границах кристаллитов потенциального барьера, вызванного зарядом, накопившимся в ловушках.

При расчете температурной зависимости предполагается, что все кристаллиты представляют собой кубические структуры с одинаковой длиной ребра L [1]. Концентрация легирующей примеси равна N .

Значительный вклад в ток, протекающий через границу зерна, дает термоэлектронная эмиссия. Результаты измерений показывают, что расстояние между зернами составляет не менее 50 Å. Поэтому туннельными токами можно пренебречь [2]. Ниже будет показано, что туннельная составляющая тока пренебрежимо мала по сравнению с составляющей термоэлектронной эмиссии. Эффективная подвижность μ_{eff} определяется в этом случае как

$$\mu_{eff} = \frac{Lq}{\sqrt{2\pi mkT}} \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right), \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, К; m – эффективная масса заряженных частиц, кг.

Общая подвижность оценивается по правилу Матиссена:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \dots + \frac{1}{\mu_n}, \quad (2)$$

где μ_1, \dots, μ_n - подвижности, рассчитанные с учетом различных моделей рассеяния.[3].

Рассеяние частиц на границах зерна при малых размерах зерен (менее 1000 Å) имеет преобладающий характер, и можно считать, что $\mu \approx \mu_{eff}$. Заметим, что с ростом зерна подвижность μ_{eff} увеличивается, и фактор рассеяния на границах зерна перестает оказывать преобладающее воздействие. В этом случае ограничивающим фактором являются те же эффекты, что и в монокристаллическом кремнии – рассеяние на ионах примеси и тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки.

При моделировании температурной зависимости предполагается, что эффективная масса линейно возрастает с ростом температуры:

$$m = m_{300} + \Delta \times (T - 300), \quad (3)$$

где m_{300} – эффективная масса частицы при температуре 300 К, Δ – температурный коэффициент эффективной массы частицы. Для электрона $m_{300} = 1.09m_e$ кг, $\Delta = 1.6 \times 10^{-4} m_e$ кг/К, где $m_e = 9 \times 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона. [3]

Прежде всего, определим концентрацию легирующей примеси в резисторе с использованием САПР конструктивно-технологического моделирования TCAD. На рис. 1 показано распределение концентрации примеси в резисторе на поликремнии.

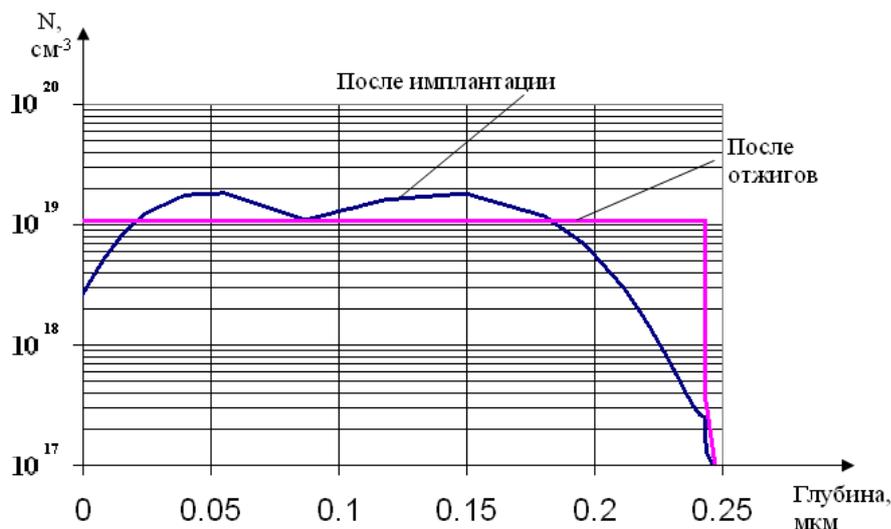


Рис.1. Концентрационные профили примеси фосфора в поликремнии, полученные после имплантации в две ступени (первая ступень: доза 2.1×10^{14} см⁻², энергия 120 кЭв, вторая ступень: доза 9.3×10^{13} см⁻², энергия 40 кЭв) и отжига

Из рисунка 1 видно, что концентрация примеси по глубине поликремниевого резистора практически после отжига постоянна и составляет $N = 10^{19}$ см⁻³.

Определить высоту барьера проще всего из экспериментальной температурной зависимости сопротивления резистора. Учитывая, что удельную проводимость в поликремнии, легированном фосфором, можно оценить как $\sigma = \mu Nq$, получаем, что отношение удельных сопротивлений при различных температурах равно

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\mu_2 N}{\mu_1 N} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (4)$$

Далее, в соответствии с формулой (1)

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\frac{Lq}{\sqrt{2\pi m_1 K T_1}} \exp\left(\frac{E_b}{K T_1} - \frac{E_b}{K T_2}\right)}{\frac{Lq}{\sqrt{2\pi m_2 K T_2}}} = \frac{\sqrt{m_2 T_2}}{\sqrt{m_1 T_1}} \exp\left(\frac{E_b}{K T_1} - \frac{E_b}{K T_2}\right),$$

откуда нетрудно найти E_b :

$$E_b = \frac{K T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\rho_1 \sqrt{m_1 T_1}}{\rho_2 \sqrt{m_2 T_2}} \quad (5)$$

При $T_1 = 300$ К $\rho_1 = 1345$ Ом/□ $T_2 = 350$ К, $\rho_2 = 1190$ Ом/□, получаем $E_b = 0.036$ эВ. В этом случае коэффициент туннелирования электронов при толщине границы зерна $\delta = 50$ Å через барьер будет определяться как

$$D = \int_0^1 \exp\left[-\frac{4\pi\delta\sqrt{2mE_b}}{h} \sqrt{1-\xi}\right] d\xi = 0.01 \quad (h - \text{постоянная Планка}).$$

Учитывая, что $\exp\left(\frac{-E_b}{K T}\right) = 0.26$, составляющая тока термоэлектронной эмиссии будет более чем в 10 раз превосходить туннельную составляющую тока, что и обосновывает наше допущение о пренебрежимо малых туннельных токах. Зная высоту потенциального барьера, из (3) определяется эффективный размер зерна:

$$L = \frac{\mu\sqrt{2\pi m k T}}{q} \exp\left(\frac{E_b}{K T}\right) = \frac{\sqrt{2\pi m k T}}{\rho q^2 N} \exp\left(\frac{E_b}{K T}\right) = 65 \text{ Å}$$

В используемой САПР TCAD нет модели, учитывающей рассеяние на границах зерна, что, к сожалению, приводило почти к десятикратному расхождению между моделью и экспериментальными данными в диапазоне температур 300 – 400 К. Поэтому для моделирования резисторов на поликремнии был разработан специальный модуль, динамически подключаемый к программе моделирования и позволяющий учитывать эффект рассеяния на границах кристаллитов. Величина потенциального барьера и эффективного размера зерна были взяты из описанного выше расчета на основе двух экспериментальных точек. На рис. 2 приведен результат моделирования в модифицированной программе в сравнении с экспериментальными данными.

Из рисунка 2 видно, что экспериментальные данные находятся в пределах 5%-го разброса относительно рассчитанной зависимости. Это, в свою очередь, подтверждает эффективность использования предложенной модели.

На основе расчетной зависимости можно определить температурные коэффициенты сопротивления резисторов. Поскольку в современных SPICE-моделях температурную зависимость резисторов аппроксимируют квадратичной зависимостью $R = R_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2$, то для использования температурной модели в схемотехнических САПР необходимо определить температурные коэффициенты сопротивления α_1 и α_2 . Расчет α_1 и α_2 по зависимостям, полученным при моделировании (рис. 2), дает следующий результат: $\alpha_1 = -9.9$ Ом/К, $\alpha_2 = 0.01$ Ом/К².

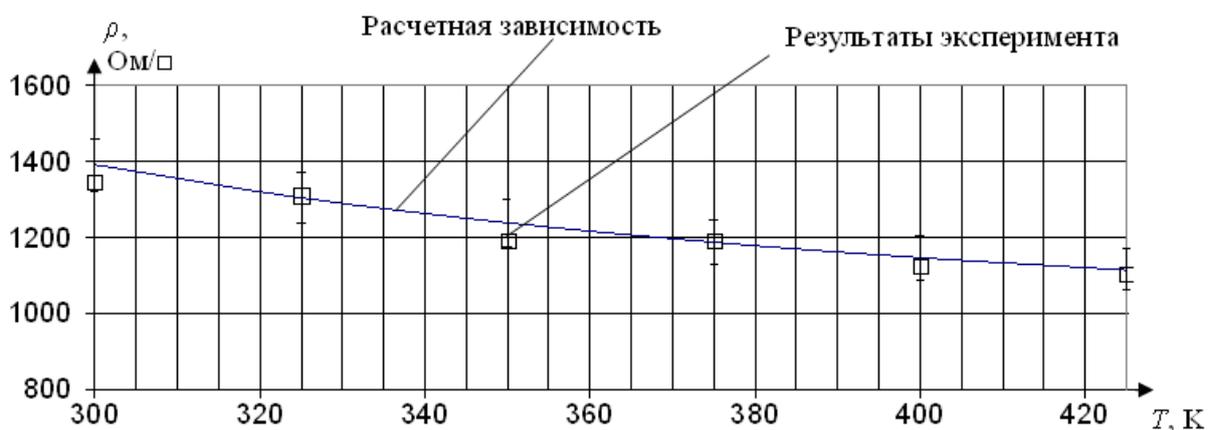


Рис.2. Расчетная температурная зависимость сопротивления резистора на основе поликремния в сравнении с экспериментальными данными

В заключение следует отметить, что:

- добавленная в САПР TCAD модель подвижности позволяет с достаточной точностью рассчитывать температурные зависимости удельного поверхностного сопротивления резисторов на поликремнии. (расхождение между расчетной и экспериментальной температурной зависимостью сопротивления составляет не более 5%);
- предложен эффективный метод оценки параметров для модели подвижности в поликристаллическом кремнии. Эффективность метода подтверждена малым расхождением между результатами моделирования и экспериментальными данными;
- при заданных размерах зерен и межзеренных границ проводимость поликремния обусловлена преодолением электронами потенциальных барьеров на границах зерен за счет термоэлектронной эмиссии.

Литература

1. С. А. Колосов, Ю.В. Клевков, А.Ф. Плотников. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe. – Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, №4, стр. 473–478
2. К.М. Доцанов. Температурная зависимость электрических свойств поликристаллического кремния в темноте и при воздействии солнечного излучения. – Физика и техника полупроводников, 1997, том 31, №8, стр. 954–956
3. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Ивченко М.О.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент, Власов А.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

GENETIC PROCESSING OF RAMAN SPECTROSCOPY DATA

Ivchenko M.O.

Ph.D., associate professor, Vlasov A.I.

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

Аннотация

В данной работе описывается метод генетического программирования, предназначенный для классификации спектров рамановского рассеяния по их компонентному составу. Представлена двухуровневая функция оценки приспособленности, призванная уменьшить риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании полученных правил.

Annotation

This paper describes a genetic programming method for identification of components within mixtures of materials using Raman scattering data. A two-level fitness function is presented which allows for the minimization of risks associated with possible false classification of future spectra.

Рамановская спектроскопия – неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества, как твёрдого, жидкого, так и газообразного, сопровождающееся заметным изменением его частоты. В спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, число и расположение которых определяется молекулярным строением вещества. Одно из важнейших применений рамановской спектроскопии заключается в определении молекулярного состава образца по его спектру рамановского рассеяния.

Генетическое программирование имеет преимущество над искусственными нейронными сетями и хемометрическими методами идентификации состава вещества по его рамановскому спектру, заключающееся в том, что сгенерированные правила распознавания поддаются интерпретации и могут быть использованы как отдельно так и совместно с экспертной оценкой для классификации спектров.

Распознаванию спектров рамановского рассеяния мешает ряд проблем. Присутствие флуоресцентных соединений, примесей и сложных смесей добавляют трудностей при идентификации соединений по их спектрам. Более того, концентрация исследуемого компонента бывает так мала, что она находится вблизи границы предела обнаружения используемого измерительного инструмента. Кроме того, самые интенсивные пики в спектрах компонентов вещества могут приходиться на одну область в спектре исследуемого вещества.

Также существуют трудности, вызванные тем, что спектры рамановского рассеяния обладают высокой разрядностью и низкой численностью. Зачастую приходится идентифицировать вещества, основываясь на малом количестве справочных спектров.

В ответ на это, вместо того, чтобы иметь целью лишь эволюцию правил, корректно классифицирующих обучающие выборки данных, необходимо также оптимизировать выбор правил с тем, чтобы минимизировать вероятность ошибочной классификации будущих выборок, тем самым минимизировав проблемы, связанные с малым количеством образцов и их спектров [1].

Главная задача представленного метода заключается в точном определении вхождения определенного компонента в исследуемое вещество по его спектру рамановского рассеяния.

Генетическое программирование

Генетическое программирование основывается на идее эволюции с помощью естественного отбора, выдвинутой Дарвином (1857). Делается предположение, что если взять две вполне хороших решения задачи и каким-либо образом получить из них новое решение, то с высокой вероятностью новое решение получится хорошим или даже лучшим. Для реализации этого используют моделирование эволюции (естественного отбора). В природе, по упрощенной схеме, каждое животное стремится выжить, чтобы оставить после себя как можно больше потомства. Выжить в таких условиях могут лишь сильнейшие особи.

Генетические алгоритмы работают с совокупностью *особей* - популяцией, каждая из которых представляет возможное решение данной проблемы. Каждая особь оценивается мерой ее *приспособленности* (fitness) согласно тому, насколько удачно соответствующее ей решение задачи. В природе это эквивалентно оценке того, насколько эффективен организм при конкуренции за ресурсы. Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводить» потомство с помощью *скрещивания* с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции. Иногда происходят мутации, или спонтанные изменения в генах [2].

Генетический алгоритм для идентификации компонентов вещества

В данной работе каждая особь представляет собой математическую формулу, составленную из функций и переменных. К функциям относятся простые математические операторы «+» и «-», а переменные соответствуют длинам волн спектра. Популяция инициализируется случайными сочетаниями функций и переменных для создания *бинарных деревьев* ограниченной глубины (в данной работе она равна 5).

В совокупности функции и длины волн, выбранные особью i , формируют формулу E_i , вычисление значения которой по соответствующим интенсивностям для заданного спектра S_i дает значение $E_i(S_i)$.

Значение $E_i(S_i)$ интерпретируется как индикатор присутствия ($E_i(S_i) > 0$) либо отсутствия ($E_i(S_i) < 0$) соответствующего компонента в веществе.

После инициализации популяции вычисляется приспособленность каждой ее особи (формулы) и самые «удачные» (приспособленные) особи отбираются для скрещивания, получая в результате следующее поколение популяции [1].

Выбранная в работе стратегия «разведения» особей заключается в применении принципов элитизма, перекрестного скрещивания и мутации.

Элитизм подразумевает копирование двух самых приспособленных особей из каждой популяции в следующее поколение без изменений (мутаций). Остальные особи нового поколения создаются с помощью *перекрестного скрещивания* популяции, которое заключается в случайном выборе двух особей с учетом равномерного распределения из лучших 1.5% особей предыдущей популяции и создания нового индивида, сочетающего свойства обоих родителей. *Мутация* включает в себя случайные изменения в особи новой популяции и имеет фиксированную вероятность.

Первичная цель эволюции особей является способность корректно классифицировать все обучающие выборки. Однако целесообразным представляется ввод вторичной цели, заключающийся в минимизации риска будущих ошибочных классификаций.

Для достижения первичной цели приспособленность особи i вычисляется как $F_1(i) = Acc(i) \times N$, где $Acc(i)$ является характеристикой точности классификации (ассигасу) особью, а N – количество обучающих выборок. Таким образом, оценка в 1 балл

присваивается особи за каждый корректно классифицированный спектр и 0 баллов – за ошибочную классификацию.

Для достижения вторичной цели необходим механизм, с помощью которого, в случае, если две особи одинаково корректно распознают выборку, предпочтение отдавалось бы особи с наибольшей степенью уверенности. Степень уверенности классификации $C_i(S_j)$ особи i по отношению к спектру S_j можно задать как $C_i(S_j) = Acc(i) \times |E_i(S_j)|$. В целях содействия достижения вторичной цели, приспособленность особи i целесообразно принимать за $F_2(i) = \min_j C_i(S_j)$. Иными словами, $F_2(i)$ равен наименьшей степени уверенности для всех спектров в обучающей выборке. Таким образом, если особь ошибочно классифицирует хотя бы одну особь выборки, ее значение $F_2(i)$ будет равно 0.

Суммарная приспособленность особи i в таком случае вычисляется как $F(i) = F_1(i) + F_2(i)$.

В результате F_2 не влияет на приспособленность, пока особь не сможет корректно идентифицировать все обучающие выборки. Иными словами, F_2 выступает в качестве критерия ранжирования для тех особей, которые приспособились корректно распознавать все обучающие выборки. Это способствует эволюции особей с более высокими степенями уверенности, уменьшая, тем самым, риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании сформированных правил [1].

Новые популяции продолжают создаваться до наступления состояния *схождения*. Схождением называется состояние популяции, в котором все особи популяции находятся в области некоторого экстремума и почти одинаковы. Скрещивание практически никак не изменяет популяции, а мутирующие особи склонны вымирать, так как менее приспособлены. Таким образом, схождение популяции означает, что достигнуто решение, близкое к оптимальному [3].

Генетическое программирование классифицируемых веществ

На рисунках 1 и 2 представлены результаты применения подобного генетического алгоритма [1] для ацетона и ацетонитрила: двух веществ, пики спектров которых приходятся на примерно одинаковую длину волны. Ввиду этого генетическим алгоритмом были выбраны другие длины волн в качестве классификаторов.

Пик в ацетоне на волновом числе $\approx 1700 \text{ см}^{-1}$ связан с присутствием в нем функциональной группы $\text{C}=\text{O}$, отсутствующей в ацетонитриле. В свою очередь, ацетонитрил имеет связь $\text{C}\equiv\text{N}$, выражающуюся в виде пика на волновом числе $\approx 2255 \text{ см}^{-1}$, отсутствующую в ацетоне.

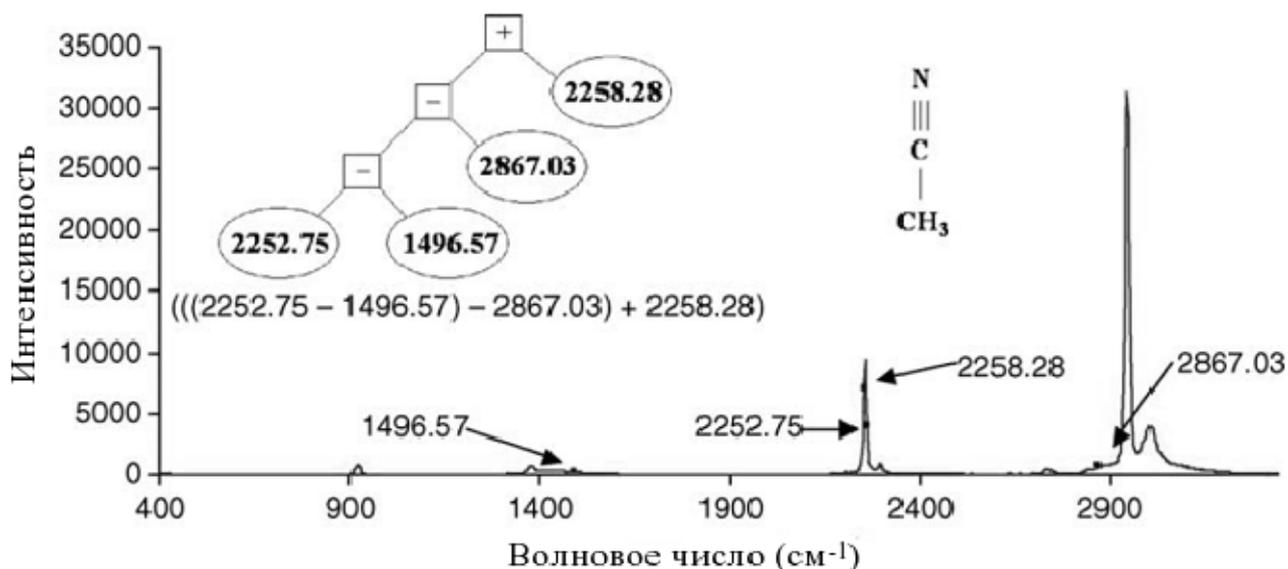


Рис.1. Спектр рамановского рассеяния ацетонитрила и правила его классификации [1].

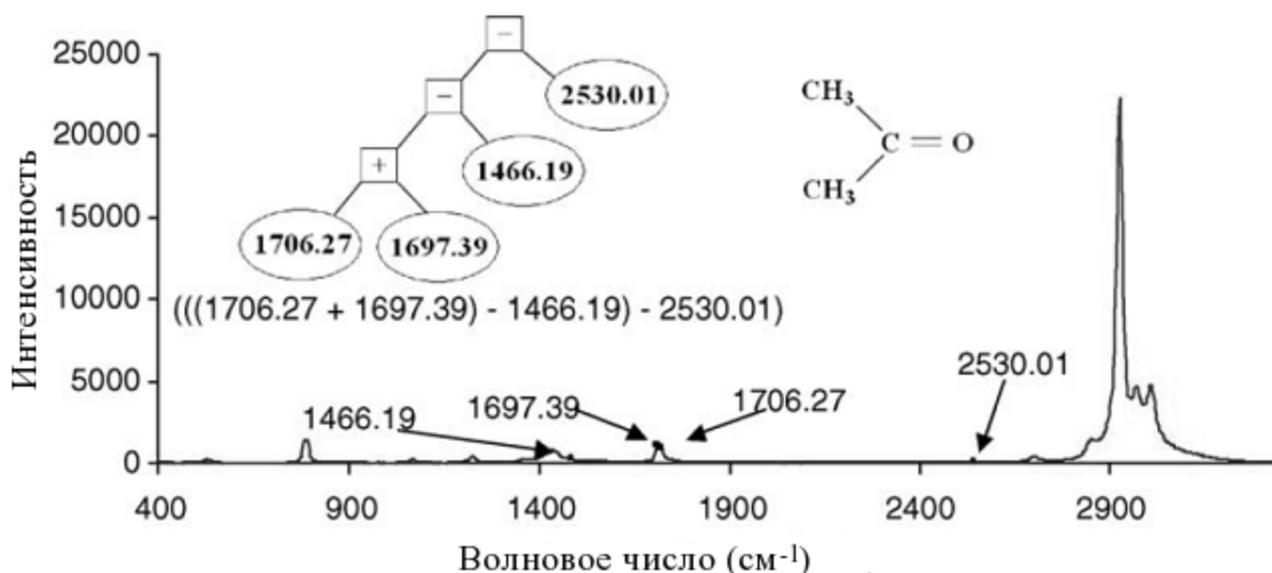


Рис.2. Спектр рамановского рассеяния ацетона и правила его классификации [1].

Корреляция между правилами, сгенерированными генетическим алгоритмом, и химической структурой веществ демонстрирует практическую применимость представленного метода.

Выводы

В данной работе был описан метод генетического программирования для классификации спектров рамановской спектроскопии и представлена двухуровневая функция оценки приспособленности, призванная уменьшить риск ошибочной классификации спектров в будущем.

Сгенерированные правила классификации, полученные методом генной эволюции, позволяют формировать решения, учитывающие экспертный опыт оператора. Они являются информативными при совместном анализе с химической структурой компонента, чье присутствие в веществе исследуется. Это обстоятельство выгодно отличает представленный метод от других машинных алгоритмов классификации спектров.

Представленный метод генетического программирования оптимизирует степени уверенности в найденных правилах классификации с тем, чтобы уменьшить риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании этих правил. Это является полезным в случаях, когда количество обучающих выборок мало.

В дальнейшем представленный метод предлагается совершенствовать с тем, чтобы определять химическую концентрацию каждого компонента вещества по его спектру рамановского рассеяния.

Также полезным представляется совершенствование функции приспособленности с целью ранжированного учета ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний, так как в некоторых случаях один вид ошибки является более критичным, чем другой.

Литература

1. Hennesy K., et al. An Improved Genetic Programming Technique for the Classification of Raman Spectra // Applications and innovations in intelligent systems XII. Cambridge. 2005. 181-192.
2. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
3. Yang, J. Honavar, V. Feature subset selection using a genetic algorithm // Intelligent Systems and their Applications, IEEE Vol. 13. Iowa State Univ. 2002. 44-49.

МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Леонидов В.В.

к.т.н., доцент, Макаrchук В.В.

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

CHECK-OUT METHODOLOGY OF STATIC PARAMETERS OF FET-TRANSISTORS

Leonidov V.V.

Candidate of science, Associate Professor, Makarchuk V.V.

BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В данной статье описаны основные параметры полевых транзисторов и методы их контроля. Рассмотрены проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации автоматизированных измерительных систем. Разработана структурная схема измерительного комплекса.

Abstract

This article describes the basic parameters of field-effect transistors and methods of their control. The problems encountered in the design and operation of automated measuring systems are considered there. Block diagram of measuring complex is developed.

Измерение статических параметров полевых транзисторов является обязательной частью выходного контроля при их изготовлении. Автоматизация измерений позволяет существенно уменьшить время измерения параметров, исключить «человеческий фактор», тем самым повысить точность измерений, автоматизировать принятие решения о годности транзистора, вести статистику годных и бракованных изделий по партиям. Таким образом, разработка комплексной автоматизированной системы контроля параметров полевых транзисторов является актуальной задачей.

Одни из основных параметров полевых транзисторов, рассмотренные в данной статье:

- начальный ток стока;
- остаточный ток стока;
- ток утечки затвора;
- сопротивление сток-исток;
- пороговое напряжение;
- крутизна характеристики;
- активная составляющая выходной проводимости.

Последовательно задавая на n-канальном полевом транзисторе разные напряжения сток-исток $U_{СИ}$ и измеряя ток стока I_C как функцию напряжения $U_{СИ}$, получим семейство выходных характеристик (рис. 1).

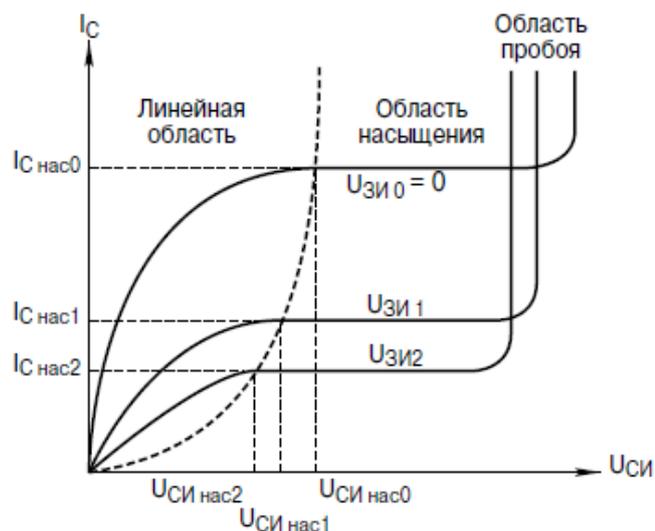


Рис. 1. Выходная ВАХ полевого транзистора.

Ток насыщения в цепи стока транзистора (или начальный ток стока - $I_{Снас}$), включённого по схеме на рис. 3 при $U_{ЗИ}=0$ характерен только для полевого транзистора с управляющим p-n-переходом.

Ток стока в другой рабочей точке можно рассчитать по формуле (1):

$$I_C = I_{Снас} * \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ0}}\right)^2 \quad (1)$$

Приведённое выражение является приближённым для характеристики передачи любого полевого транзистора.

Для измерения тока стока по представленной схеме необходимо сделать гальваническую развязку источников напряжения и измерителя тока. В данной работе для развязки напряжений питания был использован двухтактный импульсный преобразователь, управляемый микроконтроллером, для развязки логических сигналов – оптопары.

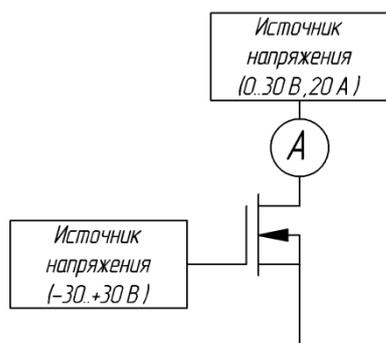


Рис. 2. Схема измерения порогового напряжения, крутизны характеристики и активной составляющей выходной проводимости.

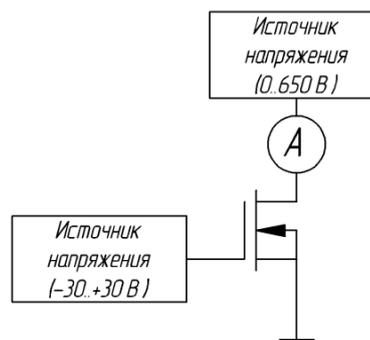


Рис. 3. Схема измерение тока стока.

На рис. 2 представлена схема включения n-канального полевого транзистора при измерении порогового напряжения, крутизны характеристики и активной составляющей выходной проводимости. Методика измерения порогового напряжения заключается в последовательной подаче различных значений напряжения на затвор и одновременном измерении тока стока. Напряжение, при котором ток стока превысит значение, заданное в нормах измерений, будет пороговым.

Одной из наиболее важных характеристик, определяющих быстродействие полевого транзистора, является крутизна характеристики. Вычисляется она по формуле (2):

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зп}} \quad (2)$$

при $U_{си} = \text{const}$, где $\Delta I_c = I_{с2} - I_{с1}$, $\Delta U_{зп} = U_{зп2} - U_{зп1}$. Таким образом, этот параметр характеризуется изменением тока стока при единичном увеличении напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке.

Измерение тока утечки затвора производится по схеме, представленной на рис. 4. При измерении малых токов практически у всех полупроводниковых приборов возникают определённые трудности. Значения таких параметров могут быть сравнимы с токами утечки, присутствующими на печатной плате (до нескольких нА) и меняться в зависимости от температуры и влажности окружающей среды. Также на показания измерений отрицательно воздействуют наводки от внешних полей. Для уменьшения влияния этих факторов, плата измерителя тока должна быть помещена в экранируемый корпус и изолирована от воздействия влаги.

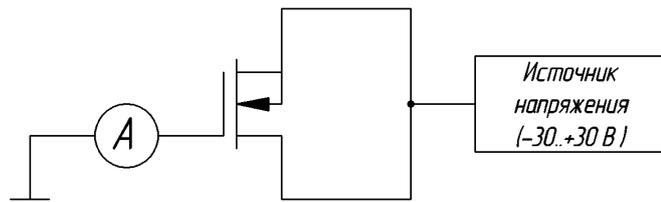


Рис. 4. Схема измерения тока утечки затвора.

Методика измерения сопротивления канала заключается в измерении падения напряжения сток-исток при заданном токе стока (рис. 5). Для реализации такой схемы необходим программируемый генератор тока с большим диапазоном задаваемых значений (в данном случае его величина может находиться в пределах от 0.01А до 50А).

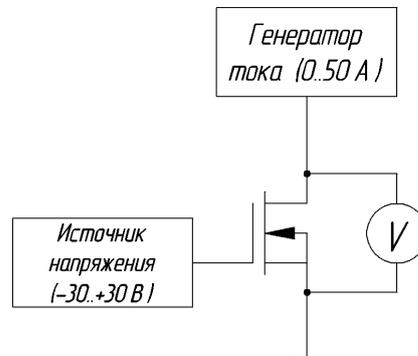


Рис. 5. Схема измерения сопротивления канала.

На основе проведённых исследований на рис. 6 представлена структурная схема реализации автоматизированного измерительного комплекса.

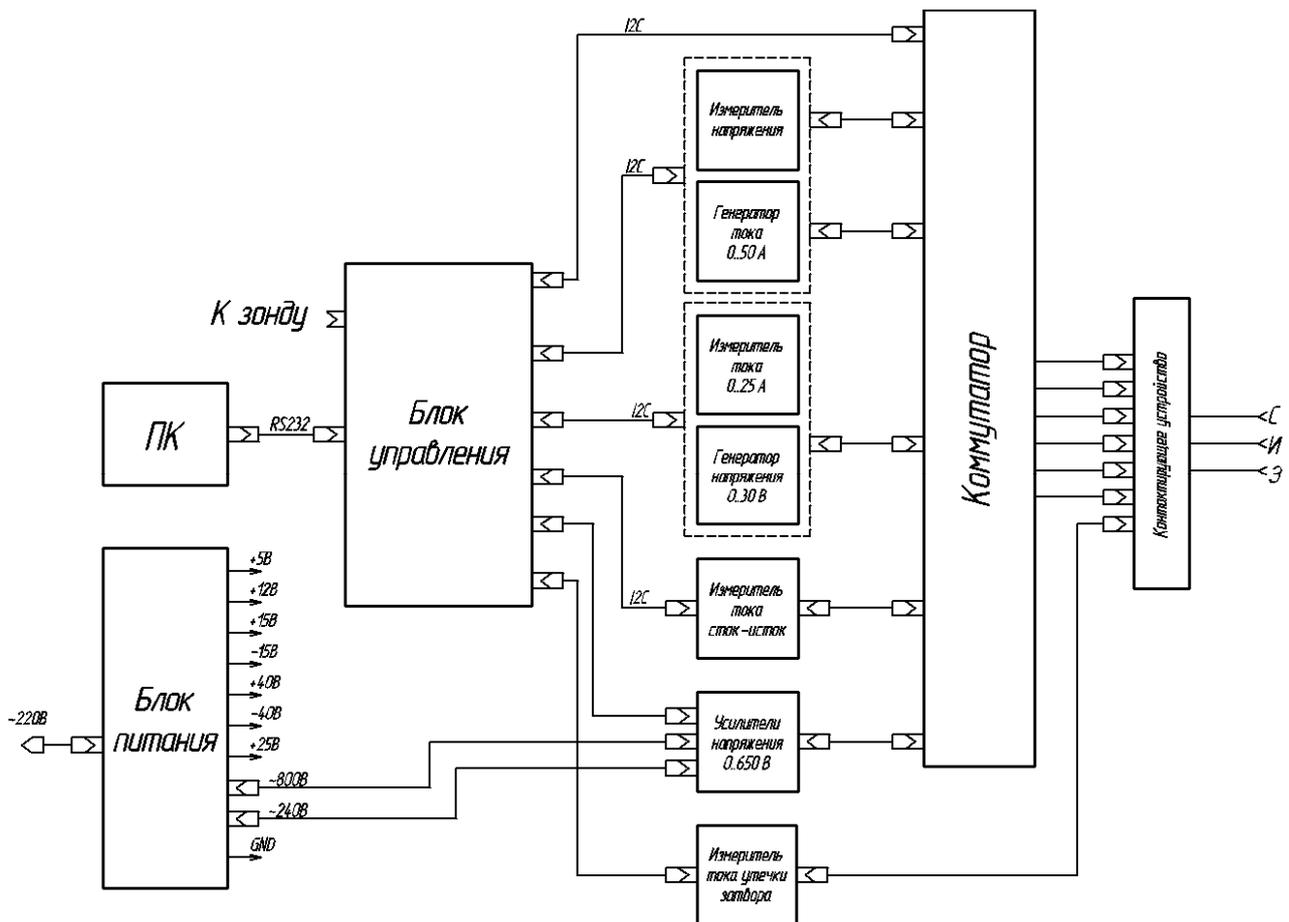


Рис. 6. Структурная схема измерительного комплекса для автоматизированного контроля статических параметров n-канальных полевых транзисторов

Данный комплекс даёт возможность автоматизированного контроля статических параметров полевых транзисторов, как на пластинах, так и на приборах в корпусах.

Литература

1. ГОСТ 20398.XX – «Комплекс стандартов на методы измерения параметров полевых транзисторов».
2. Аронов В. Л., Федотов Я.А.: «Испытание и исследование полупроводниковых приборов.» – Учебн. Пособие для специальностей полупроводниковой техники вузов – М., «Высш. школа», 1975 – 325с.
3. Титце У., Шенк К.: «Полупроводниковая схемотехника: в 2 т.: пер. с нем. – Т.1.»-М.: Додэка-XXI, 2008. – 832с.
4. Хоровиц П., Хилл У.: «Искусство схемотехники» - Изд. 7-е. – М.: Мир, БИНОМ. – 2099. – 704с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННЫХ МОДУЛЕЙ RFID-СИСТЕМ

Смолина А.С.

Научный руководитель: чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., заведующий каф. ИУ4 Шахнов В.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, каф. ИУ4, Москва, РФ

RESEARCH OF RFID-SYSTEMS' ANTENNA MODULES

Smolina A.

Research supervisor: RAS corr. member, d.t.s., Prof., chief of IU4 department Shakhnov V.A.
BMSTU, Moscow, RF

Аннотация

В данной работе рассмотрена классификация RFID-систем по частотному диапазону, в результате которой были выбраны СВЧ RFID-системы, и в качестве примера реализации такой системы предложена конструкция микрополосковой антенны.

Abstract

This article is devoted to consideration of RFID's classification according to a frequency span, as a result of which there were selected the UHF RFID-systems and as an example there was considered a microstrip antenna.

Введение

В настоящее время все чаще и чаще применяются системы радиочастотной идентификации в самых различных областях повседневной жизни. Поэтому также актуален и вопрос реализации антенного модуля такой системы.

1. RFID-системы

RFID (*Radio Frequency Identification*, радиочастотная идентификация) — метод автоматической бесконтактной идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках.

На сегодняшний день RFID-системы находят применение в самых разнообразных случаях, где необходим точный контроль, отслеживание и учет перемещений различных объектов. Типичные области применения:

- управление производством, товарными и таможенными складами, магазинами, выдачей и перемещением товаров и материальных ценностей;
- электронный контроль доступа и перемещений персонала на территории предприятий;
- автоматический сбор на железных дорогах, платных автомобильных дорогах, станциях, терминалах;
- контроль, планирование и управление движением, интенсивностью графика и выбором оптимальных маршрутов;
- общественный транспорт: управление движением, оплата проезда и оптимизация пассажиропотоков;
- системы электронных платежей;
- обеспечение безопасности.

Для дальнейшего расширения спектра применений RFID необходимо обеспечить высокий технический уровень исполнения, малые габариты и низкую стоимость, совершенствование уровня разработки и производства аппаратуры [2].

Любая RFID-система состоит из считывающего устройства (считыватель, ридер или интеррогатор) и транспондера (он же RFID-метка, иногда также применяется термин RFID-тег). Большинство RFID-меток состоит из двух частей. Первая — интегральная схема (ИС) для хранения и обработки информации, модулирования и демодулирования радиочастотного (RF) сигнала и некоторых других функций. Вторая — антенна для приёма и передачи сигнала.

В RFID используются радиоволны, обычно находящиеся в диапазоне частот от 30 кГц до 5,8 ГГц [1]. Область применения RFID-систем, зависит от диапазона частот. Классификация типов частот RFID представлена на рис.1

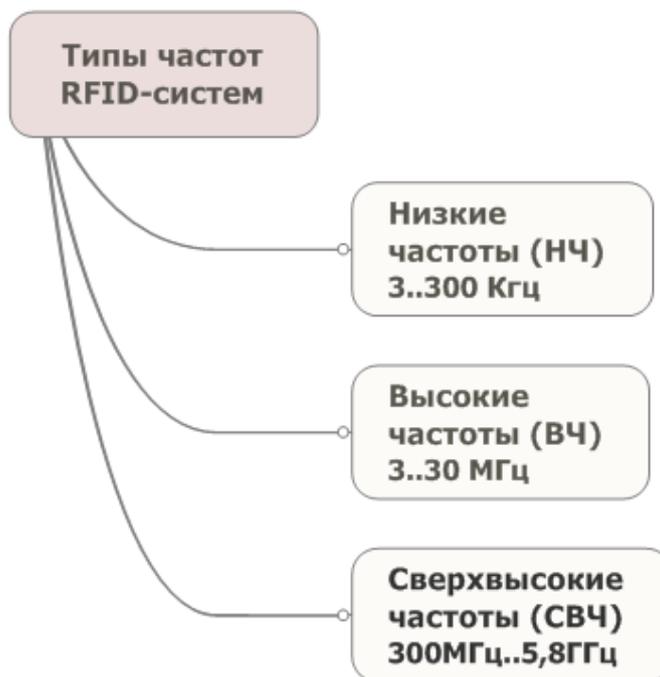


Рис.1. Классификация RFID-систем по типам частот.

В табл.1 [3] показана условная зависимость параметров, влияющих на работу антенны, от частотного диапазона.

Табл.1. Зависимость различных параметров от частоты

Частота	Размеры антенны	Отражение радиоволн от поверхности	Потребление энергии	Зависимость передачи данных от температуры
КГц	Большие	Слабое	Большое	Слабая
ГГц	Малые	Сильное	Малое	Сильная

С целью миниатюризации размеров антенного модуля RFID-систем, а также увеличения дальности действия RFID-метки, логично выбрать сверхвысокочастотный диапазон. В СВЧ RFID-системах по сравнению с НЧ и ВЧ ниже стоимость меток, при этом выше стоимость прочего оборудования.

СВЧ-диапазон представляет большой интерес ввиду того, что при существующих нормах на уровень мощности излучения в данном диапазоне на пассивных идентификаторах достигаются дальности до 4..8 м, что очень важно, например, для складских приложений. В этом диапазоне доминируют два стандарта ISO 18000 и EPC.

2. Антенны для СВЧ-диапазона

В системах RFID с электромагнитной связью, работающих в СВЧ-диапазоне, применяются следующие основные типы антенн:

- антенна-вибратор;
- антенна типа «волновой канал»;
- микрополосковая антенна;
- щелевая антенна.

Параметры антенн не зависят от того, используются ли антенны для передачи или для приема (принцип взаимности). Если известны свойства антенны при использовании ее для передачи, то эти свойства позволяют полностью оценить ее как приемную, и наоборот.

К основным параметрам антенн относят:

- диаграмма направленности;
- входное сопротивление;
- коэффициент направленного действия;
- коэффициент полезного действия;
- коэффициент усиления;
- действующая длина (высота);
- ширина полосы пропускания.

В качестве примера можно рассмотреть микрополосковые антенны. Их можно найти во многих современных коммуникационных устройствах. Например, они используются в самых последних поколениях GPS-приемников и мобильных телефонов, которые становятся всё миниатюрнее. Благодаря особой конструктивной форме микрополосковые антенны предоставляют также определенные преимущества для систем RFID.

В своём простейшем виде микрополосковая антенна строится на основе печатной платы (например, из фторопласта для более высоких частот), покрытой металлизационным слоем с обеих сторон, из которых одна сторона (нижняя) выполняет функции «земли». На верхней стороне формируется прямоугольная площадка, на которую подается СВЧ питание либо с помощью микрополосковой линии на той же стороне (рис.2) [4], либо с помощью фидера через отверстие в основной плате, либо с помощью промежуточной подложки, используя емкостную связь.

Длина S_A прямоугольной площадки определяет резонансную частоту антенны. При условии $h_{\Pi} \ll \lambda$:

$$S_A = \frac{\lambda}{2} - h_{\Pi}, \quad \text{м} \quad (1)$$

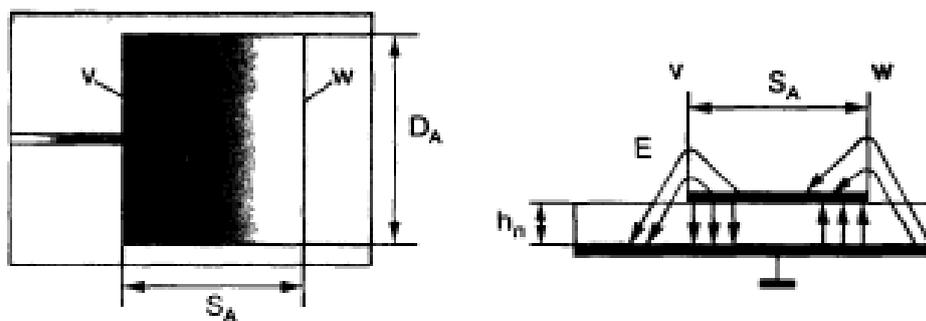


Рис. 2. Функциональная схема микрополосковой антенны.

Обычно толщина подложки h_{Π} равна 1-2 % от длины волны, то есть $h_{\Pi} \ll S_A$. Ширина D_A слабо влияет на резонансную частоту антенны, но определяет сопротивление излучения R_{Σ} антенны. При $D_A < \lambda/2$ сопротивление излучения, как ключевой параметр, отвечающий за рассеиваемую мощность определяется формулой (1):

$$R_{\Sigma} = \frac{90}{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + (\epsilon_r - 1) \sqrt{4 + \frac{48 \cdot h_{\Pi}}{D_A}}} \cdot \left(\frac{\lambda}{D_A}\right)^2, \quad \text{Ом} \quad (2)$$

При $D_A > 3\lambda/2$:

$$R_{\Sigma} = \frac{120}{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + (\epsilon_r - 1) \sqrt{4 + \frac{48 \cdot h_{\Pi}}{D_A}}} \cdot \frac{\lambda}{D_A}, \quad \text{Ом} \quad (3)$$

Если микрополосковая антенна работает на своей резонансной частоте, разность фаз между кромками v и w прямоугольной площадки равно точно 180° . На рис. 2 показаны траектории силовых линий электрического поля. На входной и выходной кромках этой прямоугольной площадки силовые линии поля находятся в фазе. Соответственно кромки v и w ведут себя подобно двум синфазным антеннам. Поляризация антенны линейна и параллельна продольной кромке S_A .

При соответствующем способе подачи энергии, микрополосковые антенны можно также использовать с круговой поляризацией. Чтобы генерировать электромагнитные волны с круговой поляризацией, на излучающий элемент должны быть поданы сигналы с фазовым сдвигом на 90° .

Соединение микрополосковых элементов в группы позволяет увеличить направленное действие и коэффициент усиления антенны. Чтобы сформировать групповую микрополосковую антенну, можно объединить отдельные излучающие элементы (рис.3).

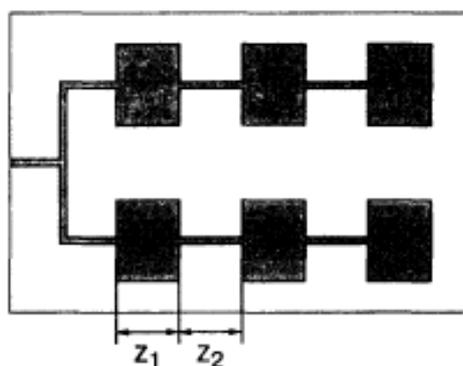


Рис.3. Соединение микрополосковых элементов в группы.

В результате такого объединения возрастает усиление по сравнению с отдельным элементом. Схема расположения элементов, показанная на рис. 3, включает в себя синфазно возбуждаемые элементы излучения. Микрополосковые элементы длиной $z_1 = \lambda/2 - h_{\text{П}}$ запитываются через узкие соединительные полоски длиной $z_2 = \lambda/2 - h_{\text{П}}$, которые соединяются последовательно. В результате поперечные кромки v-v или w-w каждого микрополоскового элемента отстоят точно на расстоянии, равно длине волны λ .

Таким образом, гарантируется синфазное питание отдельных элементов. Это устройство поляризуется в направлении отрезков соединительных полосок.

При использовании технологии травления печатных плат производство микрополосковых антенн получается недорогим и с высоким уровнем воспроизводимости.

Для наглядности можно рассмотреть микрополосковую антенну, работающую в воздухе на частоте 2,45 ГГц, расположенной на кремниевой подложке. Согласно формуле (2), сопротивление излучения получится равным 25 Ом. Одиночный элемент обладает слабой направленностью, диаграмма направленности в горизонтальной плоскости аппроксимируется зависимостью вида: $G = \cos \theta$. Интенсивность излучения определяется по формуле:

$$S = \frac{P \cdot G}{4\pi r^2}, \text{ Вт/м}^2$$

Тогда зависимость интенсивности от расстояния может быть представлена на рис. 4 построенным в Mathcad графиком (для случая, когда рассматривается один элемент, коэффициент направленного действия антенны $G=1$).

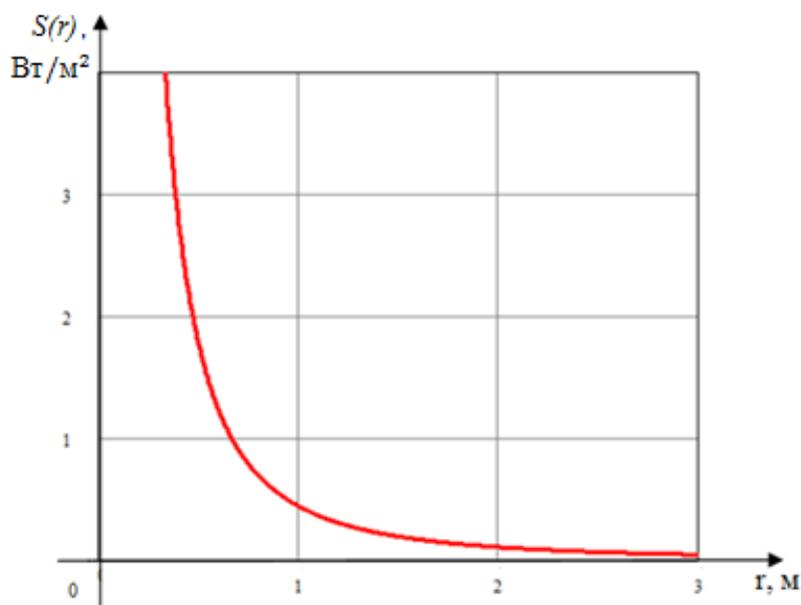


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от расстояния $S(r)$.

В системе Comsol можно смоделировать распространение магнитных полей антенны в пространстве. На рис. 5 представлен пример взаимодействия RFID-метки и её считывателя.

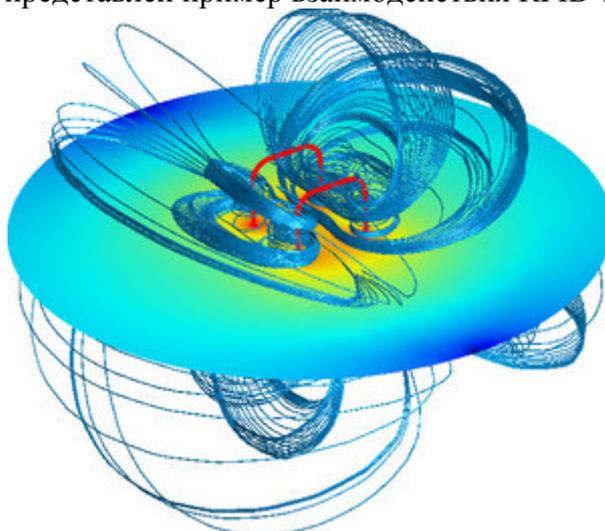


Рис. 5. Модель RFID-системы [5].

Выводы

В данной работе были рассмотрены антенны, применяющихся в СВЧ RFID-системах. В качестве примера была представлена микрополосковая антенна, для которой в системе Mathcad был построен график зависимости интенсивности излучения от расстояния $S(r)$ (рис.4), анализируя который, можно сделать вывод о том, что на расстоянии 1 м RFID-метка читаема, следовательно, применение микрополосковых антенн в RFID-системах оправдывает себя.

Литература

1. Лахири С. RFID. Руководство по внедрению. Кудиц-Пресс, Москва, 2007.
2. Т. Шарфельд. Системы RFID низкой стоимости. Москва, 2006
3. Барсуков В.С. «RFID или не RFID? Вот в чём вопрос». Журнал «Специальная техника», 2005.
4. Дшхунян В.Л., Шаньгин В.Ф. Электронная идентификация, NT Press, Москва, 2004.
5. Model of an RFID System // <http://www.comsol.com/showroom/gallery/1264/>

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ЗОНДОВОЙ СТАНЦИИ

Гарифулина М.Р.

к.т.н, доцент Макаrchук В.В.

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

METHOD OF MEASURING SEMICONDUCTOR STRUCTURES USING PROBE STATION

Garifulina M.R.

c.t.s., associate prof. Makarchuk V.V.

BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

При создании новых элементов электроники необходимо проводить контроль их электрических параметров. Осуществлять контроль элементов микроэлектроники можно с использованием специализированного контрольного оборудования, в основе которого находится зондовая станция. При снятии измерений, необходимо помнить, что полученные данные могут содержать ошибки различной природы. Поэтому, необходимо осуществлять последующую обработку полученной информации, которую возможно сделать с помощью различных математических методов, среди которых наиболее популярным является метод наименьших квадратов.

Abstract

Create new electronics components associated with control of their electrical parameters. Control elements of microelectronics can be using specialized monitoring equipment, based on which the probe station. With the withdrawal of measurements, it must be remembered that the received data may contain errors of various nature. Therefore, it is necessary to follow the processing of information received. This can be done using various mathematical methods, among which the most popular is the method of least squares.

Введение

Тестовая структура — это гетероструктура, формируемая на полупроводниковой пластине, используемая в процессе тестового контроля микросхем на производстве. Тестовым кристаллом называют совокупность различных тестовых структур, сформированных в определённой области рабочей пластины параллельно с кристаллами производимых микросхем. Тестовые структуры должны иметь определённое сходство с рабочими компонентами интегральных схем (ИС), чтобы объективно отражать их свойства. Все тестовые структуры имеют большое число конструкторских, топологических и схемотехнических исполнений.

Тестовые структуры классифицируют по назначению: параметрические, функциональные. Параметрические тестовые структуры предназначены для исследования физических параметров компонентов ИС, таких как геометрические размеры топологических элементов, удельное поверхностное сопротивление слоёв, качество металлизации. Конструктивно такие тестовые структуры могут быть выполнены в виде различных поверхностных резисторов, встречно-штыревых линий либо группы контактов. Функциональные тестовые структуры предназначены для исследования функциональности или контроля работоспособности ИС после прохождения всех технологических операций. Конструктивно функциональные тестовые структуры могут быть выполнены в виде транзисторов, кольцевых генераторов, различных логических элементов; позволяют контролировать скорость рекомбинации и время жизни носителей заряда, профиль распределения примесей, динамические характеристики прибора.

Состав измерительного комплекса

Измерение электрических параметров тестовых структур осуществляется с помощью измерительного комплекса (рисунок 1).



Рис.1. Состав измерительного комплекса.

В состав измерительного комплекса (рисунок 1) входит зондовая станция 6, с помощью которой производятся измерения. Топология тестовой структуры наблюдается на мониторе 7. Электрические параметры измеряются с помощью вольтметра, амперметра и мультиметра. Данные передаются на персональный компьютер, где проходят дополнительную обработку обрабатываются.

Зондовая станция

Зондовая станция является основным элементом в измерительном комплексе для контроля электрических параметров. Зондовая станция (рисунок 2) позволяет снять измерения характеристик малых объектов на интегральных схемах, полупроводниковых пластин, электромеханических системах, электрооптических устройств, оптических структур.

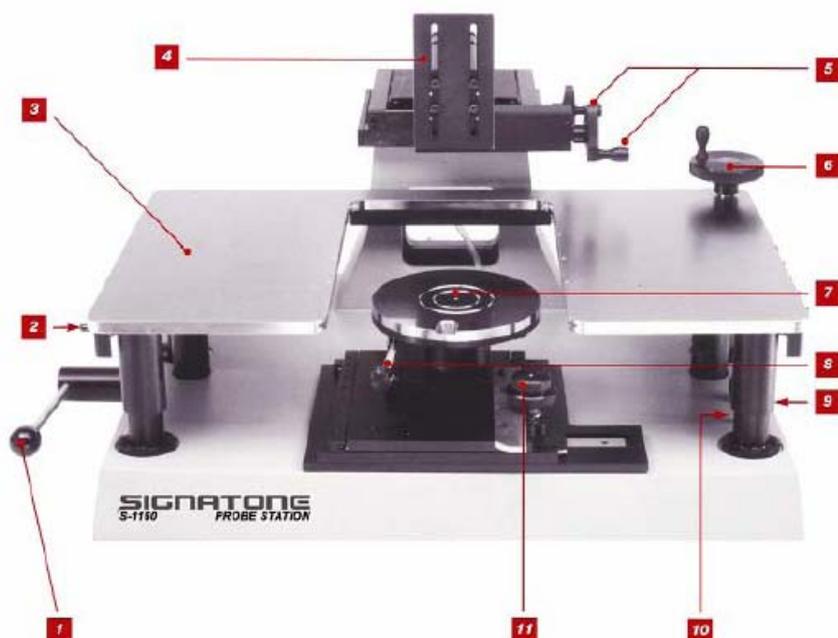


Рис.2. Структурная схема зондовой станции Signatone S1160.

(1 — Рычаг для линейного вертикального перемещения, 2 — Вакуумные порты и соединения с сигналом, 3 — Большая стальная подвижная плоская рабочая поверхность (стол), 4 — Местоположение микроскопа, 5 — Рычаги для перемещения микроскопа по X и Y осям, 6 — Плавная регулировка подвижной плоской рабочей поверхности (стола), 7 — Вакуумный держатель, 8 — Рычаг для вращения, 9 — Рукоятка вакуумного регулятора тяги, 10 — Вакуумный переключатель, 11 — Рукоятки для контроля передвижения вакуумного держателя по X и Y осям).

Маршрут выполнения эксперимента

Обобщенный маршрут эксперимента можно представить следующим образом:

1. Установить образца.
 - 1.1. Располагаем образец в середине поверхности держателя и регулируем высоту стола и микроскопа таким образом, что конец зонда находится немного выше образца. Регулировка производится в 2 этапа: с помощью рычага для линейного вертикального перемещения 1 — грубое перемещение, с помощью плавной регулировки стола 6.
 - 1.2. Включаем вакуумный переключатель 10.
2. Найти нужный элемент и подвести зонды.
 - 2.1. Наводим микроскоп с помощью рычагов для перемещения микроскопа по X и Y осям 5 на интересующее нас место на образце.
 - 2.2. Повернем микроскоп с меньшим увеличением. С помощью грубого перемещения перенести конец зонда в центр поля зрения. Микроскоп также должен находиться в середине.
 - 2.3. Опускаем конец зонда до того, пока расстояние между ним и образцом не будет мало и его можно будет увидеть только при большем увеличении.
 - 2.4. Увеличим коэффициент увеличения, заменив линзу (осуществляется поворотом).

Повторяем пункт 2.3 по тех пор пока зондовый конец не будет виден в требуемом увеличении, тогда аккуратно переместим конец зонда в область, которая нас интересует, и опустим, чтобы произвести контакт. Контакт может быть установлен, когда конец зонда начинает скользить в сторону.

Таким образом, подводим необходимое нам для исследования количество зондов и снимаем электрические параметры.

Обработка сигнала производится с помощью программной среды LabView.

Метод наименьших квадратов

Метод конечных элементов используется для оценки неизвестных величин по результатам измерений, содержащим случайные ошибки. Метод конечных элементов применяется также для приближённого представления заданной функции другими (более простыми) функциями и оказывается полезным при наблюдений обработке. Метод наименьших квадратов является самым точным и наиболее строгим способом построения на плоскости наилучшей прямой, прямой корреляции, по некоторой группе точек. Правило методы наименьших квадратов заключается в следующем: наилучшая линия, проходящая через множество точек, находящихся на плоскости, должна занимать положение, при котором сумма квадратов отклонений точек от этой линии минимальна.

В результате измерений получен ряд значений, где величина Y зависит от X :

$$X_1, X_2, X_3 \dots X_i \dots X_n;$$

$$Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_i \dots Y_n.$$

По данным эксперимента строится график зависимости $Y=f(X)$.

Введем непрерывную функцию $F(X)$ для аппроксимации дискретной зависимости $f(X)$:

$$F(X)=aX+b \quad (1),$$

где a, b – коэффициенты, которые требуется найти.

Составим величину φ – сумму квадратов отклонений полученных точек от прямой:

$$\varphi = \sum (Y_i - F(X_i))^2 \quad (2).$$

Величина φ всегда положительна и оказывается тем меньше, чем ближе к прямой лежат полученные в эксперименте точки.

С учетом формулы (1) φ имеет вид:

$$\varphi = \sum (Y_i - aX_i - b)^2 \quad (3).$$

Дифференцируя φ , получим:

$$b = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}) y_i]}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4);$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (5).$$

Среднеквадратичные ошибки определения a и b равны:

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum (y_i - bx_i - a)^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6);$$

$$S_a = \sqrt{\left(\frac{\sum (y_i - bx_i - a)^2}{n-2} \right) \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)} \quad (7).$$

Обработка измерений методом наименьших квадратов

На рисунке 3 изображена схема для расчета вольт-амперной характеристики. Резистор $R1$ является нагрузкой. Через источник питания подается напряжение U . Значение напряжения питания изменяется от 0 до 16 В с шагом 0,2 В. С помощью амперметра получен ток базы. С помощью вольтметра $V1$ происходит контроль напряжения, подаваемого на базу транзистора $VT1$. Напряжения на эмиттере транзистора получено с помощью вольтметра $V2$.

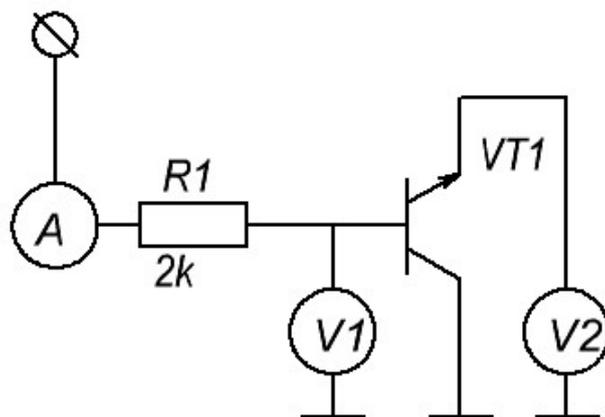


Рис.3. Схема для расчета вольт-амперной характеристики.

Была получена зависимость тока базы от напряжения эмиттера – ВАХ р-п перехода. Измеренные значения тока и напряжения показаны в таблице 1.

Таблица 1. Данные токов и напряжений, полученные в ходе эксперимента.

I, mA	U2, B	I, mA	U2, B	I, mA	U2, B
0	0	2,2	0,86	4,9	0,94
0	0,2	2,3	0,86	5	0,94
0	0,4	2,4	0,86	5,1	0,94
0,1	0,53	2,5	0,87	5,2	0,95
0,1	0,64	2,6	0,87	5,2	0,95
0,2	0,69	2,7	0,87	5,3	0,95
0,3	0,71	2,8	0,88	5,4	0,95
0,4	0,72	2,9	0,88	5,8	0,95
0,5	0,74	3	0,88	5,9	0,96
0,6	0,75	3,1	0,89	6	0,96
0,7	0,76	3,3	0,89	6	0,96
0,8	0,77	3,3	0,89	6	0,96
0,8	0,77	3,4	0,9	6,1	0,96
0,9	0,78	3,5	0,9	6,2	0,97
1	0,79	3,7	0,9	6,3	0,97
1,1	0,8	3,8	0,91	6,4	0,97
1,2	0,8	3,9	0,91	6,5	0,97
1,3	0,81	3,9	0,91	6,6	0,98
1,3	0,81	4,1	0,91	6,7	0,98
1,5	0,82	4,1	0,92	6,9	0,98
1,6	0,83	4,2	0,92	7	0,98
1,7	0,83	4,4	0,92	7	0,98
1,8	0,84	4,4	0,93	7,1	0,99
1,9	0,84	4,5	0,93	7,1	0,99
2	0,84	4,8	0,93	7,2	0,99
2,1	0,85	4,9	0,93	7,4	0,99
2,1	0,85	4,9	0,94	7,5	1

Данные значения обработаны с помощью программы, созданной в программной среде LabView. Полученная зависимость тока через р-п переход от напряжения, приложенного к нему, показана на рисунке 4.

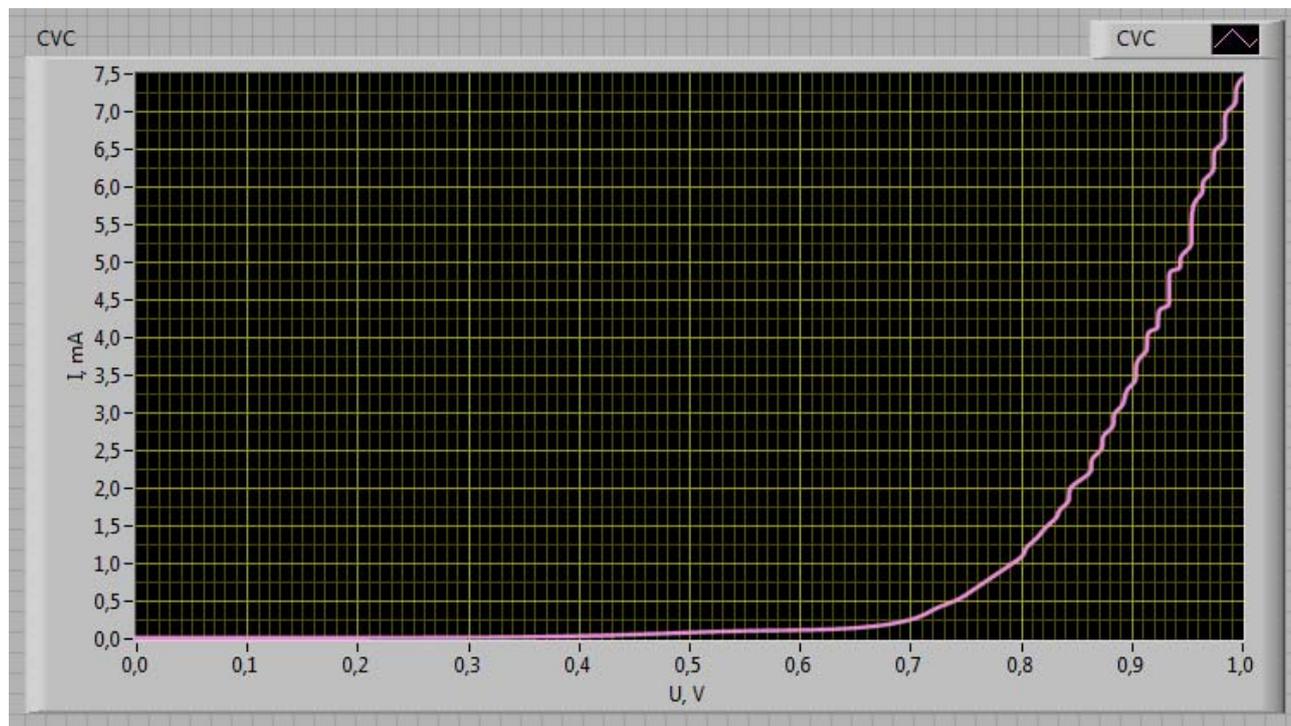


Рис.4. ВАХ р-п перехода в программной среде LabView.

Литература

1. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. - М.: Изд-во «Мир», 1972.
2. Агеева Т.И., Афонин А.М., Власов А.И. и др. Информационные технологии в инженерном образовании / Под ред. С.В.Коршунова, В.Н.Гузненкова. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007. - 432 с.

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Косолапов И.А.

Научный руководитель: д.т.н., профессор, Зинченко Л.А.

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

MULTISCALE MODELING OF OPTICAL MICROMECHANICAL SYSTEMS

Kosolapov I.A.

Supervisor: Dr., Prof., Zinchenko L.A.

MSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В докладе рассматриваются некоторые подходы к многомасштабному моделированию сложных микрооптомеханических систем. Предложен иерархический подход к многомасштабному моделированию микрооптомеханических систем. Обсуждаются различные способы взаимосвязи между подсистемами различной физической природы.

Die Inhaltsangabe

Der Bericht beschreibt einige Ansätze für Multiskalen Modellierung komplexer Systeme mikrooptomechanischer. Ein hierarchischer Ansatz zur Modellierung mnogomashtabnomu mikrooptomechanischer Systeme. Wir diskutieren verschiedene Möglichkeiten, das Verhältnis zwischen den Teilsystemen unterschiedlicher physikalischer Natur.

Введение

Под многомасштабным моделированием [6] понимается процесс моделирования поведения исследуемой структуры на различных уровнях ее иерархического представления. При этом исследуемая система разбивается на более мелкие подсистемы, вплоть до элементарных составляющих, каждая из которых проходит стадию моделирования.

В докладе рассматриваются некоторые подходы к многомасштабному моделированию микрооптомеханических систем. Основное внимание сосредоточено на решении следующих задачи: исследование методов моделирования микрооптомеханических систем, изучение особенностей моделирования отдельных компонентов микрооптомеханических систем, изучение методов переходов между подсистемами различной природы, разработке и исследованию эффективных методов моделирования микрооптомеханических систем на основе многомасштабного подхода [2,4].

Подходы к моделированию микрооптомеханических систем

В настоящее время инструментальные средства САПР предоставляют значительные возможности для проведения многомасштабного моделирования микрооптомеханических систем. Данный этап позволяет снизить общие затраты на экспериментальные исследования, а так же провести моделирование и тестирование устройства при различных вариациях входных параметров. Процесс моделирования дает возможность оценить работоспособность не только всего устройства в целом, но и отдельных узлов и элементов при различных нагрузках.

На рисунке 1 приведен пример типичной последовательности этапов разработки микрооптомеханического акселерометра [4]. На первом этапе разработана конструкция, выявлены недостатки конструкции, произведена доработка конструкции. На следующем этапе построена трехмерная физическая модель микрооптомеханического акселерометра. Проведено моделирование нагрузок на чувствительные элементы, моделирование деформаций с использованием различных материалов, в частности германия и кремния. На

последнем этапе создан макет микрооптомеханического акселерометра, отражающий конструктивные особенности.

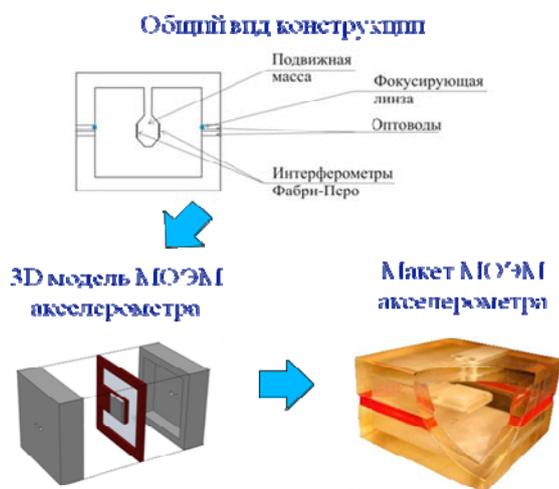


Рис.1. Этапы создания микрооптомеханического акселерометра.

Существует несколько подходов к процессу моделирования [1-3]:

1) Моделирование «сверху вниз» - процесс моделирования разбивается на этапы, каждый этап осуществляет моделирование все более мелких узлов, вплоть до составляющих элементов. Недостатком является невозможность оценки влияния элементов и простейших узлов на работу всего устройства в целом ;

2) Моделирование «снизу вверх» - каждый этап данного процесса моделирования производит укрупнение моделируемых узлов и элементов в них входящих. Несомненным преимуществом является то, что происходит моделирование поведения самых простых элементов устройства, которые затем компонуется в более сложные узлы, в свою очередь составляющие конечное устройство. Это позволяет определить и с достаточной точностью оценить влияние каждого элемента на работоспособность всей системы в целом.

Оптическая подсистема является важным компонентом микрооптомеханических систем. Интерферометр является основным объектом моделирования и выступает составной частью оптической подсистемы. На рисунке 2 представлена структура интерферометра Фабри-Перо.

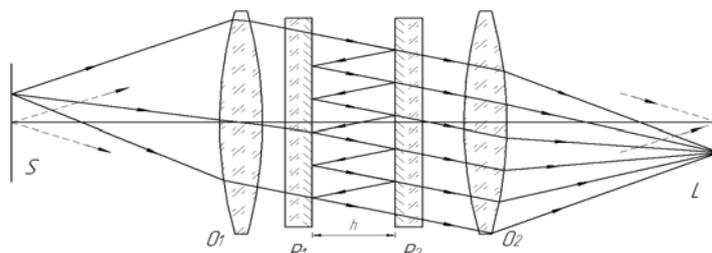


Рис.2. Структура интерферометра Фабри-Перо.

Математическая модель интерферометра [4] определяется следующим образом:

$$I = I_0 \frac{R_0 + F \sin \eta \left[R_1 \sin \eta - \frac{\rho_1 \tau_1 \tau_1'}{\rho_1} \sin(\eta + 2\eta_0) \right]}{1 + F \sin^2 \eta} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n t \cos \theta' \quad (2)$$

$$\tau_1 \tau_2' = \sqrt{T_1 T_2'} = T, \rho_1 \rho_2' = \sqrt{R_1 R_2'} = R \text{ и } \alpha_1' + \alpha_2' = \alpha \quad (3)$$

$$I = I_0 \frac{T_1 T_2'}{(1 - \rho_1' \rho_2') + 4\rho_1' \rho_2' \sin^2(\frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \delta}{2})} \quad (4)$$

$$I = I_0 \frac{T^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\frac{\alpha + \delta}{2})} \quad (5)$$

В качестве математической модели механической подсистемы выбрана система ДУ в частных производных. Для ее решения использован метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [5].

Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции (в физической интерпретации - температуры, давления, перемещения и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами. Исследуемая геометрическая область разбивается на элементы таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная функция аппроксимировалась пробной функцией (как правило, полиномом). Причем эти пробные функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей. Выбор для каждого элемента аппроксимирующей функции будет определять соответствующий тип элемента [5].

В данной работе рассматривается метод конечных элементов в формулировке, основанной на процедуре минимизации функционала, соответствующего решаемой непрерывной задаче [1]. В результате выполнения указанной процедуры происходит замещение уравнения или системы уравнений в частных производных системой недифференциальных уравнений, имеющих в качестве коэффициентов аппроксимирующие функции, которые фактически являются значениями искомой функции в вершинах разбиения.

Наиболее распространёнными вычислительными системами, основанными на методе конечных элементов являются:

1. ANSYS — универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором;
2. MSC.Nastran — универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором MSC.Patran;
3. ABAQUS — универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором;
4. Impact — универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором;
5. NEiNastran — универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором FEMAP;
6. NXNastran — универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором FEMAP;
7. SAMCEF — универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором SAMCEF Field.
8. Temper-3D — система КЭ анализа для расчёта температурных полей в трёхмерных конструкциях (теплотехнический расчёт).
9. COMSOL Multiphysics — универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором.
10. NX Nastran — универсальная система МКЭ анализа.

Для решения задачи моделирования выбран программный пакет ANSYS. Данный программный пакет удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) Доступность;
- 2) Возможность моделирования сложных изотропных и анизотропных структур;
- 3) Возможность описания модели механической подсистемы на формальном языке описания VHDL-AMS.

Иерархический подход к многомасштабному моделированию микрооптомеханических систем

Иерархический подход основан на разбиении сложной системы на несколько подсистем. Таким образом, микрооптомеханическая система представляется механической и оптической подсистемами [2]. Каждую из подсистем следует представить в виде набора подсистем, каждая из которых выполняет определенную фиксированную функцию. У иерархического подхода можно выделить три основных метода:

1) Вертикальная декомпозиция – строго вертикальное расположение и подчинение подсистем (рисунок 3,а);

2) Право вмешательства – подсистемы верхнего уровня могут вмешиваться в принятие решений подсистем нижнего уровня (рисунок 3,б);

3) Выполнимость действий – выполнимость определенных действий подсистемами верхнего уровня непосредственно зависит от выполнения своих непосредственных функций подсистемами нижнего уровня (рисунок 3,в) [1,3].

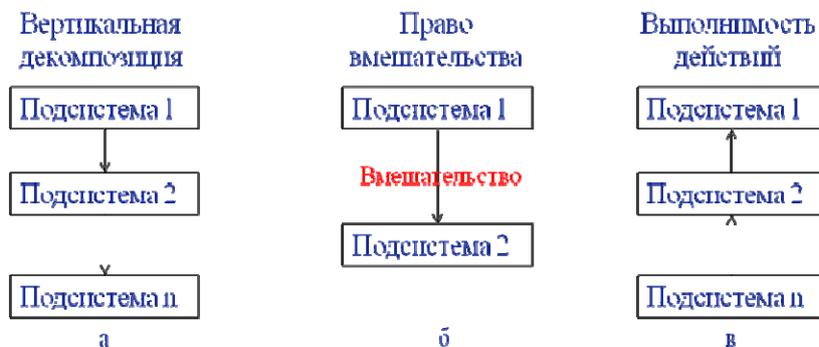


Рис.3. Основные свойства иерархического подхода.

Поскольку сложная система разбита на механическую и оптическую, то следует установить взаимосвязь и взаимное влияние данных подсистем друг на друга.

Для перехода между различными подсистемами использован метод макромоделей, реализованный в ANSYS и позволяющий получить макромоделю на языке VHDL-AMS.

Для моделирования на более высоком уровне иерархии использован программный комплекс MATLAB/Simulink, который дает возможность использовать готовые элементы для моделирования динамических систем. Предлагаемая структура взаимодействия оптической и механической подсистем с учетом иерархического подхода приведена на рисунке 4.

Заключение

Многомасштабное моделирование имеет большое значение при проектировании сложных микрооптомеханических систем. Иерархический подход, применяемый при многомасштабном моделировании, позволяет изучить поведение каждого элемента сложной системы.

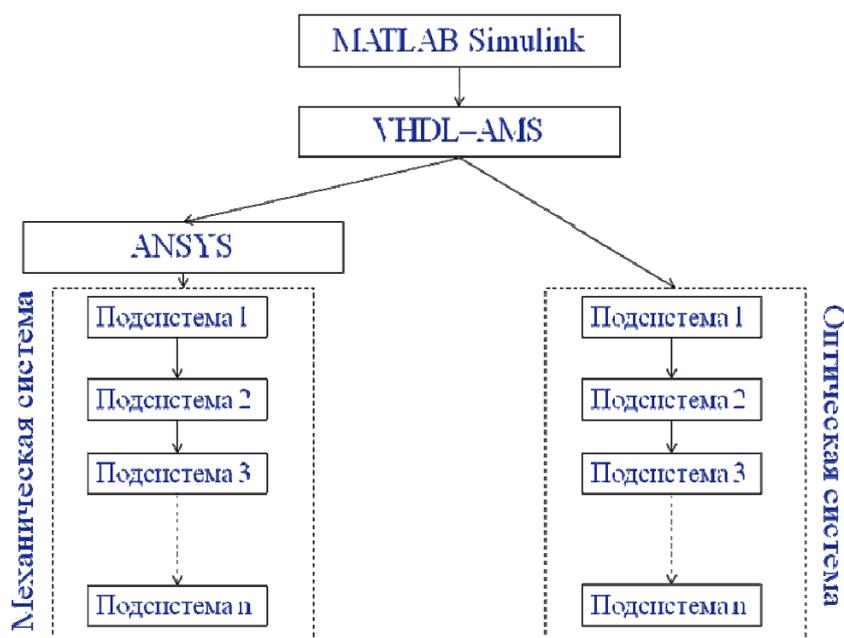


Рис.4. Взаимодействие подсистем различной физической природы.

Главным преимуществом данного подхода является возможность оценить влияние каждого отдельного элемента на работоспособность как микрооптомеханической системы в целом, так и оптической или механической подсистем, в составе которой и находится исследуемый элемент. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-07-00171-а).

Литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. — М: Наука, 1997. — 320 с.
2. Введение в математическое моделирование. Учебное пособие. Под ред. П. В. Трусова. — М.: Логос, 2004.
3. Мышкис А. Д., Элементы теории математических моделей. — 3-е изд., испр. — М.: КомКнига, 2007.
4. Косолапов И.А., Моделирование микроакселерометра на основе интерферометра Фабри-Перов САПР ANSYS, 9 молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы». — М.: МГТУ, 2009. — с.108-111.
5. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984
6. Шахнов В.А., Зинченко Л.А. Особенности математического моделирования в задачах проектирования наносистем. Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2009. с. 84-92.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АНИМАЦИИ

Иванов А.М., Ривкин А.М.

Научный руководитель: к.т.н., доцент, Журавлева Л.В.,
МГТУ им. Баумана, Москва, Российская Федерация

CONTROL SYSTEM OF WORKING OUT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ASSEMBLAGE OF PRODUCTS OF ELECTRONIC TECHNICS WITH USE OF MEANS OF ANIMATION

Ivanov A.M., Rivkin A.M.

Supervisor of studies: Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, Zhuravleva L.V.,
BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Работа посвящена описанию системы управления разработкой технологических процессов сборки изделий электронной техники с использованием средств анимации. Представлено описание процесса тестирования, адаптации и внедрения данной системы в процесс обучения. Проведен анализ целесообразности создания системы.

Annotation

Work is devoted describing of a control system by working out of technological processes of assemblage of products of electronic technics with use means of animation. The description of process of testing, adaptation and introduction of the given system is presented to studying process. The analysis of expediency of creation of system is carried out.

Система управления разработкой технологических процессов сборки изделий электронной техники представляет собой обучающее пособие по курсу «Технология производства электронных средств». Она содержит видеоматериалы, документы, необходимые для создания Технологического Процесса сборки электронных изделий, а так же вспомогательные справочные материалы по данной предметной области. В рамках работы с системой происходит обработка базового технологического процесса с целью получения комплекта технологической документации на заданный технологический процесс сборки электронных узлов. Кроме того, система предоставляет возможность разработки самого Технологического Процесса.

Последовательность этапов разработки технологических процессов в системе будет выглядеть следующим образом: анализ исходных данных, разработка комплекта технологической документации, разработка маршрутного технологического процесса, разработка операционного технологического процесса, разработка требований техники безопасности, оформление технологической документации.

Методы современного программирования требуют разбиения программных продуктов на модули в соответствии с выполняемыми ими конкретными задачами, причем модули по возможности должны быть независимы друг от друга. Это особенно важно при разработке крупных проектов, поскольку такое разбиение позволяет упростить процесс тестирования системы, поиска ошибок, обновления версий. Кроме того, если разработка программы ведется несколькими программистами, такое разбиение просто необходимо, поскольку позволяет им работать максимально независимо друг от друга, т.к. каждый работает только со «своим» модулем, и не должен знать тонкости работы других модулей, а только лишь интерфейс взаимодействия.



Рис.1. Интерфейс при просмотре анимационного ролика в Системе после авторизации под ролью студента.

Модуль авторизации пользователей в системе служит для входа пользователей в систему. В зависимости от выбранного типа пользователя (пользователь в группе, преподаватель, администратор) будет отображаться свой уникальный интерфейс пользователя для решаемых задач.

Модуль пользователей служит для добавления, удаления, изменения данных о пользователях в системе.

Модуль операций служит для добавления, изменения, удаления операций в разрабатываемом ТП сборки изделий электронной техники с использованием средств анимации. Данный список содержит полный перечень всех операций в требуемом порядке, который может быть найден в результате работы с системой пользователя.

Модуль переходов служит для составления перечня работ для любой операции. Формирование списка для работ, идентично формированию операций.

Модуль роликов предназначен для добавления, изменения, удаления роликов в системе. Каждый ролик визуализирует конкретную операцию в разрабатываемом ТП сборки изделий электронной техники.

Системные требования

1) Требования к стандартизации и унификации:

Система представляет графический интерфейс пользователю, описанный на HTML 4.0 в кодировке win-1251. Подготовленные страницы HTML должны быть составлены с учетом рекомендаций «HTML 4.01 Specification W3C Recommendation 24 December 1999» и достаточно для корректного отображения в браузерах Internet Explorer версии не ниже 6.0, Mozilla Firefox версии не ниже 1.51 и Opera версии не ниже 9.01b. Разработка прикладного программного обеспечения должна производиться на PHP(Zend) версии не ниже 5.1.6. Доступ к базе данных должен осуществляться средствами PHP. Интерфейс пользователей должен быть выполнен на HTML 4.0 в кодировке «Win-1251» с расширением CSS 2.0. Сценарии активизации HTML страниц интерфейса должны быть выполнены на языке JavaScript 1.3 в кодировке «Win-1251» с учетом расширений используемых пользовательскими программными агентами (браузерами). Размер одной HTML страницы интерфейса не должен превышать 256 Кбайт (без учета табличных и/или списочных данных). Общий размер файлов оформительского дизайна для одной страницы интерфейса не должен превышать 512 Кбайт.

2) Требования к эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и хранению компонентов системы:

Система должна обеспечивать непрерывный круглосуточный режим эксплуатации с учетом времени на техническое обслуживание. В помещениях, предназначенных для эксплуатации системы, должны отсутствовать агрессивные среды, массовая концентрация пыли в воздухе должна быть не более 0,75 мг/м³, электрическая составляющая электромагнитного поля помех не должна превышать 0,3 в/м в диапазоне частот от 0,15 до 300,00 МГц. Напряжение питания сети должно быть 220В ±10 %. 50 Гц. Требования по обеспечению пожарной безопасности и электробезопасности (заземление) в помещениях должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования», ГОСТ Р 50571.22-2000. «Электроустановки зданий. Часть 7. Требования к специальным электроустановкам. Раздел 707. Заземление оборудования обработки информации», «Правилами устройства электроустановок», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей». Климатические факторы помещения для эксплуатации изделий должны быть по ГОСТ 15150-69 (с изм. 2004) «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов.

3) Требования к программному обеспечению:

А. Требования к клиентской части:

Операционная система MS Windows 95/98/Me/2000/NT/XP/Vista или Unix-система.

Графический браузер с поддержкой JavaScript 1.3 (Jscript 1.3) и CSS2 (MS Internet Explorer версии не ниже 6.0, Mozilla Firefox версии не ниже 1.5.1, Opera версии не ниже 9.01b). Доступ к сети Internet или локальной сети кафедры ИУ4 (МГТУ).

Б. Требования к серверной части:

Операционная система Unix (Linux или FreeBSD), СУБД Oracle версии не ниже 10.1g., FTP-сервер, позволяющий размещать файлы системы на сервере, Поддержка PHP5., Сервер Apache 2.2.11.

Целесообразность системы

Эффективность разработанной системы оценена методом комплексного оценивания. Оценка эффективности методом комплексного оценивания показала, что ожидаемый прирост эффективности при использовании разработанной системы составит 57%. Данная система предназначена для обучения студентов, не обладающих определенным набором знаний, разрабатывать Технологические Процессы сборки изделий электронной техники. На данный момент она развернута и проходит тестирование на кафедре ИУ4 МГТУ им. Баумана.

Литература

1. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite – М. Диалог-МИФИ, 2003.
2. Кватрани Т. Визуальное моделирование с помощью Rational Rose 2002 и UML, - М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
3. Фаулер М., Кендалл С. UML. Основы, - СПб.: Символ-Плюс, 2002.
4. Ушакова С.Е., Сергеев В.С., Ключников А.В., Привалов В.П. Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры. Учеб. пособие для вузов, - М.: Радио и связь, 1986.
5. Гусев В.П. Технология радиоаппаратостроения. Учеб. пособие для вузов. М.: «Высшая школа», 1972.
6. Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / Под общ. Ред. В.А. Шахнова, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ

Шугайбова Н.А.

Научный руководитель проф., д.т.н., Назаров А.В.

МГТУ им. Баумана, кафедра Иу4, г. Москва, Россия.

THE FEATURES OF COMPUTER MODELING OF THE MUTUAL DIFFUSION IN TWO-COMPONENT MEDIUM

Shugaibova N.A.

The supervisor of studies prof. Nazarov A.V.

BMSTU, Moscow, Russia.

Аннотация

В данной работе рассмотрены особенности моделирования на ЭВМ взаимной диффузии двухкомпонентной среды. Разработан и испытан алгоритм моделирования диффузии в двухкомпонентной равнообъемной среде методом клеточного автомата. Также был разработан алгоритм моделирования диффузии в неравнообъемной среде методами статистической физики. Результаты данной работы будут применены для постановки лабораторной работы «Моделирование объектов «Среда-структура» по курсу «Математическое моделирование».

Annotation

In this work features of computer modeling of the mutual diffusion in two-component medium are considered. The algorithm of modeling of diffusion in two-component equalsized medium based on the method of cell automata is developed and tested. Also the algorithm of modeling of diffusion in nonequalsized medium realized by means of statistic physics is developed. The results of the given work will be applied for development of the laboratory work «Modeling of objects "Medium-structure" in the course «Mathematical modeling».

Диффузия (от [лат.](#) *diffusio* — распространение, растекание, рассеивание) – неравновесный процесс, вызываемый молекулярным тепловым движением и приводящий к установлению равновесного распределения концентраций внутри фаз.

Моделирование процесса диффузии на ЭВМ является важной задачей научных исследований в самых разных областях, поскольку для создания в полупроводнике слоев с различным типом проводимости и р-п-переходов в настоящее время используются два метода введения примеси: термическая диффузия и ионная имплантация (ионное легирование). С уменьшением размеров элементов ИМС и толщин легируемых слоев второй метод стал преимущественным. Однако и диффузионный процесс не теряет своего значения, тем более, что при отжиге полупроводника после ионного легирования распределение примеси подчиняется общим законам диффузии.

Целью проделанной работы было моделирование диффузионного процесса в равнообъемной и неравнообъемной средах. Для каждой среды был разработан свой алгоритм поведения частиц. Полученные результаты будут использованы для последующей постановки лабораторной работы по курсу «Моделирование объектов «Среда-структура».

Для моделирования диффузии в равнообъемной среде использовалась модель клеточного автомата [1]. Моделирование в нем элементарной операции общего диффузионного процесса – перемещения частицы из одного положения в другое – подразумевает пошаговое копирование ее «там» с *одновременным* удалением «отсюда». Для начала построим клеточный автомат двухкомпонентной среды, который визуально представляет собой набор кругов двух цветов (рис.1)

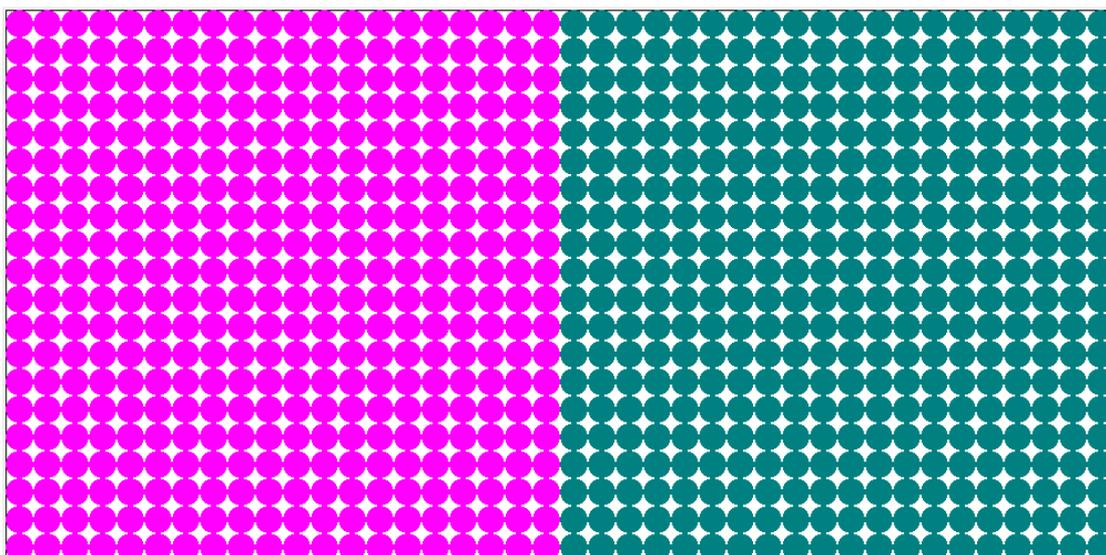
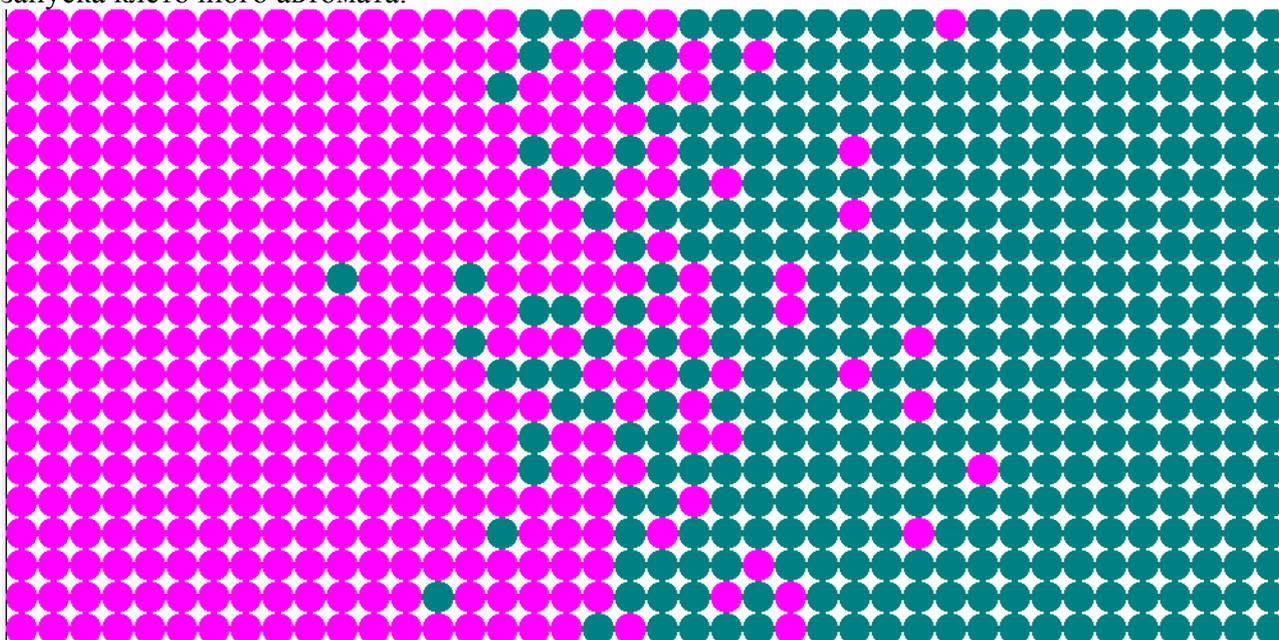


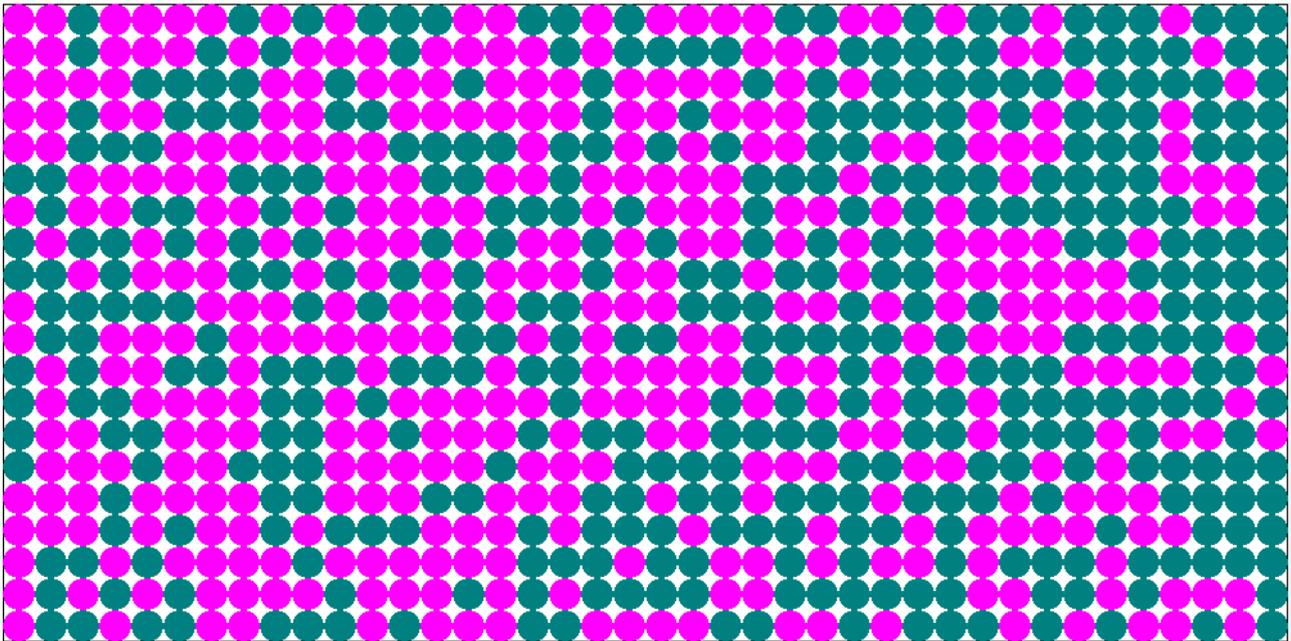
Рис.1. Модель двухкомпонентной среды.

Принцип действия клеточного автомата подсказывает практика: в природе при встрече две молекулы просто обмениваются местами. Реализовать такой механизм с помощью КА можно, если разбить все множество его клеток на четные и нечетные пары (блоки). Далее можно запустить КА, определив для него следующее правило: на нечетном шаге производить обмен содержимого клеток внутри его нечетных блоков, а на четном – содержимого четных блоков. Понятно, что на каждом шаге необходимо генерировать новую случайную последовательность нулей и единиц, определяющую правила для блоков: 0 – не выполнять обмен и 1 – выполнять обмен. В данной работе в качестве критерия обмена использовался массив чисел, который заполнялся по следующему правилу: генерируется число в диапазоне от 0 до 100, если число больше 50 в ячейку массива записывается 1, иначе в ячейку записывается 0. Генератор случайных чисел реализован таким образом, что вероятность его работы описывается нормальным распределением, что приближает работу клеточного автомата к реальным условиям.

На рис. 2 представлены последовательные состояния диффузионного процесса после запуска клеточного автомата.



а) Компоненты начинают диффундировать друг в друга



б) Формирование однородной структуры
Рис.2. Стадии диффузионного процесса.

Для анализа среды была введена величина, определяющая процентное содержание частиц компонентов в определенной области среды. В связи с этим появился критерий окончания диффузионного процесса – как только эта величина становится равной 50, процесс останавливается. Используя этот критерий можно качественно оценить среднюю длительность диффузионного процесса. Для этого строится график зависимости длительности переходного процесса от количества частиц компонентов (рис.3). На графике время диффузионного процесса оценивается количеством тактов, где такт – это длительность одного шага перемещения частиц.

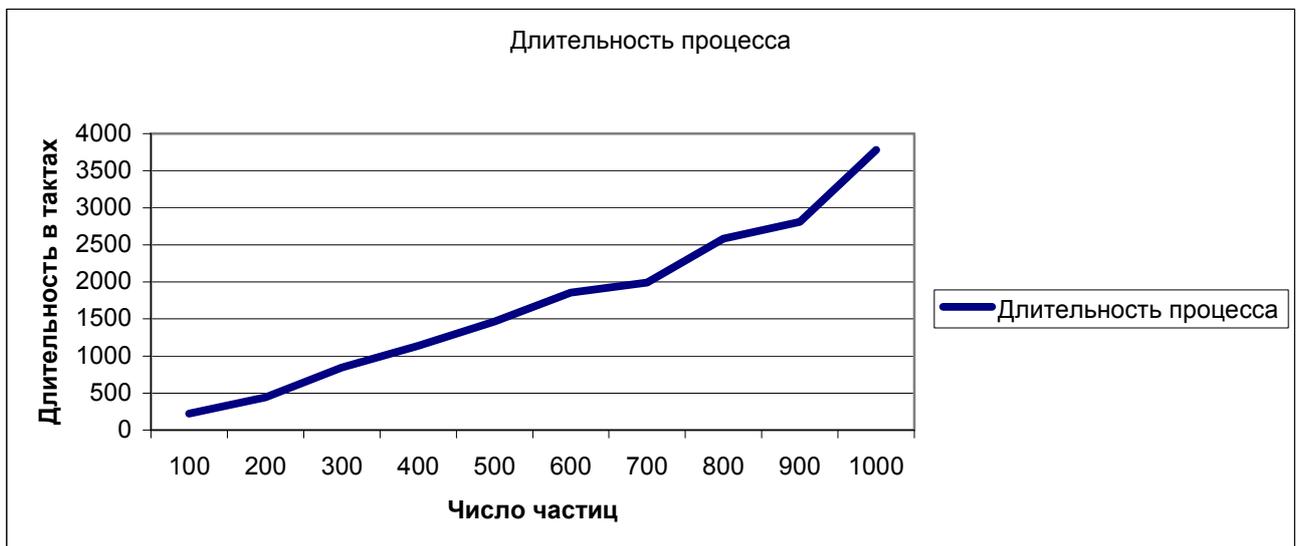


Рис.3. График зависимости длительности процесса от числа частиц.

Из графика видно, что при увеличении частиц угол наклона линии несколько увеличивается, из чего следует, что зависимость имеет некоторый степенной характер, следовательно при моделировании среды с большим количеством частиц следует учитывать вычислительные способности ЭВМ.

Также задавая необходимое время диффузионного процесса можно оценить однородность структуры. На рис.4 показан график зависимости однородности структуры от количества частиц через 1000 тактов от начала диффузионного процесса.



Рис.4. Соотношение компонентов среды после 1000 тактов диффузионного процесса.

Из данного графика видно, что удовлетворительную однородность среды (>45%) можно получить за время, гораздо меньшее длительности диффузионного процесса, что следует учитывать при использовании диффузии в изготовлении ответственных изделий. Таблицы с результатами исследования диффузионного процесса в равнообъемной двухкомпонентной среде приведены в приложении.

Следующим этапом работы стало моделирование диффузионного процесса в неравнообъемной среде, например диффузия газа из конечного источника в воздух. Для моделирования данной системы использовался метод прямого моделирования Монте-Карло [2]. Идея метода состоит в моделировании на ЭВМ реального течения газа с помощью моделирующих молекул. Одна моделирующая частица представляет очень большое число реальных молекул. В основе метода лежит идея расщепления непрерывного процесса движения молекул и их столкновений в разреженном газе на два последовательных этапа на временном шаге Δt . Сначала молекулы передвигаются на расстояния, соответствующие малому шагу Δt , затем производятся столкновения между молекулами. Процесс многократно повторяется. В данной работе также учитывалось влияние среды (воздух) на движение частиц, поэтому длина свободного пробега частиц задавалась случайным образом, таким образом моделируя броуновское движение частицы в среде.

На рис. 5 представлена модель начального состояния диффузионного процесса. Среда разделена перегородкой, не пропускающей газ, в каждой половине имеется конечный источник газа.

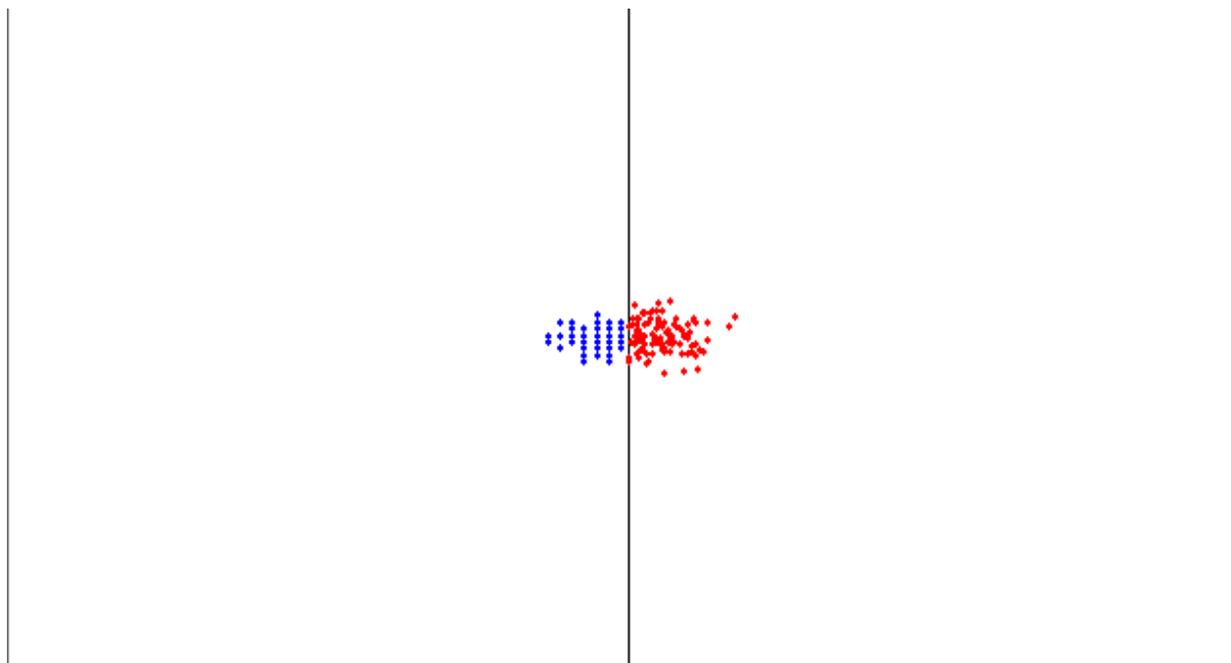


Рис.5. Модель начального состояния диффузионного процесса.

Для моделирования движения частиц в каждый момент времени случайным образом определяется длина свободного пробега частицы и рассчитываются координаты, так как координаты рассчитываются независимо друг от друга, получается равномерное движение частицы в среде. Для моделирования столкновений в каждый момент времени для частицы проверяется наличие «соседей» и, если столкновение происходит, то координаты пересчитываются в соответствии с правилами поведения частиц при абсолютно упругом ударе. На рис.6 показано состояние среды до удаления перегородки.

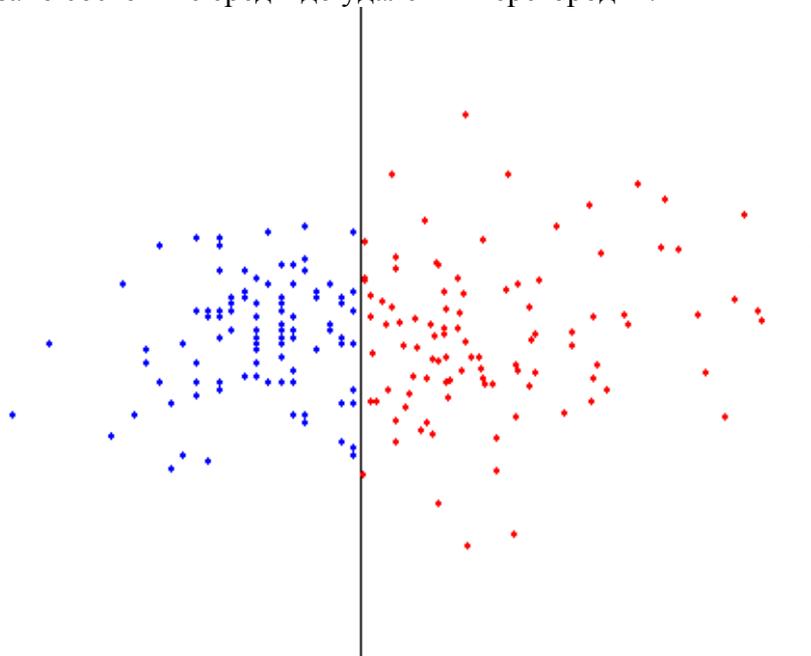


Рис.6. Распространение газа в среде.

Затем перегородка удаляется и начинается процесс диффузии компонентов друг в друга, состояние среды через некоторое время после начала процесса показано на рис.7.

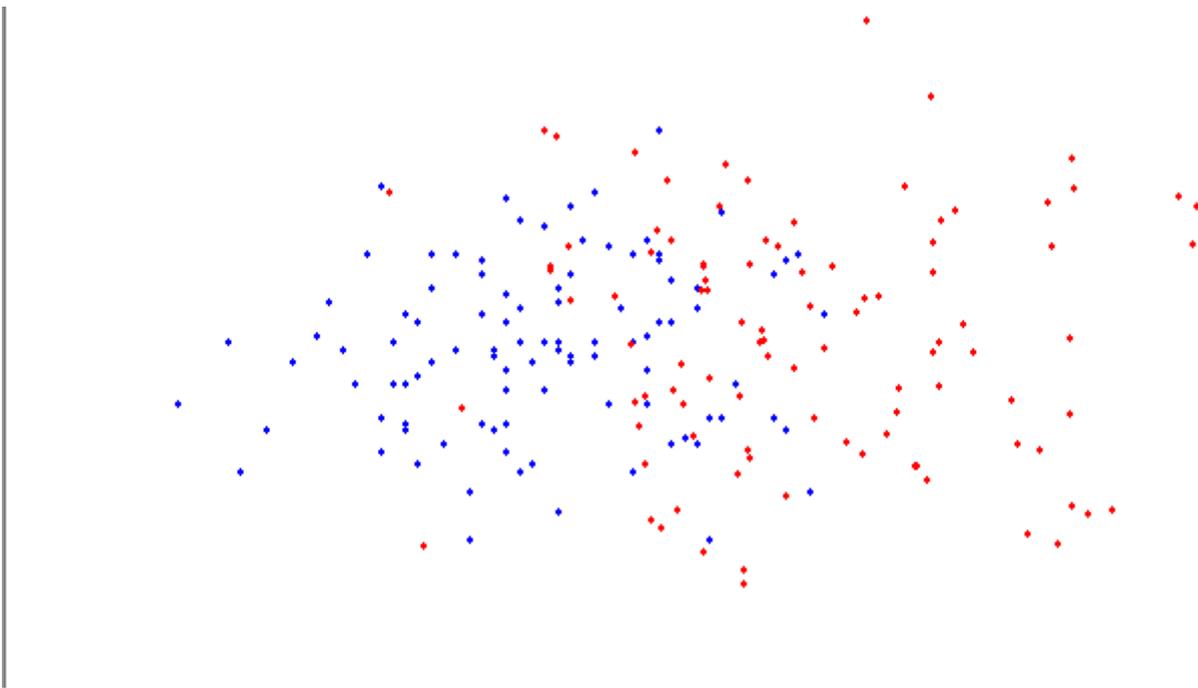


Рис.7. Начало диффузионного процесса.

Процесс диффузии продолжается до образования однородной структуры, представленной на рис.8.

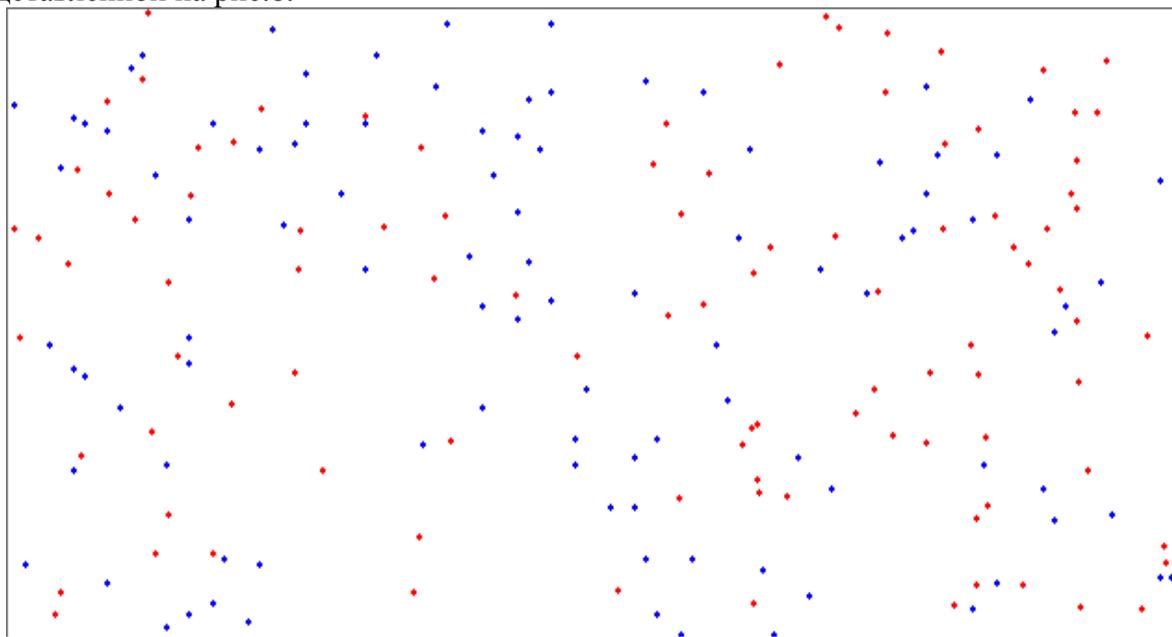


Рис.8. Однородная структура, полученная в результате диффузии.

Таким образом, для постановки лабораторной работы по курсу «Моделирование объектов «Среда-структура» были выработаны алгоритмы моделирования диффузии в равнообъемной среде методом клеточного автомата и неравнообъемной среде методом прямого моделирования Монте-Карло.

Таблица 1. Длительность диффузионного процесса

Число частиц	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	tcp	Число тактов
100	0,8	1,275	0,965	0,945	1,145	1,175	1,075	1,355	0,885	1,615	1,1235	225
200	1,995	1,595	1,735	2,415	3,075	2,225	2,865	1,925	1,665	2,485	2,198	440
300	5,2	3,42	3,75	3,12	4,21	5,67	4,37	4,1	4,2	4,18	4,222	844
400	4,1	6,235	5,775	5,795	4,525	5,165	6,315	6,035	5,285	7,765	5,6995	1140
500	5	6,92	8,425	9,395	4,875	9,985	6,425	6,725	8,145	7,445	7,3335	1467
600	9,09	11,49	11,68	8,12	7,92	7,55	9,17	8,61	9,52	9,68	9,283	1857
700	8,88	8,78	11,95	10,07	9,48	10,5	8,83	10,26	12,01	8,83	9,959	1992
800	11,18	10,34	14,1	13,7	15,75	17,74	11,49	14,98	10,22	9,64	12,914	2582
900	14,37	13,22	14,44	14,09	14,16	15,65	10,67	13,71	18,57	11,69	14,057	2811
1000	16,89	13,60	18,91	27,6	19,62	17,41	28,1	17,46	15,68	13,79	18,906	3781

Таблица 2. Процентное содержание частиц через 1000 тактов

Число частиц	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	pcp
100	52	50	55	51	53	52	49	54	49	52	51,7
200	53,57	54,59	52,04	52,04	50,51	54,08	48,97	48,97	50	50,5	51,527
300	47,05	53,97	46,36	49,48	50,17	48,44	50,17	49,13	51,9	51,9	49,857
400	48,5	48	48,75	48,75	46	46,75	46	51,75	50,25	47,75	48,25
500	44,62	47,34	48,55	47,52	46,48	44	44,62	44,21	42,14	45,04	45,452
600	42,08	43,84	42,4	43,04	45,12	44	44,48	46,24	41,92	44,96	43,808
700	41,97	41,56	42,93	41,01	39,23	41,83	42,79	41,83	42,38	42,11	41,764
800	39,35	40,19	39,83	39,83	40,66	38,52	40,9	40,54	39,71	36,86	39,639
900	38,91	39,12	37,56	36,1	40,27	37,25	37,04	38,91	36,73	37,87	37,976
1000	36,54	37	35,81	36,04	35,99	37,92	36,54	35,9	35,26	37,37	36,437

Литература

1. Т.Тоффоли, Н.Марголус, «Машины клеточных автоматов», М.: «Мир», 1991, стр.165-169.
2. Д.К.Белашенко, «Механизмы диффузии в неупорядоченных системах (компьютерное моделирование)», М.: журнал «Успехи физических наук», т.169,№4,1999, стр. 361-382.

ОСТРИЙНЫЕ АВТОКАТОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Корзинов В.В., Тренин А.В.

Научный руководитель: Беликов А.И. доцент, доцент
МГТУ им.Н.Э.Баумана, кафедра МТ-11, belikov@bmstu.ru

FIELD RADIATING EDGE CATHODES BASED ON CARBON FIBRE

Korzinov V.V., Trenin A.V.

Belikov A.I., assistant professor
BMSTU named by N.E.Bauman, chair MT-11, Moscow, belikov@bmstu.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования острижных автоэмиссионных катодов на основе углеродного волокна с обработанной торцевой поверхностью

Abstract

Results of researches field radiating edge cathodes based on carbon fibre with the processed face surface are presented

Введение

Автоэмиссионные катоды могут применяться в различных электронных приборах, например, в промышленных электронных микроскопах используются острижные вольфрамовые автокатоды с радиусом эмитирующего острия 0,01 мкм и менее. Для обеспечения устойчивой работы такого катода необходимо поддержание давления не выше 10^{-10} мм.рт.ст. Существенным преимуществом автоэмиссионных катодов из материалов на основе углерода является их устойчивая работоспособность в вакууме при давлениях 10^{-7} – 10^{-6} мм.рт.ст.

В настоящее время известны автоэмиссионные катоды из углеродных нитей диаметром 5-8 мкм, в которых эмитирующей поверхностью является слом волокна без дополнительной обработки. Однако вследствие не повторяемости поверхности излома и возникновением множественности центров эмиссии катоды такой конструкции не обладают необходимой воспроизводимостью и стабильностью эмиссионных характеристик.

Известны также острижные автокатоды с углеродным волокном, окончание которого имеет коническую форму с малым радиусом кривизны вершины (0,2-0,5 мкм и менее). Автоэмиссионный катод с таким эмиттером формирует расходящийся электронный поток с телесным углом, превосходящим 60° и, следовательно, его электронно-оптическая яркость относительно невысока. Кроме того, при такой форме эмитирующего окончания волокна наблюдаются множественные центры эмиссии с их последовательной работой, что приводит к "мерцанию" электронного пятна, и, наконец, такой катод имеет ограниченный срок службы из-за разрушения острия под действием электронной бомбардировки.

Вместе с тем для радикального улучшения разрешающей способности, контрастности изображения и быстродействия приборов исследования и обработки поверхности, необходимы катоды, которые формируют электронные потоки с малым телесным углом и высокой электронно-оптической яркостью, постоянным свечением электронного пятна и повышенной долговечностью. В рассматриваемом автоэмиссионном катоде, содержащем эмиттер из углеродного волокна конической формы, закрепленный на металлическом держателе, в вершине углеродного волокна вдоль его продольной оси выполняется углубление диаметром 0,1-0,4 мкм (рис.1), что обеспечивает повышение электронно-оптической яркости автоэмиссионного катода, однородности эмиссии и долговечности. Эффект улучшения характеристик связан с локализацией эмиссии в малом телесном угле и объясняется фокусирующим действием кромок и стенок углубления. В результате чего основная часть траекторий электронов проходит в приосевой области, формируя

электронный поток высокой интенсивности, малого поперечного сечения и локализованный в малом телесном угле.



Рис.1. Фотография эмитирующей поверхности углеродного волокна, выполненная на электронном микроскопе при увеличении 50000X.

Экспериментальные исследования

Изготовление автокатода

С целью проведения работ по исследованию эмиссионных свойств и наблюдения картины эмиссии углеродного волокна на ФГУП НПП «Торий» была разработана и изготовлена конструкция катодного узла, внешний вид которой представлен на рис.2.



Рис. 2. Фотография катодного узла (катодная ножка с дужкой-держателем углеродного волокна).

Сборка катодного узла производилась в несколько этапов:

1. Установка и фиксация волокна в дужке-держателе на специальной оснастке;
2. Установка дужки (с закрепленным на ней волокном) в корпус катодного узла;
3. Заточка волокна.

Заточка волокна осуществлялась с помощью дугового разряда, при этом волокно устанавливалось в электрическую цепь по схеме (рис.3).

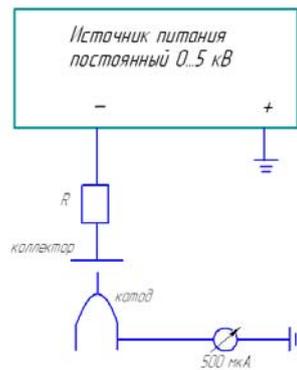


Рис. 3. Электрическая схема оснастки для заточки острия.

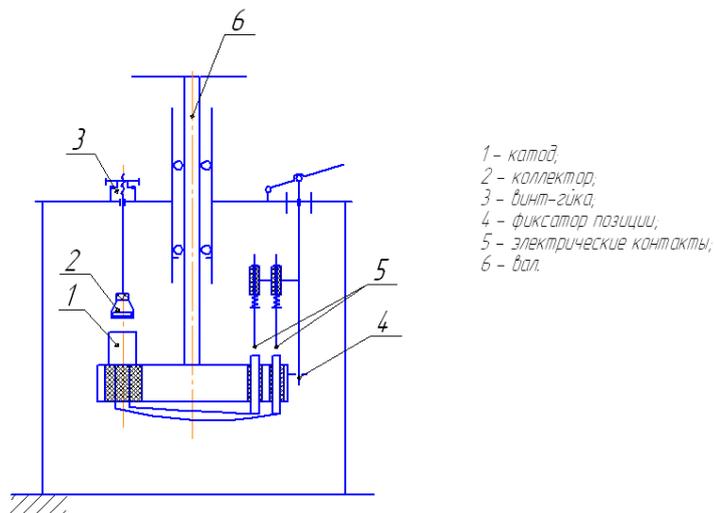


Рис. 4. Схема оснастки для заточки волокна.

Заточки волокна осуществлялась с помощью оснастки на стенде рис.4. Катод 1 размещался в позиции карусели, затем с помощью передачи винт-гайка 3 по калибровочной пластине высотой 1 мм устанавливалось расстояние между катодом и коллектором. После чего на коллектор подавалось напряжение 1,4 кВ, а электрические контакты 5 через амперметр заземлялись. Для смены позиции с автокатодом контакты 5 и фиксатор 4 поднимаются, с помощью вала 6 выполняется поворот карусели.

В полученных острых катодах использовалось углеродное волокно марки ВМН-4, структура которого имеет следующую особенность: сердцевина более хрупкая, чем периферия волокна, поэтому в процессе заточки сердцевина выгорает быстрее боковой поверхности и образуется углубление имеющее форму, показанную на рис. 2.

Испытание автокатода

Изготовленные катоды испытывались на сверхвысоковакуумной установке СВВУ-2.

Установка СВВУ-2 (рис.5) состоит из механического насоса 2НВР-5ДМ NI, магнитоэлектрического насоса (НОРД), криогенного насоса (ОРБИТРОН), электромагнитных VE1, VE2 и электромеханических VM1 клапанов, затвора (тип ЗПТ) VM2, натекателя VF, манометров ионизационных РА и термопарных РТ.

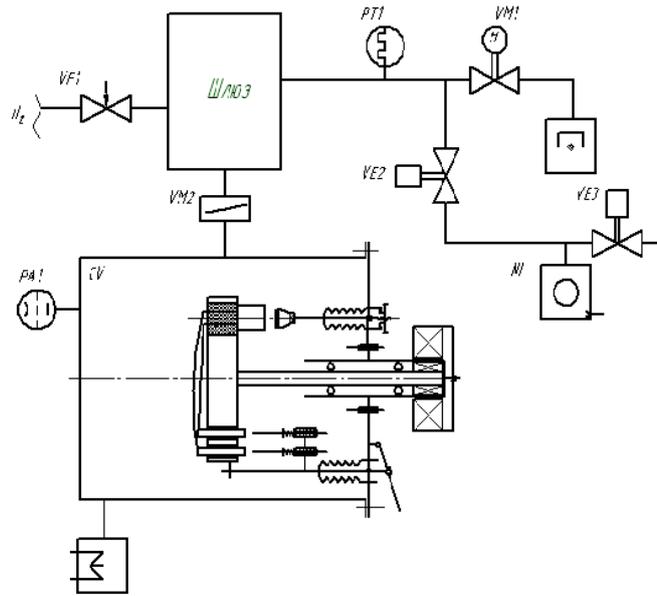


Рис.5. Схема стенда на базе установки СВВУ-2 для испытания автокатодов.

В ходе испытаний катоды размещались в позициях карусели. Камера установки откачивалась до давления $2,8 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст.

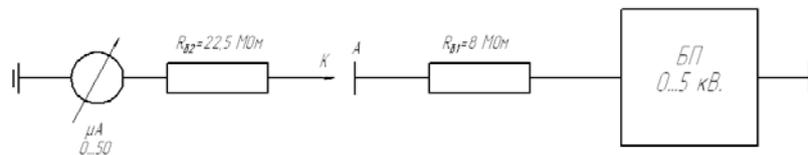


Рис.6. Электрическая схема испытания.

На катод подавали напряжение (рис.6), которое постепенно наращивалось. Появление тока эмиссии было зафиксировано при напряжении 1,6 кВ. В первые минуты ток эмиссии был нестабилен, что можно объяснить процессами обезгаживания волокна, т.к. при появлении электронов остаточные газы начинали ионизироваться и «бомбардировать» остриё. Затем, когда ток эмиссии стабилизировался, увеличивали потенциал до 1,8, 2,0 и 2,2 кВ. На рис.7 приведена вольтамперная характеристика, снятая в ходе эксперимента.

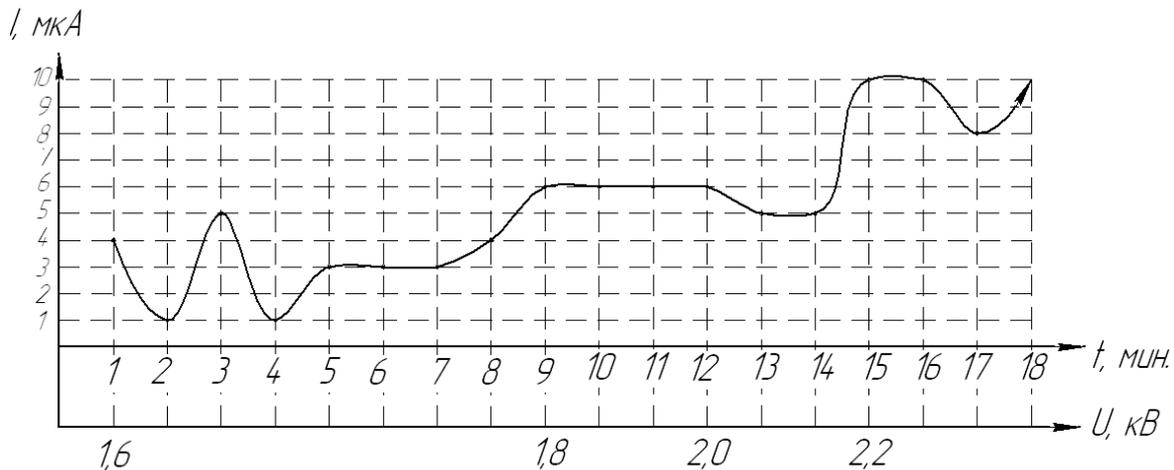


Рис.7. Вольтамперная характеристика автокатаода.

Выводы

По результатам проведенной работы, основываясь на полученной вольтамперной характеристике, следует отметить, что при давлении $2,8 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. автоэмиссионный катод на основе обработанного углеродного волокна обеспечивает стабильный ток эмиссии на уровне 6 мкА при вытягивающем напряжении 1,8-2,0 кВ.

Литература

1. Барсов С.В. и др. Высокостабильные автоэмиссионные катоды из углеродных волокон // Вакуумная наука и техника: Материалы X юбил.н.-т.конференции. - Крым, 2003. - С.445-446.

ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ТОПОЛОГИЙ СУБМИКРОННЫХ СБИС ПО ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО ФОТОШАБЛОНА В САПР СБИС

А.Е. Аверьянихин

Научный руководитель Зинченко Л.А. д.т.н, профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия

PECULIARITIES OF DESCRIPTION OF SUBMICRON TOPOLOGY IN DOUBLE PATTERN LITHOGRAPHY TECHNOLOGY CAD SYSTEMS

A Averyanikhin

Tutor: Lyudmila Zinchenko, PhD, professor
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

Технология двойного фотошаблона является распространенной технологией производства СБИС, которая отвечает современным требованиям к точности воспроизведения двумерного плана топологии, учитывая такие технологические ограничения, как расстояния между смежными элементами слоя, взаимное влияние контуров геометрических примитивов, вызванное дифракционными явлениями, вносящими искажения при экспонировании. Метод автоматизации производства СБИС, при котором сложные логические схемы выполняются на основе совокупности более простых, разработанных для производства по технологии, например, КМОП, обуславливает необходимость реализации процесса трансформации топологической информации ранее разработанных схем для реализации по технологии двойного фотошаблона.

Abstract

Double pattern lithography is a wide used technical method to produce an electronic circuits, with a strong tolerances for critical dimensions between the figures in a topology plane. This method takes care of such restrictions, like reciprocal diffraction influence of neighbor geometric figures. Today, some complex circuits based on earlier developed blocks. That is why the transformation algorithm must be developed.

Введение

Алгоритм, реализующий процесс трансформации топологии для технологии двойного шаблона, должен соответствовать ряду требований, которые следуют из условия воспроизведения функционального назначения элементов [1]. Должна быть соблюдена технологическая целостность устройства. Также необходимо выделить критерии оптимизации трансформации для обеспечения возможности проведения качественного анализа процесса трансформации. Определим процесс трансформации как разделение элементов топологии одного слоя по критерию близости на два слоя, учитывая набор технологических ограничений, накладываемых технологией двойного фотошаблона.

Особенности представления топологической информации

Разработан подход к представлению топологической информации, ориентированный на применение для технологии двойного шаблона и оперирующий данными в распространенном ныне формате хранения топологической информации GDSII, который на сегодняшний день является универсальным форматом представления данных о сложных интегральных схемах. Этот подход был использован для синтаксического обеспечения описания топологии СБИС в виде упорядоченного набора геометрических примитивов. GDSII файл содержит информацию в иерархическом виде [3]. В нем содержатся структуры. Каждая структура содержит элементы (граница/многоугольник, траектория/полилиния, текст, структурные ограничения, массивы перекрестных взаимосвязей). Элементы располагаются слоями. Современные файлы GDSII сколько-нибудь сложной СБИС могут достигать довольно больших объемов (до нескольких терабайт), что накладывает определенные ограничения на возможность их обработки и требует решения задачи оптимизации представления топологической информации, а также методов ее обработки.

Файл является кроссплатформенным и представляет собой двоичный поток низкой энтропии. Типы данных, которыми оперирует стандарт, должны быть связаны с конкретной системой. Во время синтаксического анализа файла необходимо использовать формальную систему описания Бэкуса Наура (Backus Naur Form).

Особенности структур данных

Предложенный алгоритм основан на разделении одного слоя рисунка топологии на два на основе анализа ограничений, накладываемых технологией двойного фотошаблона, применительно к каждой паре геометрических примитивов, расположенных на данном слое топологии. На вход алгоритма фигуры обычно поступают в виде наборов геометрических примитивов – манхетенских многоугольников. Основная идея состоит в разделении целого двумерного плана на секции, т.н. “закрытые области” [2]. Полигоны в обоих наборах разделяют двумерный план на области, одновременно принадлежащие либо первому набору, либо второму, либо обоим сразу. Под закрытой областью понимается область, которая может быть описана одним простым геометрическим примитивом. Для того, чтобы рассчитать все закрытые области, необходимо уметь вычислять существующие пересечения между двумерными планами наборов. Задача разделяется на ряд подзадач:

- определение пересечений между полигонами;
- определение принадлежности каждой закрытой области (к первому набору, ко второму набору, либо к обоим сразу);
- выделение закрытых областей для дальнейшей обработки.

Определим набор простейших операций над полигонами:

- Пересечение;
- Объединение;
- Разность;
- Исключающее ИЛИ.

Алгоритм представляет информацию о манхетенских многоугольниках, используя внутренние структуры данных для хранения информации в виде графических примитивов. На начальном этапе каждый полигон трансформируется в графический примитив; каждый графический примитив представляет собой информацию об одном полигоне. Графический примитив представляет собой перечень связей, каждая из которых имеет по две вершины $L_1 \in (X_1, X_2)$. Одна вершина является начальным узлом связи, другая - конечным. Несколько связей могут соединяться в одной вершине $X_n \in \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$. В начале одна вершина может соединять лишь две связи. Это является следствием того, что каждый многоугольник должен быть закрытым, то есть представлять собой правильный геометрический многоугольник. Все связи в графическом примитиве получают свой уникальный идентификатор, что говорит об их принадлежности к определенному многоугольнику. В процессе обработки пересечения между примитивами определяются как точки пересечений, и между ними можно построить новые связи. Однако их количество не может быть больше четырех. Структура данных “графический примитив” представляет собой массив указателей на структуры данных “связь”. Структура данных “связь” представляет собой массив указателей на две структуры данных “вершина”: начало связи и конец связи. Структура данных “вершина” представляет собой структуру данных, состоящую из геометрических координат вершины и двух указателей на инцидентные связи (рис. 1).

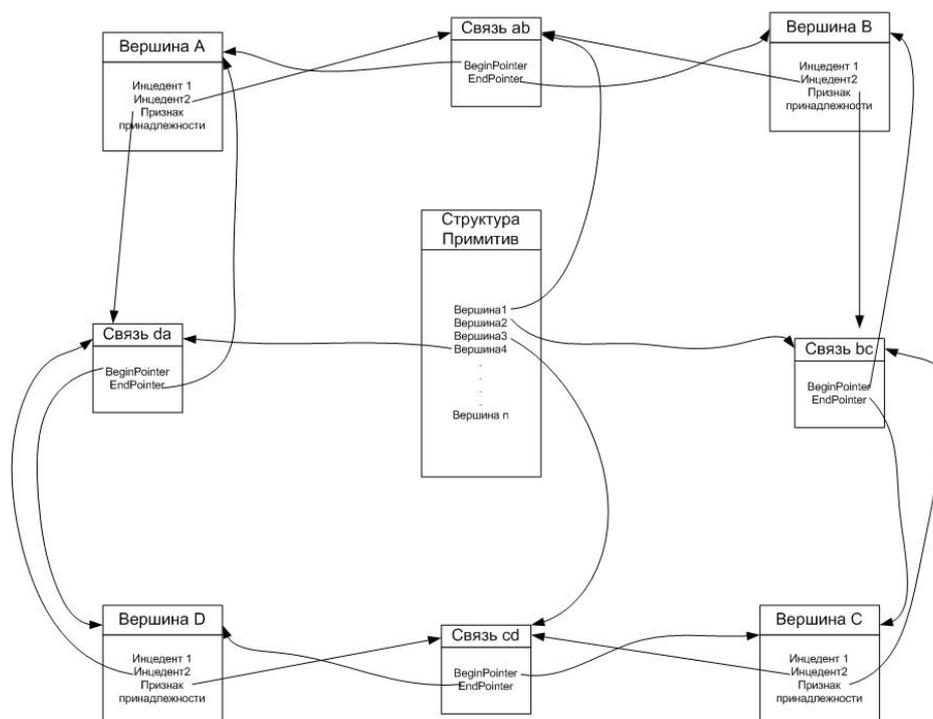


Рис. 1 Иерархическое представление геометрического примитива

Если в процессе анализа двух полигонов выясняется, что существуют пересекающиеся связи, то производится поиск точки пересечения. На ее месте создается новая вершина, которая разделяет связи на две. Сравнение пар геометрических примитивов происходит последовательно: каждая пара элементов проверяется на соответствие каждому из ограничений, которые представлены в формализованном виде и представляют собой набор числовых данных. Для проведения сравнения необходимо представить критерии условий в виде целых чисел высокой разрядности, так как двумерный план топологии описывается с использованием пользовательского параметра ширины шага координатной сетки. После проведения сравнения пары элементов на основании результатов принимается решение о разделении или неразделении пары элементов на различные слои топологии для последовательного экспонирования.

Заключение

К преимуществам данного метода анализа можно отнести высокую энтропию внутреннего представления данных, а также не очень высокую сложность вычислений. Однако введение пользовательского параметра ширины шага координатной сетки, требование унифицированного представления критериев оценки и непосредственно данных о топологии в виде 64-битных целых чисел вносит определенные ограничения на процесс округления и представления данных. Учитывая высокие требования, предъявляемые к технологическому процессу производства СБИС по технологии двойного фотошаблона, необходимо минимизировать погрешности в представлении данных при разделении рисунков топологии на слои.

Работа выполнена при финансовой поддержке по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы» (ГК №П2292).

Литература

1. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие.- М.: Техносфера, 2004.- 212 с.
2. Ф. Препарата, М.Шеймос, Вычислительная геометрия. –М.: Наука, 1986.-455 с.
3. <http://www.boolean.klaasholwerda.nl>

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЩЕТОЧНО-КОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Манукянц Э. В.

Научный руководитель: к.т.н., профессор, Мысловский Э. В.

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

COMPUTER-AIDED MONITORING SYSTEM TURBOGENERATOR'S CONTACT BRUSH DEVICE

Manukyantz E. V.

Scientific adviser: Ph.D., professor, Mislovskii E. V.

IU4 department, BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В статье описывается автоматизированная система, предназначенная для сбора показаний с датчиков и дистанционного контроля состояния щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов.

Abstract

In article the automated system intended for gathering of indications from gauges and the remote control of a condition of contact brush device of turbogenerators is described.

Введение

Результаты анализа технологических нарушений на электростанциях РАО ЕЭС России в период 1998 по 2008 годы, проведенного Департаментом Государственной инспекцией эксплуатации и финансового аудита РАО ЕЭС России, показывает, что щеточно-контактный аппарат занимает первое место среди узлов турбогенераторов по повреждаемости.

Основными причинами данного факта являются следующие:

- уровень знаний о процессах в скользящем контакте остановился на уровне технологических возможностей 70-80 годов прошлого века;
- отсутствие однозначных требований к качеству работы ЩКА и документируемому инструментальному контролю;
- низкая техническая культура обслуживания ЩКА;
- отсутствие однозначного алгоритма действий обслуживающего персонала, основанного на инструментальном контроле;
- низкое качество изготавливаемых щеток;
- отсутствие документируемого 100% входного контроля изготавливаемых щеток;
- отсутствие требований по созданию ЩКА, соответствующего мировым стандартам.

Щеточно-контактный аппарат представляет собой узел турбогенератора, обеспечивающий подачу постоянного тока от неподвижных токоведущих частей цепи возбуждения к вращающейся обмотке возбуждения ротора генератора посредством скользящего контакта.

Траверса ЩКА включает в себя щеткодержатели и укомплектована щетками скользящего контакта. Количество щеток, установленных на каждом полюсе щеточно-контактного аппарата, определяется величиной максимального тока возбуждения обмотки ротора и допустимым током щеток, изготавливаемых отечественными предприятиями и рекомендуемых к применению для турбогенераторов: материал контактного кольца – сталь, окружная скорость порядка 60 м/с.

Основной функцией щеточно-контактного аппарата является передача тока от системы возбуждения в обмотку ротора. Поэтому все обслуживание и оценка состояния щеточно-контактного аппарата должно основываться на контроле и оценке его токопроводимости.

Объективная картина о токопроводимости щеточно-контактного аппарата может быть получена только при помощи токоизмерительных средств, позволяющих оценивать ток каждой щетки аппарата. Основной диагностируемой характеристикой работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора является токораспределение между щетками.

Назначение АСМ ЩКА

Автоматизированная система мониторинга щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов (АСМ ЩКА) предназначена для:

- анализа качества настройки ЩКА;
- формирования трехуровневых сигналов интегрального состояния ЩКА;
- предупреждения оперативного персонала о необходимости проведения регулировочных мероприятий;
- инструментального и методического обеспечения процедуры настройки ЩКА;
- инструментального контроля стабильности тока в скользящем контакте всех щеток аппарата;
- методического обеспечения оптимизации режима работы ЩКА по типу щеток и по их количеству;
- электронного документирования результатов контроля.

Областью применения АСМ ЩКА являются турбогенераторы и возбудители, установленные на атомных электростанциях.

Физические основы и алгоритм проведения контроля АСМ ЩКА

Измерение тока каждой щетки основано на использовании закона полного тока, принципе работы токовых клещей постоянного тока. Контактная клемма каждой щетки подключена к токоведущему цилиндру диаметром 14мм, вокруг которого расположен магнитопровод, выполненный из феррита, в распиле которого расположен датчик Холла. Зафиксированный аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровой в измерительном блоке, где происходит предварительная его обработка. Информация о токе каждой щетки передается в блок управления и индикации

Блок управления и индикации отображает оперативную информацию, производит ее документирование с возможностью последующего анализа, а также по установленным критериям формирует один из трех сигналов интегрального состояния щеточно-контактного аппарата:

1. щеточно-контактный аппарат работает нормально;
2. рекомендуется настройка ЩКА (в работе ЩКА обнаружены отклонения от установленных критериев ненормальной работы).
3. Требуется срочная регулировка ЩКА (обнаружены признаки предаварийных режимов работы). АСМ ЩКА работает в автономном режиме и не зависит от других устройств.

Состав АСМ ЩКА и функциональное назначение отдельных блоков

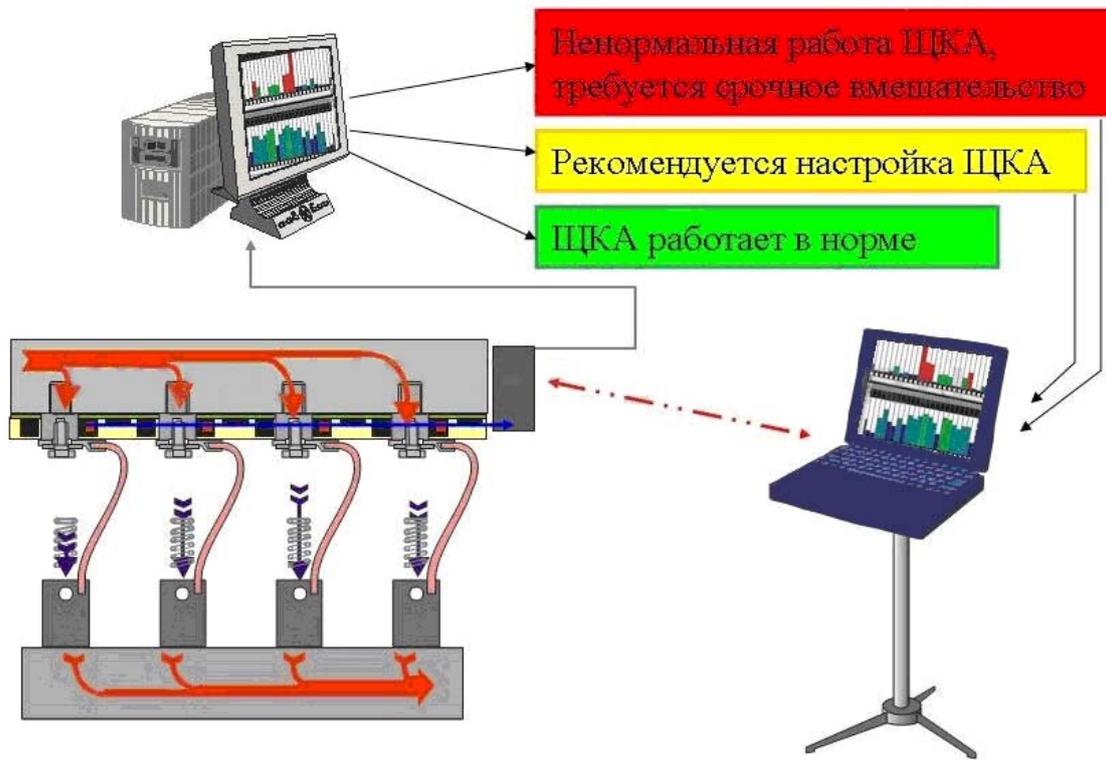


Рисунок 1. Основные узлы АСМ ЩКА

АСМ ЩКА представляет собой двухуровневую многопроцессорную и мультисенсорную систему сбора и обработки информации. Нижний уровень образован мультисенсорной системой сбора данных (МССД). Верхний уровень состоит из блока управления и индикации (БУИ) и переносного терминала (ПТ) на основе портативного компьютера типа Note-book.

Мультисенсорная система сбора данных (МССД) обеспечивает сбор информации о токах, протекающих через каждую щетку турбогенератора. Для каждой щетки периодически выполняется измерение мгновенного значения тока с заданной частотой дискретизации и обеспечивается получение следующей информации:

- среднее значение тока;

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

- стандартное отклонение тока;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

- коэффициент асимметрии тока;

$$K_A = \frac{n \cdot \sum (x_i - \bar{x})^3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot \sigma^3} \quad (3)$$

- осциллограмм тока (по запросу).

МССД состоит из набора однотипных контроллеров сбора данных (КСД), объединенных общим шинным интерфейсом между собой и с системным контроллером.

Системный контроллер (СК) обеспечивает взаимодействие МССД с блоком управления и индикации (БУИ). Контроллер выполняет преобразование интерфейса USB<->UART<->RS-485 с гальванической развязкой.

Блок управления и индикации (БУИ) обеспечивает оперативную обработку информации и ее отображение, производит документирование с возможностью последующего анализа, а также по установленным критериям формирует один из трех сигналов интегрального состояния щеточно-контактного аппарата.

Переносной терминал (ПТ) выполнен на основе портативного компьютера типа Note-book. ПТ связан с БУИ по скоростному бесконтактному WiFi каналу. На обоих компьютерах установлена программа Anyplace Control. Указанные программно-технические средства позволяют дистанционно (в радиусе до 15 м) получать на ПТ оперативную информацию о состоянии любой щетки ЩКА, отображать ее на дисплее. Программное обеспечение основано на лицензионных и оригинальных программах.

Литература

1. Аппарат щеточно-контактный турбогенераторов типов ТВВ, ТВФ и ТФ. Инструкция по эксплуатации. ОБС.460.468 ИЭ. (АО «Электросила»).
2. Брауде Л.И., Борозинец Б.В., Маслов В.В. Оперативный контроль исправности щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов, - Электрические станции, 1998, №1
3. Попов И.Н., Зражевский С.М., Калмыков А.В. О контроле состояния и настройке щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов, - Электрические станции, 2002, №1

ВРЕМЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ХМП С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПЛАНАРИЗАЦИИ ПО КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

Гладких А.А.

Научные руководители: доцент, кандидат технических наук Макаrchuk В.В.

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра «ИУ-4»

кандидат физико-математических наук Амирханов А.В.,

Россия, Москва, НИИСИ РАН

TIMING OPTIMIZATION OF CMP MODEL BASED ON MATERIAL REMOVAL RATE DISTRIBUTION OF SILICON WAFER

Gladkikh A.A.

The supervisors of studies: candidate technical science, reader Makarchuk V.V.

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

candidate of physico-mathematical science Amirkhanov A.V.

Russia, Moscow, SRISA RAS

e-mail: GladkikhAlexei@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрено моделирование технологического процесса химико-механической планаризации кремниевой пластины при формировании межслойной изоляции. Представлен обобщенный алгоритм моделирования толщины пленки диоксида, как отдельного кристалла, так и всей пластины. Приведены результаты калибровки предложенной модели.

Abstract

Simulation of technological process of chemical-mechanical planarization of silicon wafer in the inter-level dielectric formation has been considered in this work. The generalized algorithm of film thickness simulation as a single die and the whole wafer has been described. Results of model calibration have been present in this work.

Введение

Хорошо известно [1], что в современных СБИС используется многослойная металлизация, применение которой позволяет существенно повысить степень интеграции благодаря тому, что в этом случае всю поверхность кристалла можно использовать для формирования только активных структур. Однако ее применение, как, впрочем, и применение любой другой технологии, создает и свои проблемы. Одной из них является возникновение рельефа поверхности кристалла СБИС при формировании нескольких проводящих слоев, что приводит к технологическим трудностям при их создании.

Однако главной и наиболее существенной проблемой, возникающей при наличии рельефа поверхности пластины, является ограничение, связанное с процессом получения маски фоторезиста с помощью проекционной литографии. Известно [1], что в соответствии со вторым критерием Релея, глубина фокусировки DOF оптической системы установки

проекционной литографии определяется выражением: $DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}$, где k_2 – коэффициент,

характеризующий особенности процесса литографии (введение аннулярного освещения, OPC-коррекции, фазосдвигающие шаблоны и т.д.), λ – длина волны экспонирующего излучения, а NA – числовая апертура объектива. Это значит, что в случае использования, например, установки проекционной литографии с параметрами: $\lambda = 365 \text{ нм}$, $NA = 0,6$ и без дополнительных технологий (в таком случае $k_2 = 1$), глубина фокусировки $DOF \approx 1,0 \text{ мкм}$. То есть, наличие рельефа величиной всего лишь в $1,0 \text{ мкм}$ приведет к тому, что часть пленки фоторезиста не попадет в фокус, а это, в свою очередь, вызовет непроработку элементов топологии и, следовательно, не позволит получить годный кристалл.

Из сказанного выше следует, что при формировании многоуровневой металлизации необходимо каждый следующий уровень металлизации формировать на выровненной

(планаризованной) поверхности межслойного изолятора (диоксида кремния). С этой целью используется процесс химико-механической планаризации (ХМП) изолирующего слоя, который позволяет получить планаризованную поверхность перед нанесением пленки фоторезиста.

Локальная плотность заполнения

Для дальнейшего изложения материала введем понятие локальной плотности заполнения топологического слоя, для чего возьмем некоторый участок топологии проводящего слоя СБИС. Для вычисления локальной плотности заполнения слоя d , весь топологический слой разобьем на квадраты со стороной W . После разбиения имеем площадь квадрата, равную $S_{кв} = W^2$, и суммарную площадь элементов, которые лежат внутри квадрата, равную $S_{эп}$. Тогда локальную плотность заполнения слоя определим как: $d = S_{эп}/S_{кв}$.

Модель процесса ХМП кристалла

Общее описание модели ХМП

В данной работе будет использовано преобразованное уравнение Престона, предложенное в [2], в котором скорость планаризации выражена в зависимости от плотности заполнения топологического слоя:

$$MRR = \frac{dz}{dt} = -\frac{K}{\rho(x, y, z)}, \quad (1)$$

где $\rho(x, y, z)$ – это эффективная плотность топологии, понятие которой будет дано позднее, и которая зависит от локальной плотности заполнения d , z – толщина двуокиси кремния, отсчитываемая от некоторой базовой точки, K – скорость удаления материала при плотности равной 100%, то есть при отсутствии какого-либо рельефа на пластине.

При решении дифференциального уравнения (1) следует рассмотреть два случая: первый случай – при $z \geq z_0 - z_1$ и, второй – при $z < z_0 - z_1$. Оба случая показаны на рис.1.

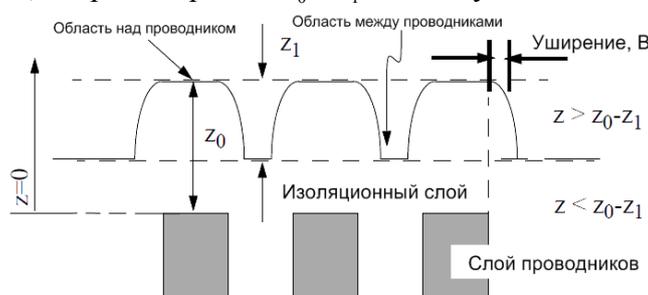


Рис.1. Расчет конечной толщины двуокиси после проведения операции ХМП

Интегрирование дифференциального уравнения дает следующую зависимость конечной толщины двуокиси кремния от времени планаризации:

$$z = \begin{cases} z_0 - \frac{Kt}{\rho(x, y)} & Kt \leq \rho(x, y)z_1 \\ z_0 - z_1 - Kt + \rho(x, y)z_1 & Kt > \rho(x, y)z_1 \end{cases} \quad (2)$$

При моделировании процесса ХМП данное выражение для толщины является основным. Физические процессы, протекающие при планаризации можно интерпретировать следующим образом: перед тем, как будет достигнута локальная планарность (то есть все еще присутствуют ступеньки) конечная толщина оксида обратно пропорциональна эффективной плотности в этой точке. После достижения локальной планарности, скорость планаризации становится постоянной и равной коэффициенту K .

Точность расчета толщины зависит от точности расчета эффективной плотности $\rho(x, y)$, представляющей собой значение, в котором учтено влияние соседних участков топологии. Эффективную плотность, в свою очередь, необходимо рассчитать, используя так называемое

ядро свертки (которое представляет собой матрицу), определяющее «величину» влияния между соседними элементами топологии (локальной плотности) и расстояние, на котором оно учитывается. С точки зрения физической интерпретации, ядро свертки позволяет учесть прогиб полировальной подушки и ее адаптацию к рельефу. Эффективная плотность не является локальным параметром, а зависит от всех значений плотностей, которые лежат в области *длины планаризации* – расстояния, меньше которого возникает существенное влияние (область максимальной нагрузки) одних элементов топографии на другие.

Функция для вычисления матрицы ядра должна быть рассчитана для двух случаев: первый – когда расчетный радиус r больше половины длины планаризации $a = L/2$, и второй – когда расчетный радиус меньше половины длины планаризации. При этом расчет может проводиться только с использованием численных методов, так как содержит эллиптические интегралы по углу $d\theta$, аналитический вид, которых получить невозможно. Весовая функция w имеет следующий вид:

$$w(r, L) = \begin{cases} k_2 \frac{2L}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4r^2}{L^2} \sin^2 \theta} d\theta & r \leq a \\ k_2 \frac{4r}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4r^2}{L^2} \sin^2 \theta} d\theta - \left(1 - \frac{4r^2}{L^2}\right) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{4r^2} \sin^2 \theta}} \right) & r > a \end{cases} \quad (3)$$

$L=2a$ – длина планаризации ядра свертки, определяется как точка перегиба функции, коэффициент k_2 в приведенном выражении вычисляется по формуле: $k_2 = \frac{(1-\nu^2)q}{E}$, в которой, E – модуль Юнга материала подушки, q – приложенная нагрузка, ν – коэффициент упругости материала подушки. С целью повышения точности расчета эффективная плотность должна быть нормализована, поэтому коэффициент k_2 при расчете весовой функции можно не учитывать.

Поясним, что введенное понятие длины планаризации L определяет влияние одних структур на другие не вообще, а лишь в области распределения максимальной нагрузки функции ядра свертки $w(r, L)$, при котором взаимодействие между элементами перестает проявляться на расстоянии большем максимального расчетного радиуса r_{max} .

Имея матрицу эффективной плотности и используя выражение (2) для вычисления толщины оксида после планаризации, становится возможным рассчитать его конечную толщину, и, тем самым, провести моделирование самого процесса ХМП оксида. Чтобы использовать маршрут моделирования, приведенный на рис.2, необходимо определить следующие параметры модели:

1. L – длина планаризации ядра свертки;
2. R – шаг сетки ядра (или разрешение сетки);
3. r_{max} – максимальный расчетный радиус ядра свертки;
4. z_0, z_1 – параметры нанесения оксида;
5. K – скорость удаления оксида;

С целью их получения, то есть проведения *калибровки* модели, необходимо иметь ФШ, содержащий тестовые структуры, характеризующие процесс ХМП.

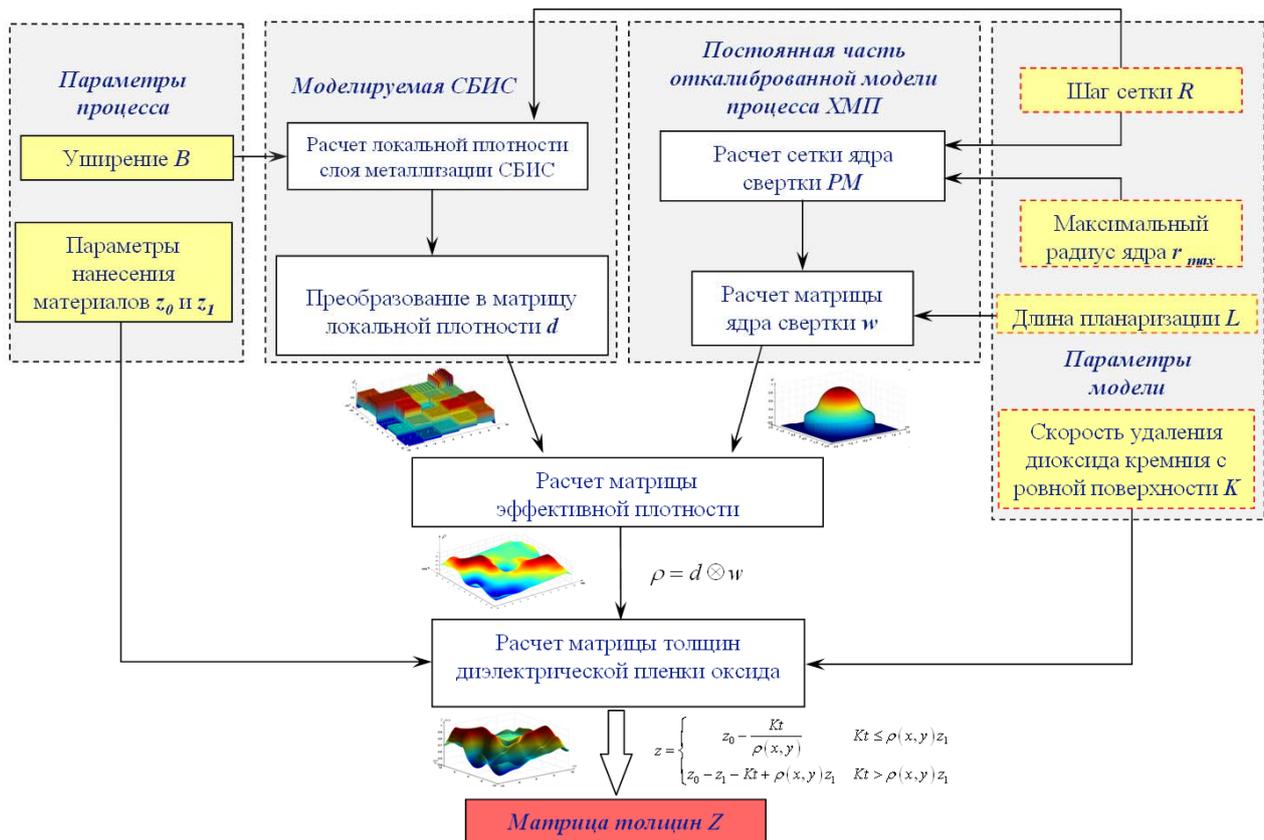


Рис.2. Маршрут моделирования технологической операции ХМП

Фотошаблон для характеристики процесса ХМП

Разработанный тестовый ФШ содержит 25 блоков, каждый из которых отличается от других такими параметрами как плотность и шаг, а также шагом структуры и ее плотностью. Для проведения калибровки параметров «длина планаризации» L и «максимального расчетного радиуса» r_{max} , используется группа блоков отличающиеся плотностью заполнения. Эта группа включает в себя блоки с фиксированным шагом структур и плотностями: 10%, 90%, 30%, 70% и 50%. Общий вид шаблона показан на рис.3:

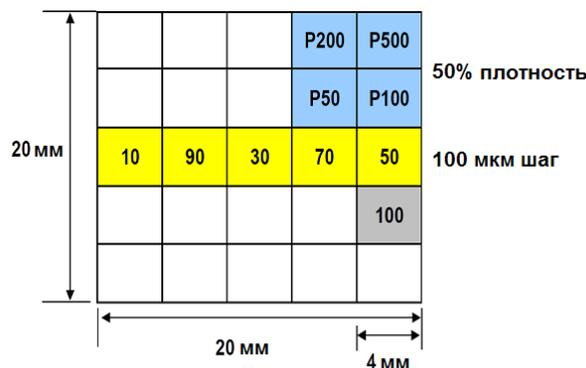


Рис.3. Тестовый шаблон для определения параметров процесса ХМП

Помимо возможности определения указанных выше параметров, такая структура шаблона позволяет получить хорошее качественное представление о зависимости конечной толщины пленки оксида от плотности структуры.

Моделирование процесса ХМП при различных временах планаризации

Используя модель технологического процесса ХМП для получения конечного распределения пленки, можно подобрать его режим для параметров, которые получены не

путем калибровки, а путем использования заданного входного значения этого параметра для процесса ХМП. Такой параметр не должен изменяться во время калибровки. В данном случае одним из таких параметров является время планаризации t (см. выражение 2). Данный параметр представляет собой интерес, так как если с использованием модели проводить одномерную оптимизацию времени как параметра функции $stdZ = f(t)$ и $\bar{Z} = f(t)$ можно минимизировать значения $stdZ$ и получить необходимое значение \bar{Z} , где $stdZ$ – среднеквадратичное отклонение толщины от среднего значения толщины \bar{Z} .

Для проведения оптимизации параметров технологического процесса для любого кристалла необходимо провести калибровку модели при различном времени планаризации.

С этой целью воспользуемся результатами измерений, полученных для пяти времен планаризации при одинаковых значениях других ранее указанных параметров. То есть в данном случае калибровка параметров модели проводилась с учетом различного времени планаризации: 70, 140, 210, 280 и 350 секунд.

Оптимизация модели процесса ХМП

В качестве параметров оптимизации были выбраны параметры необходимые для построения модели процесса ХМП для расчета толщины пленки в рамках одного кристалла и, которые не были определены ранее (шаг сетки моделирования, уширение проводников и время планаризации). Этими параметрами являются длина планаризации, максимальный расчетный радиус и скорость удаления материала с ровной поверхности пластины.

Модель технологического процесса осаждения была существенно упрощена. В результате этих упрощений было принято, что при осаждении толщина z_1 равна толщине нижележащего проводящего слоя, а значение z_0 было принято толщине осаждаемого оксида.

- Значение z_0 : 1,57 мкм;
- Значение z_1 : 0,60 мкм;

При проведении калибровки процесса ХМП параметры оптимизации и их области значений имели следующий вид:

- Длина планаризации ядра свертки L : от 1,0 мм до 2,5 мм;
- Скорость удаления материала с ровной поверхности K : от 600 Å/мин до 1800 Å/мин, приблизительная оценка получена по скорости планаризации на тестовом шаблоне в точке с плотность 100%, и равна 1556 Å/мин (рис.5);
- Максимальный расчетный радиус ядра свертки: r_{max} от 1,0 мм до 2,0 мм;

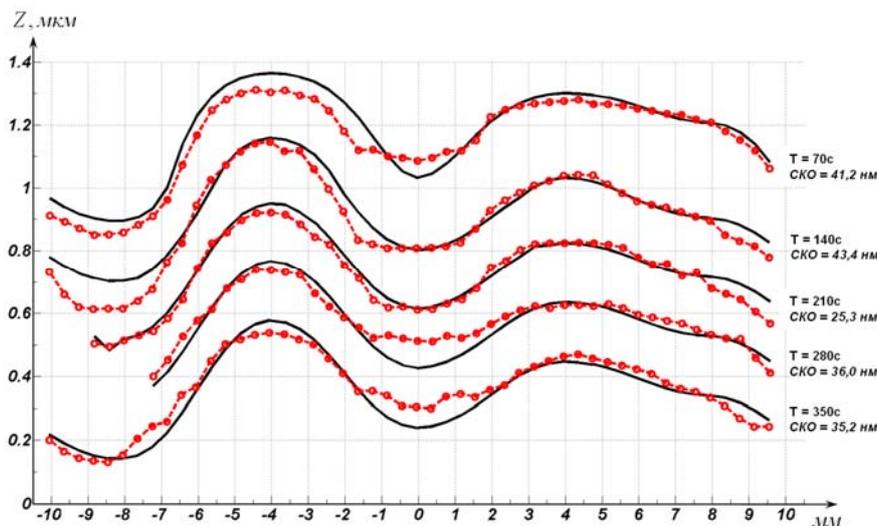


Рис.4. Результат моделирования (сплошная линия) толщины оксида после ХМП в сравнении с измеренными (пунктирная линия) значениями в тех же точках при калибровке модели для пяти различных времен планаризации

При оптимизации в качестве целевой функции было выбрано среднеквадратичное отклонение (СКО) между измеренными и промоделированными значениями, а критерием поиска – нахождение ее минимального значения.

В результате оптимизации были получены следующие значения параметров модели:

- Максимальный расчетный радиус: $r_{max} = 1910$ мкм;
- Длина планаризации: $L = 2226$ мкм;
- Скорость удаления материала: 1613 Å/мин;

При этом значение СКО составило $36,7$ нм, а значение коэффициента корреляции увеличилось до $R^2=0,9700$.

Из анализа рис.4 видно, что наибольшее расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования наблюдается для участков рельефа, имеющих малую толщину пленки диоксида. Следует заметить, что СКО по сравнению со средними значениями пленки оксида составляют довольно малые значения (СКО $36,7$ нм, при средних толщинах 500 нм – 1500 нм). Из гистограммы распределения абсолютной ошибки моделирования при калибровке для нескольких времен планаризации (рис.5), также видно, что большая часть результатов попала в интервал от -80 нм до $+80$ нм.

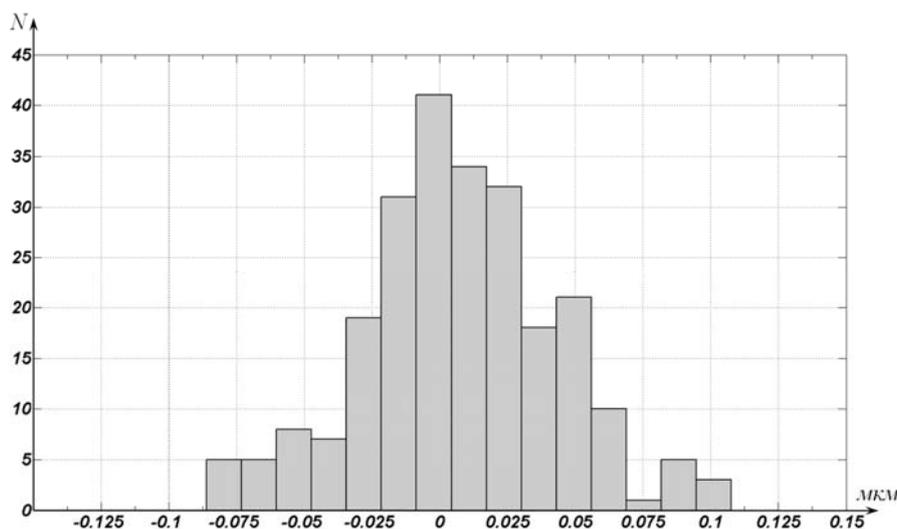


Рис.5. Гистограмма абсолютной ошибки моделирования при калибровке для нескольких времен планаризации

Моделирование распределение толщины пленки по пластине

Общее описание модели ХМП

Еще один важный вопрос при расчете распределения толщины оксида состоит в том, что кристалл никогда не обрабатывается как отдельный элемент, а изготавливается на пластине вместе с другими кристаллами. При этом скорость планаризации ровной поверхности различна для различных областей пластины. Это связано с несколькими факторами: неравномерность подачи полировочной жидкости, неоднородности, существующие на подушке, наличие базового среза на пластине и т.п.

Для учета таких дефектов и моделирование распределения толщины по всей пластине в [2] предложено использовать следующую функцию:

$$MRR(x, y) = ax + by + cxy + dx^2 + ey^2, \quad (4)$$

где x, y – координаты от центра пластины, a, b, c, d, e – коэффициенты. Однако, при проведении данной работы было получено, что данное уравнение не отражает действительного распределения скорости по пластине. При проведении калибровки ошибка составила более 100% при использовании выражения (4).

В данной работе предлагается другой подход к решению этой задачи. Как предполагается в [4] и как показывают результаты измерений, основное изменение скорости происходит по диаметру пластины, а на каждой окружности скорость удаления материала не меняется.

Поэтому если аппроксимировать некоторой функцией значения скорости в зависимости расстояния от центра, то можно получить ее распределение по всей пластине. Для аппроксимации в данной работе используется нейронная сеть *ANFIS* (*Adaptive Neural-Based Fuzzy Inference System*, адаптивная нейро-нечеткая система). Адаптивные модели нечеткого вывода являются универсальными аппроксиматорами широкого класса многомерных нелинейных функций [6], что оправдывает их использование в данном случае. Кроме этого также следует учитывать, что не равномерность скорости удаления материала в большей степени связана с такими факторами, которые сложно учесть с помощью строго физического обоснования. Таким образом, адаптивная модель нечеткого вывода является математическим описанием процессов возникающих при планаризации оксида кремния.

Для использования нейронной сети, необходима настройка ее коэффициентов или обучение. Для этого были использованы экспериментальные данные, полученные при удалении пленки оксида кремния со средней толщиной по пластине 1,70 мкм, нанесенного на ровную поверхность, после чего проведена планаризация за время 300 с.

В результате обучения нейронной сети был проведен расчет значений скорости по диаметру. На рис.6 приведены результаты измерений и расчетов.

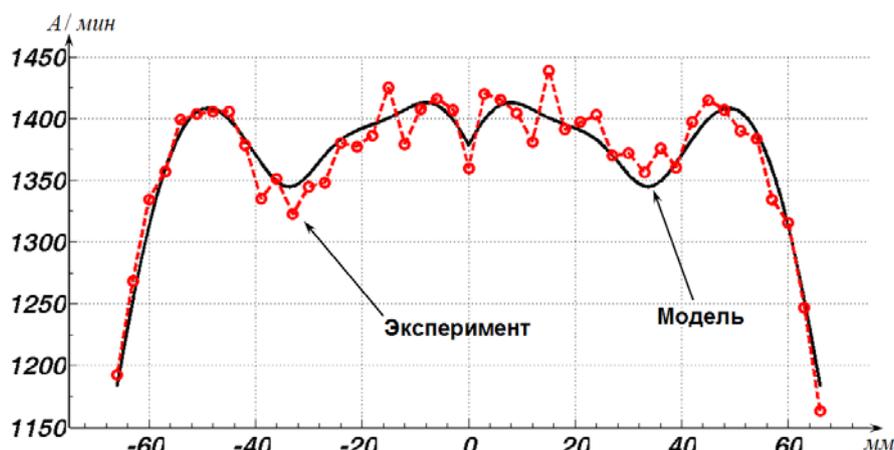


Рис.6. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования полученных после обучения нейронной сети

Как видно из рис.6 существует небольшое расхождение модели и эксперимента. В данном случае от модели и требовалось получение некоторого усредненного значения экспериментальных данных.

В работе [2] для расчета распределения толщины пленки оксида по пластине предложено использовать следующее выражение скорости удаления материала в *i*-ом кристалле:

$$K_i = \frac{1}{A} \iint MRR(x, y) dx dy, \quad (5)$$

В выражении (5) интеграл берется по области *i*-го кристалла, *A* – площадь кристалла. С помощью данного выражения получают, по сути, усредненное значение скорости в кристалле. Но усреднение можно использовать только для очень маленького кристалла, в противном случае, как например, для рассматриваемого тестового кристалла с размерами 20×20 мм, это приведет к появлению резкой границы после расчета толщины пленки. Чтобы избежать этого в данной работе предлагается использовать свое значение скорости для каждой точки пластины (кристалла). Таким образом, будет получена плавная граница в областях изменения скорости.

С другой стороны, как показано в [2] и [4], длина планаризации по пластине изменяется незначительно. Это значит, что изменением параметров ядра свертки по пластине можно пренебречь. Необходимо также отметить, что учесть изменения длины планаризации при расчете распределения толщины пленки по пластине достаточно сложно. Это связано с тем, что эффективная плотность, которая в наибольшей степени и зависит от длины планаризации, в отличие от скорости удаления материала, не является локальным

параметром. Следовательно, если учет длины планаризации все же необходим, то следует проводить усреднение длины планаризации в некоторой области и после этого на ее основе пересчитывать ядро свертки.

Моделирование распределения толщины пленки оксида после ХМП по всей пластине

С использованием полученной модели было рассчитано распределение скорости по всей пластине. Далее на основании выражения (2) для расчета толщины пленки оксида, матрицы ядра свертки, полученной при калибровке модели в области кристалла и матрицы локальной плотности, было выполнено моделирование распределения толщины пленки по пластине. Результат расчета представлен на рис.7.

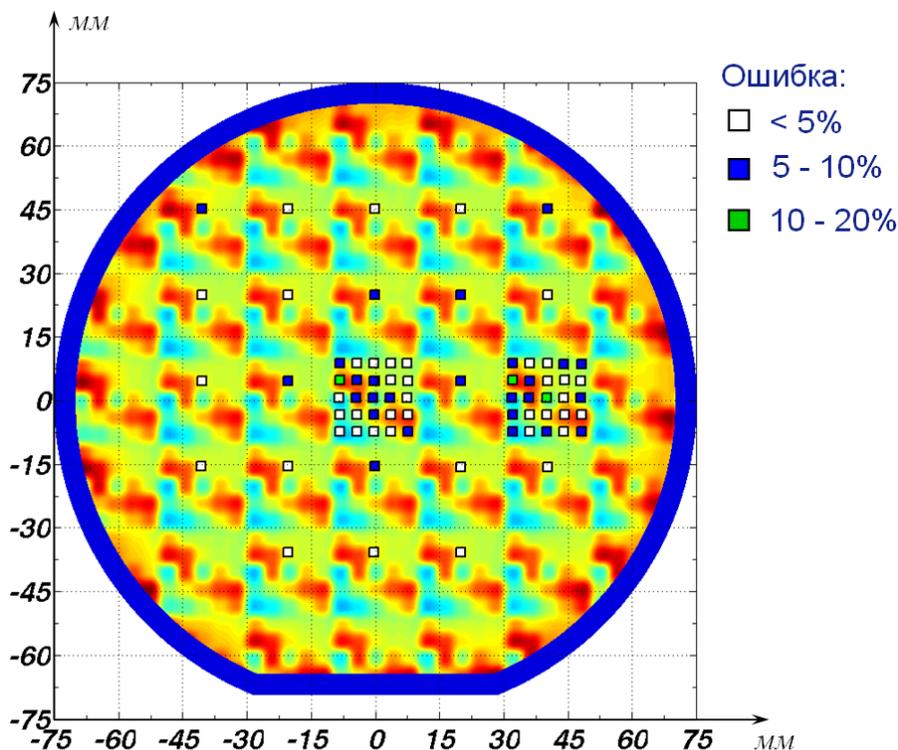


Рис.7. Распределение толщины пленки по пластине

Дополнительно для оценки адекватности модели было проведено сравнение полученных при моделировании значений с данными измерений. Из рис.7 видно, что для большинства измерений ошибка составляет не более 10%. **В целом среднеквадратичное отклонение составило 36,5 нм, коэффициент корреляции $R^2=0,9766$.**

В заключение в отношении моделирования распределения толщины пленки по всей пластине следует отметить, что более точные результаты для заданного времени планаризации можно получить, если учесть, что скорость удаления материала кроме изменения в радиальном направлении имеет также изменение и по окружности. Однако чтобы учесть этот эффект необходимо увеличить число измерений с пластины, на которой сформирован только окисел и которая не имеет рельефа.

Выводы

1. Рассмотрена модель технологической операции ХМП, основанная на уравнении Престона. Модель была реализована на базе нескольких систем автоматизированного проектирования. При этом ее основная часть была реализована на базе среды *Matlab*TM, что позволило сократить время разработки программного кода и повысить эффективность его работы при выполнении матричных операций.
2. Показано, что модель может быть использована для определения оптимального значения времени планаризации. С этой целью было проведено моделирование для пяти значений

времени планаризации. Значение среднеквадратичного отклонения при сравнении имевшихся экспериментальных данных с результатами моделирования увеличилось с **22,8 нм** до **38,8 нм**.

3. Проведено моделирование распределение скорости удаления материала с ровной поверхности по пластине с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы и предположения, что ее изменение происходит только в радиальном направлении. На основе полученного распределения проведено моделирования распределения толщины пленки по пластине после ХМП при наличии рельефа. Получено, что для 69 из 71 точки расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования **не превышает 10%, а СКО по всем точкам 36,5 нм**.
4. Показано, что предложенная модель позволяет предсказать результаты реального процесса ХМП. Это позволяет использовать ее для расчета рельефа после выполнения операции ХМП и одновременно рационально заполнять топологические слои металлизации фиктивными фигурами (*Dummy Features, Filler*), уменьшающими рельеф поверхности пластины, что, в конечном итоге, способствует повышению процента выход годных СБИС.

Литература

1. C. C. Chiang, J. Kawa, *Design For Manufacturability And Yield For Nano-Scale CMOS*. – Springer, 2007. – 251 стр.
2. D. O. Ouma, *Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Dielectric Planarization*. Dis. PhD in Electrical Engineering and Computer Science / Dennis Okumu Ouma; Massachusetts Institute of Technology – Massachusetts, 1998. – 228p.
3. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*, 3rd Int.Ed. – McGraw-Hill Book Company, Chap. 12, 1970.
4. J. M. Steigerwald, S.P. Murarka, R.J. Gutmann. *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*. – WILEY-VCH Verlag GmbH, 2004. – 322 стр.
5. Т. Н. Smith. *Device Independent Process Control of Dielectric Chemical Mechanical Polishing*. – Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 162 стр.
6. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов Ф.С., *Нечеткие модели и сети*. – М: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 284 стр.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА «ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОПИСЬ»

Демин А.А., Демина О.А., Байкина Л.Р.

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры ИУ4 МГТУ А. И. Власов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

INTELLECTUAL INTERACTIVE TRAINING SYSTEM «ELECTRONIC COPY-BOOK»

Dyomin Alexey Anatoljevich, Dyomina Olga Aleksandrovna, Baikina Liliya Rishatovna.
The supervisor of studies: Ph.D., IU4 chair associate professor of BMSTU A.I. Vlasov
BMSTU, Moscow, Russia.

Аннотация

«Электронная пропись» - это программно-аппаратный комплекс для обучения правописанию, тренировки почерка, скорости письма и грамотности на различных языках. За счет интерактивного взаимодействия с пользователем система позволяет минимизировать или исключать тренировку ненужных для конкретного пользователя упражнений и концентрироваться на тех упражнениях, которые у пользователя получаются хуже всего.

Abstract

The project is devoted to development of input device of hand-written information, allowing to training way of writing symbols, correcting of handwriting, and multilingual writing study. Analysis algorithms of raster images, recognition of the hand-written text are involved in the project, variants of hardware realization of the device are analysed and problems for the further development of the project are marked.

«Электронная пропись» - это программно-аппаратный комплекс для обучения правописанию, тренировки почерка, скорости письма и грамотности на различных языках. За счет интерактивного взаимодействия с пользователем система позволяет минимизировать или исключать тренировку ненужных для конкретного пользователя упражнений и концентрироваться на тех упражнениях, которые у пользователя получаются хуже всего. За счет организации процесса обучения в игровой форме система повышает мотивацию к обучению и увеличивает эффективность обучения.

Одной из стратегических целей данного проекта - создание полной замены бумажных тетрадей и книжек электронной тетрадью.

Программно-аппаратный комплекс состоит из: устройства графического ввода (графический планшет, сенсорный экран или специальное пишущее устройство), поле для отображения заданий (экран или бумага) и специализированного ПО «Электронная пропись» для анализа, выполненного упражнения.

В базовом варианте система ориентирована на работу с планшетными ноутбуками, но так же возможна работа с обычным компьютером и отдельным планшетом (сенсорным устройством рукописного ввода, диджитайзером), КПК или смартфонами, а так же электронными книжками.

Программное обеспечение системы «Электронная пропись», оценочную версию которой можно скачать на нашем сайте rpropis.vov.ru, содержит упражнения на русском и японском языке. В процессе выполнения квалификационного задания система предложит тренировать в первую очередь самые неудавшиеся символы, а в конце упражнения выведет средний бал за каллиграфию и скорость письма, а так же оценит прогресс обучения.

Система "Электронная пропись" прошла апробацию в московской средней общеобразовательной школе №436 среди учеников второго класса.

Работа с электронной прописью для учеников оказалась более удобной и приятной, чем использование типовых бумажных тетрадей.

Ученики остались очень довольны результатами работы с Электронной прописью и пожелали скорейшего внедрения ее в свою школу.

Данный проект ориентирован на внедрение в процесс обучения в государственных и частных образовательных учреждениях. Перспективным методом развития проекта является заключение договоров с производителями сенсорных устройств ввода и карманных ПК о включении в пакет поставки устройств программного обеспечения «Электронной прописи». Данное сотрудничество так же может оказаться выгодным для многих производителей, так как привлечет дополнительных покупателей.

По данным SmartMarketing, рынок КПК в 2007 году составил 150 тыс. штук. Количество устройств с сенсорным вводом растет, а значит, увеличивается и использование рукописного ввода. Текущая ситуация на рынке благоприятно влияет на развитие новых устройств рукописного ввода информации.

Один из вариантов выхода на рынок является продажа разрабатываемого ПО совместно с устройствами ручного ввода и КПК. В этом случае, основной целевой группой являются дети дошкольного возраста, школьники младших классов и студенты. Предполагаемая розничная стоимость комплекса составит 10000 руб, а ПО – 2000 руб.

Так же нашими потенциальными клиентами являются библиотеки, рукописные и печатные архивы, где требуется оцифровка бумажных документов.

Нашими потенциальными конкурентами являются компании-разработчики ПО распознавания рукописного текста для КПК и печатного текста для персональных компьютеров.

Вероятными рисками проекта, являются:

- 1) расширение деятельности компаний, занимающихся распознаванием текста;
- 2) нехватка материальных и временных ресурсов для первоочередного занятия рынка обучающих программ;
- 3) завышение предполагаемых объемов рынка.

Средний предполагаемый уровень зарплаты в создаваемой фирме будет выше среднего уровня оплаты труда по совместительству в Москве и составит 20 тыс. руб. Работа над проектом сотрудниками будет производиться на дому и в ВУЗе, что наиболее удобно при совмещении работы с учебой.

Конкурентный уровень оплаты труда будет стимулировать работу над проектом и поможет привлечь молодых специалистов, что снизит риск нехватки времени и увеличит конкурентоспособность фирмы в целом.

В основе интеллектуального ядра комплекса лежат методы и алгоритмы распознавания образов позволяющих качественно подойти к решению проблемы распознавания рукописного текста. Разработан и реализован ряд алгоритмов, позволяющих быстро и эффективно обрабатывать растровые данные и преобразовывать их к векторному представлению с минимальными потерями качества и данных.

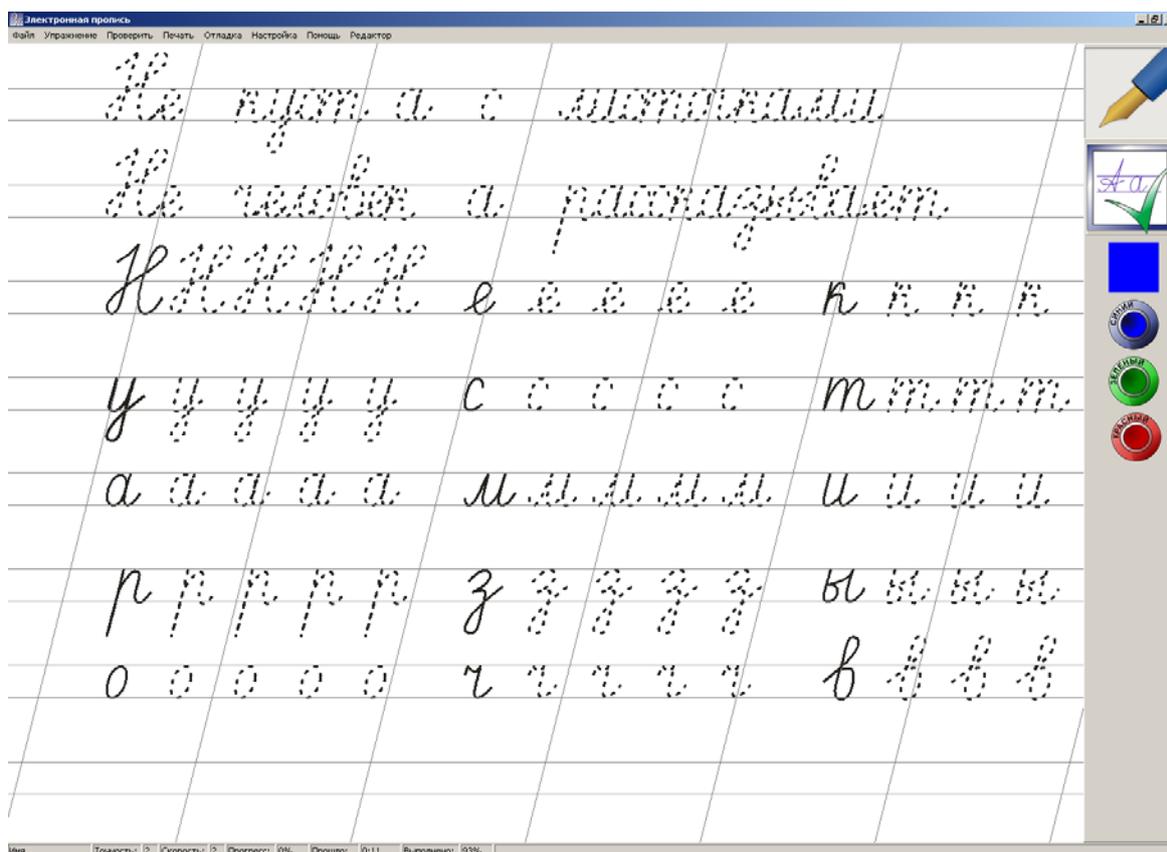


Рис. 1. Упражнение для тренировки почерка.

Разработанные методы анализа рукописного текста, (некоторые из которых представлены на рис. 1), позволят оцифровывать рукописные документы, архивы, рукописи, усовершенствовать ввод информации в мобильные устройства без клавиатуры, создать рукописное заполнение бланков в электронном виде.

Новшеством разрабатываемого устройства является создание интерактивного обучающего устройства, которое позволит совместить интеллектуальную игру и процесс обучения, что позволяет значительно увеличить эффективность выполнения упражнений. Команда имеет большой опыт в разработке и продаже программного и аппаратного обеспечения.

Создавая платформу для разработки новых упражнений, мы предоставляем возможность преподавателям апробировать свои научные труды быстро, выгодно и без рискованных вложений.

Проект «Электронная пропись» был представлен на нескольких конференциях, в том числе в научной конференции, организованной компанией Intel в Португалии в ноябре 2009г. Проект получил финансирование по программе УМНИК. На программное обеспечение получено свидетельство на регистрацию программ.

Литература

1. Влад Головач «Дизайн пользовательского интерфейса»
2. Костевич Л.С. Математическое программирование: Информ. Технологии оптимальных решений: Учеб. Пособие / Л.С. Костевич. – Мн.: Новое знание, 2003. – 424 с.: ил.
3. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн.1: Учебное пособие для ВУЗов /Общая редакция. А.И.Галушкина. М.:ИПРЖР, 2000.416 с., ил. (Нейрокомпьютеры и их применение).
4. Коробейников А. П. Методы распознавания образов, учебное пособие, Издательский центр ДГТУ, 2003.

ВНЕДРЕНИЕ ЧАСТНО - ГОСУДАРСТВЕННОГО ПАРТНЕРСТВА В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ

Демина О.А., Смурыгин И.М., Уваров Р.А.
Научный руководитель: доцент кафедры ИУ4 МГТУ Л.В. Журавлева
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

IMPLANTATION IS PRIVATE - THE STATE PARTNERSHIP IN A SPHERE OF EDUCATION

Demina O.A., Smurigin I.M., Uvarov R.A.
The supervisor of studies: the IU4 chair associate professor of BMSTU L.V. Zhuravleva
BMSTU, Moscow, Russia.

Аннотация

В современных экономических условиях все более востребованными на рынке труда становятся компетентные специалисты. Важнейшим направлением развития инженерного образования, в этом отношении, является специальная организация работы студентов на протяжении всей учебы в вузе. Внедрение частно- государственного партнерства в области образования и широкой академической мобильности для опережающего инновационного образования в качестве инструментов социальной адаптации студентов позволяет скомпенсировать отсутствие государственного регулирования в сфере трудоустройства выпускников вузов, увеличить число студентов, трудоустраивающихся по специальности.

Abstract

In modern economic conditions more and more claimed on a labour market there are competent experts. The major direction of development of an engineering education, in this respect, is the special organisation of operation of students throughout all study in high school. Implantation is private - the state partnership in a sphere of education and wide academic mobility for advanced innovative derivation as tools of social adaptation of students allows to compensate absence of state regulation in sphere of employment of graduates of high schools, to increase number of the students who are finding a job on a speciality.

В общественно – экономической системе развития с государственным регулированием социальная защита выпускников высших учебных заведений со стороны государства обеспечивалась следующими средствами.

1. Гарантированное трудоустройство в соответствии с выбранной профессией.
2. Адресное распределение выпускников вузов на профильные предприятия.
3. Адаптация выпускников вузов к условиям производства с помощью Института молодых специалистов. В соответствии со статусом молодого специалиста за выпускником закреплялось рабочее место сроком на три года, выпускник обеспечивался руководством наставников и жильем.
4. Профессиональный рост за счет обучения на курсах повышения квалификации.

В этой ситуации основные задачи по адаптации молодых специалистов к условиям производства выполняли производственные предприятия. В высших учебных заведениях студенты получали элементы адаптации с помощью курсового проектирования, производственных практик, дипломного проектирования.

Пути развития профессионального образования в наступившем столетии во многом определяются ориентирами отечественной высшей школы в условиях перехода к новым экономическим механизмам хозяйствования. Отсутствие государственного регулирования в сфере трудоустройства выпускников вузов создает следующую ситуацию.

1. Предоставление выпускникам вузов рабочих мест в соответствии с выбранной профессией не гарантировано.
2. Трудоустройством занимается сам выпускник.
3. Работодатель отдает предпочтение специалистам, имеющим опыт работы.

4. Социальный пакет не включает обеспечение жильем и образовательными услугами для повышения профессионального уровня.

В современных экономических условиях все более востребованными на рынке труда становятся *компетентные специалисты*, обладающие не только высоким профессионализмом, но и профессионально значимыми личностными качествами.

В этой ситуации достаточно интенсивно происходит смена образовательной парадигмы, основные задачи по формированию компетенций и профессионально значимых личностных качеств, позволяющих выпускникам быстро адаптироваться к постоянно меняющимся условиям производства, выполняют высшие учебные заведения и будущие выпускники.

Для подготовки компетентных специалистов необходимо применение наукоемких образовательных технологий. Превращение системы инженерного образования в сферу освоения способов познавательной и инженерной деятельности, коммуникативной и инженерной культуры требует изменения представлений о вузе с его учебно-воспитательным процессом. Важнейшим направлением развития инженерного образования в этом отношении является *специальная организация работы* студентов на протяжении всей учебы в вузе в комплексных полидисциплинарных практико-ориентированных коллективах (*командах*), органическое включение студентов в активную творческую деятельность, обеспечение их массового участия в исследовательской и инженерной работе (рис.1).



Рис. 1. Схема взаимодействия ВУЗов и предприятий при командных методах обучения

В результате такой подготовки создаются условия для частно - государственного партнерства в области образования (корпоративный университет, малые предприятия, созданные выпускниками), использования широкой академической мобильности для опережающего инновационного образования, формирования кадрового резерва преподавателей. Схема взаимодействия образовательных структур представлена на рис. 1.

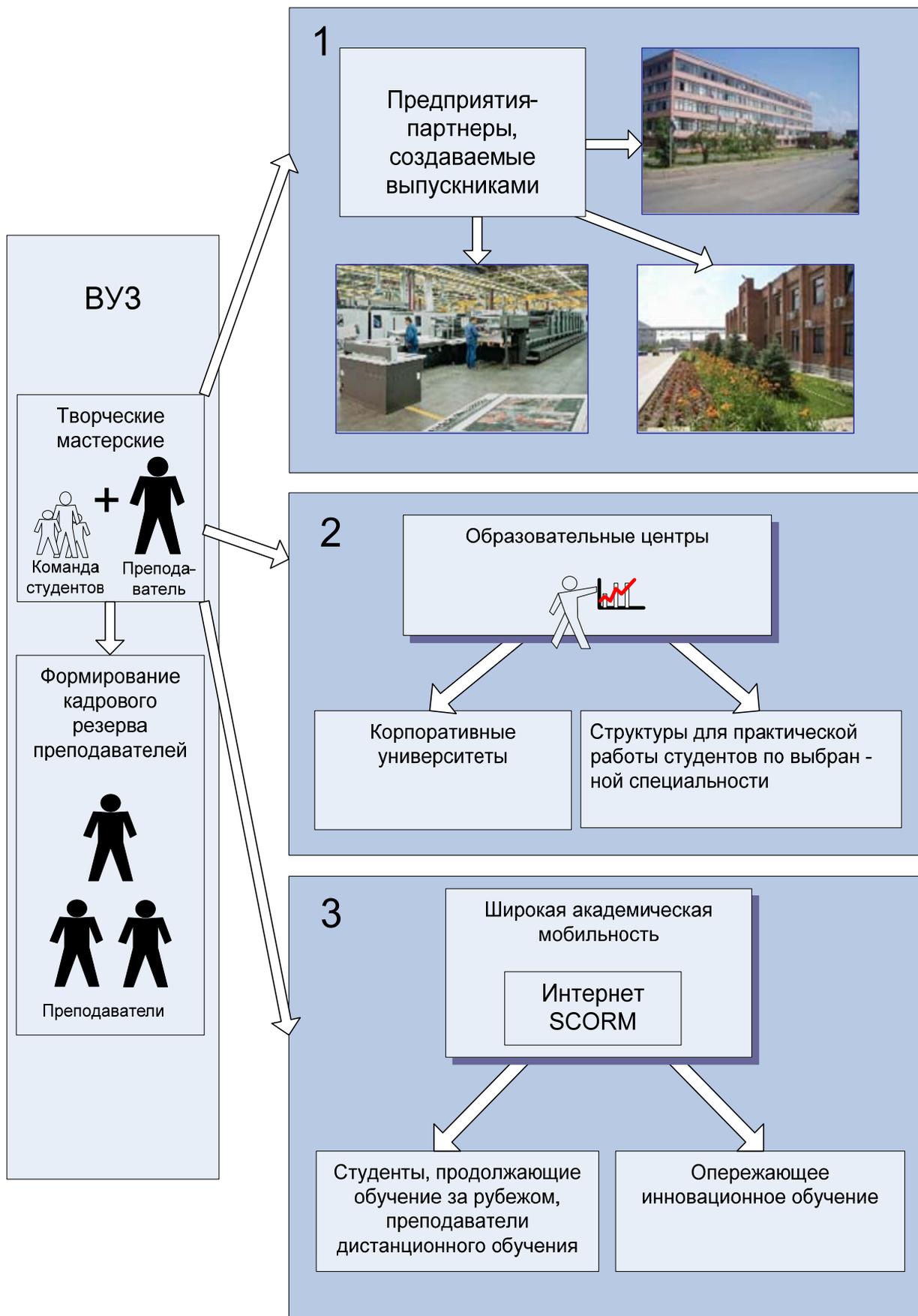


Рис.2. Частно - государственное партнерство в области образования

Для управления командами студентов целесообразно создавать *творческие мастерские*, которые возглавляют авторитетные ученые, ведущие инженеры. Перманентно обновляемое общество студентов и аспирантов образуют творческий коллектив (команду),

соответствующую научную школу, где реализуется преемственность в методологии познавательной деятельности, становлении представлений о мире и месте человека в мире, об идеалах, ценностях и целях научной и инженерной работы, закрепляются и передаются традиции искусства исследования и инженерной деятельности. Приоритетными направлениями частно - государственного партнерства в области профессионального образования является обеспечение участия объединений работодателей в разработке образовательных (корпоративных) стандартов; вовлечение вузов в инновационный процесс; распространение лучшего опыта взаимодействия промышленности и образования. Одним из средств адаптации выпускников вузов к условиям профессиональной деятельности в таких отраслях является Корпоративный университет и малые предприятия, создаваемые выпускниками из кадрового состава команд, сформировавшимися в процессе научно-практической работы в творческих мастерских.

Корпоративный университет позволяет студентам вузов получать опыт профессиональной деятельности с последующим трудоустройством по корпоративным стандартам в Корпоративном университете.

Малые предприятия, создаваемые выпускниками, готовы сотрудничать с ВУЗом, создают рабочие места для студентов, которые участвуют в инновационных проектах еще во время обучения в ВУЗе.

На предприятиях-партнерах студенты получают дополнительные образовательные услуги для приобретения отсутствующих у них умений и навыков, необходимых для решения производственных задач. Полученные навыки используются студентами в образовательном процессе при выполнении самостоятельных практических работ.

Современные образовательные технологии в системе инженерного образования должны органически включать широкую академическую мобильность. Это предоставляет студентам свободный выбор индивидуальной образовательной траектории в рамках выбранного направления подготовки. Благодаря этому при финансовом участии государства (именные стипендии), работодателей или заинтересованных научных школ за рубежом выпускники отечественных вузов получают возможность продолжить образование за рубежом.

Обучаясь в командах, студенты получают опыт не только научно-практической работы, но и педагогической, и управленческой. Выпускники, продолжающие обучение за рубежом, привлекаются для дистанционного обучения студентов отечественных вузов с использованием международной системы дистанционного обучения SCORM.

Доступ к средствам дистанционного обучения, возможность размещения альтернативных средств обучения с использованием информационных технологий, управление самостоятельной работой студентов с использованием автоматизированных систем информационной поддержки позволяют применять как групповую, так и индивидуально – ориентированную организацию учебного процесса, обеспечивает опережающее инновационное образование.

Предлагаемые образовательные технологии и формы взаимодействия образования с производством и бизнесом уже имеют опыт практической реализации в МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Литература

1. Коржуев А.В. Попков В.А. Дидактика высшей школы: Учебное пособие. Издательство Академия, 2008г., 416 с., ил.
2. Е. В. Ширшов, Е. В. Ефимова Организация учебной деятельности в вузе на основе информационно-коммуникационных технологий. Логос, 2006 г., 272 стр., с ил.

ВАКУУМНЫЙ МАССАЖЕР С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ параметров

Томилин В.А, Петросян Г.А.

Научные руководители: проф. д.м.н. Г.И.Семикин, проф. д.т.н. Е.А.Деулин
МГТУ им. Н.Э. Баумана каф. МТ11-82, г. Москва, Россия.

VACUUM MASSAGER WITH WIDE RANGE OF MEDICAL PARAMETERS

V.A.Tomilin, G.A.Petrosyan

G.I.Semikhin, E.A.Deulin

BMSTU of Baumana MT11-82, Moscow, Russia.

Аннотация

Представлена схема и конструкция вакуумного массажера, созданного в МГТУ им. Баумана. Представленная конструкция позволяет улучшить вакуумные параметры массажера от 10^4 Па до 10^5 Па, также как многократно расширить диапазон частот по сравнению с существующими массажерами.

Abstract:

Vacuum scheme and design of vacuum massager being designed in BMSTU are presented. The presented design helps increase vacuum parameters of massager from 10^4 Pa till 10^5 Pa also as makes the frequency band many times wider in comparison with the existing ones.

1. Введение

Вакуумный массаж производится за счет чередования повышенного и пониженного давления воздуха в специальных аспираторах, которые прикладывают к телу больного. Используются воздушные волны как средство массажного воздействия. Вакуумный массаж позволяет разблокировать ткани, активизировать лимфатическую циркуляцию и метаболические процессы в коже, устранить отёчность и восстановить жизненную силу всего организма.

В настоящее время российскими и зарубежными фирмами разрабатываются различные модели вакуумных массажеров. (Таблица 1)

Таблица 1. Характеристики вакуумных массажеров.

	BTL 12 Vac	BTL Vac	ABM 1
Диапазон рабочих давлений, Па	$10^5 - 5 \cdot 10^4$	$10^5 - 3 \cdot 10^4$	$10^5 - 5 \cdot 10^4$
Диапазон частот, имп/мин (имп/с)	10-60 (0,166-1)	15-60 (0,25-1)	30-80 (0,5-1,33)

Давление в камере уменьшается за счет увеличения времени откачки, в связи с чем уменьшается частота импульсов. Из этого можно отметить, что недостатками существующих массажеров являются: ограниченный диапазон давлений (наименьшее давление 30 кПа); малый диапазон частот (10-90 имп/мин).

Задачей данной работы является разработка вакуумного оздоровительного массажера на базе передовых вакуумных технологий, а также разработка современной системы управления.

2. Описание вакуумной системы.

Требования к вакуумному массажеру.

1) Для оказания оздоровительного эффекта в вакуумной камере необходимо создать разрежение. Слишком низкое давление может повредить кожу человека, поэтому примем предельное давление в банке $p' = 1 \cdot 10^4$ Па. Для обеспечения высокой скорости откачки необходим насос с быстротой откачки $S_H \geq 0.010$ м³/с.

2) Сущность данной установки заключается в том, что давление в камере меняется циклически. При предельном давлении частота пульсаций может составить 20 импульсов в секунду. Для реализации такой высокой частоты пульсаций требуется быстродействующие клапана с изменяемой проводимостью.

3) В качестве блока управления используется схема микроконтроллера собственного производства, построенная на микроконтроллере ATmega 16-16PU. Данный микроконтроллер является наилучшим решением для поставленной задачи. В него входят все необходимые элементы: 8-ми разрядный АЦП, который позволяет достаточно точно оцифровывать получаемые сигналы с баратрона; необходимое количество внутренней памяти для зашития в него управляющей программы; имеется достаточное количество выходов для подключения графического дисплея, клавиатуры ввода данных, для подключения принимающих датчиков и управляющих механизмов.

Описание работы массажера:

Вакуумная камера 1 устанавливается на кожу человека. Насос 5, при открытом клапане 3 и закрытом клапане 2, производит откачку воздуха из камеры до необходимого давления за время откачки $t_{отк}=0.096$ с. По истечению этого времени клапан 3 закрывается, а клапан 2 открывается и напускает воздух из атмосферы за время напуска $t_{нап}=0.005$ с. Цикл повторяется многократно.

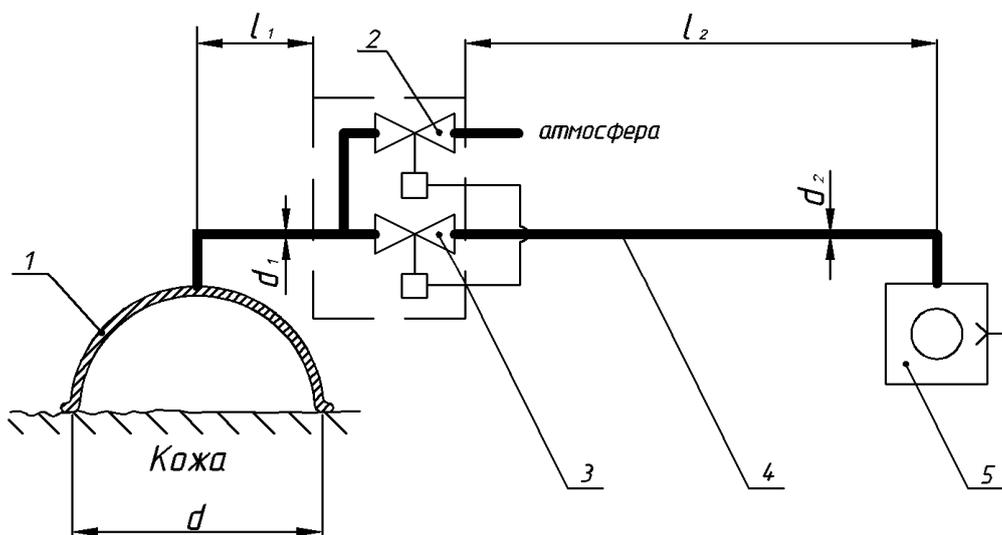


Рис. 1. Схема вакуумного массажера.

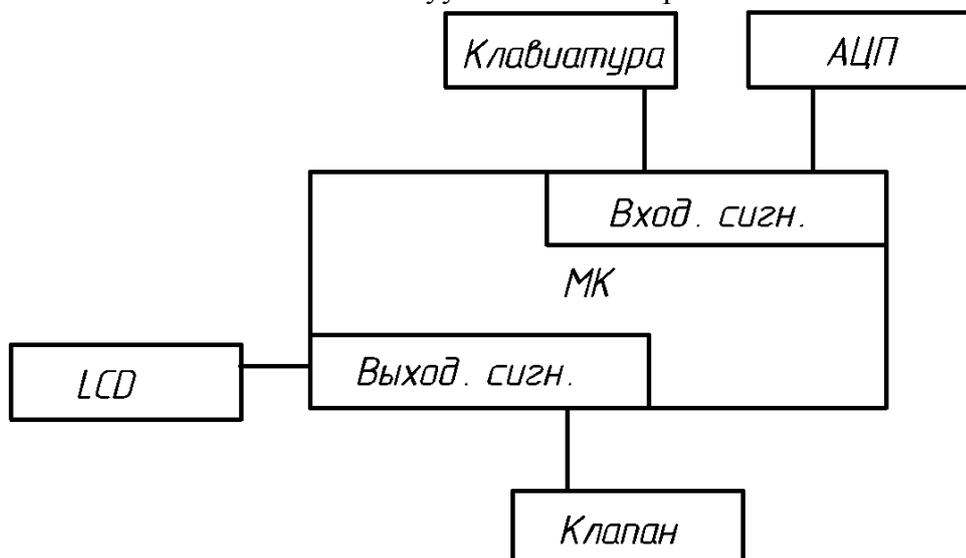


Рис. 2. Схема блока управления.

Время напуска и время откачки зависят от геометрических параметров трубопровода и клапана, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические характеристики трубопроводов

Диаметр, м	Длина, м	Проводимость, м ³ /с
$d_1=6 \cdot 10^{-3}$	$l_1=70 \cdot 10^{-3}$	1.188
$d_2=8 \cdot 10^{-3}$	$l_2=10$	0,102

$U_K=0.00022 \text{ м}^3/\text{с}$ – проводимость клапана при откачке до давления $p_2 = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$

$U=0.0002195 \text{ м}^3/\text{с}$ – общая проводимость при последовательном соединении трубопроводов

3. Теоретическое исследование динамических параметров системы

Данная установка обладает тремя способами регулирования её параметров:

1) Изменение времени откачки

Если требуется получить давление в камере $p_2 = 6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ можно программно задать время откачки, соответствующее необходимому давлению.

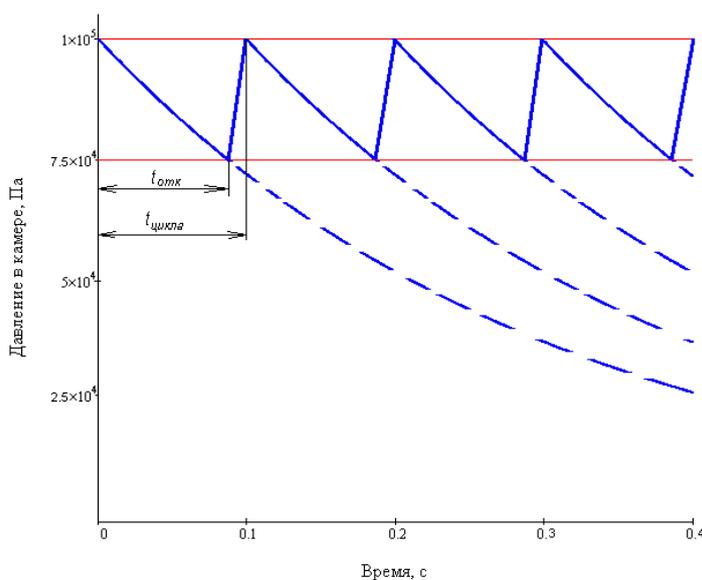


Рис.3. Динамика изменения давления (10 имп/с).

2) Изменение проводимости клапана

Увеличение проводимости влечет увеличение реальной скорости откачки, вследствие чего мы получим новую кривую откачки.

Чтобы получить в банке более низкое давление $p_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и при этом оставить неизменной частоту импульсов 10 имп/с, необходимо изменить проводимость клапана U_K .

$U_K = 0.00055 \text{ м}^3/\text{с}$ - проводимость клапана при откачке до давления $p_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$

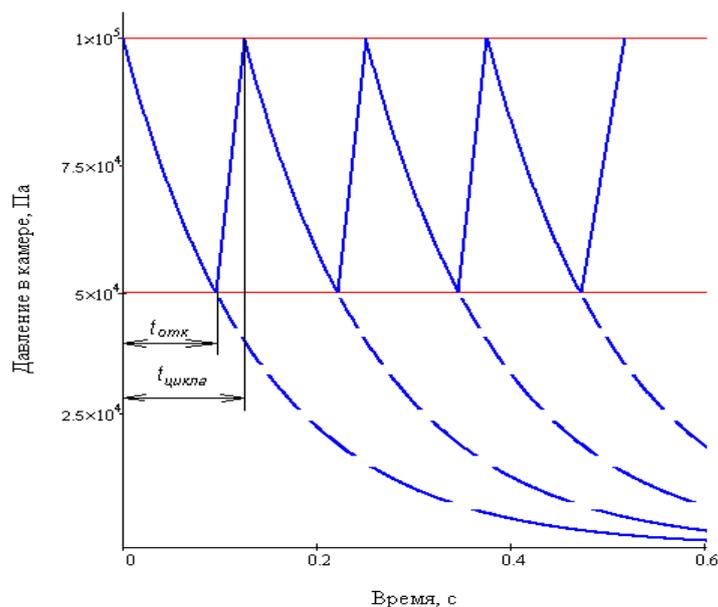


Рис. 4. Динамика изменения давления при частоте 10 имп/с

3) Комбинированный метод

Система управления позволяет задавать время откачки не зависимо от проводимости клапана, тем самым можем получить различные вариации частот и давлений.

Выводы

Разработка показывает возможность регулирования давления от 10^4 до 10^5 Па и изменения частоты пульсаций от 120-1200 имп/мин (2-20 имп/с), за счет изменения вакуумных параметров системы: времени откачки и проводимости клапана.

По сравнению с существующими моделями диапазон давлений расширен на 30% при максимальной частоте работы, а также минимум в два раза увеличен диапазон частот.

Новая разработка незаменима в исследовании действия вакуумного массажа на тело человека при различных параметрах вакуума и частоты импульсов. Благодаря широкому диапазону давлений и частот появилась возможность определить оптимальные параметры массажа для наилучшего оздоровительного эффекта.

Литература

- 1) Л. Н. Розанов «Вакуумная техника» Москва «Высшая школа» 2007 г. 390 стр.
- 2) Вакуумный оздоровительный массажер, Компания ВТЛ, <http://www.btlmed.ru/> 2004 г.
- 3) Вакуумный оздоровительный массажер, Каскад ФТО. <http://www.kaskad-fto.ru/> 2008 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОДИАПАЗОННОГО ДАТЧИКА ВАКУУМА И КОЭФФИЦИЕНТА ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОРБАТОМ

Скрылев А.В.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Деулин Евгений Алексеевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана, МТ-11, 2-Баумканская ул., 5, Москва 105005, Россия
e-mail: straikerstraiker@mail.ru

RESEARCHES OF THE GAUGE OF VACUUM IN WIDE RANGE AND COVERAGE COEFFICIENT

Skrylev A.V.

dr.science., prof. Deulin E.A.
Bauman Moscow State Technical University 2nd Baumanskay st. 5, Moscow 105005, Russia
E-mail: straikerstraiker@mail.ru

Аннотация

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента покрытия поверхностей сорбатов от коэффициента трения при 22°С и различных значениях влажности. Данные результаты подтверждают теорию «сухого трения» и являются основой для создания на базе исследованного датчика прибора для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов. Приведено обоснование работ по проведению исследований и созданию прибора, приведена конструкция разрабатываемого датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов.

Предпосылки создания

Уровень сегодняшней техники поражает воображение. Если заглянуть в интернет или любой каталог фирмы в области вакуумной техники, то от количества представленных там приборов для измерения остаточного давления даже у специалиста разбегаются глаза. Ряд современных приборов имеет довольно широкий диапазон измерения вакуума и составляет до 10 порядков. Но их техническое решение заключается в объединении в одном корпусе нескольких приборов, обладающих узким (до 4-х порядков) диапазоном измеряемых давлений и работающих на разных физических принципах (теплопроводности, ионизации атомов и др.). Стоимость таких универсальных приборов превышает на 1-2 тысячи долларов суммарную стоимость датчиков, входящих в универсальный прибор. Вследствие чего, исследователям и технологам приходится усложнять процесс измерения остаточного давления в камере.

В современных технологиях нанесения тонких пленок в фотоэлектронных приборах (ФЭП), в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в установках для экспериментальных термоядерных исследований типа Токамак и др. важно знать значение коэффициента покрытия поверхностей сорбатов для определения степени чистоты поверхности, поскольку этот параметр является критичным. В настоящее время его рассчитывают по известным уравнениям: Генри, Ленгмюра, БЭТ. Но проблема использования этих методов заключается в том, что измерение параметров входящих в уравнения происходит удаленно от исследуемой поверхности, что вносит большие погрешности в значение коэффициента покрытия поверхностей сорбатов.

В результате изучения теории «сухого трения», разработанной Деулиным Е.А., возникла идея создания датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне давлений и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов, который способен решить вышеописанные проблемы в современных технологиях.

Принцип работы датчика основан на том, что при изменении остаточного давления, температуры, влажности происходят не только количественные изменения сорбированного газа (коэффициента покрытия), но и качественные изменения в природе и характере трения [1]:

- в области давлений ($10^5 - 10$) Па – доминирует «капиллярное трение»,
- в области давлений ($10 - 1$) Па – сочетается действие капиллярного и вязкостного трения, т.е. имеет место «капиллярно-вязкостное трение»,
- в области давлений ($1 - 10^{-1}$) Па – доминирует «вязкостное трение»,
- в области давлений ($10^{-1} - 10^{-7}$) Па – доминирует «адгезионное» трение,
- в области давлений $P < 10^{-7}$ Па – доминирует «когезионное» трение.

Создаваемый датчик основывается на функциональной зависимости коэффициента покрытия поверхностей сорбатом, остаточного давления и коэффициента трения [2]. Данная зависимость была исследована для пар трения металл-металл и диэлектрик-диэлектрик. Эксперименты показывают, что рассматриваемая зависимость применима в случае трения-скольжения в шарикоподшипнике [3].

Экспериментальная зависимость [4], представленная на рис. 1, отражает характер изменения теоретических кривых зависимости коэффициента трения от коэффициента покрытия поверхности сорбатом и остаточного давления [2,3], что позволяет проводить измерения коэффициента покрытия косвенным методом.

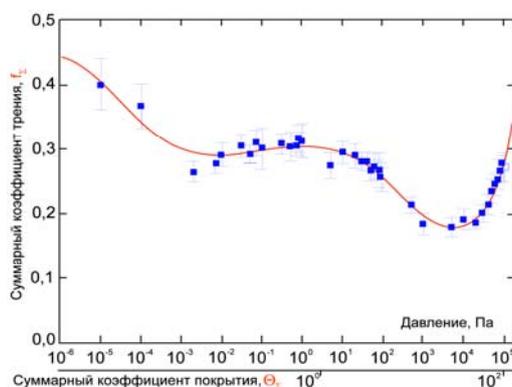


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента трения от коэффициента покрытия поверхности сорбатом в паре трения Si – Si.

Для подтверждения теории, что коэффициент покрытия поверхностей сорбатом функционально зависит от коэффициента трения нами были проведены нижеописанные эксперименты.

Методика проведения эксперимента

На рис. 2 представлена фотография установки, на которой проводились измерения.

Установка состоит из:

- кремниевой подложки 1, по которой должна скользить кремниевая пластинка;
- механизма передачи вращательного движения 2;
- неподвижно закрепленный диск с градусной шкалой 3;
- стрелка-указатель 4.

Последовательность проведения эксперимента:

1. Перед проведением эксперимента поверхности кремниевой подложки и пластинки протираются спиртом;
2. Кремниевая подложка выравнивается по горизонту;
3. На диске с градусной шкалой выставляется 0°;
4. Кремниевая пластинка кладется в центр подложки;
5. Вращается стрелка-указатель по часовой стрелке;
6. Фиксируется момент, когда пластинка начинает скользить по подложке;
7. Записывается значение угла поворота кремниевой подложки;

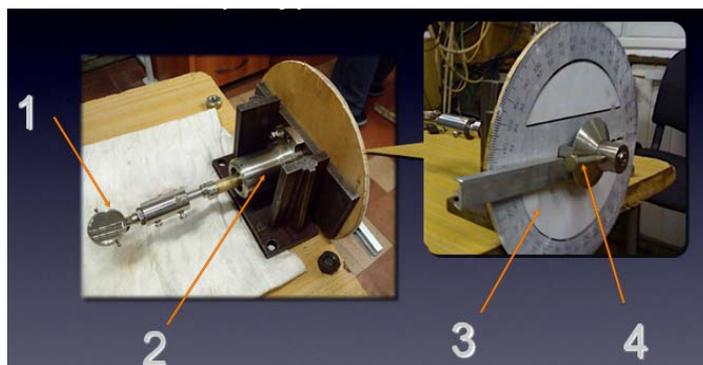


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки.

8. Система возвращается в горизонтальное положение вращением стрелки-указателя против часовой стрелки;
9. Повторяются шаги 1-8;
10. Обрабатываются полученные экспериментальные значения угла наклона подложки, при котором начинается скольжение пластинки.

Коэффициент трения вычисляется по известному углу трения, который, в свою очередь, равен углу наклона подложки, при котором пластинка приходит в движение, по формуле:

$$f_i^j = \tan(\psi_i^j), \quad (1)$$

где: ψ_i^j - угол трения при i -том замере в j -том эксперименте;

Были проведены измерения коэффициента трения при комнатной температуре и влажности. На рис. 3 представлена диаграмма, отображающая угол, коэффициент трения и количество попыток, при которых кремниевая пластинка начинала движение.

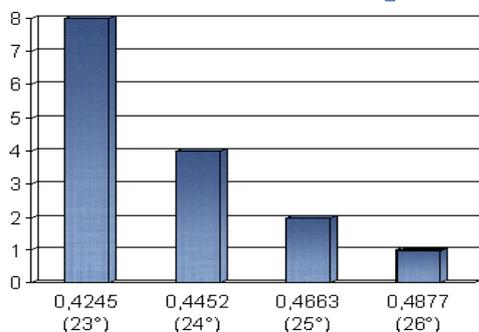


Рис. 3. Распределение значений коэффициента трения от угла поворота при повторении опыта 15 раз.

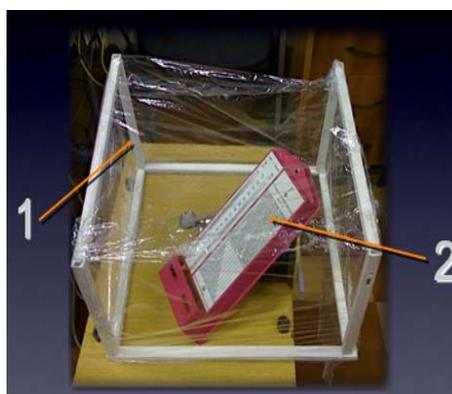


Рис. 4. Колпак на стенд, позволяющий проводить эксперименты с повышенной влажностью
1-деревянный каркас с полиэтиленовой пленкой, 2- психрометр для измерения влажности

В результате, получается средний коэффициент трения при комнатной температуре (22°C) и влажности (30%) равный 0,4398, что в переводе на градусную меру равно 23° 42'. Далее нами был собран колпак рис. 4, позволяющий проводить эксперименты с повышенной влажностью. Полученная зависимость коэффициента трения от влажности воздуха представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлен пересчет влажности в коэффициент покрытия поверхностей сорбатом, можно заметить, что характер изменения кривой аналогичен экспериментальной [4] и теоретической [2,3] зависимостям.

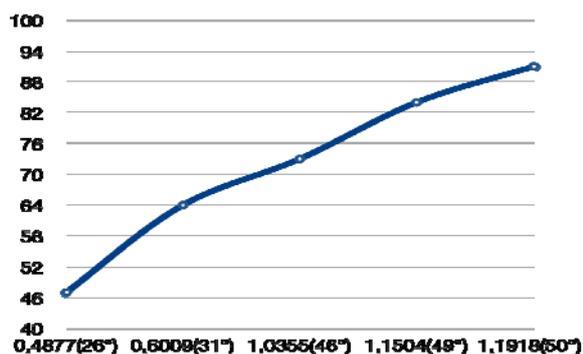


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от влажности.

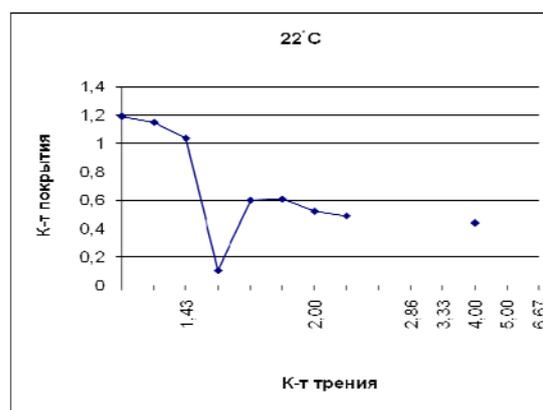


Рис. 6. Зависимость коэффициента покрытия поверхности сорбатом от коэффициента трения при 22 С

Выводы

Проведенные нами эксперименты подтверждают теорию так называемого «сухого трения» и являются предпосылками для создания прибора, в основе которого лежат описываемые явления [1]. Для того, чтобы запустить прибор в массовое производство, т.е. выйти на рынок приборов для измерения вакуума, и создать совершенно новый рынок приборов для измерения коэффициента покрытия поверхностей сорбатом, необходимо накопление практических знаний о том, что происходит на поверхностях при «сухом трении». С этой целью мы проводим эксперименты, в которых наблюдаем за поведением коэффициента трения при различных значениях температуры, влажности, давления. Следующим нашим шагом будет проведение аналогичных экспериментов, но уже в вакуумной камере, где мы будем исследовать зависимость коэффициента трения и коэффициента покрытия поверхностей сорбатом от остаточного давления. Затем будем проводить эксперименты в прогреваемой камере и исследовать эту зависимость от температуры среды. Затем уже проводить эксперименты с датчиком, который уже находится в производстве и в настоящее время подается заявка на его патентование.

Благодарности

Авторы благодарят Федеральное агентство по образованию РФ за поддержку проведенных работ, выполненных в соответствии с государственным контрактом на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд П2421 от 19 ноября 2009 г. в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Литература

1. Patent of RF № 2316744. Deulin, E.A. A method of vacuum measurement. Bull. Inv.-10.02, 2008.
2. Deulin, E.A. The Role of Adsorbed Water Film For Sliding Friction of Smooth and Rough Surfaces. in Tribology - Science and Application Conference. 2004. Vienna.
3. Deulin, E.A., et al. Effect of Gas Adsorption on Tribology of Ball Bearings in Vacuum. in 15th International Colloquium on Tribology "Automotive and Industrial Lubrication". 2006. Stuttgart, Ostfildern: Technische Akademie Esslingen.
4. Deulin, E.A., A.A. Gatsenko, and A.B. Loginov, Friction force of smooth surfaces of SiO₂-SiO₂ as a function of residual pressure. Surface Science, 1999. 433-435: p. 288-292.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ НАУКОЕМКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Петросян Г.А., Бредихин И.С.*

Проф д.т.н. Деулин Е.А.

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, дом 5

**Черноголовка, Институт физики твердого тела, ул. Институтская, дом 2*

NEW HIGHTTECH METHODS USING FOR ANALYSIS THE STRUCTURE OF SURFACE AS RESULT OF PHYSICAL INFLUENCE

Petrosyan G.A., Bredikhin I.S.*

Deulin E.A.

Moscow, BMSTU, 2-nd Baumanskaya, 5

**Chernogolovka, Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences, Institutskaya, 2*

Аннотация

В работе приведены результаты исследований процесса наводороживания материалов пар трения в вакууме и в атмосфере. Приводятся косвенные доказательства появления новых молекул изотопов водорода и его изотопов в материалах пар трения.

Abstract

Presented results of the research process of hydrogenation of materials of friction pairs in vacuum and in an atmosphere. Presented indirect evidence of the appearance of new molecules of hydrogen isotopes in the materials of friction pairs.

Введение

Процессы, происходящие при «сухом» трении представляют комплекс физико-химических процессов, природа которых разнообразна и вызывает дискуссии до сих пор. К таким явлениям относят процесс принудительного растворения сорбированного газа предсказанный в 1997 году [1]. Известно, что наличие водорода в стали резко снижает её твердость, пластичность и ударную вязкость, изменяет магнитные и электрические свойства стали. Кроме того, водород снижает усталостную и длительную прочность стали.

Авторами уже доказано, что в процессе «сухого» трения в вакууме, концентрация атомов водорода в материалах пары трения шарикоподшипника увеличивается в 100-300 раз по сравнению с исходной. Результаты экспериментов [2] приведенные на рис.1 показывают увеличение концентрации водорода на глубине 0,8 мкм.

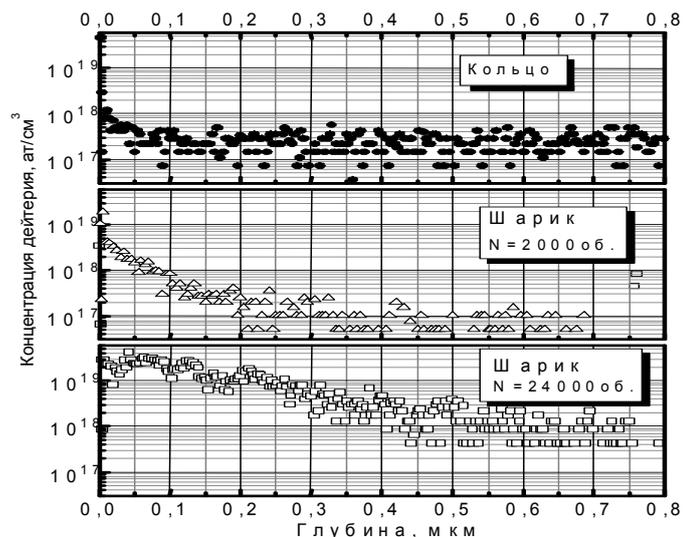


Рис.1 Распределение дейтерия по глубине в неподвижном кольце, шарике после 2000

Так же доказано [3], что в процессе «сухого» трения транспортируемого газа о стенку трубопровода наблюдается в той же мере (в 100-300 раз) увеличение концентрации водорода.

Далее представлены результаты новых экспериментов, проводимых для исследования пары трения металла и резца в процессе резания.

Методика экспериментов

Выдвигаемая авторами гипотеза основана на том, что в связи с процессом генерации водорода и его изотопов при их растворении в материалах пары трения, концентрация растворенных атомов в материале будет значительно превышать концентрацию тех же изотопов содержащихся в окружающей среде.

Цель экспериментов – подтвердить гипотезу о появлении третьего изотопа водорода (трития) в материалах пары трения. Так как в отличие от других изотопов водорода содержания трития в природе ничтожно мало, и тритий обладает радиоактивностью с периодом полураспада 12,5 лет, то эксперимент проводился, при помощи радиометра-дозиметра МКС-01Р для определения бета излучения в зоне резания (рассматриваемое нами как процесс трения с экстремальными параметрами), которое затем сопоставлялось с фоновыми уровнями излучений.

Результаты экспериментов

В результате эксперимента получено незначительное увеличение дозы излучения в зоне резания по сравнению с фоновым. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показания измерительных приборов при эксперименте

А) Гамма излучение

Фоновое излучение, мкЗв/час	Излучение при резании, мкЗв/час		
0.10	0.19	0.11	0.16

Б) Рентгеновское излучение

Фоновое излучение, мкЗв/час	Излучение при резании, мкЗв/час
0.11	0.13

Для точной проверки гипотезы на наноуровне был проведен ВИМС анализ резца на установке TOF SIMS5 (рис.1).



Рис. 2. Работа на установке TOF SIMS5 в г. Черноголовка

Известно, что времяпролетный масс-спектрометр TOF SIMS 5 обладает лучшими характеристиками для всех видов поверхностной спектроскопии вторичных ионов. Он предоставляет детальную информацию об элементном и молекулярном составе поверхности и приповерхностных тонких слоях образца.

Для подтверждения результатов эксперимента был проведен эксперимент ВИМС было установлено, что концентрация трития в зоне трения превышала концентрацию трития в базовой области на 37%.

На рис. 3 представлен график зависимости количества атомов трития от глубины травления на базовой поверхности резца, ранее не участвующей в резании.

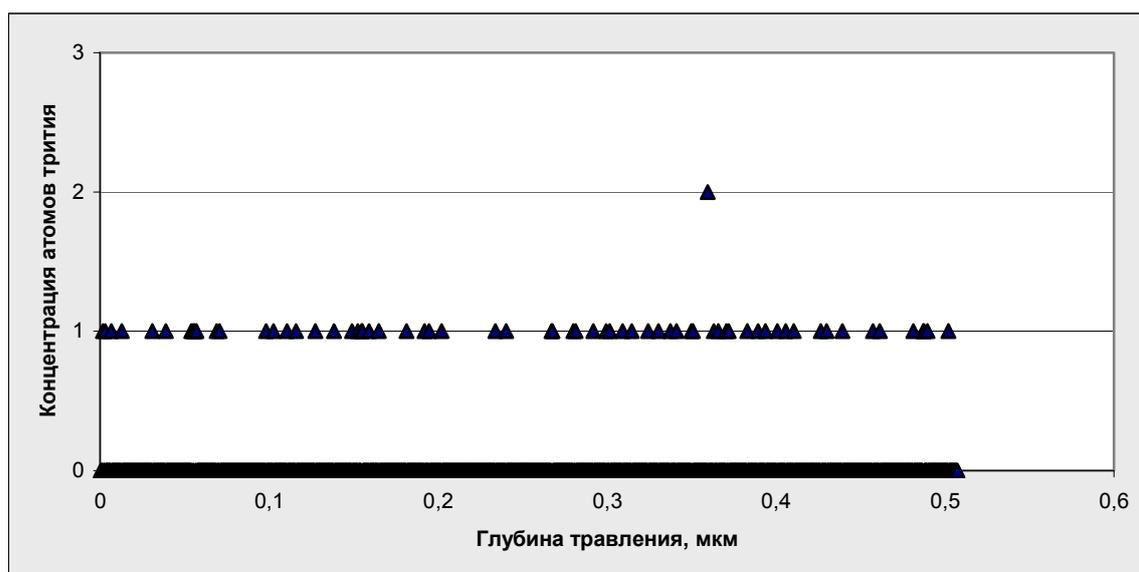


Рис.3. Зависимость концентрации атомов трития от глубины травления на базовой поверхности резца

На рис. 4 представлен график зависимости количества атомов трития от глубины травления на рабочей поверхности резца.

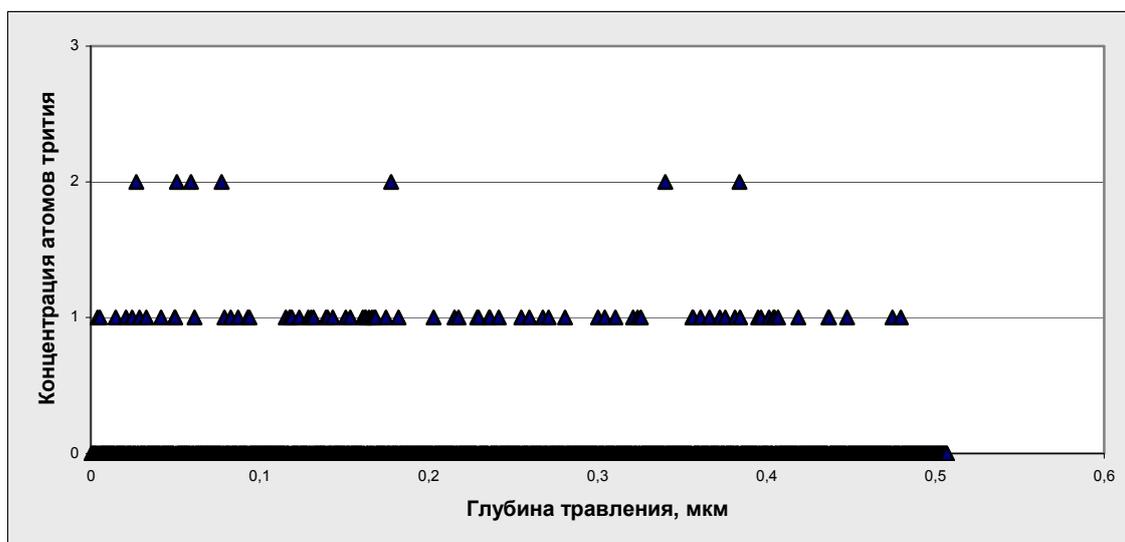


Рис.4. Зависимость концентрации атомов трития от глубины травления на рабочей поверхности резца

Заключение

В результате экспериментов было получено косвенное доказательство появления в материалах пар трения третьего изотопа водорода, трития, подтверждаемое незначительным увеличением регистрируемой дозы излучения.

Литература

- 1) Deulin E.A. Exchange of gases at friction in vacuum// ECASIA '97.- John Wiley & sons, Nov. 1997.- pp. 1170-1175.
- 2) Deulin E.A., Nevshoupa R.A. Deuterium Penetration Into The Bulk Of A Steel Ball Of A Ball Bearing Due To Its Rotation In Vacuum.- Applied Surface Science, 144-145, (1999), pp.268-268.
- 3) Деулин Е.А., Мирзоев Абдуджаббор.М., Мирзоев Абдугаффор.М. Исследование причин появления «водородной болезни» в материале труб магистральных газопроводов и разработка вакуумных методов их устранения / Нано-и Микросистемная Техника , №5 (94) 2008, с.с. 40-43

Благодарность авторов:

Авторы благодарят Министерство Науки Российской Федерации за Контракт П2421 (шифр «НК-417П») от 19.11.2009 г., во многом облегчивший процесс подготовки и переработки вышеизложенных материалов.

КОРПУС СВЧ ИС ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА С ДИАПАЗОНОМ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ДО 4 ГГц ПО ТЕХНОЛОГИИ LTCC

^{1,2}Будяков А.С., ^{1,2}Греков А.И., ¹Кузьмин А.Д., ¹Савченко Е.М.
к.т.н., доцент, с.н.с., Будяков А.С.

ФГУП «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия

МГТУ им. Баумана, г. Москва, Россия

SURFACE-MOUNT RFIC PACKAGE BASED ON LTCC WITH UP TO 4 GHz OPERATION FREQUENCY RANGE

^{1,2}Budyakov A.S., ^{1,2} Grekov A.I., ¹Kuzmin A.D., ¹Savchenko E.M.

PhD, lecturer, senior researcher, Budyakov A.S.

FSUE “NPP “PULSAR”, Moscow, Russia

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

Приведена конструкция безвыводного СВЧ корпуса для поверхностного монтажа с диапазоном рабочих частот до 4 ГГц по технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC). Корпус предназначен для создания СВЧ интегральных схем генераторов управляемых напряжением. Проведено исследование S-параметров корпуса в диапазоне СВЧ методами численного моделирования и экспериментального исследования на анализаторе цепей.

Abstract

A leadless RFIC package based on LTCC (Low Temperature Co-fire Ceramic) with operation frequency range up to 4 GHz is presented. The package is designed for radio frequency integrated circuit (RFIC) voltage controlled oscillators manufacturing. Research of S-parameters of the IC package is performed by means of numeric simulation and experimental measurements by network analyzer.

Элементы в безвыводных корпусах для поверхностного монтажа широко применяются в современной радиоэлектронной аппаратуре. Такие корпуса позволяют обеспечить малые габариты и меньшее влияние параметров корпуса на электрические характеристики интегральных схем (ИС) в диапазоне ВЧ и СВЧ. Однако номенклатура отечественных корпусов для поверхностного монтажа на сегодняшний день небольшая и часто не удовлетворяет всем требованиям разработчиков ВЧ и СВЧ интегральных схем.

В данной работе была поставлена задача разработки корпуса для СВЧ ИС генератора управляемого напряжением (ГУН) для поверхностного монтажа с внешними размерами не более 7,0x5,0 мм, при этом возникает необходимость разместить на монтажной площадке кристалл с активной частью схемы ГУН и микроплату с катушкой индуктивности резонатора. Рассматривались варианты применения корпусов для поверхностного монтажа производства ОАО «ЗПП» (г. Йошкар-Ола). В таблице 1 приведено сравнение наиболее подходящих корпусов производства ОАО «ЗПП» и разработанного корпуса по технологии LTCC.

Таблица 1. Основные параметры рассматриваемых корпусов

Условное обозначение	Кол-во контактных площадок/кол-во выводных площадок, шт.	Габаритные размеры тела корпуса, мм (длина на ширину)	Размеры монтажной площадки, мм
QLCC 6/8-1	6/8	5,0 x 5,0	2,25x2,8
QLCC10/10-1	10/10	9,1 x 7,1	6,6x2,6
L-ПК03	4/4	7,0 x 5,0	до 3,1x3,0*

* Указан максимальный размер монтажной площадки

Корпус QLCC 6/8-1 имеет размеры и форму монтажной площадки, не позволяющие разместить некоторые варианты микроплаты катушки индуктивности вместе с кристаллом ИС ГУН, тогда как корпус QLCC10/10-1 имеет достаточные размеры монтажной площадки, но не подходит по требованиям к внешним размерам. Поэтому было принято разработать новый корпус L-РК03, удовлетворяющим предъявленным требованиям. На рис. 1 приведен чертеж корпуса L-РК03. Внутренний вывод №8 предназначен для подключения напряжения источника питания, имеет вытянутую форму для снижения длины монтажной проволоки, вывод №5 металлизированного дна полости подключается к "земляной" шине питания, выводы №6, №7 служат для подключения выводов управляющего напряжения и выходного напряжения ИС генератора управляемого напряжением. Внутренние выводы корпуса L-РК03 сформированы на дне полости, для увеличения монтажной площадки.

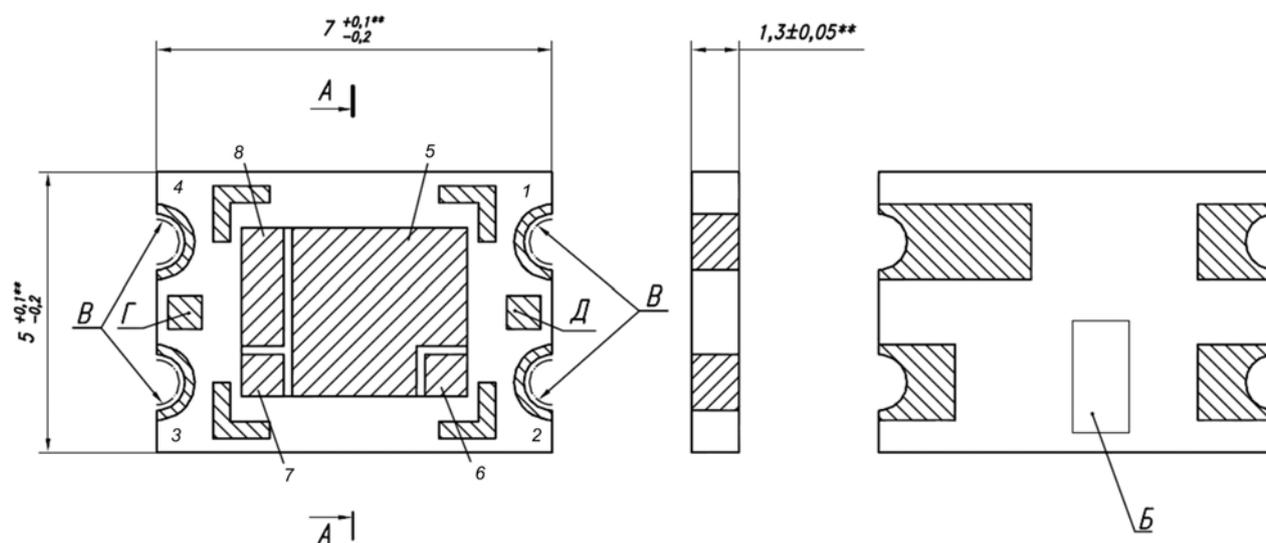


Рис. 1 – Чертеж корпуса L-РК03

Для формирования слоев металлизации использовалась трафаретная печать с минимальным разрешением 140 мкм с пастами на основе золота. Крышка корпуса представляет керамический лист с размерами 4,5x5 мм, которая крепится сверху с помощью клея.

Электромагнитное моделирование корпуса ИС проводилось с применением метода конечных элементов. Особенность построения модели корпуса ИС заключается в том, что она должна соответствовать экспериментальной измерительной оснастке для адекватного сравнения результатов. Варианты проведения экспериментальных исследований значительно ограничены доступом к выводам корпуса. Так внутренние выводы корпуса могут быть подключены к анализатору цепей лишь с помощью специальных зондов, которые требуют определенного расположения смежных контактных площадок типа «сигнал-земля» или «земля-сигнал-земля». Однако в данном случае расположение контактных площадок (траверсов) не допускает подключение зондов, поэтому для проведения экспериментальных исследований требуется подключение к внутренним выводам корпуса каких-либо эталонных структур, параметры которых могут быть достаточно точно рассчитаны. В качестве эталонной структуры был выбран небольшой отрезок микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом на поликоровой плате. На рис. 2 приведена трехмерная модель корпуса

L-РК03 в измерительной оснастке с отрезком микрополосковой линии, подключенной к внутренним выводам корпуса. Такой эксперимент позволяет определить предельно достижимые значения вносимых потерь и потери на отражение, обусловленные влиянием корпуса. Для определения паразитных входных емкостей корпуса требуется проведение

эксперимента с внутренними выводами, работающими в режиме холостого хода. Для определения паразитных индуктивностей корпуса, необходимо проведение эксперимента с хорошо заземленными внутренними контактами.

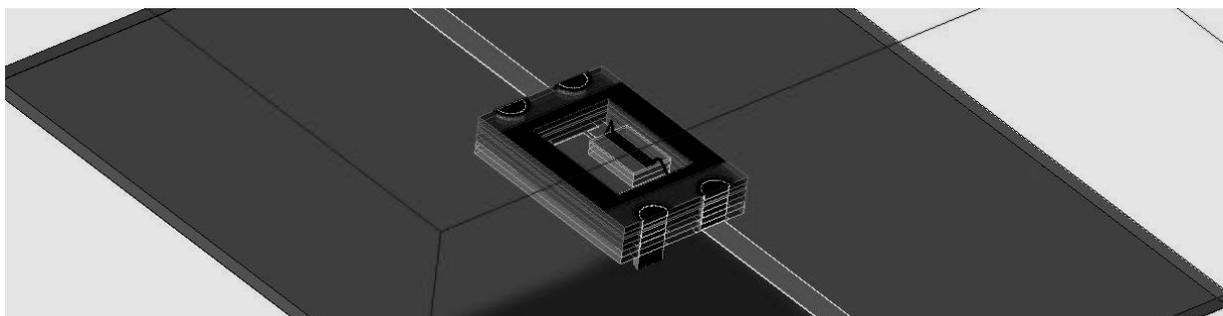


Рис. 2 – Трехмерная модель корпуса LPK03-1 в измерительной оснастке

На рис. 3 приведена фотография измерительной оснастки, с дополнительными переходниками для подключения к анализатору цепей. Перед проведением измерений, анализатор цепей был откалиброван с определением плоскостей отсчета по линиям №1 и №2.

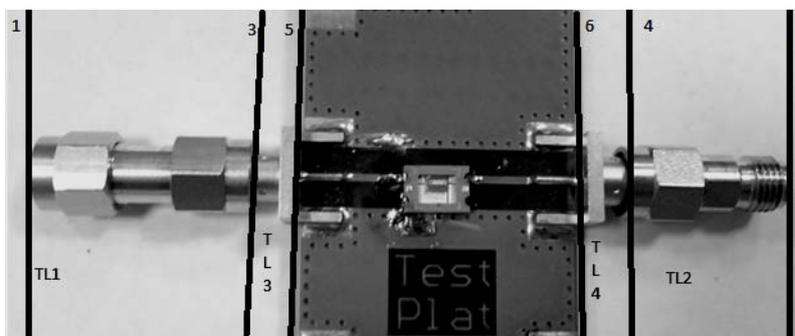


Рис. 3 – Экспериментальный образец корпуса LPK03-1 в измерительной оснастке

Для сравнения результатов моделирования и измерений, была составлена схема рис. 4. Матрица S-параметров, полученная при электромагнитном моделировании, была включена в схему в виде четырехполюсника SNP1. Матрица S-параметров SNP1 соответствует плоскостям отсчета №5, №6. Для адекватного сравнения с результатами измерений в схему рис. 4 были добавлены идеальные линии TL1-TL4, которые моделируют фазовые сдвиги обусловленные наличием SMA разъемов (отсчетные плоскости №3, №4) и переходников (№1, №2). Таким образом, схема рис. 4 позволяет смоделировать S-параметры корпуса LPK03 соответствующие отсчетным плоскостям №1, №2. Четырехполюсник с подключенными результатами измерения S-параметров представлен на рис. 4 элементом SNP2.

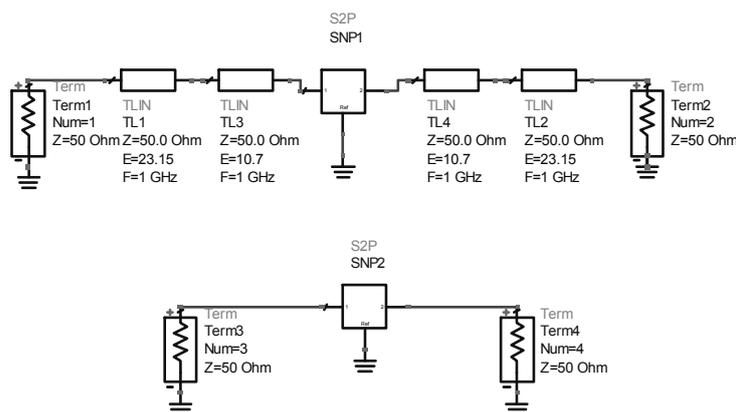


Рис. 4 – Схема моделирования, учитывающая влияние измерительной оснастки

При сравнении результатов моделирования и измерений можно сделать вывод о достаточно высокой точности проведенного численного моделирования, рис. 5. Частотные характеристики S-параметров рис. 5, соответствующие портам №1, №2 относятся к результатам моделирования, а портам №3, №4 относятся к результатам измерения.

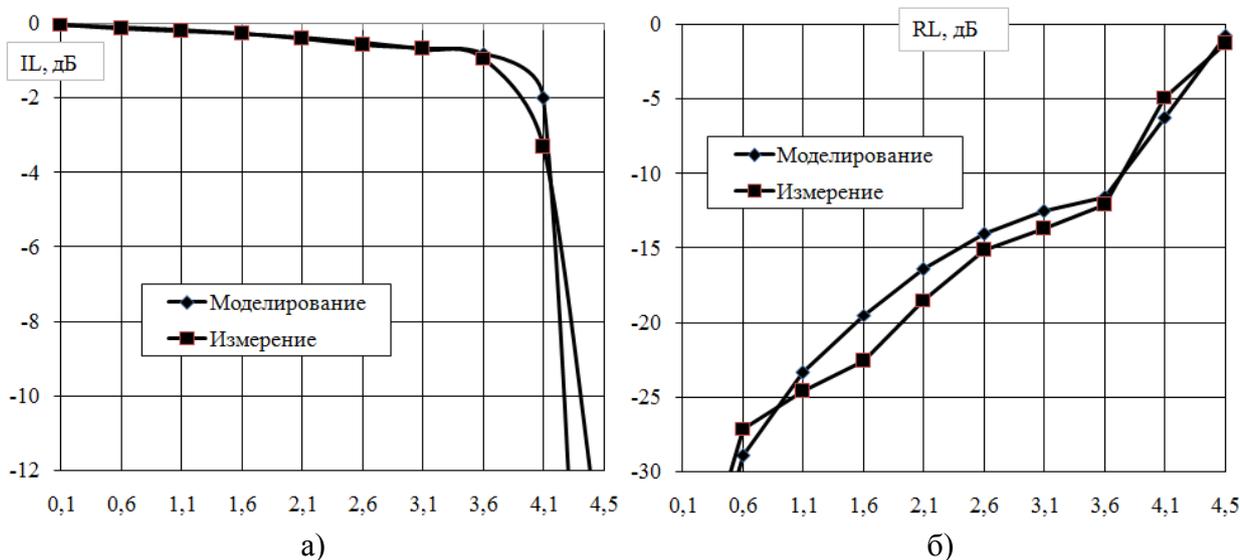


Рис. 5 – Частотные характеристики вносимых потерь (а) и потерь на отражение (б) корпуса LPK03-1 в измерительной оснастке с микрополосковой линией включенной между внутренними выводами №6-№7 (рис. 1)

Разработан СВЧ корпус для поверхностного монтажа с внешними размерами 7,0 x 5,0 мм и монтажной площадкой до 3,1x3,0 мм. Корпус вносит потери по мощности менее 2 дБ в диапазоне частот до 4 ГГц. На основе разработанного корпуса возможно создание широкого ряда генераторов управляемых напряжением с резонатором на основе кварца, ПАВ, катушки индуктивности и т.д. или ГУН с резонатором, интегрированным на кристалл.

Литература

1. Егоров Г.Н., Капкин С.П., Стельмахович Л.А., Трофименков В.В., Хрипко В.А. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Электроника НТБ. - 2006. - №3. - С. 60–65.
2. Будяков А.С., Вагин А.В., Кузьмин А.Д., Мельничук С.А., Савченко Е.М. Исследование СВЧ параметров стандартных отечественных металлокерамических корпусов для поверхностного монтажа // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2009, С. 92-93.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АНИМАЦИИ

Иванов А.М., Ривкин А.М., Лавров И.В.
Научный руководитель: к.т.н., доцент, Журавлева Л.В.,
МГТУ им. Баумана, Москва, Российская Федерация

CONTROL SYSTEM OF WORKING OUT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ASSEMBLAGE OF PRODUCTS OF ELECTRONIC TECHNICS WITH USE OF MEANS OF ANIMATION

Ivanov A.M., Rivkin A.M. Lavrov I.V.
Supervisor of studies: Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, Zhuravleva L.V.,
BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Работа посвящена описанию автоматизированной системы управления разработкой технологических процессов сборки изделий электронной техники с использованием средств анимации. Представлено описание процесса тестирования, адаптации и внедрения данной системы в процесс обучения. Проведена оценка эффективности использования системы управления.

Annotation

Work is devoted describing of a control system by working out of technological processes of assemblage of products of electronic technics with use means of animation. The description of process of testing, adaptation and introduction of the given system is presented to studying process. The analysis of expediency of creation of system is carried out.

Автоматизированная система управления разработкой технологических процессов (ТП) сборки электронных средств представляет собой обучающую систему для проведения семинарских занятий по курсу «Технология производства электронных средств». Она содержит видеоматериалы, базу данных, необходимые для разработки Технологического процесса сборки интегральных схем, а также формы документов и вспомогательные справочные материалы для разработки и кодирования технологической документации. Обучение процессу разработки технологических процессов и технологической документации проводится на примере базового процесса сборки многокристальных больших интегральных схем. Базовый технологический процесс сборки визуализируется с помощью анимационных роликов.

Последовательность этапов разработки технологического процесса состоит из просмотра и анализа анимационных роликов операций (рис.1); расположения их по маршруту сборки; выбора из базы данных названий операций и присвоения их соответствующим роликам; выбора из базы данных формы маршрутной карты и разработки маршрутной карты; кодирования маршрутной карты с использованием справочников; разработки операций, операционных карт и их кодирования.



Рис.1. Интерфейс просмотра анимационных роликов в обучающей Системе.

Интерфейс кодирования технологической документации представлен на рис.2

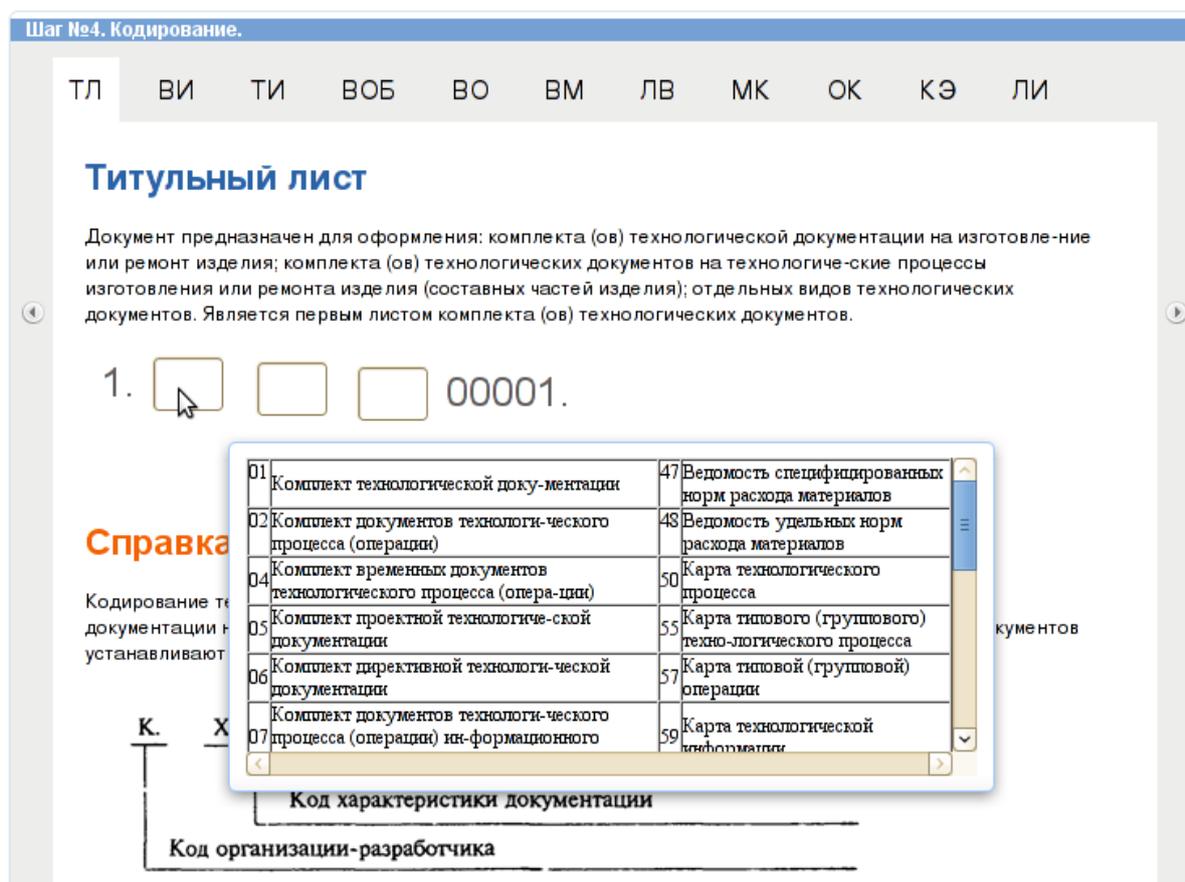


Рис.2.Интерфейс кодирования титульного листа технологического процесса.

Автоматизированная система управления разработкой технологических процессов сборки изделий электронных средств строится по модульному принципу (рис.3): модуль авторизации пользователей; модуль пользователей; модуль операций; модуль переходов; модуль роликов и др. Каждый модуль выполняет свои функции.

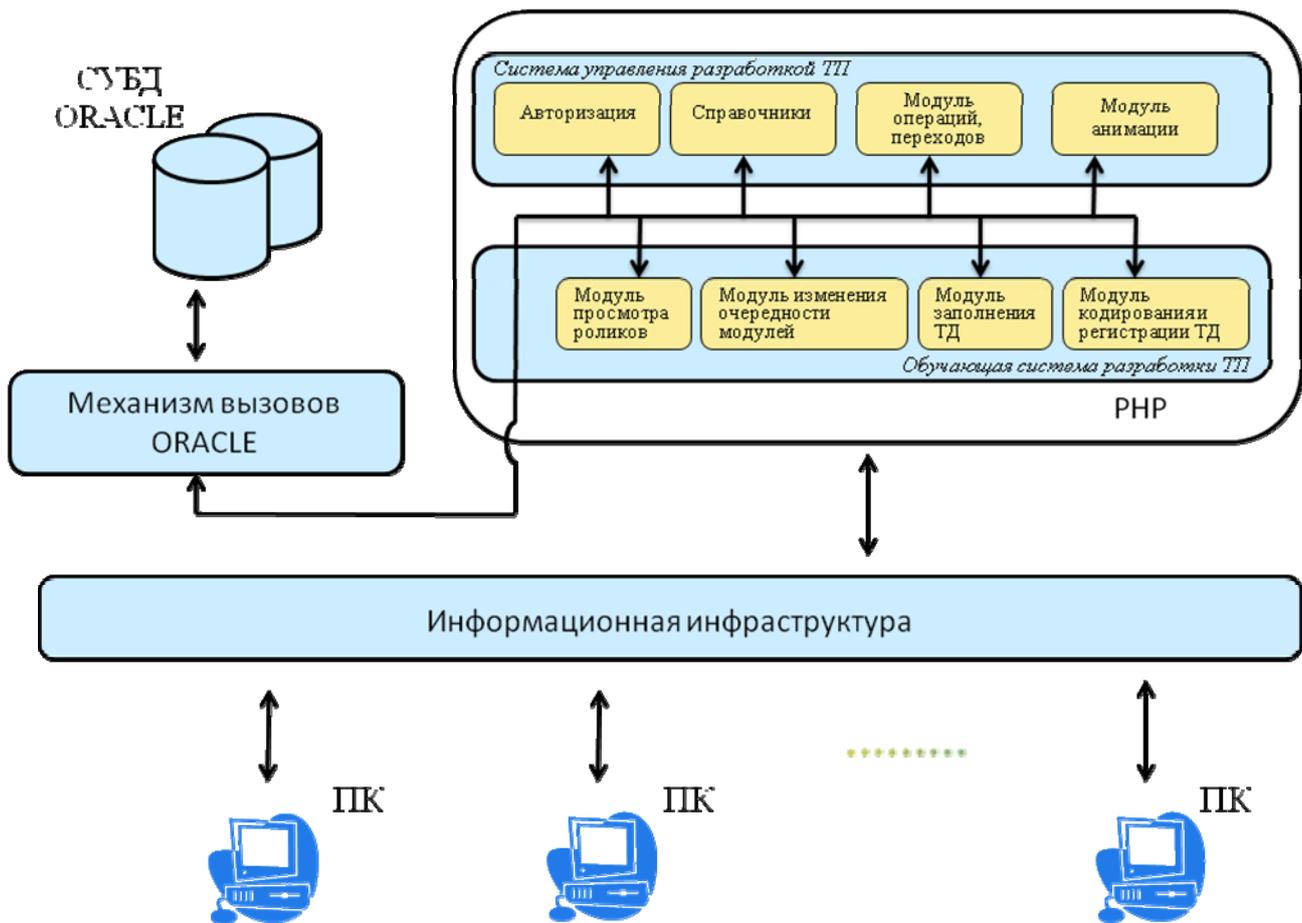


Рис.3. Автоматизированная система обучения разработке технологических процессов сборки электронных средств и технологической документации

Модуль авторизации пользователей в системе служит для входа пользователей в систему. В зависимости от выбранного типа пользователя (пользователь в группе, преподаватель, администратор) отображается свой уникальный интерфейс пользователя для решаемых задач.

Модуль пользователей позволяет добавлять, удалять, изменять данные о пользователях в системе.

Модуль операций позволяет добавлять, удалять, изменять данные операций в разрабатываемом ТП сборки изделий электронной техники. Данный модуль содержит перечень названий всех операций в требуемом порядке, которые использует пользователь в процессе разработки ТП и технологической документации.

Модуль переходов служит для разработки операций сборки и операционных карт. Разработка операций аналогична разработке маршрутной карты.

Модуль роликов содержит набор роликов, которые можно добавлять, изменять, удалять. Каждый ролик визуализирует конкретную операцию базового ТП сборки изделий электронной техники.

Требования, предъявляемые к обучающей системе

К обучающей системе предъявляются требования по стандартизации и унификации; по эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и хранению компонентов системы; к программному обеспечению.

Эффективность обучающей системы

Оценка эффективности разработанной обучающей системы проводилась с использованием теории сверток по комплексному показателю. Эффективность процесса обучения при использовании разработанной системы повышается на 57%. В настоящее время система развернута и проходит тестирование на сервере кафедры ИУ4 МГТУ им. Баумана.

Литература

1. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite – М. Диалог-МИФИ, 2003.
8. Кватрани Т. Визуальное моделирование с помощью Rational Rose 2002 и UML, - М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
9. Фаулер М., Кендалл С. UML. Основы, - СПб.: Символ-Плюс, 2002.
10. Ушакова С.Е., Сергеев В.С., Ключников А.В., Привалов В.П. Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры. Учеб. пособие для вузов, - М.: Радио и связь, 1986.
11. Бушминский И.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова, М.: Радио и связь, 1989.
12. Гусев В.П. Технология радиоаппаратостроения. Учеб. пособие для вузов. М.: «Высшая школа», 1972.
13. Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / Под общ. Ред. В.А. Шахнова, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Михеев Г.А.

Научный руководитель: доцент Соловьев В.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

AUTOMATED TESTING SYSTEM OF RELIABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Mikheev G.A.

Scientific adviser: docent Soloviev V.A.

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman, Moscow, Russia

Аннотация

В работе рассматривается проблема создания программного обеспечения для расчета характеристик надежности электронной аппаратуры. В качестве методик для расчета были выбраны как стандартный коэффициентный метод, а также метод по π -факторам.

Abstract

This paper considers the problem of creating software to calculate the reliability characteristics of electronic equipment. As techniques for the calculation were chosen the standard coefficient method and the method of π -factors.

Основным показателем качества электронного оборудования является надежность.

Надежность средств закладывается на этапах проектирования и изготовления и в наибольшей степени проявляется на этапах эксплуатации. Следует учитывать, что усложнение аппаратуры резко снижает надежность современного радиоэлектронного оборудования. При этом низкая надежность приводит к тому, что стоимость эксплуатации радиоэлектронного оборудования в течение одного года иногда в несколько раз превышает стоимость самого оборудования. Важность выполняемых радиоэлектронной аппаратурой задач делает часто отказ в работе событием чрезвычайным, а в некоторых случаях и опасным, например, при использовании аппаратуры в медицине, в военном деле, при космических исследованиях, на транспорте и др. В работе рассматривается проблема создания программного обеспечения для расчета характеристик надежности электронной аппаратуры.

Коэффициентный метод расчета

Сущность коэффициентного метода состоит в том, что при расчете надежности электронного оборудования используют не абсолютные значения интенсивности отказов λ_i , а коэффициент надежности k_i , связывающий значения λ_i с интенсивностью отказов λ_b какого-либо базового элемента:

$$k_i = \lambda_i / \lambda_b \quad (1)$$

Коэффициент надежности k_i практически не зависит от условий эксплуатации и для данного элемента является константой, а различие условий эксплуатации учитывается соответствующими изменениями λ_b . В качестве базового элемента в теории и практике выбран резистор. Показатели надежности комплектующих берутся на основании справочных данных. В табл. 1 приведены коэффициенты условий эксплуатации k_u работы для некоторых типов аппаратуры. Влияние на надежность элементов основных дестабилизирующих факторов - электрических нагрузок, температуры окружающей среды - учитывается введением в расчет поправочных коэффициентов a_i . Учет влияния других факторов - запыленности, влажности и т.д. - выполняется коррекцией интенсивности отказов базового

элемента с помощью поправочных коэффициентов. Результирующий коэффициент надежности элементов электронного оборудования с учетом поправочных коэффициентов:

$$k_i' = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot k_i \cdot k_u, \quad (2)$$

где

k_u - номинальное значение коэффициента условий эксплуатации;

k_i - номинальное значение коэффициент надежности;

a_1 - коэффициент учитывающий влияние нагрузки по напряжению, току или мощности;

a_2 - коэффициент учитывающий влияние температуры среды;

a_3 - коэффициент снижения нагрузки от номинальной по напряжению, току или мощности;

a_4 - коэффициент использования данного элемента;

Оценка надежности по π -факторам.

Данная методика разработана в США и во многом повторяет ранее рассмотренные стандартный коэффициентный метод. Однако количество поправочных коэффициентов больше, что позволяет проводить расчеты с высокой точностью. Надежность оценивается на основе анализа нагрузки компонентов. Этот метод применим, когда большая часть проекта завершена и перечень комплектующих изделий, включающий их нагрузки, определен. Он может быть так же использован на последующих стадиях проектирования, для нахождения компромиссов по надежности в зависимости от выбора компонентов и их нагрузок.

Интенсивность отказов представлена применительно к оборудованию в нормальном рабочем состоянии, т.е. при включенном питании и при выполнении предназначенных функций, при предназначенных окружающих условиях. Основная процедура определения уровня интенсивности отказов платы (или системы) заключается в суммировании индивидуальных интенсивностей отказов каждого компонента. Эта сумма затем дополняется интенсивностью отказов электрической платы. Окончательно, эффект соединения плат вместе рассчитывается путем добавления интенсивности отказов каждого соединителя (разъема, клеммника и т.п.). Типовым примером для модели, используемой для большинства других видов компонентов, является следующая модель для дискретных полупроводников:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E, \quad (3)$$

где

λ_p – интенсивность отказов компонента;

λ_b – базовая интенсивность отказов, обычно выраженная моделью отношения к влиянию электрических и температурных нагрузок на компонент;

π_E и другие π -факторы – базовые интенсивности отказов для категорий окружающей среды применения и других параметров, которые влияют на надежность компонентов

Расчеты надежности электрорадиоизделий по λ – характеристикам

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по моделям, имеющим вид:

$$\lambda_3 = \lambda_6' K_p P_n, \quad (4)$$

где

λ_6' – исходная интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, приведенная к условиям: номинальная электрическая нагрузка при температуре окружающей среды $t_{окр}=25^\circ\text{C}$;

K_p – коэффициент режима, учитывающий изменение λ_6 в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды;

P_n – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов, в зависимости от различных факторов;

n – число учитываемых факторов.

Модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов распространяются на период постоянства интенсивности отказов во времени. Значения λ'_6 могут быть использованы для групп изделий, ЭРИ, объединенных по функциональному назначению, сходной технологии производства, близкому конструктивному исполнению и применяемым материалам.

Функциональное назначение

Для создания программного продукта была выбрана интегрированная среда разработки Borland Delphi как мощное и современное средство написания Windows-ориентированных программных средств. Система Delphi, относящаяся к так называемым средствам быстрой разработки приложений (Rapid Application Development-RAD), представляет собой мощный генератор кода, визуальный дизайнер приложений, средство ведения баз данных. Создание программ в Delphi базируется на объектно-ориентированной технологии. В качестве языка программирования используется Object Pascal - объектно-ориентированный язык, пригодный для написания программ любой сложности.

Программное обеспечение предоставляет возможность расчета надежности РЭА. Пользователь имеет возможность создать проект, соответствующий законченному изделию или отдельному блоку. Пользователь имеет возможность выбрать компоненты для вставки в созданный проект из БД, ввести их параметры самостоятельно, добавив элемент в базу данных и изменять параметры элемента и условия эксплуатации уже находящихся в проекте элементов.

Интенсивность отказов рассчитывается для каждого элемента. Для системы в целом рассчитывается интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ. После моделирования и расчета характеристик надежности системы, производится их сравнение с требуемыми для данного устройства. Если рассчитанные характеристики надежности не удовлетворяют требованиям, предъявляемым разработчиком, система производит поиск потенциально ненадежных узлов и предлагает методы повышения их надежности. Результаты расчетов отражаются как в текстовом, так и в графическом виде. Доступ к расчетам имеют только авторизованные пользователи. Пользователь имеет возможность сохранения всех данных о проекте, формирование отчета по проведенным расчетам.

Входные данные

На входе в программу имеем данные о элементах, составляющих проект: количество, условия эксплуатации, электрические параметры, способы установки и соединения и т.д.

Выходные данные

На выходе имеем файл проекта, файл с отчетом о проведенных исследованиях, интенсивность отказов каждого элемента, групп элементов и системы в целом, вероятность безотказной работы и время наработки на отказ. Обобщенный алгоритм работы программы представлен на рис. 1., обобщенная структура программы показана на рис. 2.

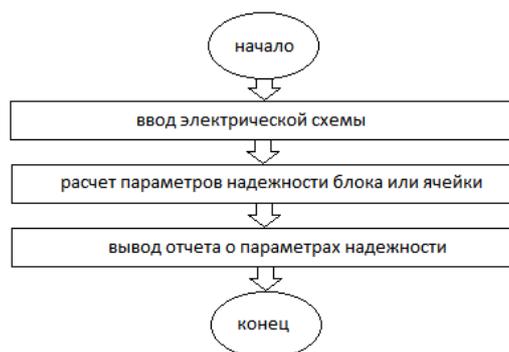


Рис. 1. Обобщенный алгоритм работы программы

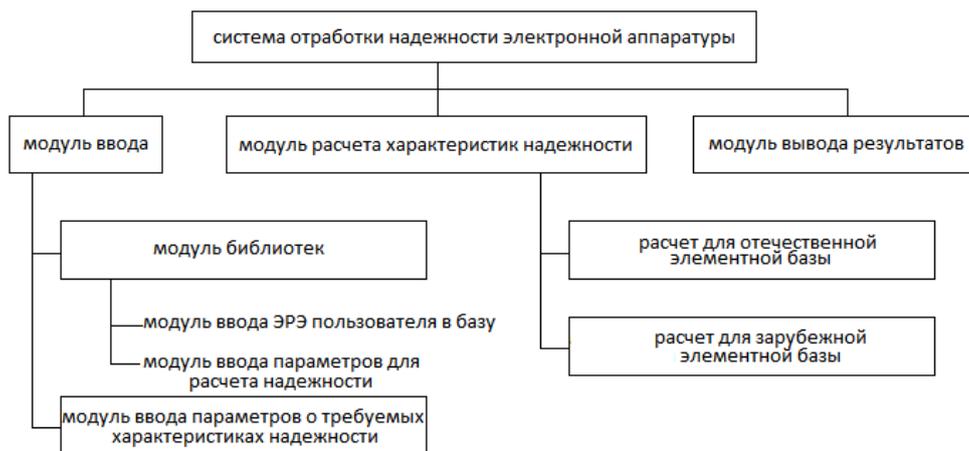


Рис. 2. Обобщенная структура программы

Основные результаты работы

В работе были рассмотрены положения теории надежности электронных средств; проанализированы основные методики расчета характеристик надежности электронной аппаратуры: коэффициентный метод и метод по π -факторам; разработано алгоритмическое и математическое обеспечение программного продукта — автоматизированной системы расчета надежности электронного оборудования

Литература

1. Военный справочник «Прогнозирование надежности электронного оборудования», - Министерство обороны США, 1991. – 12с.
2. Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Программное обеспечение конструкторских расчётов РЭС и ЭВС. Часть 4: Методические указания для курсового и дипломного проектирования, — М.: МГТУ, 2000.
3. Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Программное обеспечение конструкторских расчётов РЭС и ЭВС. Часть 7. Программный комплекс конструкторских и технологических расчетов: Методические указания для курсового и дипломного проектирования— М.: МГТУ, 2001.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЬНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ.

Захаров Е.В.

Научные руководители: к.т.н., доцент Макаrchук В.В.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Российская Федерация

Морозов С.А.,

НИИСИ РАН, Москва, Российская Федерация

FEATURES OF DESIGNING AND MODELING OF PLANAR SPIRAL INDUCTORS

Zaharov E.V.

Supervisors of studies: Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.
BMSTU, Moscow, Russian Federation

Morozov S.A.,

SRISA RAS, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Работа посвящена описанию основных особенностей разработки и моделирования планарных спиральных индуктивностей.

Abstract

This work is devoted to description main features of designing and modeling of planar spiral inductors.

В настоящее время рост производства недорогих радиочастотных интегральных микросхем значительно увеличил интерес к пассивным компонентам, формируемым на поверхности кристалла. На данный момент существуют несколько типов интегральных резисторов и емкостей. Причем большинство из их параметров легко моделируются и достаточно точно могут быть рассчитаны. Однако с расчетом параметров спиральных индуктивностей дело обстоит иначе.

Существуют различные способы создания индуктивностей на поверхности кристалла интегральной микросхемы. Наиболее распространенными из них являются так называемые планарные индуктивности (рисунок 1), которые в зависимости от их формы разделяют на квадратные (рисунок 1а), гексагональные (рисунок 1б), ортогональные (рисунок 1с) и круглые (рисунок 1д).

Благодаря простоте геометрии наиболее часто используются квадратные спирали,. Однако другие полигональные спирали также находят применение при разработке интегральных микросхем. Для улучшения характеристик индуктивностей некоторые разработчики предпочитают полигональные спирали с числом сторон большим, чем 4. Среди них широко используются гексагональные и ортогональные индуктивности.

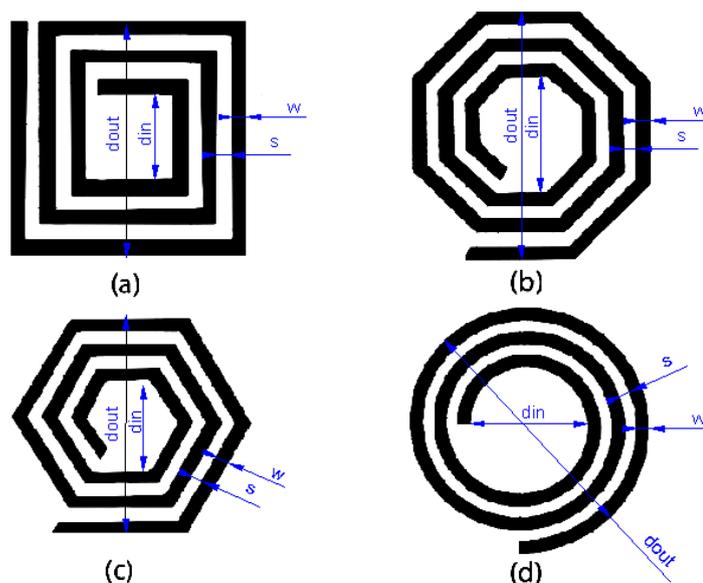


Рис.1. Плоские спиральные индуктивности
a – квадратная, *b* – гексагональная, *c* – ортогональная, *d* - круглая

Электрические параметры всех этих разновидностей плоских индуктивностей можно определить исходя из их геометрических параметров, таких как:

- число витков N ,
- ширина проводника w ,
- расстояние между проводниками соседних витков спирали s и одним из следующих параметров:
- наружным диаметром d_{out} ,
- внутренним диаметром d_{in} ,
- средним диаметром $d_{avg}=0.5*(d_{out}+d_{in})$,
- или коэффициентом заполнения $\rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in})$.

Толщина проводящего слоя металла мало влияет на величину индуктивности, поэтому ее влиянием можно пренебречь.

С целью поиска точных способов моделирования спиральных индуктивностей были проделаны достаточно большие исследования. На рисунок 2 показана стандартная модель плоской спиральной индуктивности. Паразитные резисторы и емкости в ней имеют простые интуитивные выражения. Однако для вычисления значения индуктивности необходимо простое и точное выражение.

Это значение индуктивности может быть вычислено точно при помощи решения уравнений Максвелла. Очень точное численное решение может быть получено использованием 3D-симулятора, такого как MagNet [1]. Однако, вычисление в 3D-симуляторах требует очень больших вычислительных мощностей, а также большого количества времени для вычислений. Поэтому существуют более удобные методы. Можно использовать метод Greenhouse[2]. Данный метод позволяет получать достаточно точные значения с терпимыми затратами времени, но его использование не позволяет моделировать индуктивность прямо из начальных условий.

С другой стороны для расчета величины индуктивности можно использовать простое приближенное выражение. Однако погрешность этого метода будет порядка 20% и более, что недопустимо для разработки и оптимизации схем.

Существуют компромиссные методы вычислений, которые позволяют получать достаточно точное выражение с погрешностью порядка 2-3%, и к тому же они достаточно просты. Поэтому они являются отличными кандидатами для использования в разработке индуктивностей. Далее рассмотрим эти методы:

1. Модифицированная формула Wheeler: [3][4]

$$L_{mw} = K_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \quad (1)$$

В этой формуле коэффициенты K1 и K2 зависят от вида индуктивности, и их значения приведены в таблице 1. Коэффициент заполнения ρ показывает насколько пуста индуктивность. Для маленького ρ будет иметь место пустая индуктивность ($d_{out} \approx d_{in}$), а для большого ρ индуктивность будет полной ($d_{out} \gg d_{in}$). Две индуктивности с одним и тем же средним диаметром, но с разными коэффициентами заполнения будут иметь, конечно, разные значения индуктивности. Чем больше коэффициент заполнения, тем меньше индуктивность, т.к. чем ближе проводники к центру колец, тем меньше они вносят вклад в положительную взаимоиндукцию, и больше в отрицательную.

Таблица 1. Коэффициенты для формулы (1)

Тип	K1	K2
Квадратная	2.34	2.75
Гексагональная	2.33	3.82
ортогональная	2.25	3.55

2. Выражение основанное на приближении к токовым слоям. [4]

Простое и точное выражения для индуктивности планарных спиралей получено путем приближения сторон спирали к симметричным токовым слоям с эквивалентными плотностями токов. Для примера, в случае квадратной спирали, будет иметь место 4 идентичных токовых слоя. Токовые слои на противоположных сторонах параллельны друг к другу, поскольку смежные – ортогональны.

$$L_{mw} = \mu n^2 d_{avg} c_1 \frac{(\ln(c_2 / \rho) + c_3 \rho + c_4 \rho^2)}{2} \quad (2)$$

В формуле (2) коэффициенты c_i зависят от вида индуктивности, и их значения приведены в таблице 2. Тем не менее точность этого выражения уменьшается с увеличением отношения s/w , это показало максимальную ошибку 8% в случае $s \leq 3w$. Следует отметить, что на практике в индуктивных спиральных выполняется неравенство $s \leq w$. Причина заключается в том, что меньшее расстояние между проводниками (s) улучшает межвитковую магнитную связь и уменьшает площадь, занимаемую спиралью. Большое значение s используется только для уменьшения емкости между витками.

Таблица 2. Коэффициенты для формулы (2)

Тип	c1	c2	c3	c4
Квадратная	1.27	2.07	0.18	0.13
Гексагональная	1.09	2.23	0.00	0.17
ортогональная	1.07	2.29	0.00	0.19
Круглая	1.00	2.46	0.00	0.20

3. Выражение, полученное из анализа данных. [4]

$$L_{mw} = \beta d_{out}^{\alpha_1} w^{\alpha_2} d_{avg}^{\alpha_3} n^{\alpha_4} s^{\alpha_5} \quad (3)$$

Коэффициенты β и α_i зависят от вида индуктивности, и из значения приведены в таблице 3. Данная формула достаточно проста в использовании, а также следует отметить, что эту формула применима для оптимального расчета индуктивностей и схем, содержащих индуктивности, применяя геометрическое программирование.

Таблица 3. Коэффициенты для формулы (3)

Тип	β	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
Квадратная	$1.62 \cdot 10^{-3}$	-1.21	-0.147	2.40	1.78	-0.030
Гексагональная	$1.28 \cdot 10^{-3}$	-1.24	-0.174	2.47	1.77	-0.049
ортогональная	$1.33 \cdot 10^{-3}$	-1.21	-0.163	2.43	1.75	-0.049

Однокристалльные индуктивности - это очень важные компоненты в интегральных схемах. Они используются в самых различных устройствах, таких как генератор, управляемый напряжением, низкочастотный и пассивный фильтры. Добротность таких индуктивностей ограничена резистивными потерями в спиральных кольцах и потерями в подложке.

Планарные индуктивности могут быть промоделированы с использованием схемы со сосредоточенными элементами. Очень общая модель однокристалльной спиральной индуктивности включает несколько индуктивностей и сопротивлений, и емкость оксида последовательно с сопротивлением подложки представленным как шунтирующий элемент. Более точная модель учитывает и емкость подложки.

Другой подход - это представление индивидуальных сегментов спиральных индуктивностей и связей между ними.

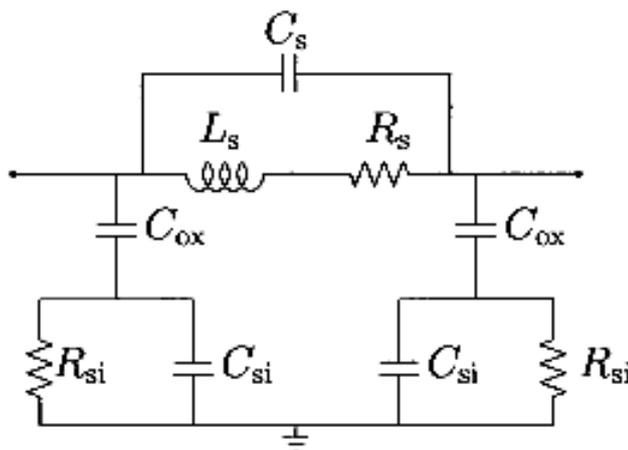


Рис.2. Модель планарной индуктивности с учетом связей между отдельными сегментами.

Рассмотрев различные методы моделирования и основные концепты индуктивности, можно сформулировать общие правила разработки планарных индуктивностей, некоторые из которых сформулированы ниже:

1. Сегменты с противоположным направлением токов вызывают отрицательную взаимную индукцию, тогда как сегменты с одинаковым направлением вызывают положительную взаимную индукцию. Поэтому разработчик должен располагать параллельные сегменты с одинаковым направлением тока как можно ближе, а непараллельные сегменты – насколько возможно дальше друг от друга.

2. Длинные проводники обладают большей индуктивностью, но одновременно и большим последовательным сопротивлением, что уменьшает добротность Q . Схожий эффект делает широкие проводники более предпочтительными, поскольку в этом случае последовательное сопротивление уменьшается.

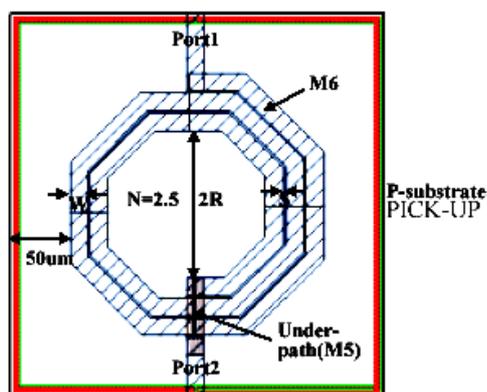
3. Увеличение емкости оксида и увеличение емкости между металлизацией приводит к уменьшению собственной резонансной частоты и пика Q . Поэтому более предпочтительно создание индуктивностей на самом верхнем слое металла, так как они обладают большей добротностью Q .

4. Маленькое расстояние между участками металлизации увеличивает индуктивность вследствие увеличения взаимной индукции. Однако на высоких частотах емкость, соединяющая участки, уменьшает добротность Q .

Рассмотрим следующие три вида гексагональных индуктивностей:

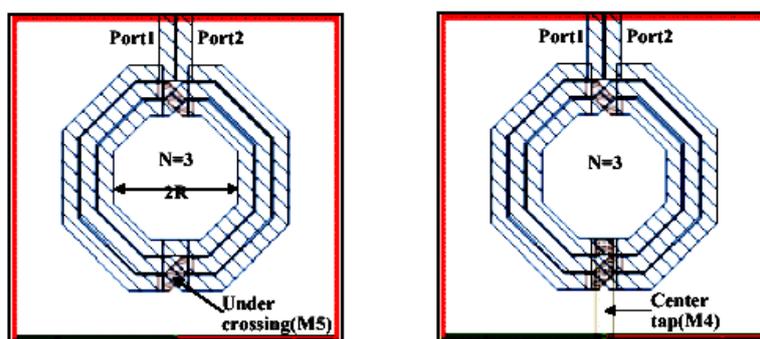
- стандартную индуктивность
- симметричную индуктивность
- симметричную индуктивность с центральным ответвлением.

При разработке интегральных схем улучшение качества индуктивности может быть достигнуто путем создания индуктивности со средней точкой, для улучшения взаимных индуктивных свойств. Для решения этой задачи необходимо найти симметричный центр. В простой плоской спирали, такой, как показано на рисунке 3, такую точку найти сложно. Для решения этой проблемы была предложена симметричная спиральная индуктивность, показанная на рисунке 4. Она имеет естественный геометрический центр, который совпадает с электрической точкой. Наличие такого центра необходимо в дифференциальных схемах, в которых такая точка может быть заземлена, или через нее может быть подано питание, без влияния на дифференциальный сигнал.



Standard inductor

Рис.3. Конструкция стандартной спиральной индуктивности.



Symmetric inductor

Symmetric inductor with center-tap

Рис.4. Конструкция симметричной (слева) и симметричной с центральным ответвлением (справа) спиральных индуктивностей.

Рассмотрим влияние наружного радиуса спирали R , числа витков N , и ширины проводника на величину ее индуктивности. Ниже на рисунке 5 приведена зависимость индуктивности от радиуса и количества витков.

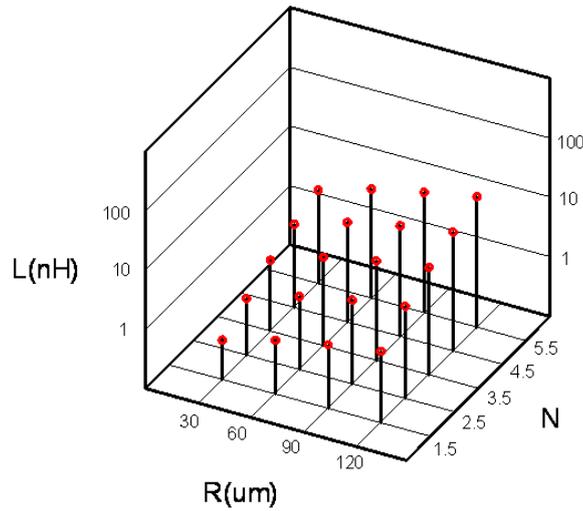


Рис.5. Зависимость индуктивности от радиуса и количества витков

2. Влияние геометрических размеров плоской спиральной индуктивности на ее добротность

Влияние различных параметров на добротность планарной спиральной индуктивности хорошо видно на ее модели (рисунок 6)

$$R_s = \frac{\rho \cdot l}{w \cdot \delta \cdot (1 - e^{-t/\delta})}$$

$$C_s = n \cdot w^2 \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{t_{oxM1-M2}} \quad C_{ox} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot w \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$C_{si} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot w \cdot C_{Sub}$$

$$R_{si} = \frac{2}{l \cdot w \cdot G_{Sub}}$$

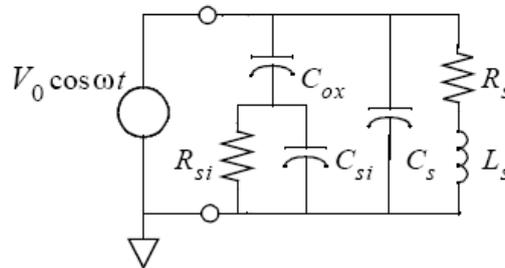


Рис.6. Модель планарной индуктивности на кремнии

(ρ - сопротивление металла на единицу длины, l - общая длина спирали, w - ширина проводника спирали, δ - глубина поверхностного слоя металла, t - толщина металла, N - число витков, n - количество пересечений между спиралью и центральным ответвлением = $N - 1$, $t_{oxM1-M2}$ - толщина оксида между спиралью и центральным ответвлением, t_{ox} - толщина оксида между спиралью и подложкой, C_{sub} - емкость подложки на единицу площади, G_{sub} - проводимость подложки на единицу площади).

Параметр L_s представляет собой последовательную индуктивность, и вычисляется с помощью алгоритма Greenhouse [2]. Последовательное сопротивление спирали R_s определяется с учетом поверхностной глубины проводника ограниченной толщины и распространения тока в полосе проводника. Емкость C_s является приближением емкости между спиралью и центральным ответвлением. C_{ox} представляет собой емкость между спиралью и подложкой. Влияние кремниевой подложки учитывается с помощью параметров C_{si} и R_{si} . Параметры C_{ox} , C_{si} и R_{si} пропорциональны площади, покрываемой спиралью. Параметры C_{sub} и G_{sub} учитывают свойства кремниевой подложки, и определяются по данным эксперимента.

Качество сформированной планарной индуктивности определяется ее добротностью Q , величина которой ограничена паразитными емкостями и сопротивлениями. Сохраняемая и теряемая в ней энергия могут быть полностью описаны ее эквивалентной энергетической моделью (рисунок 6), в которой величины L_s , R_s , R_p и C_0 представляют собой общую величину индуктивности, ее емкостные потери, потери в подложке и общую емкость ($C_0 = C_s + C_p$), соответственно. Величина добротности может быть рассчитана из следующего выражения:

$$Q = 2\pi \cdot \frac{[\text{Пиковая магнитная энергия} - \text{Пиковая электрическая энергия}]}{\text{Энергия теряемая за один цикл осцилляции}} =$$

$$= \frac{\omega L_s}{R_s} \cdot \frac{R_p}{R_p + [(\omega L_s / R_s)^2 + 1] \cdot R_s} \cdot \left(1 - \frac{R_s^2 C_0}{L_s} - \omega^2 L_s C_0 \right)$$

где величина $\omega L_s / R_s$ определяет запасенную магнитную энергию. Вторая часть формулы учитывает потери в подложке, являющиеся причиной уменьшения добротности Q в области частот, больших резонансной, что наглядно видно из рисунка 7.

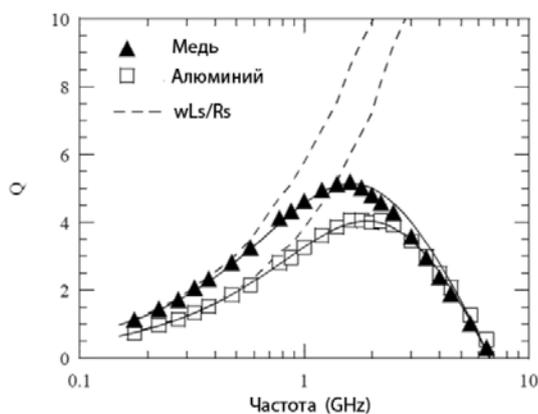


Рис.7. Зависимость добротности планарной индуктивности Q для медных и алюминиевых проводников.

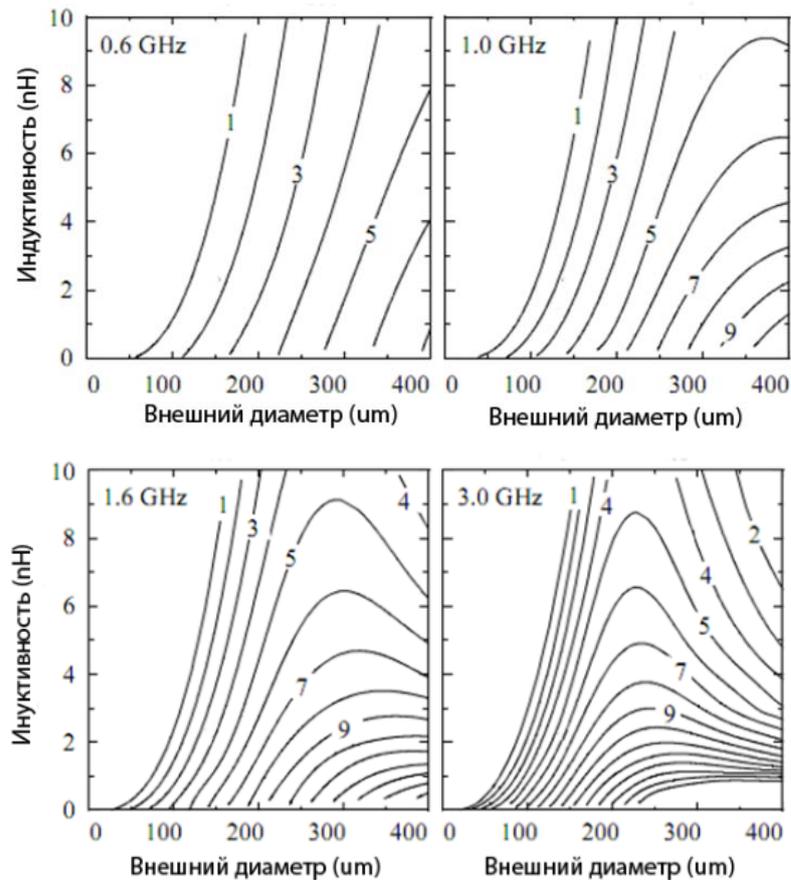


Рис.8. Зависимость добротности Q планарной индуктивности от ее внешнего диаметра на различных частотах.

Литература

1. MagNet 5 user guide: Using the MagNet version 5 package from Infolytica, E. M. Freeman, Infolytica Corp., Montreal, P.Q., Canada,
2. H. M. Greenhouse, "Design of planar rectangular microelectronic inductors," IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packaging, vol. PHP-10, pp.101–109, June 1974..
3. H. A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils," in Proc.IRE, Oct. 1928, vol. 16, no. 10, pp. 1398–1400.TMA Medici, Two-Dimensional Device Simulation Program, User's Manual, Volume 1 – Technology Modeling Associates, Inc., 1997.
4. S. S. Mohan, M del Mar Hershenson, St P. Boyd, and T H. Lee "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances" IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.34, no.10 oct.1999.
5. C. P. Yue, C. Ryu, J. Lau, T. H. Lee, and S. S. Wong, "A physical model for planar spiral inductors on silicon," in Int. Electron Devices Meeting Tech. Dig., Dec. 1996, pp. 155–158.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОП-КОНДЕНСАТОРА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ТОЛЩИНАМИ
ПОДЗАТВОРНОГО ОКИСЛА**

Зотов С.К.

Научные руководители: к.т.н., доцент Макаrchук В.В.

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

к. ф.–м. н. Амирханов А.В.,

НИИСИ РАН, Москва, Российская Федерация

**THE MODELLING OF CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS
OF MOS-CAPACITORS WITH GATE OXIDE NANOSCALE THICKNESS**

Zotov S.K.

Supervisors of studies: Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Candidate of physicomathematical science Amirkhanov A.V.,

SRISA RAS, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Работа посвящена моделированию вольтфарадной характеристики МОП-конденсаторов с наноразмерными толщинами подзатворного окисла при помощи САПР TCAD.

Abstract

This work is devoted to modelling of capacitance-voltage characteristics of mos-capacitors with gate oxide nanoscale thickness with the aid of Technology Computer Aided Design system.

В современном мире производство СБИС занимает ведущие позиции. По закону Мура каждые два года количество транзисторов на единицу площади увеличивается в два раза, следовательно, уменьшается размер транзистора и ужесточаются требования к точности измерений его параметров, что необходимо для более точного моделирования СБИС.

Одним из важнейших параметров, который определяет динамические свойства МОП-транзисторов, является толщина подзатворного окисла. В современных субмикронных технологиях изготовления СБИС ее можно определить с приемлемой погрешностью, но для предсказания в технологиях следующего поколения необходимо иметь модели, точно описывающие емкостные свойства. Настройку моделей необходимо проводить на отлаженном техпроцессе последнего поколения. На сегодняшний день это – технологический процесс КМОП КНИ СБИС с минимальными проектными нормами 0,35 мкм, разработанный на ведущем предприятии РФ по производству интегральных микросхем - НИИСИ РАН.

Определение толщины окисла традиционно производится на основе измерений вольтфарадных характеристик МОП-конденсаторов [1]. Структура КНИ МОП-конденсатора с карманом р-типа представлена на рисунке 1а.

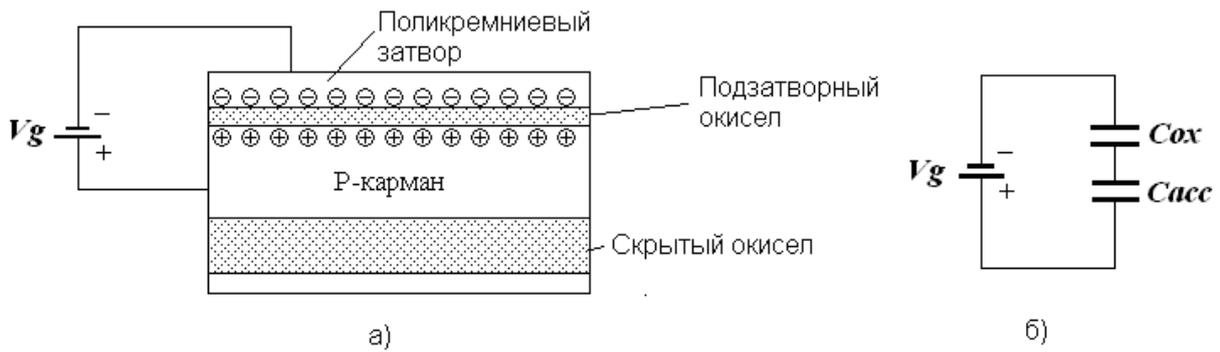


Рис.1. КНИ МОП-конденсатор в режиме обогащения (а) и его эквивалентная схема (б)

Рассмотрим КНИ МОП-структуру с карманом р-типа и постоянным отрицательным напряжением на затворе, при котором область кремния вблизи подзатворного окисла находится в режиме обогащения (рисунок 1а). Избыточные дырки у поверхности сконцентрированы в непосредственной близости к окислу. Если на постоянное напряжение смещения V_G накладывается малое переменное напряжение V_a , то под его действием заряды на поликремниевом затворе и у поверхности кремния будут претерпевать малые изменения. Эти изменения определяются полной емкостью МОП-структуры. Она будет состоять из последовательно соединенных емкостей окисла C_{OX} и емкости обогащенного слоя C_{acc} (рисунок 1б). Толщина обогащенного слоя мала в сравнении с толщиной подзатворного окисла. Чем больше напряжение, приложенное к затвору, тем тоньше будет этот обогащенный слой. Поэтому полная емкость МОП-структуры будет асимптотически стремиться к «чистой» емкости окисла C_{OX} [2, 3]. Следовательно, полная удельная емкость C_G (на единицу площади) в режиме обогащения стремится к удельной емкости окисла C'_{OX} (рисунок 2), при этом $C'_{OX} = \epsilon_{OX} / t_{OX}$, где t_{OX} – толщина окисла, ϵ_{OX} – абсолютная диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла, равная $3,4 \times 10^{-11}$ Ф/м.

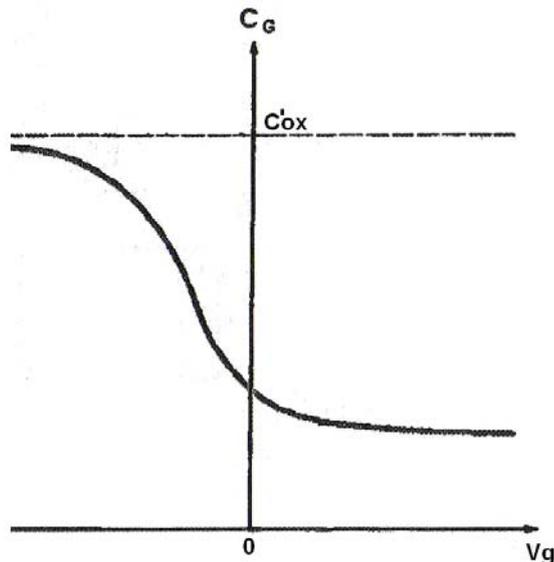


Рис.2. Вольтфарадная характеристика МОП-конденсатора с р-карманом

Для моделирования вольтфарадных характеристик МОП-конденсаторов с последующим определением толщины окисла воспользуемся системой автоматизированного проектирования TCAD.

Моделируемая структура представляет собой КНИ МОП-конденсатор, в котором роль обкладок выполняют поликремниевый затвор и кремниевый карман, а роль диэлектрика –

подзатворный окисел. Рассчитанный с помощью системы TCAD концентрационный профиль КНИ МОП-конденсатора показан на рисунке 3.

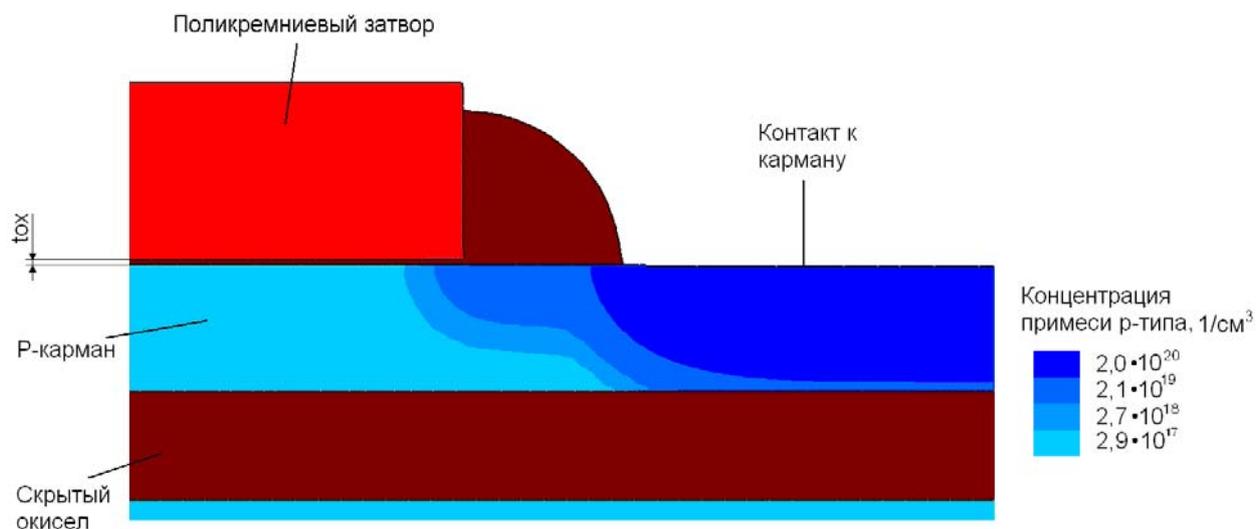


Рис.3. Расчетный концентрационный профиль КНИ МОП-конденсатора

При расчете вольтфарадных характеристик использовался малосигнальный анализ [4] с применением методики, описанной в работе [5]. На затвор подавалось напряжение с амплитудой $V_a=30$ мВ, смещением V_G от -3 В до 3 В и частотой $F=1$ кГц (рисунок 4).

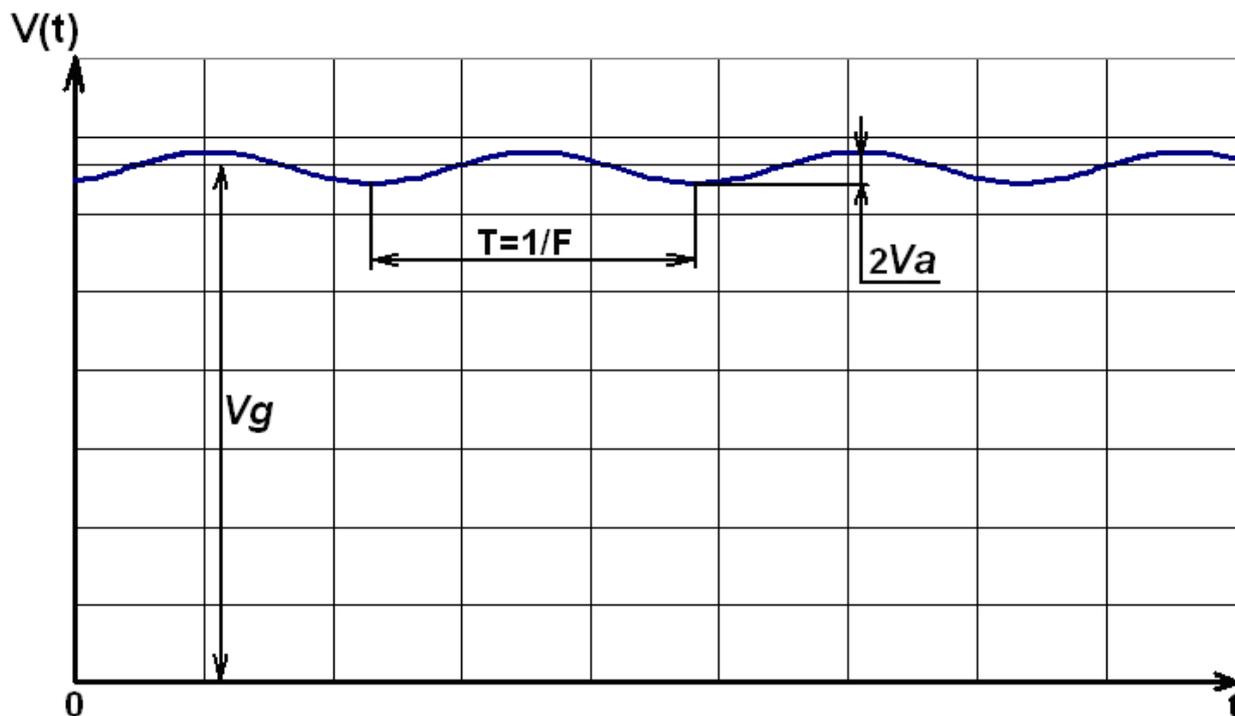


Рис.4. Изменение напряжения на затворе МОП-конденсатора во времени

Результаты настройки модели представлены на рисунке 5

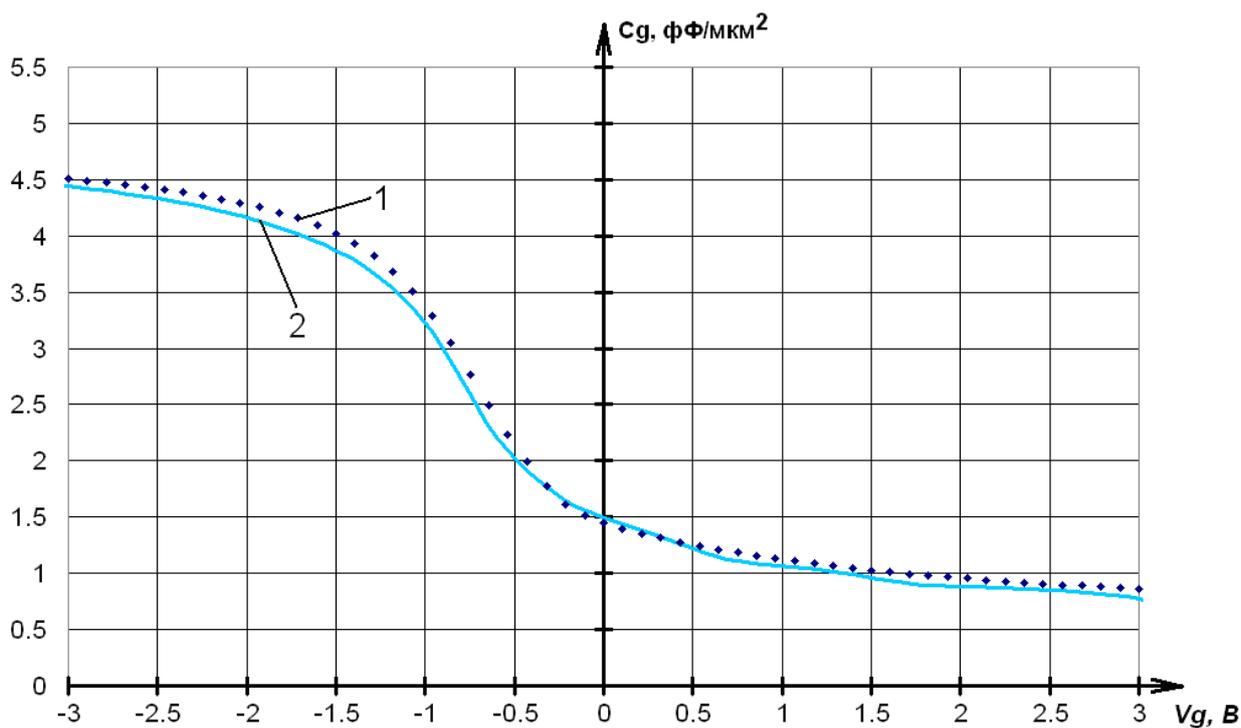


Рис. 5 – Расчетная (2) и экспериментальная (1) вольтфарадные характеристики КНИ МОП-конденсатора при частоте переменного напряжения 1 кГц

Толщина подзатворного окисла t_{ox} , полученная на основе расчета концентрационного профиля, (рисунок 3) – 6,9 нм.

Толщины подзатворного окисла, полученные из рассчитанной вольтфарадной характеристики и экспериментальных данных в точке $V_g = -3$ В с использованием формулы $t_{ox} = \varepsilon_{ox} / C'_{ox}$, составляют 7,1 нм и 7,2 нм, соответственно.

При настройке модели варьировались параметры термического окисления кремния, влияющие на асимптоту C_{ox} , а также параметры модели подвижности носителей в кремнии, влияющие на напряжение, при котором будет формироваться обогащенный слой [4]. В результате откалиброванная модель МОП-конденсатора для технологического процесса КМОП КНИ СБИС с минимальными проектными нормами 0,35 мкм позволила получить довольно точное совпадение (расхождение не более 5%) расчетных и экспериментальных вольтфарадных характеристик. Таким образом, эта модель может быть предложена к использованию при разработке субмикронной технологии следующего поколения, в частности, технологического процесса с проектными нормами 0,25 мкм.

Литература

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с., ил.
2. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.
3. Y.P. Tsividis. Operation and Modeling of the MOS Transistor (McGraw-Hill, 1999).
4. TMA Medici, Two-Dimensional Device Simulation Program, User's Manual, Volume 1 – Technology Modeling Associates, Inc., 1997.
5. Глушко А.А. Анализ сходимости модифицированного метода Ньютона, применяемого в системе TCAD // 10-я Молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2008». 16-17 апреля 2008г., г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. – с.148-150.

СИСТЕМА МИКРОДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Якимец Д.В.

*Научный руководитель: Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., заведующий каф. ИУ4, Шахнов В.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

LIQUIDS MICROBATCHING SYSTEM

Yakimets D.V.

*Research supervisor: RAS corr. member, d.t.s., Prof., chief of IU4 department, Shakhnov V.A.
BMSTU, Moscow, Russia*

Аннотация

В системах управления производством прецизионных полупроводниковых устройств, химическими и фармацевтическими технологическими процессами, а также при проведении биомедицинских исследований требуются системы микродозирования жидкостей. В данной работе представлена концепция такой системы. Основной упор сделан на выборе расходомера, так как именно от него в первую очередь зависит точность дозирования.

Abstract

Manufacturing execution systems of precision semiconductor devices, chemical and pharmaceutical engineering process as well as biomedical researches require liquids microbatching systems. This work is devoted to conception of such system. There is the main emphasis on selecting a flow meter in this article, since the accuracy of batching depends on it in the first place.

Введение

Современные достижения в области химии, медицины, пищевой промышленности во многом основаны на прецизионном дозировании тех или иных жидкостей-добавок. Часто речь идёт даже не о нанолитрах, а об ещё меньших объёмах. В лабораторных условиях работа с такими дозами обычно не вызывает проблем. Тем не менее, при переходе к серийному производству встаёт необходимость разработки систем дозирования жидкостей.

Существует множество различных методов дозирования [1], на которых можно построить такую систему. Но наиболее универсальным способом, обеспечивающим высокую точность измерения расхода (0,5% и выше), является определение объема дозирования с помощью датчика расхода жидкости (расходомера). Принцип действия таких систем основан на том, что расходомер измеряет расход жидкости, передает сигналы на контроллер системы, который, в свою очередь, управляет электромагнитным клапаном.

1. Принципы проектирования расходомеров

Так как существует необходимость работы с малыми объёмами, традиционные расходомеры механического типа не подходят для построения системы. Необходимо рассматривать датчики, в составе которых нет подвижных компонентов, и которые почти не создают помех потому жидкой среды. Классификация таких МЭМС расходомеров по физическим принципам работы приведена на рис. 1.



Рис.1. Классификация МЭМС расходомеров по физическим принципам работы.

Электромагнитные датчики используются для измерения расхода проводящих жидкостей; датчики, основанные на регистрации перепада давления, создают препятствие для движения жидкости; ультразвуковые расходомеры, несмотря на высокую эффективность, плохо поддаются масштабированию. Поэтому в дальнейшем в системе микродозирования жидкостей будут описаны датчики, основанные на принципе переноса тепла [2].

Существуют различные конструкции микротермоанемометров. Обычно они изготавливаются на кремниевых подложках методами микротехнологий, хотя существует множество датчиков, построенных на печатных платах (рис.2) [3]. Почти во всех микрорасходомерах в качестве детекторов температуры используются терморезисторы. Несмотря на малые размеры, такие датчики могут работать с широким диапазоном скоростей потоков (до 400 мкл/мин) и обладают высокой чувствительностью.

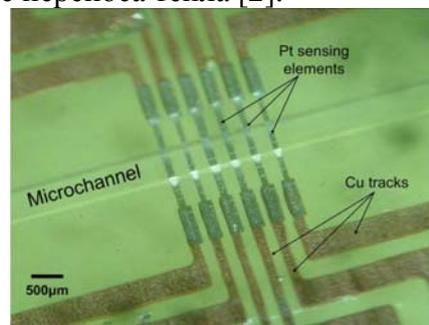


Рис.2. Типовая конструкция датчика.

Такие датчики ещё называются калориметрическими и упрощённо их можно изобразить так, как показано на рис.3. Зелёные терморезисторы включены в мостовую схему и регистрируется разница в значениях сопротивления на них.

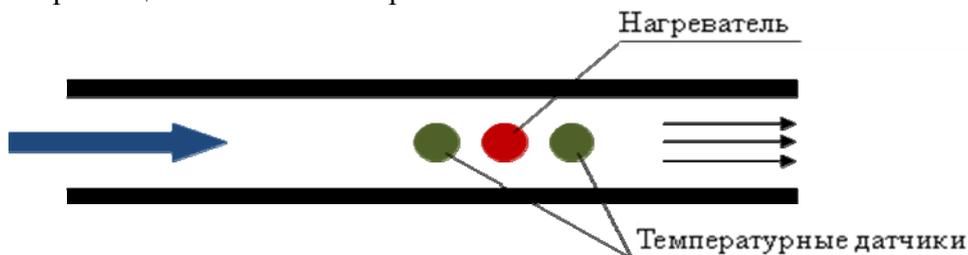
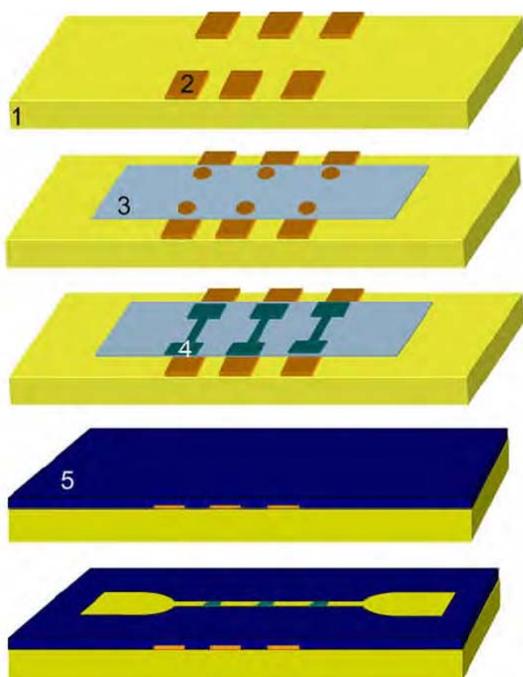


Рис.3. Калориметрический датчик.

Отдельного рассмотрения требует вопрос технологии получения таких микросенсоров. В самом простом случае, когда в качестве основы используется печатная плата, можно выделить следующие этапы:



- a) Сначала на печатной плате путём химического травления формируется проводящий рисунок и контактные площадки.
- b) Наносится тонкий слой SU-8 (около 15мкм) для того, чтобы сгладить неровности, которые вносят медные проводники.
- c) Нанесутся платиновые проводники толщиной около 300нм. (для формирования правильной геометрии на данном этапе часть платины после распыления удаляется). Электрический контакт между платиной и медью обеспечивается благодаря отверстиям в слое SU-8.
- d) Полученную структуру покрывают фоторезистом SU-8.
- e) Через фотошаблон проводят экспонирование SU-8 и получают канал. Его толщина составляет 2-500мкм, в зависимости от того, какой толщины слой фоторезиста был нанесён.
- f) Наносится тонкий слой PMMA (до 1.5мкм)

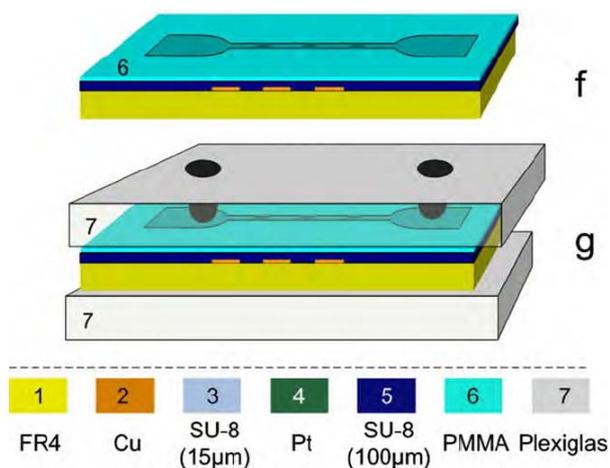


Рис.4. Основные производственные этапы.

для изоляции платиновых проводников.

g) Окончательная изоляция проводится с помощью термической сварки с толстой (3мм) пластиной PMMA. (Plexiglas®).

h) В завершении процесса в верхнем слое сверлятся два отверстия для входа и выхода жидкости. Однако, из-за различных коэффициентов теплового расширения, во время термосварки возможно отслоение печатной платы от верхней пластины. Поэтому, под печатную плату подкладывают такую же PMMA-пластину, как и для верхнего слоя.

2. Разработка клапана

В системах дозирования наиболее широко используемыми являются электромагнитные клапаны простейшей конструкции это отсечные клапаны с одним входным и одним выходным портами. Электромагнитный клапан позволяет быстро (задержка около 20 мс) открывать или перекрывать поток жидкости. В данной системе микродозирования такие клапаны будут работать, но так как контролируются сверхмалые потоки жидкости, которые могут быть под большим давлением, задержка 20мс не приемлема.

Для систем такого типа лучшим решением являются МЭМС клапаны, изготовленные, например, в кремнии. На данный момент механизм активации, используемый в таких микроклапанах одинаков [5]: небольшое количество инертной жидкости нагревается встроенным резистором до тех пор, пока не будет вызвано фазовое изменение, которое, в свою очередь, вызовет довольно большую деформацию мембраны-клапана (рис. 5).

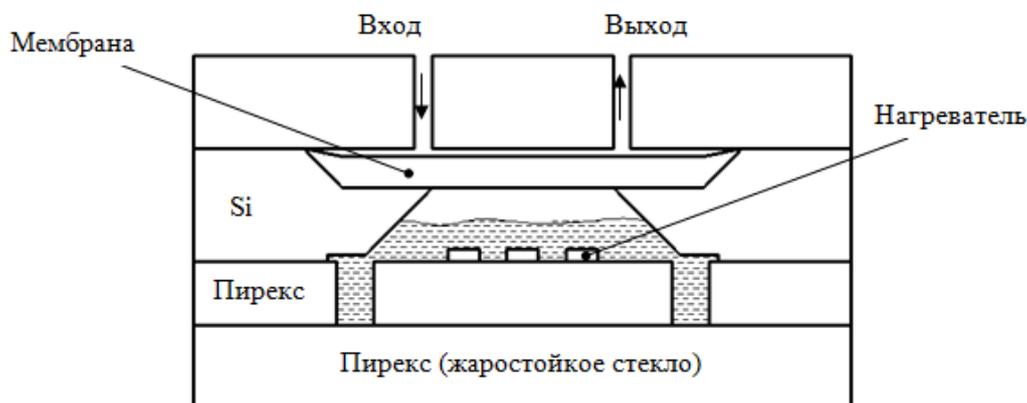


Рис.5. Поперечное сечение микроклапана [6].

Такие клапаны высокоэффективны: среднее время закрытия около 10 мс, что в два раза превосходит лучшие модели электромагнитных клапанов. Такие устройства обладают значительно меньшими размерами, имеют более длительный срок службы. Недостаток □ относительно большой расход энергии (0,1-0,5 Вт), необходимой для нагрева жидкости.

Кроме того, предъявляются особые требования для материала мембраны. Наиболее распространённым сейчас является кремнийорганический (силиконовый) каучук. Он обладает малым модулем Юнга (~1МПа) и обеспечивает хорошую герметизацию. Рабочая жидкость может быть различной.

3. Выбор контроллера

Контроллер связывает датчик расхода жидкости, клапан, и обеспечивает управление системой. На рис.6 представлена структурная схема такой системы.

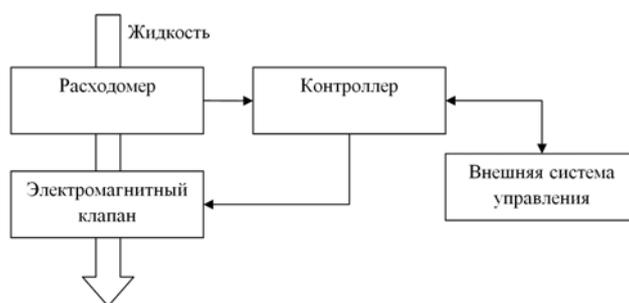


Рис.6. Структурная схема системы микродозирования жидкости.

В настоящее время существует несколько подходов к реализации цифровых устройств. Один из наиболее распространенных путей — использование микроконтроллеров в сочетании с микросхемами стандартной дискретной цифровой логики и периферийными БИС. Второй подход — это применение заказных СБИС. Наконец, третий подход заключается в разработке цифровых устройств с помощью программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Основное их преимущество заключается в предоставляемой возможности быстрого создания цифровых устройств с произвольной внутренней структурой. По сравнению с заказными СБИС, цикл разработки устройств на ПЛИС занимает значительно меньшее время и неизмеримо дешевле, благодаря тому, что изменение принципиальной электрической схемы выполняется путем перепрограммирования одного и того же экземпляра микросхемы.

Ведущими производителями ПЛИС являются фирмы Xilinx и Altera. Они выпускают ПЛИС с различной архитектурой, САПР, средства программирования и др. Важно, что САПР минимальной конфигурации этих фирм бесплатен, а его возможности достаточны для освоения данной технологии и разработки цифровых устройств среднего уровня.

Учитывая функции, который должен реализовывать контроллер целесообразно использовать микросхемы с числом логических ячеек 3000 – 5000. Анализ сравнительных характеристик ПЛИС показывает, что микросхемы обоих производителей обладают схожими техническими показателями, однако продукция Xilinx предпочтительнее по цене. Оптимальным представляется использование ПЛИС семейства Spartan-II, модель XC2S200. Она обладает 5292 логическими ячейками и 56 кбит распределенной памяти.

Выводы

Для повышения универсальности разрабатываемой системы, в качестве конструкции расходомера был выбран калориметрический датчик. Для сбора информации и дальнейшей её обработки предложено использовать ПЛИС. Это важно, так как при смене типа жидкости появляется необходимость перепрограммирования логики работы устройства. Кроме того, в перспективе, можно нарастить функциональность системы микродозирования жидкостей путём установки нейро-анализатора состава дозируемого вещества, что позволило бы вывести контроль дозирования на качественно новый уровень.

Литература

1. М.В. Соколов, А.Л. Гуревич, Автоматическое дозирование жидких сред // Л.: Химия, 1987. - 397 с.
2. Дж. Фрайден, Современные датчики. Справочник // М.: Техносфера, 2005. - 592 с.
3. K. Kontakis, A. Petropoulos, A novel microfluidic integration technology for PCB-based devices: Application to microflow sensing // Elsevier, 2009.
4. Р.Г. Джексон, Новейшие датчики // М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Jack W. Judy, Biomedical Applications of MEMS // Measurement Science and Technology Conference, Anaheim, CA (January 20-22, 2000), pp. 403-414 – Invited Talk.
6. X. Yang, Ch. Grosjean, A MEMS thermopneumatic silicone membrane valve // Journal of Nanoparticle Research vol. 2, num. 4, Springer Netherlands, 2000.

КРОССПЛАТФОРМЕННЫЙ КОНВЕРТОР НЕКОТОРЫХ ФОРМАТОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СБИС

Тазабеков О. С.

Научный руководитель: к.т.н., доцент, Власов А. И.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия

CROSS-PLATFORM CONVERTER FOR BASIC TOPOLOGICAL DESCRIPTION FORMATS OF VLSI

Tazabekov O. S.

Research supervisor: d.t.s., Prof., Vlasov A. I.
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

Топологические представления систем на кристаллах, хранящиеся в формате GDS II, становятся слишком громоздкими в силу постоянно растущей степени их интеграции. Совсем недавно был разработан новый формат, позволяющий хранить топологии в более компактных файлах. В данной работе представлена концепция простого и надежного платформонезависимого конвертера форматов для нужд современных систем автоматизированного проектирования. Так же были рассмотрены подходы к задачам снижения размерности топологий и особенности форматов GDS II и OASIS.

Abstract

Topological representations of systems on the crystals stored in the format GDS II, becoming too cumbersome because of the ever-increasing degree of integration. More recently developed a new format, enabling the storage of topology in more compact files. This article is devoted to conception of simple and reliable crossplatform converter for modern CAD- systems. Also attention was paid to approaches to the problems of reducing the topologies dimensionality, and features of GDS II and OASIS formats.

Введение

Современному инженеру 21 века сложно переоценить роль систем автоматизированного проектирования в производственном цикле изделий. Автоматизированное проектирование и автоматизированное изготовление чертежей и документации с помощью ЭВМ имеет место на этапах выработки концепции нового изделия, проектирования и разработки чертежей. Инженеры и ученые осуществили прорыв, когда научили ЭВМ оперировать с чертежами, топологиями, 3d- моделями и другими видами геометрической информации. Но на сегодняшний день, когда человечество делает шаг в мир нанотехнологий, проблема компактного представления топологической информации стоит особенно остро. Именно поэтому, как никогда актуальны новые способы ее представления, которые затем реализуются в современных форматах файлов геометрического представления объектов. Микроэлектроника является одной из самых быстроразвивающихся областей техники, и ее развитие прямо пропорционально развитию автоматизированных систем проектирования, которые в настоящий момент нуждаются в новых компактных способах представления топологической информации интегральных схем. Вспомним закон Мура (рисунок 1), постоянный рост количества элементов, располагаемых на схеме, неизбежно ведет к увеличению размеров файла топологического описания проекта. С учетом скорости развития технологий, средний размер файла проекта в старом формате GDS II в ближайшие годы составит от 2 до 5 терабайт, что неизбежно повлечет за собой проблемы с хранением, передачей и последующей обработкой.

(пространство точек на окружности) - одномерна, любая её точка может быть описана одним параметром.

Коснемся двух различных способов представления геометрических объектов в ЭВМ. Первый способ — это аналитические модели. Аналитическая модель есть набор чисел и, если необходимо, логических параметров, которые играют роль коэффициентов и других величин в уравнениях, аналитических соотношениях, задающих объект данного типа. Например, для окружности основная форма аналитической модели — координаты центра и радиус, связанные известным соотношением:

$$(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 - R^2 = 0, \quad (1)$$

где X_c и Y_c - координаты центра окружности, X и Y - координаты точек, а R - ее радиус.

Окружность, как и многие другие объекты, может быть задана в параметрическом виде, где кроме координат есть еще одна переменная величина — параметр. Параметрическое задание образов широко применяется в компьютерной графике.

Второй способ численного моделирования геометрических объектов в ЭВМ — это координатные модели. В простых случаях — это наборы точек, которые принадлежат объектам и задаются координатами. Для кривых и ломанных линий точки располагаются в том же порядке, что и на линии. Упорядочить точки поверхности - более сложная задача: в большинстве случаев точки последовательно размещаются на линиях, проведенных на поверхности [8].

Далее рассмотрим непосредственно задачи снижения размерности. Существуют различные, по сути эквивалентные, постановки этих задач. В данной статье мы будем придерживаться определений, введенных в работе [1], основные положения которых перечислены ниже.

Пусть $B = \{b\}$ есть множество геометрических объектов рассматриваемого класса. Для каждого объекта $b \in B$ имеется его детальное описание $X = X(b)$, размерность N которого может достигать тысяч чисел. Рассмотрим множество $X = \{X(b), b \in B\}$ N -мерного евклидова пространства R^N , состоящего из детальных описаний всех объектов рассматриваемого класса. Фундаментальным предположением является предположение, что это множество X лежит, по крайней мере, приближенно, на многообразии (в общем случае, нелинейном), размерность n которого существенно меньше N . Целью снижения размерности является нахождение представления для этого многообразия (параметризации, координатной системы), которое позволит «спроектировать» множество X на него и получить компактное описание данных $X(b)$ в пространстве меньшей размерности.

Наряду с детальным описанием, можно рассмотреть различные обобщенные описания $h = H(b)$ объекта b , состоящие из набора параметров (интегральных характеристик) объекта b . В инженерных приложениях в качестве таких характеристик обычно выбирают величины, которыми оперирует инженер в процессе разработки (которые, например, являются предметом принятия решений при выборе варианта геометрии объекта). Зафиксируем некоторый набор параметров объекта $H_{mod}(b)$, определяющий отображение

$$H_{mod}(b): B \rightarrow G_{mod}. \quad (2)$$

где множество

$$G_{mod} = \{H_{mod}(b), b \in B\}. \quad (3)$$

- образ множества B при отображении H_{mod} и является фактор-пространством множества объектов B , определяемое отображением H_{mod} . Очевидно, что в общем случае существует целое множество объектов: $V_{mod}(h) = \{b \in B: H_{mod}(b) = h\}$ с одним и тем же набором параметров h , и отображение H_{mod} определяет разбиение пространства B на непересекающиеся подмножества $V_{mod}(h)$, $h \in G_{mod}$.

Для каждого объекта $b \in B$ выберем (определим некоторым образом) единственный объект $b_{mod} = b_{mod}(b) \in V_{mod}(H_{mod}(b))$, называемый модельным объектом, соответствующим исходному объекту b , и обозначим $V_{mod} = \{b_{mod}(b), b \in B\} \in B$ множество всех модельных объектов. По построению, между множествами V_{mod} и G_{mod} существует взаимно однозначное соответствие, определяемое прямым (2) и обратным отображениями:

$$H^{-1}\text{mod}: G\text{mod} \rightarrow V\text{mod}. \quad (4)$$

с помощью которых модельный объект определяется как

$$b\text{mod}(b) = H^{-1}\text{mod}(H\text{mod}(b)). \quad (5)$$

Модельный объект (5), построенный по объекту b с помощью пары отображений $\{H\text{mod}, H^{-1}\text{mod}\}$, будем называть также модельным представлением или модельным аналогом объекта b .

По построению, множество модельных объектов $V\text{mod}$ является многообразием в пространстве объектов V , параметризованным с помощью отображения $H^{-1}\text{mod}$, определенного на фактор пространстве $G\text{mod}$. Обратное отображение $H^{-1}\text{mod}$ определяет также «алгоритм восстановления», позволяющий для каждого исходного объекта $b \in V$ строить детальное описание $X\text{mod} = X(b\text{mod}(b))$ соответствующего модельного объекта $b\text{mod}(b)$ (5).

Если вектор $H\text{mod}(b)$ имеет небольшую (по сравнению с размерностью N детального описания $X(b)$) размерность n , и если все объекты $b \in V\text{mod}(h)$, имеющие одно и то же значение вектора параметров модели h , имеют близкие детальные описания, то есть если $X(b') \approx X(H^{-1}\text{mod}(h))$, для всех $h \in G\text{mod}$ и $b' \in V\text{mod}(h)$, то пара отображений $\{H\text{mod}, H^{-1}\text{mod}\}$ определяет процедуру снижения размерности (сжатия) описания объекта:

отображение $H\text{mod}$ определяет процедуру снижения размерности (сжатия) детального описания объекта:

$$X(b) \rightarrow H\text{mod}(b). \quad (6)$$

и величину $H\text{mod}(b)$ можно считать «сжатым» описанием объекта;

отображение $H^{-1}\text{mod}$ определяет процедуру восстановления детального описания объекта по его сжатому описанию:

$$H\text{mod}(b) \rightarrow X(H^{-1}\text{mod}(H\text{mod}(b))). \quad (7)$$

и погрешность приближенного равенства

$$X(b) \approx X(H^{-1}\text{mod}(H\text{mod}(b))). \quad (8)$$

определяет точность процедуры сжатия.

2. Используемые методы и подходы в задачах снижения размерности.

Универсальные подходы, обычно рассматриваемые для решения задачи снижения размерности, могут быть условно разбиты на два класса:

- подходы, основанные на параметризации описания геометрии.
- подходы, основанные на данных.

Параметризация описания объекта заключается в попытке описать объект в целом или отдельные его компоненты при помощи аналитических формул, зависящих от небольшого числа параметров. Значительная часть усилий при параметризации описания объекта лежит в предметной области, хотя при этом возникают и решаются отдельные математические задачи. Однако во многих случаях при использовании такого подхода не удастся учесть всего многообразия описаний объектов рассматриваемого класса. Кроме того, такой подход основан на существенном использовании предметной области объекта, требует достаточно подробной идентификации класса рассматриваемых объектов и требует участия в этом процессе высококвалифицированных специалистов. Это затрудняет создание универсального инструментария для параметризации описания объекта. Подходы, основанные на данных, заключаются в применении математических алгоритмов снижения размерности (оценивания внутренней размерности данных, сжатия и восстановления данных). Наиболее популярным линейным методом снижения размерности является Анализ Главных Компонент (Principal Component Analysis, PCA). Одной из причин этой популярности является простота и в то же время высокая эффективность метода. Универсальным методом снижения размерности является использование Искусственных Нейронных Сетей (Artificial Neural Networks, ANN) «с перетяжкой», называемых также репликативными нейронными сетями. Также существуют методы снижения размерности основанные на ядром PCA (Kernel PCA) [1].

3. Эффективность представления топологий в формате OASIS

В разработке интегральных схем наиболее используемым форматом на сегодняшний день является потоковый формат GDS II (GDS II является торговой маркой компании Calma, находящейся в собственности компании General Electric, USA). Много лет, этот формат был единственным из своего типа, и многие производители стали применять его в своих системах. Формат GDS II является двоичным, он создает представление целого числа и числа с плавающей запятой. Описание интегральной схемы в GDS II- представляет собой коллекцию ячеек, которые могут содержать топологию или ссылки на другие ячейки. У этих ячеек, называемых структурами в GDS II, есть алфавитно-цифровые названия до 32 символов в длину. Библиотека этих структур содержится в файле, который состоит из заголовка библиотеки, последовательности структур, и конца библиотеки. Каждая структура в последовательности состоит из заголовка структуры, последовательности элементов, и конца структуры. Существует семь видов элементов: boundary (граница) определяет заполненный многоугольник, path (путь) определяет проводящую дорожку, structure reference (структурная ссылка) вызывает под- ячейку, (array reference) вызывает множество под- ячеек, text (текст) для документации, node (узел) определяет проводящую дорожку, и box (коробка) размещает прямоугольную геометрию [4].

Одной из особенностей OASIS, обеспечивающих высокую эффективность формата и относительно небольшой размер выходного файла, является метод представления двумерных геометрических фигур ("geometries"). Существует четыре ключевых элемента, способствующих повышению эффективности его геометрического представления. Первый- способ определения типа Integer. Спецификацией определены 6 различных типов Integer. Вторым ключевым элементом является другая особенность формата, OASIS использует представления Integer, чтобы определить только контуры полигонов (point-lists). В OASIS шесть типов point-list. Третий ключевой элемент - явное представление квадратов и прямоугольников. И последнее- OASIS предусматривает модальность (хранимое состояние). Это значит, что приложение, работающее с файлами OASIS, структурно анализирует OASIS файл и при встрече значения модального параметра (например «Геометрическая высота»), это значение не будет дублироваться для последующих элементов в файле (например, определение прямоугольника и трапеции), пока это значение не будет изменено. Таким образом, модальная переменная будет удерживаться до тех пор, пока не встретится новая переменная в файле [6].

Процесс конвертирования файлов формата GDS II в формат OASIS представляет собой несколько последовательных операций, а именно:

- замена GDS II квадратов и прямоугольников на OASIS квадраты и прямоугольники.
- замена GDS II полигонов типа manhattan на OASIS полигоны, содержащие нулевой или первый тип Point- list.
- замена GDS II полигонов, представляющие trapezoid и trapezoid, на OASIS полигоны, состоящие из octangular delta point-lists (третий тип) и all-angle delta point-lists (четвертый тип), в соответствии с их надлежащими формами в OASIS.

Геометрические координаты не являются единственным применением величин integer в OASIS и GDS II. Некоторые виды использования не сказываются сильно на размере файла, в то время как другие оказывают очень большое влияние. Таблица 1 показывает вклад разных применений integer в отношении обоих форматов, прилагая к каждому количество необходимых байт для реализации каждого экземпляра. Количество байт N, требуемое для представления integer в OASIS динамично ($N= 1,2,\dots$), оно зависит от размеров представляемого целого числа [2].

Таблица 1. Наиболее важные применения координат в OASIS и GDS II

Использование типа Integer	Количество байт в GDS II	Количество байт в OASIS
XY (координаты)	8	N (динамично)
Длина записи (Record Length)	2	0
Тип записи (Record Datatype)	1	0
Слой (Layer)	2	N (динамично)
Тип данных (Datatype)	2	N (динамично)
Ссылка на столбец массива (AREF Column)	2	N (динамично)
Ссылка на столбец массива (AREF Row)	2	N (динамично)

Двухбайтный беззнаковый integer реализуется в виде двух последовательных байтов, наиболее значительный байт идет первым, они используются для представления натуральных числе от 0 до 65535 или массива из 16 индивидуальных флагов (булевых значений «да» или «нет»). Одним из наиболее важных негеометрических использований двухбайтного беззнакового integer в GDS II является кодирование длины записи в header'e каждой из них [7]. Выходит приблизительно 20 % размера файла занимает только описание длины записей. Количество лишних байт растет линейно вместе с ростом количества записей. В OASIS длина записи не кодируется в саму запись, следовательно, OASIS позволяет создавать меньшие по объему файлы при использовании двухбайтных беззнаковых integer.

Спецификация GDS II явно не указывает на наличие подобного типа в формате, тем не менее, однобайтный беззнаковый integer в формате представлен. Один байт, состоя из восьми бит, может представить число от 0 до 255. В GDS II два однобайтных integer используются в header'e каждой GDS II записи для кодирования типа записи и типа данных. Тип записи в GDS II обычно эквивалентен по размеру в OASIS, но, не смотря на тот факт, что тип записи указан в каждой из записей, он, по сути, не используются [5]. Таким образом, его устранение в каждой записи сделает файлы короче в среднем на 10 %. В OASIS типы данных могут быть как частью данных непосредственно, так и могут подразумеваться из их контекста.

В GDS II двухбайтные знаковые integer хранятся в виде 2 последовательных байтов, используя два формата - дополнения для представления целых чисел в диапазоне от -32768 до 32767. Наиболее часто используется в описании номеров слоя и типа данных, строк и столбцов в записях AREF. Менее часто используется как типовой индикатор для путей, текста, узла, записей типа box, значений данных и т.д. Номера слоя и типа данных фигурируют в каждом GDS II полигоне или пути [7]. Большинство номеров слоев и типов данных обычно могут быть представлены одним байтом, используя OASIS беззнаковый тип integer. Обычно в топологиях пара слой/тип данных занимают по четыре байта на пару в GDS II и по два байта на пару в OASIS без учета модальности. Итак, если не учитывать модальность, OASIS может снизить количество байт вдвое. С использованием модальности в OASIS -- при условии, что количество ячеек значительно меньше, чем количество слоев/типов данных, вклад в размер файла благодаря слоям/типам данных должен быть незначительным, практически нулевым для большинства типовых проектов.

4. Место программного обеспечения «Кроссплатформенный конвертор форматов топологического описания СБИС GDS II и OASIS» в общем маршруте проектирования

Рассмотрим общий маршрут проектирования систем на кристалле, который состоит из следующих основных этапов (рисунок 2):

- концептуальное проектирование системы; основной задачей данного этапа является исследование проектируемой системы и получение её исполняемых спецификаций на языке высокого уровня (стандартно на C/C++);
- проектирование, то есть трансформация исполняемой спецификации проекта на уровень регистровых передач (получение спецификаций на языках Verilog/VHDL);
- верификация проекта, то есть проверка проекта и проектных решений на соответствие исходной спецификации и другим требованиям в процессе проектирования и детализации;
- физическое проектирование, начиная от выбора технологического и библиотечного базиса и заканчивая получением финального описания проекта в формате GDSII.

Этап проектирования физической топологии интегральных схем заключается в получении описания топологии в формате GDSII для передачи его на производство из исходного списка цепей (рисунок 2).

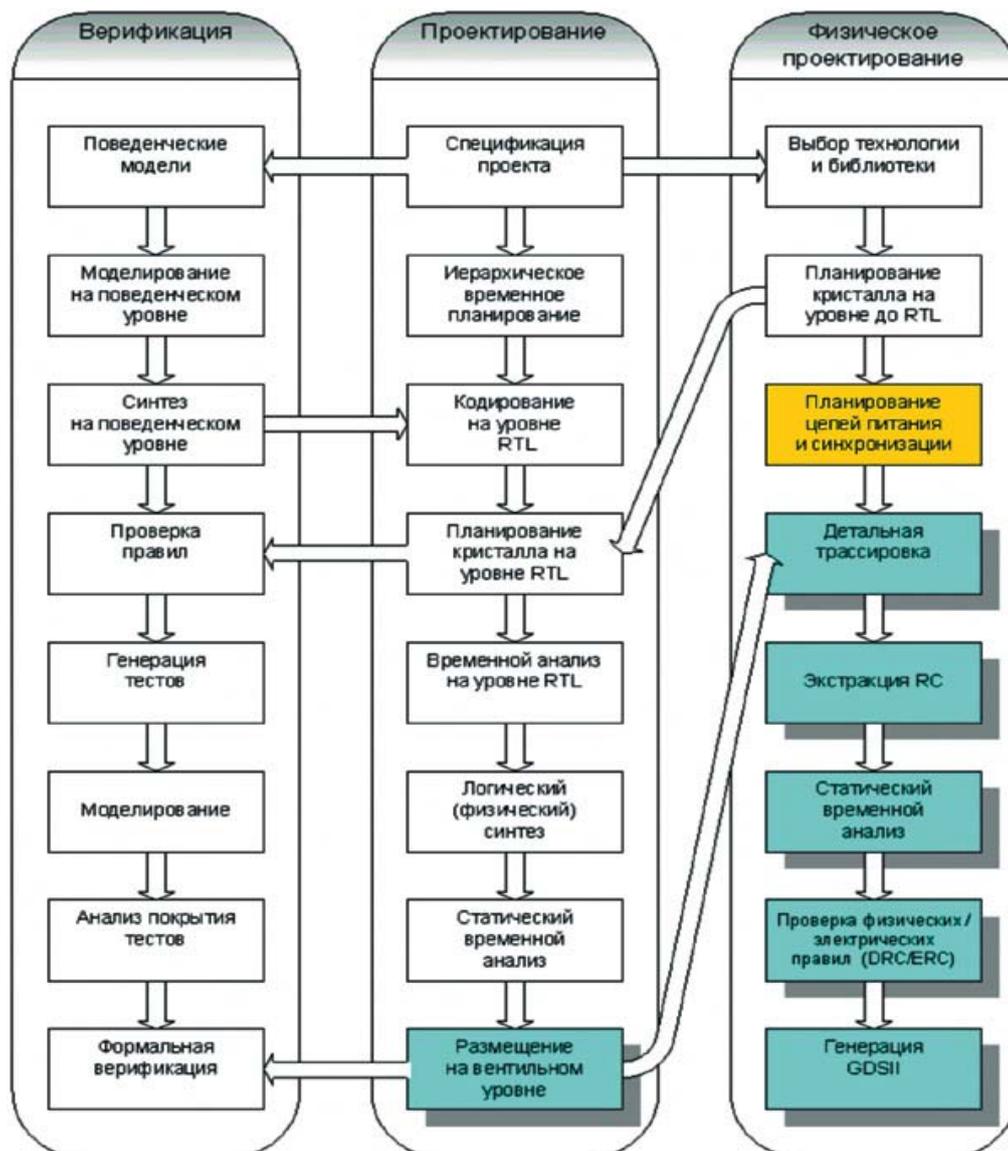


Рис. 2. Этапы разработки физического прототипа в общем маршруте проектирования.

Разработанный конвертор форматов будет работать на физическом уровне разработки интегральной схемы, дополняя или заменяя блок генерации GDS II файлов (рисунок 3).

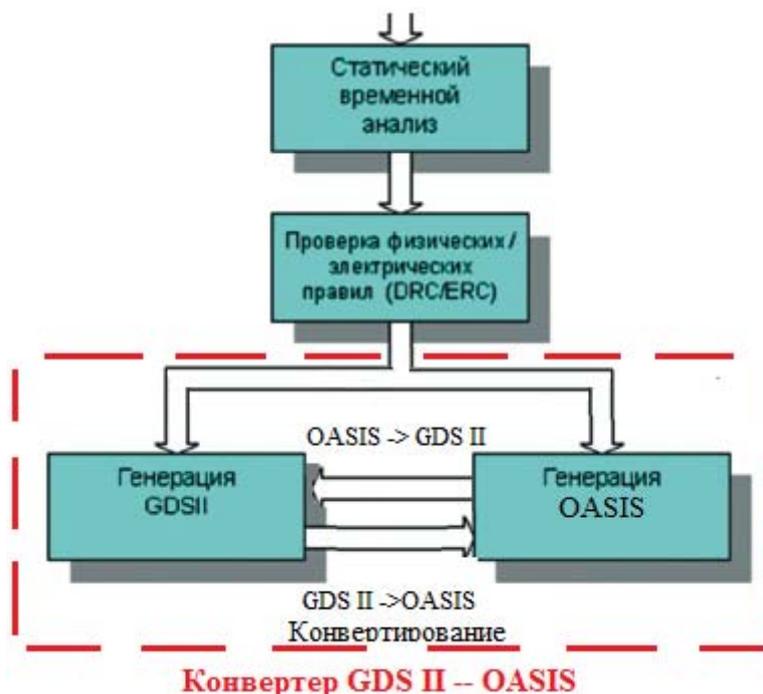


Рис. 3. Место конвертера в маршруте проектирования СБИС.

Установлено, что аналогичными разработками занимаются несколько коммерческих компаний, в частности «Mentor Graphics», анонсировавшей в 2008 году разработку open source конвертера GDS II to OASIS, предназначенного для продвижения и распространения формата. «Mentor Graphics» так же разработала линейку продуктов «Calibre», в которую позднее был включен GDS II to OASIS конвертор. Теперь конвертер файлов, представляющих топологическую информацию разрабатываемого проекта, поставляется лишь в комплекте с продуктами линейки «Calibre». Разработкой подобных систем так же занимаются компании Synopsys, SoftJin. Минусом подобного решения проблемы являются большие финансовые затраты на приобретение лицензий как на использование CAD- систем «Mentor Graphics», так и на использование систем других разработчиков, в большинстве случаев просто не выгодно приобретать всю систему из-за одного конвертера. Следует так же учитывать, что CAD- системы предназначены для работы с ними людей, высококвалифицированных специалистов, и очень затруднительно, а в силу закона об авторских правах порой даже не возможно, подключить отдельный компонент, конвертер, к другим системам для нужд предприятия, например, автоматизированной системе управления технологическими процессами. Платформоориентированность конвертера определяется платформоориентированностью всей CAD- системы, которые в большинстве своем Windows- ориентированные, намного реже Unix- ориентированные. В кроссплатформенных CAD- системах на сегодняшний день острой необходимости нет. Так же на рынке присутствуют мощные универсальные конверторы, работающие с файлами наиболее известных CAD- систем, например ACE translator. Данное программное обеспечение представляет собой универсальное решение, включающее в себя множество инструментов для чтения, записи, и конвертирования форматов. Предполагается, что программа будет использоваться отдельно на рабочей станции оператора CAD- системы при невозможности работы с имеющимся стандартом файлов. Минусами данного решения проблемы является опять же невозможность подключения полноценного программного продукта к различным более сложным системам для нужд предприятия, платформоориентированность.

Анализируя минусы описанных выше программных решений, можно приблизительно сформулировать первые требования к разрабатываемому продукту:

- максимальная платформонезависимость,
- способность работать, как в виде самостоятельного приложения, так и в виде компонента более крупной системы,
- максимальная простота и прозрачность структуры;

5. Архитектура программного обеспечения «Конвертер форматов топологического представления СБИС GDS II OASIS»

В спецификации к формату OASIS описано два типа integer и четыре типа delta. На первый взгляд все шесть типов имеют различия в структуре. Однако все они имеют единый комплексный метод для реализации редактора OASIS файлов. Он так же применяется для чтения OASIS типов integer и delta. Редакторы для 1-delta, 2-delta, и 3-delta могут базироваться на общей генерируемой процедуре высокого уровня, которую мы назовем generate-delta-procedure. Таким образом, все шесть видов integer и delta редакторов могут быть построены из одного унифицированной процедуры, generate-delta-procedure. Рассмотрим работу приложения на примере конвертирования GDS II файла в OASIS (рисунок 4). Компонент GDSII Reader считывает бинарный GDS II файл на входе и переводит информацию в эквивалентные виртуальные структуры данных, определенных спецификацией. Затем конвертер переводит информацию из виртуальных структур GDS II в виртуальные структуры OASIS. Компонент OASIS Writer записывает информацию в бинарный файл формата OASIS. В состав конвертера так же включены компоненты ASCII Reader и ASCII Writer для представления информации бинарных файлов в виде текста в формате ASCII для анализа структур GDS II и OASIS.

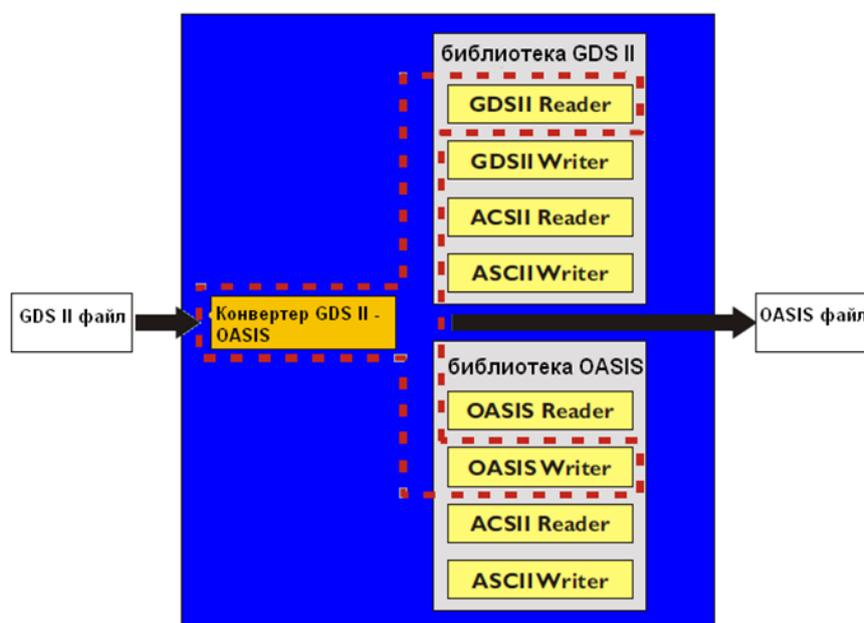


Рис. 4. Принцип работы конвертера GDS II – OASIS.

Концепция разработанного программного обеспечения заключается в реализации библиотеки классов и основной программы, к которой подключается эта библиотека. Методы классов оперируют с исходными бинарными файлами, начиная с процессов анализа файла и загрузки информации в виртуальные структуры данных в памяти компьютера, заканчивая процессами обработки этой информации и выгрузки ее в бинарный файл. Все классы в библиотеке можно условно поделить на несколько подбиблиотек и упорядочить согласно иерархии подчинения. Всего в библиотеке было выделено 4 подбиблиотек, в которых будут находиться все классы (рисунок 5).

Структура Библиотеки классов:

- conv - множество классов, методы которых осуществляют взаимное преобразование форматов,
- oasis, gdsii - классы для работы с потоковыми форматами OASIS и GDS II соответственно,
- misc содержит код, который не является специфичным для данного проекта (обработка исключений, обработка неосновной информации и т.д.),
- port находится на дне иерархии, в нем осуществляются вызовы всех системных функций;

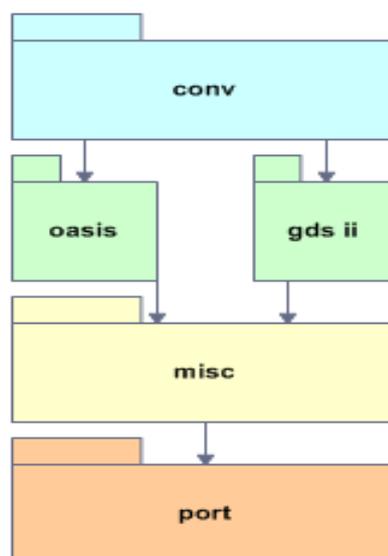


Рис.5. Структура библиотеки классов

Проводя аналогию подбиблиотек со слоями, можно сказать, что основой библиотеки, нижним слоем, будет port, на нем будет располагаться слой misc, над которым будут oasis и gdsii, наверху будет располагаться слой conv (рисунок 5). Разумеется, иерархия выстроена таким образом, чтобы каждый слой мог использовать только нижележащие слои, т.е. misc может использовать лишь port, а oasis- лишь port и misc.

Следует более подробно рассмотреть каждую библиотеку. Библиотека misc, как уже говорилось выше, содержит не специфический для проекта код. В ней:

- определены функции целочисленной арифметики с проверкой на переполнение
- определены классы Buffer, ReadBuffer и WriteBuffer, оперирующие с буфером, размещенным в динамической памяти компьютера
- определены стандартные константы и типы
- определен класс для устранения разницы между сжатыми и несжатыми файлами
- определен класс списка указателей на объекты, расположенные в динамической памяти
- и другие полезные методы и классы

В библиотеке gdsii содержатся методы, необходимые для чтения и записи потокового файла GDS II, а также для трансляции содержимого файла в ASCII код. Все классы в библиотеке сгруппированы в три слоя, в каждом из них по два подслоя (рисунок 6).

Нижний слой оперирует с типами записей во всем GDS II файле, средний слой оперирует с информацией на лексическом уровне (анализирует ее способы представления в каждой записи), верхний слой представляет собой синтаксический и семантический уровни.

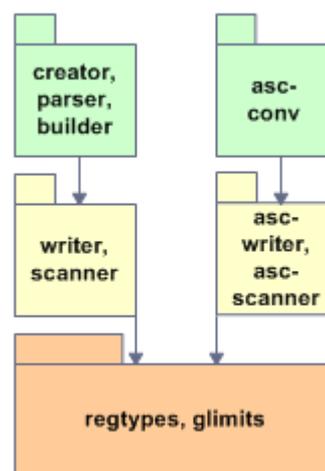


Рис.6. Структура библиотеки GDS II.

В библиотеке oasis содержатся методы, необходимые для чтения и записи потокового файла OASIS, а также для трансляции содержимого файла в ASCII код. Все классы в библиотеке сгруппированы в три слоя в четырех группах (рисунок 7). Две правые группы оперируют с бинарными потоковыми файлами OASIS, а две левые с их ASCII трансляциями. Нижний слой является лексическим слоем, т.е. осуществляет операции по считыванию и записи файла, сбору считанных байтов в лексемы (integer, delta и др.), а также записи байтов из виртуальных структур данных в файл. Средний слой является синтаксическим, т.е. методы его классов считывают лексемы и объединяют их в записи с минимальным толкованием и максимально возможной обработкой ошибок, аналогичные операции проводятся и с лексемами ASCII, так же возможны трансляции записей в ASCII. Верхний слой является семантическим слоем. Он имеет дело с именами ячейками и элементами вместо записей.

Реализованной библиотеки классов достаточно для всех операций, необходимых для обеспечения требуемого функционала программного обеспечения «Конвертер GDS II-OASIS».

Выводы

В работе были проанализированы подходы к снижению размерности топологических представлений объектов. Параметрическое описание геометрий является более удобным и компактным, нежели описание по точкам. Формат OASIS обеспечивает хранение информации в более компактных файлах, чем формат GDS II. Разрабатываемый программный продукт найдет место в маршрутах проектирования интегральных схем при физической их разработке, обеспечивая генерацию и взаимное конвертирование бинарных файлов хранения топологий. Учитывая минусы существующих решений, были сформулированы основные требования к продукту такие, как платформенезависимость и возможность работать как самостоятельно, так и в виде компонента, встраиваемого в любую более сложную информационную систему. Предложенная прозрачная архитектура обеспечит стабильную работоспособность конвертера. В перспективе, можно нарастить функциональность конвертера, добавив компоненты для работы с другими форматами топологического представления СБИС. Так же возможно включение новых нейросетевых алгоритмов сжатия и снижения размерности, что позволит лучше анализировать структуры файлов.

Литература

1. А.В. Бернштейн, А.П. Кулешов. Когнитивные технологии в проблеме снижения размерности описания геометрических объектов.
2. Alfred J. Reich, Kent Nakagawa, Robert Boone. Stream Format Efficiency // Motorola – Semiconductor Products Sector, 5301 Ed Bluestein Blvd, Austin, TX, USA, 78721 DuPont Photomasks, Inc., Gresham, OR, USA, 97030.
3. Steven M. Rubin. [Computer Aids for VLSI Design - Appendix C: GDS II Format.](#)
4. Jim Buchanan. [The GDSII Stream Format.](#)

На входе бинарный файл	На выходе бинарный файл	На входе ascii- файл	На выходе ascii файл
------------------------------	-------------------------------	----------------------------	----------------------------

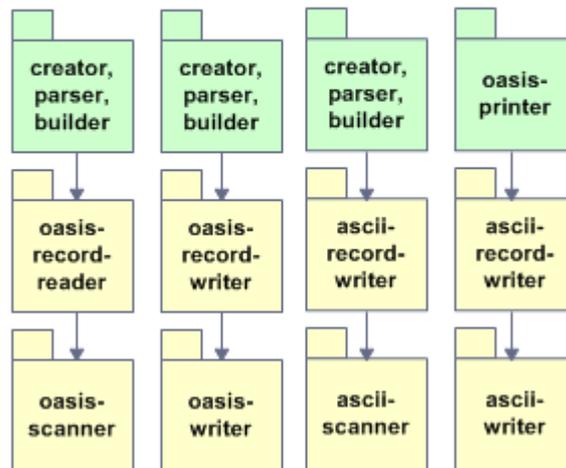


Рис.7. Структура библиотеки OASIS.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РЕМОНТЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ С ПОМОЩЬЮ КЛЕЕВ

Бодрых Н., Косолапов И., Елсуков К.А.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Малышева Г.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП НИИАТ МО РФ, Москва, Россия

RESEARCH OF STRUCTURE OF THE MATERIALS USED AT REPAIR OF STORAGE BATTERIES BY MEANS OF ADHESIVES

Vigorous N, Kosolapov I, Elsukov K.A.

The supervisor of studies: d.m.n., professor Malysheva of Century

Supervisor: Ph.D., professor Chekanov, AN

BMSTU, Moscow, FGUP NIIAT MO, Russia

Аннотация

Приведены результаты исследований поверхностей материалов, используемых при изготовлении корпусов и крышек аккумуляторных батарей. На основании полученных результатов определены характеристики качества поверхности, Ra и Rz и далее рассчитаны усилия, обеспечивающие плотность стыка поверхностей, отремонтированных с использованием клеев-расплавов.

Abstract

Results of researches of surfaces of the materials used at manufacturing of cases and covers of storage batteries are resulted. On the basis of the received results characteristics of quality of a surface are defined, Ra and Rz and further the efforts providing density of a joint of surfaces, the glues-rasplavov repaired with use are calculated.

Клеевые материалы получили широкое распространение при ремонте, поскольку позволяют соединять различные материалы, в том числе и при комнатной температуре.

В настоящей работе рассматривается новая технология ремонта стартерных аккумуляторных батарей дизельных электростанций АД-6 и др. Типовыми повреждениями таких аккумуляторов являются трещины в крышках (корпусах), которые возникают из-за ослабления болтового крепления аккумуляторов, вследствие больших и продолжительных вибрационных нагрузок. Повреждения в крышке (корпусе) могут одновременно приводить и к повреждениям аккумуляторных пластин. В этом случае такой аккумулятор подлежит замене и ранее не ремонтировался.

Авторами разработана новая технология ремонта поврежденных аккумуляторов с использованием клеев-расплавов, которыми называют термопласты со 100% содержанием клеящего вещества, приобретающие вязкотекучее состояние и адгезионные свойства при нагревании и быстро восстанавливающие твердое состояние при охлаждении.

Сложность технологии ремонта заключалась в необходимости обеспечить герметичное соединение перемычки (внутренней перегородки), чтобы исключить перетекания электролита, которая в свою очередь зависит от реологических свойств используемого клея и геометрии ремонтируемой поверхности.

Целью данного исследования является изучение структуры поверхности и определение причин, по которым одни из клеев-расплавов удовлетворяют заданным требованиям герметичности, а другие – нет. С этой целью были вырезаны несколько партий образцов из крышей аккумуляторных батарей и проведено сканирование их поверхности. Полученные результаты (рис.) позволили с высокой степенью точности определить вес характеристики поверхностных слоев и рассчитать искомое условие обеспечения герметичности восстановленных конструкций.

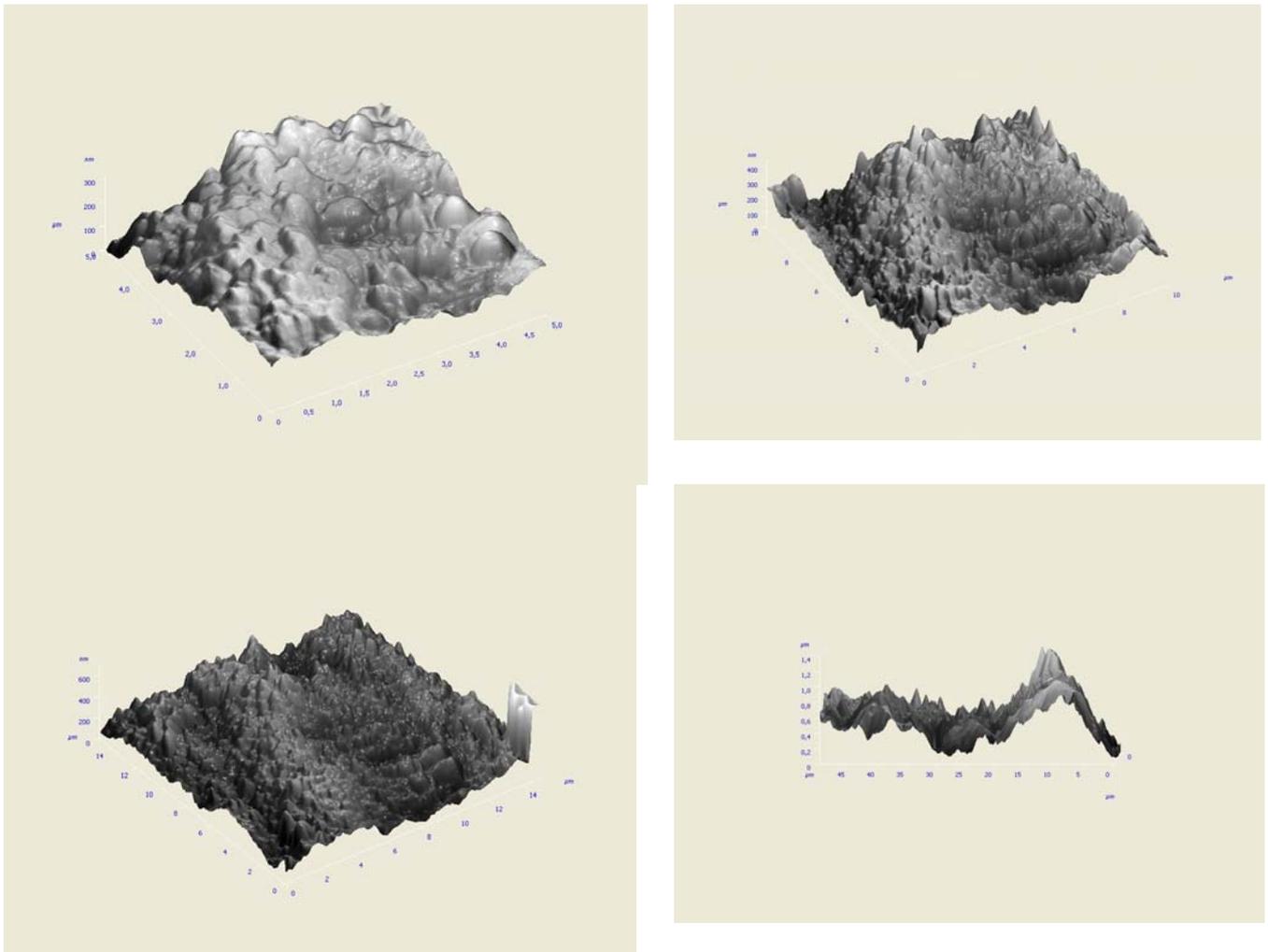


Рис.1. Структура поверхности поликарбоната, используемого в качестве материала крышек и корпусов аккумуляторных батарей

Целью данного исследования являлось изучение структуры поверхности и определение причин, по которым одни из клеев-расплавов удовлетворяют заданным требованиям герметичности, а другие – нет. С этой целью были вырезаны несколько партий образцов из крышек аккумуляторных батарей и проведено сканирование их поверхности. Полученные результаты (рис.) позволили с высокой степенью точности определить вес характеристики поверхностных слоев и рассчитать искомое условие обеспечения герметичности восстановленных конструкций.

DESIGNING, MODELING, FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF MICROFLUIDIC MEMS DEVICES FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS: MICROPUMP FOR PISTONLESS DRUG DELIVERY SYSTEM

Alexey Denisov*

Research supervisors: Prof. Vadim Shakhnov, Prof. Laurent Montes***

** Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

*** IMEP-LAHC, MINATEC, Grenoble, France*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫХ МЭМС ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В БИОМЕДИЦИНЕ НА ПРИМЕРЕ БЕСПОРШНЕВОЙ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

Денисов А.А.*

Научные руководители: д.т.н., проф. Шахнов В.А.; проф. Монтеc Л.***

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

*** IMEP-LAHC, MINATEC, Гренобль, Франция*

Abstract

The project is aimed at designing, modeling, fabrication and characterization of the main part of a pistonless drug delivery system – micropump. The reciprocating displacement micropump with bimetallic actuation is chosen as the most appropriate to the specifications and operating conditions. Under consideration are selection and justification of the technology for the micropump, design and analysis of geometrical parameters having critical influence on micropump behavior, development of mathematical models aimed at investigation of the device behavior and its operating cycles, development and optimization of process flow for device fabrication, characterization of the fabricated device and comparison of the results obtained with the result of mathematical modeling.

Аннотация

Целью проекта является разработка микропомпы возвратно-поступательного движения с биметаллической актюацией для систем направленной доставки лекарств. Основное внимание уделено: обоснованию выбранной технологии; проектированию и анализу конструкторско-технологических параметров, оказывающих значительное влияние на работу устройства; разработке математических моделей, направленных на исследование физических явлений, протекающих в процессе работы устройства; разработке и оптимизации технологического процесса изготовления устройства; проведению экспериментальных исследований с целью сравнения полученных результатов с результатами математического моделирования.

Introduction

Microfluidics is the interdisciplinary field dealing with handling of fluid volumes in the nano- and sub-nanoliter range making explicit use of the effects which are typical for fluids interacting with microstructures.

The idea of dispensing small amounts of liquid at high precision dates back to the early 1950s when the basics of modern inkjet technologies were settled. Nevertheless before 1980s microfluidics was mainly an academic topic dealing more with miniaturization of conventional technologies rather than utilizing the new principles appeared on micro and nanoscale. During the last decades the design paradigms began to shift toward extensive use of new microfluidics operating principles and phenomena which were not possible to obtain just by downscaling traditional concepts.

Nowadays the opportunities and advantages derived from miniaturization become more and more evident, allowing not only integrating MEMS devices into human body, but also controlling small amounts of fluids very precisely. Biocompatibility, great uniformity and reliability, reproducibility, low power consumption, optical and electrical sensitivity, integration capabilities, precise control, small size, ability to interact with fluids – just few of many advantages offered by MEMS to biomedical industry. They allow creating new medical devices for monitoring biological

parameters of human body (diagnostics) as well as devices aimed at improving human body treatment, reducing discomfort and promoting better health and wellbeing (therapeutics).

Drug delivery systems are among these devices. Enabling non painful procedures and information retrieval, possessing very accurate dosage and dispensing systems, having small dimensions at extremely low cost make these devices very attractive for today's therapeutics industry. With the increasing demand from biomedical industry to the systems capable of handling extremely small fluid volumes, the importance of micropumps – the main part of drug delivery systems – raises significantly.

The main subject of the Project is designing, modeling, fabrication and characterization of micropump for a disposable pistonless drug delivery system. First of all, global microfluidics market as well as markets of life-sciences, medicine and drug delivery systems are analyzed. Then the existing solutions and technologies are reviewed in order to find out the most appropriate one satisfying the specifications. Once the technology is chosen it is thoroughly analyzed, adjusted to meet the specifications and the device based on it is developed. The design phase is followed by simulation and fabrication. Finally, the hardware implemented device is characterized and the major parameters are measured. This allows comparison between the results obtained during simulation and characterization phases and making important conclusion about applicability of mathematical models as well as design flow and technology.

1. Microfluidics in life-sciences market

Nowadays the overall annual revenues of microfluidic products have overcome the barrier of 15 billion € with annual growth rate of about 20% [1]. The present and emerging markets for microfluidic technologies consist of inkjet technology, life-science technologies, industrial dispensers (for technical or agro-/food industries), industrial automation (control units featuring low power consumption, fast switching times and low cost), chemical process engineering (the production of chemicals by means of micromachined reactors) and power systems (fuel cells, micro-combustors, fuel processors, fluidic microthrusters).

Fig. 1.1 represents the segmentation of markets for microfluidic instrumentation in the life sciences. There are 4 major segments in life-sciences markets: drug discovery, biotechnology, ecology and medicine.

Biotechnology plays key role there and acts on the boundaries between different life-sciences. Therefore it is difficult to distinguish biotechnologies and the corresponding microfluidic equipment related to different application areas: medicine, drug delivery or ecology. The distinction can be made based on the source of the sample to be analyzed (medicine: blood, urine, saliva etc.; drug discovery: synthesis and compounds; biotechnology: cell culture, cell extracts; ecology: nature, agriculture, food, infrastructure).

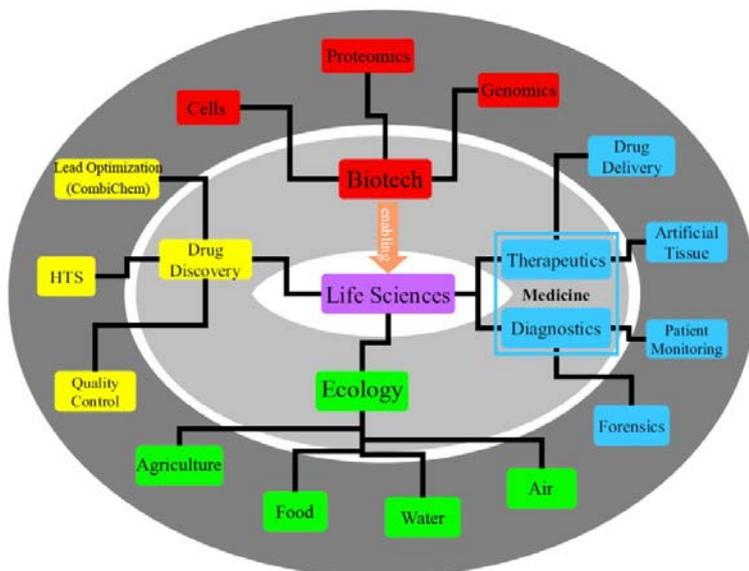


Fig. 1.1. Structure of life-science markets [1]

The medical business is commonly considered to be very conservative. Severe regulatory constraints together with sensitive customer acceptance and ethical issues usually result in short-term commercial success of novel technologies. However, medical devices are one of the major targets for microfluidic technologies. There are two main branches observed: diagnostics and therapeutics [1]. The diagnostic field is characterized by a strong competition from conventional technologies which are usually very advanced and so cheap that it is extremely difficult for

microfluidic technologies to enter these areas. In therapeutics, the majority of efforts focuses on drug delivery systems – the main subject of the Project.

There are two technical concepts to dispense drugs from reservoirs: flow controlled and diffusion controlled devices. Flow controlled devices usually apply a pressure which may be generated for example by a micropump or the evaporation of a high-vapor pressure liquid while the diffusion controlled devices work like pills which deliver the drug by diffusion through a porous layer or a membrane.

2. Specifications for the pistonless drug delivery system

The drug delivery system being developed consists of 3 modules (ref. Fig. 2.1 and 2.2): micropump, control unit and power supply unit.

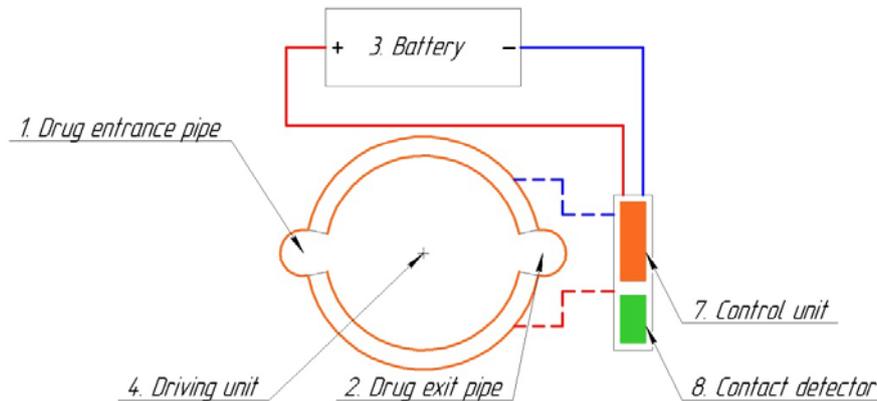


Fig. 2.1. Bottom view of drug delivery system

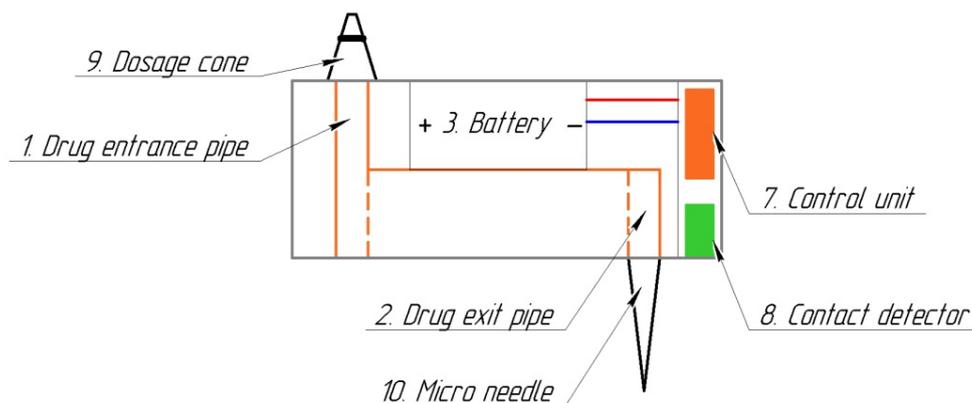


Fig. 2.2. Cross section of drug delivery system

The system consists also of supplementary submodules such as contact and flux detectors aimed at providing safe and secure injection.

The main module – micropump – is connected to the dosage cone so that the necessary amount of liquid is injected inside the chamber through the entrance pipe. The micro needle (or array of micro needles) is connected to the chamber so that the drug is dispensed out of it through the exit pipe. The chamber volume is controlled by the driving unit – diaphragm-type or any other like peristaltic, rotary or dynamic one.

Figures 2.3-2.5 illustrate operating principle of the micropump.

Fig. 2.3 illustrates state of rest when the system is relaxed: no actuation force is applied, there is no flux and all the check valves are closed.

Fig. 2.4 illustrates suction stroke. When the actuation force is applied, the membrane (or membranes) is bended outwards increasing the volume of the chamber and reducing the pressure. Due to the increased pressure difference between inlet and chamber, the input check valve opens allowing the drug to fill the chamber. The output check valve closes the outlet properly so that the drug is not dispensed. The drug entrance pipe is provided with flux detector aimed at constant monitoring of the flux and precise dosage.

Fig. 2.5 illustrates discharge stroke. When the inversed actuation force is applied (or the actuation force is not applied so the system returns to the state of rest) the membrane (or membranes) is bended inwards decreasing the volume and increasing the pressure inside the chamber. Due to the increased pressure difference between the outlet and chamber, the output check valve opens allowing the drug to be dispensed. The input check valve closes the inlet providing proper isolation between the chamber and drug source.

The size of the chamber is governed by the type of the drug, amount to be injected and needle size. The shape of the chamber can be square, rectangular, circular or oval. The micropump has to be embodied to the overall package.

The design of the micropump is governed by the injection time which depends on the amount of drug to be injected. Differential pressure created by the driving unit depends on the amount of drug to be injected. The leakage flow must be minimized as much as possible.

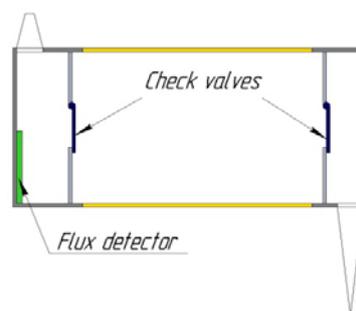


Fig. 2.3. State of rest

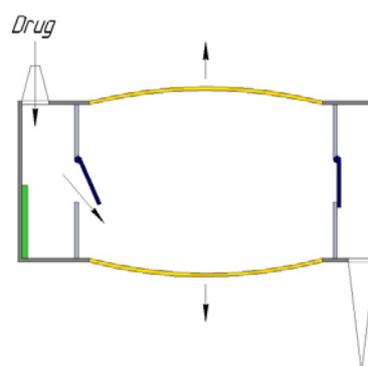


Fig. 2.4. Suction stroke

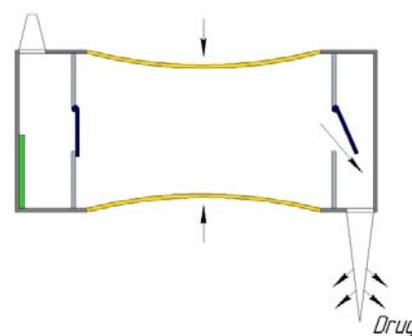


Fig. 2.5. Discharge stroke

After thorough analysis of existing solutions and technologies, reciprocating displacement micropump with bimetallic thermal actuation was chosen. The use of membrane with bimetallic actuation provides relatively high actuation force for an integrated structure, large displacement and symmetric vertical travel. A number of combinations of bimetallic materials can be used, but silicon-aluminum is one of the most attractive.

Fig. 2.6 illustrates reciprocating displacement micropump with bimetallic actuation (without input orifice). It consists of 2 substrates: 1 – top, and 2 – bottom one. The top substrate 1 is covered with *PolySi* layer 3 which acts as a membrane after back etching of the substrate 1. This *PolySi* layer 3 represents one of the 2 layers in a bimorph structure. It consists of diffused resistor rings 7 which, being subjected to electrical potential, result in heating of the membrane.

The second layer of the bimorph structure is the *Al* layer 4 which is coated on top of *PolySi* one in a shape of a ring. Due to the different thermal expansion coefficients of *Al* and *PolySi* materials, the heating of this structure results in the bending of the whole membrane. The silicon dioxide layer 6 provides thermal insulation between the heating membrane and the substrate. This plays very important role since it prevents heating of the drug during the actuation. Diffused rings (resistors) 7 are connected to contact pads using aluminum paths. The silicon dioxide layer 5 provides electrical insulation between these aluminum connections and the metal ring 4. The central boss structure 8 is rigid enough to displace transversally – along vertical direction. The bottom

substrate 2 consists of seating ring 10 and output orifice 9 which controls the flow rate out of the chamber.

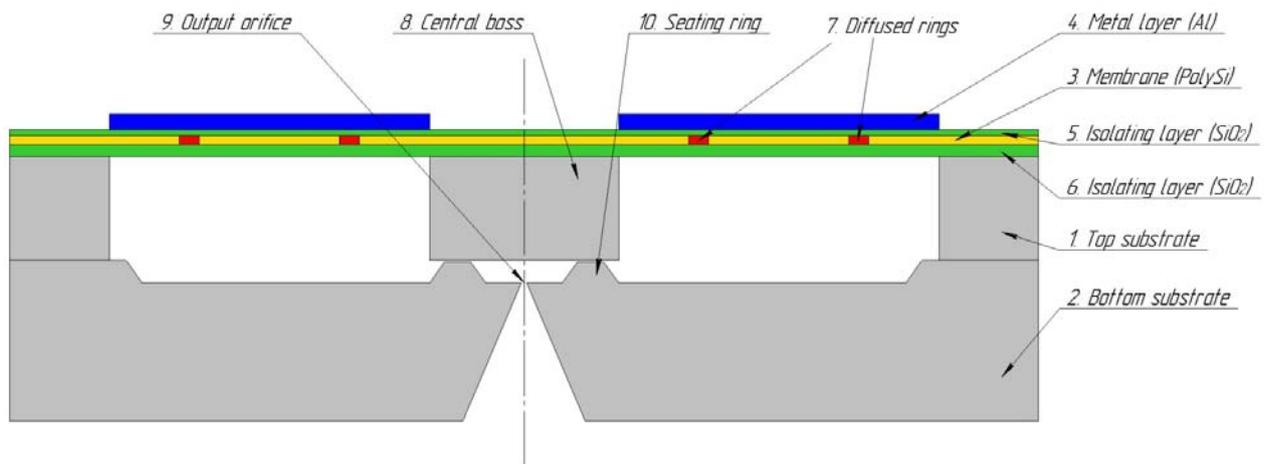


Fig. 2.6. Structure of micropump with bimetallic actuation (anisotropic etching)

The membrane shape can be circular or square and with the increasing temperature bends upwards changing the gap between the seating ring and the bottom surface of the central boss, thus controlling the drug flow. Therefore the structure has a normally closed configuration: the suction stroke occurs under an applied external voltage (which results in heating of the membrane) and the discharge stroke occurs at no applied voltage.

A top view of micropumps with different membrane configuration is shown in Fig. 2.7 and 2.8.

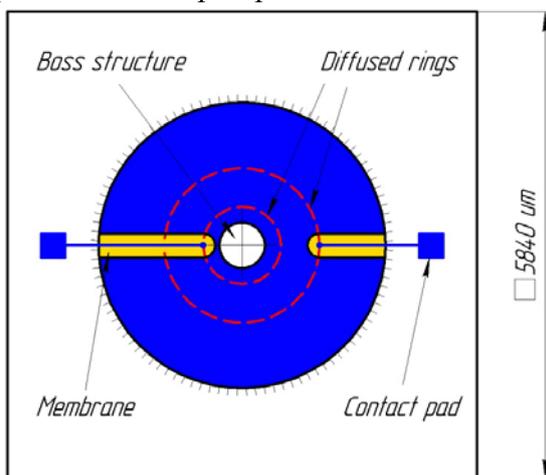


Fig. 2.7. Micropump top view. Circular membrane

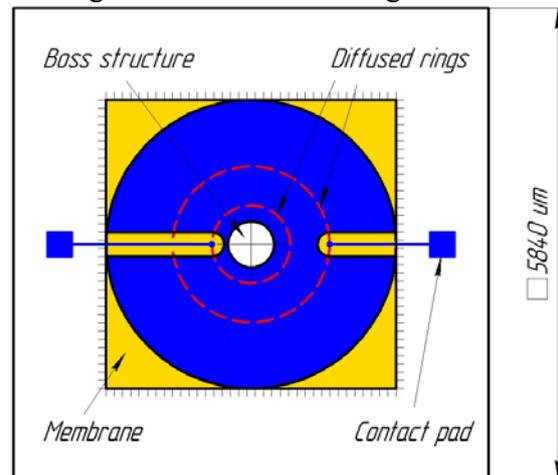


Fig. 2.8. Micropump top view. Square membrane

To release the membrane, backside anisotropic silicon etching (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) as well as isotropic silicon etching (KOH solution) can be used.

3. Modeling of the micropump with bimetallic actuation

In order to design a proper reciprocating displacement micropump with bimetallic actuation which will satisfy all the specifications and requirements and will operate in required conditions it is necessary to perform simulation of such a structure implemented in different designs and do the comparison in order to select and justify the most appropriate.

ANSYS software is used in the project for performing FEM analysis of the micropump. The flow characteristics of the micropump are controlled by several parameters: membrane and metal thicknesses, diameter of the membrane as well as position of metal and diffused rings relative to the membrane and seating ring configuration. These parameters and their influence on the central boss displacement are studied and analyzed during FEM analysis.

The analysis of the whole micropump taking into account the interactions between the fluid flow, differential pressure, membrane deflection and the actuation force applied is very complex. Therefore initially individual models are used successively in order to predict the behavior of the micropumps and then the coupling of these models is made. In order to justify the models created during the simulation, a step by step approach is chosen. Starting with the most simplified structure the modeling proceeds to more complicated ones successively, each new step making few adjustments, thus allowing monitoring of all the parameters and results.

These models working on the boundaries of different physical domains are the following:

1. Thermo-mechanical model
2. Electro-mechanical model
3. Fluidics models
 - a. EDA model
 - b. CFD model
4. Coupled models (two-way coupled FSI)

Fig. 3.1 illustrates the half-cut of the micropump created with ANSYS software while Fig. 3.2 illustrates the same micropump meshed.

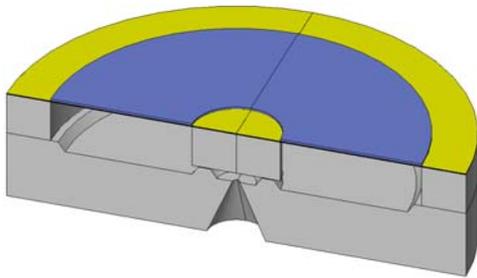


Fig. 3.1. Half-cut of the micropump

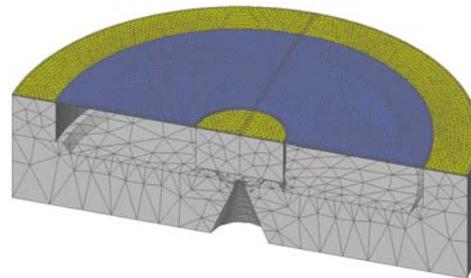


Fig. 3.2. Half-cut of the micropump (meshed)

The yellow structure in Fig. 3.1-3.2 is the *Si* (or *PolySi* for other models) membrane (compare with Fig. 2.6) while the blue one – metallic ring.

The **first model – thermo-mechanical** – is the most simplified one and aimed mainly at investigation of modeling and simulation principles of the microfluidic devices such as micropumps. Therefore a lot of efforts is directed towards creating the model itself, understanding the principles of software operation and its treatment of the structure.

Fig. 3.3 illustrates one of the critical design parameters – relative position of heated area while Fig. 3.4-3.6 – results of the mathematical modeling of the structure with different values of this parameter.

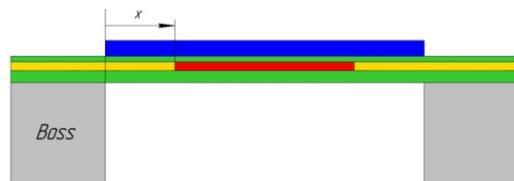


Fig. 3.3. Illustration of “relative position of heated area” design parameter

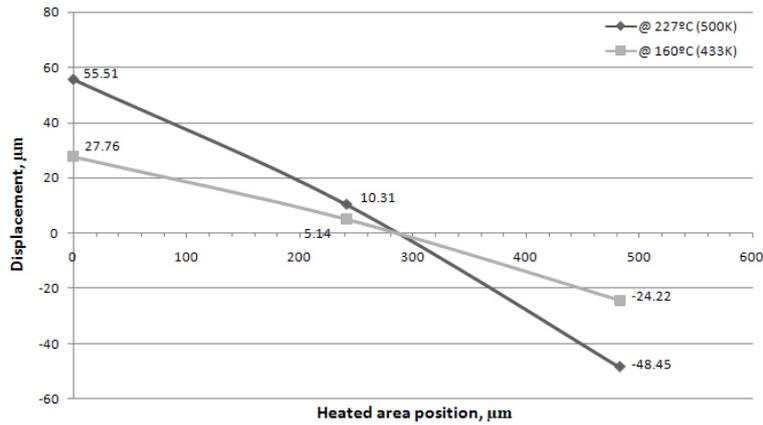


Fig. 3.4. Central boss displacement vs. relative position of heated area

Moving the heated area towards the central boss results not only in redistributing of thermal gradients but also in changing the membrane shape which tends to bend more with a heated area closer to the central boss.

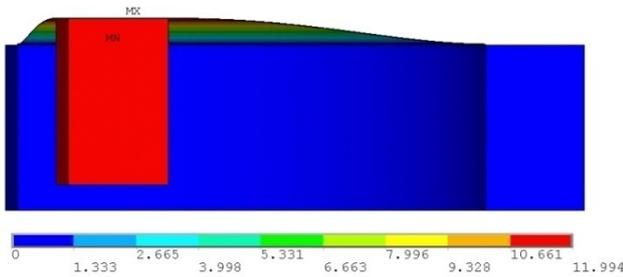


Fig. 3.5. Displacement contour plot (heated area position $x = 0 \mu\text{m}$)

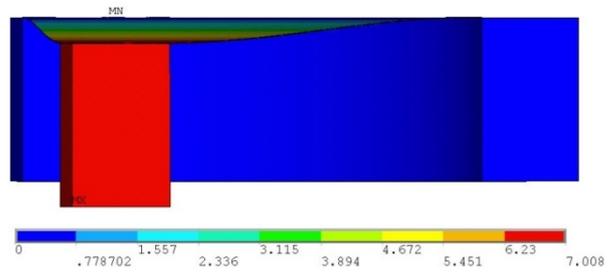


Fig. 3.6. Displacement contour plot (heated area position $x = \text{free membrane size}/2$)

Fig. 3.5 and 3.6 show the displacement contour plots with different positions of heated area. In Fig. 3.6 the heated area was moved towards the outer part of the membrane, therefore the displacement is negative.

The **second model – electro-mechanical** – is aimed at analyzing the electro-mechanical behavior of four-layered structure $\text{SiO}_2\text{-PolySi-SiO}_2\text{-Al}$ under realistic conditions.

Therefore the heated area is no more subjected to the uniform temperature, but a given potential difference is applied between diffused rings forcing the area between them to act like a resistor and heat (Joule heat) (see Fig. 3.8 and Fig. 2.7). Fig. 3.7 illustrates the half-cut of the micropump with integrated diffused resistors. The aluminum and top oxide layers were removed from the image for the sake of simplicity.

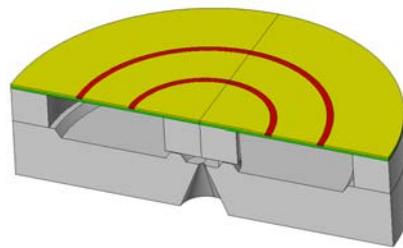


Fig. 3.7. Half-cut of the micropump showing diffused resistors (Al and top oxide layer are not shown)

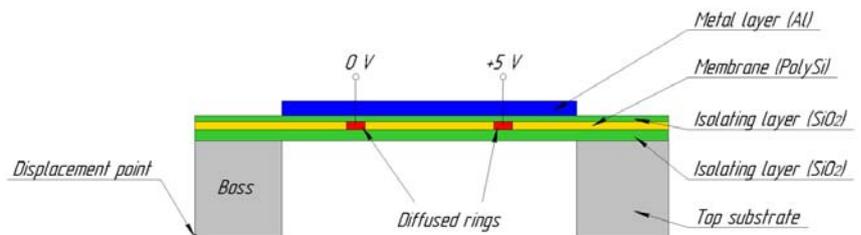


Fig. 3.8. Structure with applied potential difference between diffused resistors

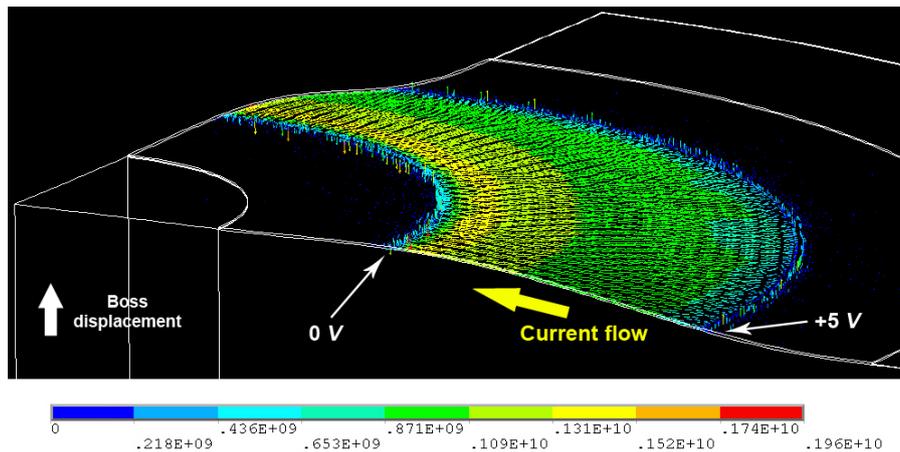


Fig. 3.9. Current distribution through the surface between diffused rings (current density vector plot, values in $pA/\mu m^2$)

Fig. 3.9 illustrates the current distribution through the surface between diffused rings due to the applied potential difference of $+5 V$. Since the applied potential difference is positive, the current flows from the outer diffused ring towards the inner one (yellow arrow in Fig. 3.9).

The legend in Fig. 3.9 shows that the current density though the surface between diffused rings is not constant. It is because of the areas with zero current density (in blue) which affect the scale of the legend. Neglecting these areas results in almost uniform current distribution along the surface (the difference between “yellow” and “green” areas is about 10 orders of magnitude smaller than the whole scale).

The plots shown give the information about the current density which allows to calculate the total power consumption. For the structure shown in Fig. 2.6 the power consumption is about $5 W$.

Fig. 3.10 illustrates the temperature distribution along the surface of the membrane. The most heated area (in red) has the temperature of $445 K$ and results in about $50 \mu m$ vertical displacement of the central boss structure.

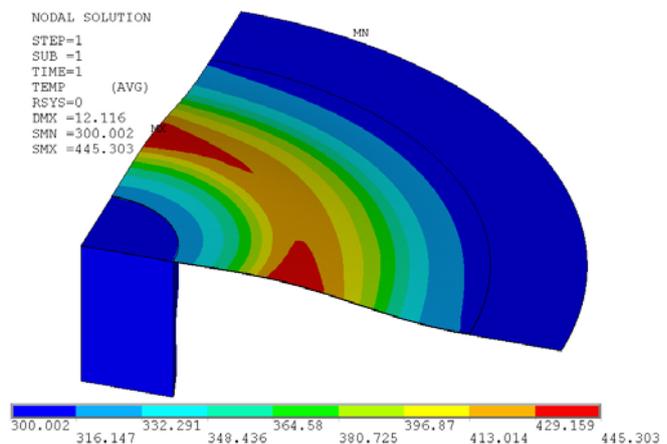


Fig. 3.10. Temperature distribution (values in K)

The **fluidics models** are aimed at analyzing the behavior of the membrane and its influence on the pressure change inside the micropump chamber. Knowing the value of the pressure difference between the micropump chamber and the outlet channel caused by the membrane deflection, it becomes possible further estimation of the micropump flow rate.

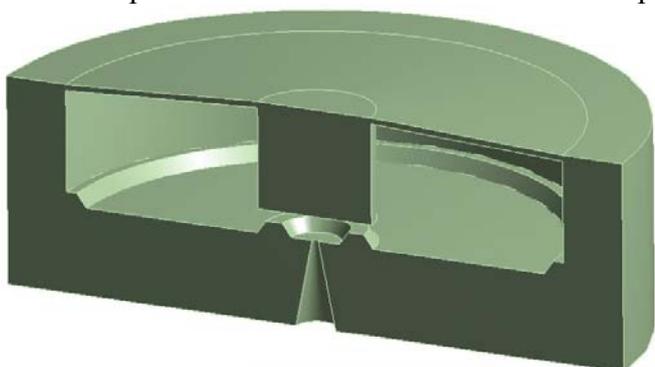


Fig. 3.11. Half-cut of the micropump with deflected membrane

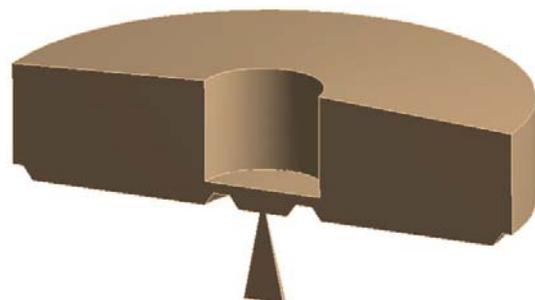


Fig. 3.12. Half-cut of the fluid filling micropump chamber

Fig. 3.13 illustrates the micropump during the discharge stroke. As a result of previous suction stroke, the membrane is deflected to its maximum position. Then, the potential difference is removed and the membrane returns to its initial position, reducing the volume of the micropump chamber and, therefore, increasing the pressure difference between the micropump chamber and the outlet channel.

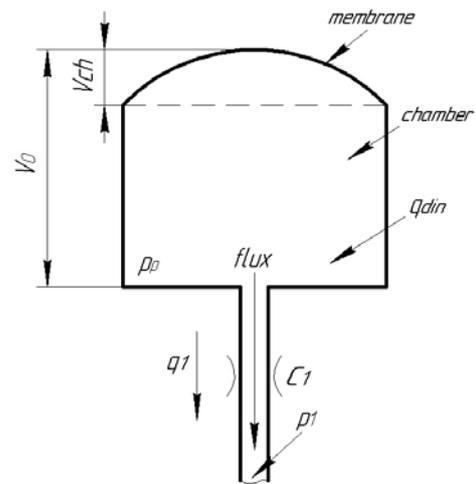


Fig. 3.13. Micropump discharge stroke

From Fig. 3.13:

p_p – pressure inside the chamber (in Pa)

p_1 – outlet pressure (outside the chamber) (in Pa)

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

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

C_1 – channel conductivity (constant which depends on channel geometrical properties and fluid properties: viscosity, density. In kg/(s·Pa)).

The dynamic mass flow can be calculated by the following expression:

$$q_{din} = \frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} + \frac{V}{RT} \frac{dp_p}{dt}$$

where $\rho = \frac{p_p}{RT}$ – fluid density ($\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ for water)

The static mass flow can be calculated by the following expression:

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

Due to the Mass Conservation Law:

$$q_{din} = q_1$$

and the following differential equation can be obtained:

$$\rho \frac{dV}{dt} + \frac{V}{RT} \frac{dp_p}{dt} = C_1 \cdot (p_1 - p_p)$$

Solving this equation in terms of $p_p = f(V)$ it is possible to find out how does the chamber pressure depend on the volume change caused by membrane deflection. The equation can be solved numerically with MATLAB SIMULINK tool [13]. In order to do that, the system block-diagram can be constructed, and the simulation can be performed in this environment.

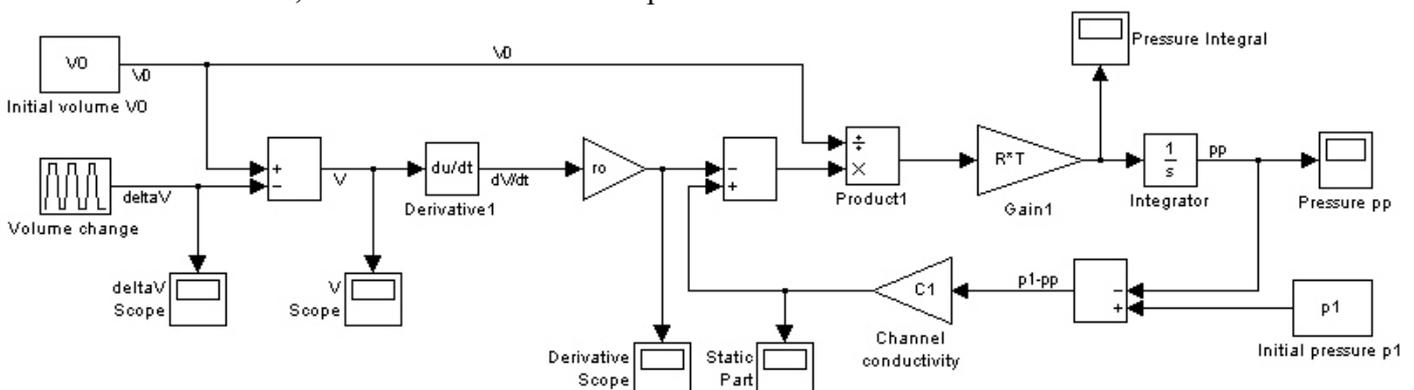


Fig. 3.14. SIMULINK block-diagram for solving the mass conservation equation

Since the actuation mechanism did not change, the behavior of the micropump chamber volume is the same as shown in Fig. 3.15. The initial chamber pressure was assumed as equal to the outlet pressure p_l , so there was no pressure difference (and, therefore, no flow) initially.

The behavior of the chamber volume is illustrated in Fig. 3.15.

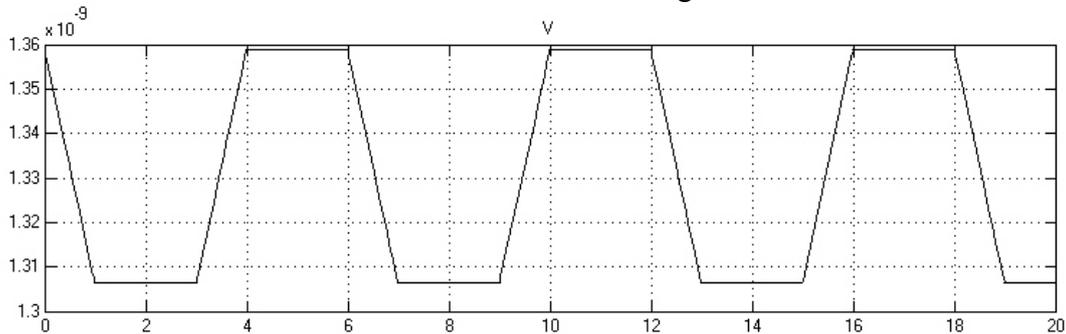


Fig. 3.15. Behavior of chamber volume (values in m^3)

It is clearly seen the discharge stroke (negative slope) as well as the suction stroke (positive slope). The initial chamber pressure was assumed as equal to the outlet pressure p_l , so there was no pressure difference (and, therefore, no flow) initially.

The behavior of the micropump chamber pressure is illustrated in Fig. 3.16.

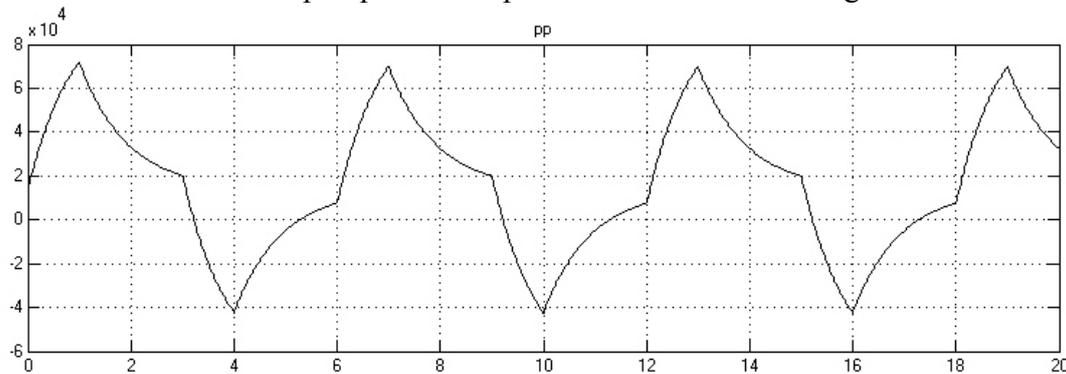


Fig. 3.16. Behavior of chamber pressure (values in Pa)

From the Fig. 3.16 it is clearly seen that the pressure behavior does not follow precisely the volume change. This is due to the fact, that during the increase of the chamber pressure and after a certain value, the flux begins flowing out of the chamber (q_l in Fig. 3.13). This mass flow results in the chamber pressure decrease. The same but opposite process takes place during decrease of the chamber pressure. According to the results from Fig. 3.16, the maximum chamber pressure is about

$$p_x = 7 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cong 10 \text{ psi}$$

Therefore, the membrane deflection of $50 \mu m$ results in the pressure difference between the micropump and the outlet of 10 psi .

The **CFD simulation** is aimed at analyzing the behavior of the flow rate through the output orifice as a function of the displacement of the central boss structure. The main goal of the simulation is estimating the maximum flow rate which can be achieved by the pump and the possible geometry optimization that may help achieving it. Therefore it results in designing the geometry of the seating ring and output orifice to satisfy the specifications and required operating conditions.

The values of the displacement of the central boss and the resulted chamber pressure are taken from the previous EDA simulation. Therefore this CFD model is still simplified since there is no coupling between electro-mechanical and fluidic domain and the initial boundary conditions are taken from the results of other models.

4. Fabrication of the micropump with bimetallic actuation

The overall process of micropump fabrication consists of 3 major steps:

1. Top substrate fabrication
2. Bottom substrate fabrication
3. Making the inlet/outlet check valves and gluing the substrates

The most critical process is the first one – the top substrate fabrication. The top substrate contains the actuation driver – the bimetallic membrane and the central boss structures – which will define the overall micropump performance (flow rate, power consumption and the packaging size).

It is very important to justify the technology chosen and achieve the parameters required before proceeding to the next step. Once the top substrate is fabricated, it can already be characterized in terms of membrane deflection and the central boss displacement. Coupled CFD and FEA modeling (ref. chapter 2) will allow estimating the flow rate for a given boss displacement and compare it with the required value.

The process flow for the fabrication of the micropump top substrate consists of 8 steps including 4 photolithography processes. Therefore, only 4 masks are required, making the process relatively easy and reducing the cost of a final product.

As already stated there are several geometrical parameters which play an important role in the behavior of the micropump. Therefore, there are different configurations corresponding to particular values of such parameters. In order to justify the FEA results obtained for the different values of design parameters, these configurations have to be fabricated and characterized. Therefore each of them has to be placed on the wafer and be easily accessible. Each structure was assigned a name making easy to track it on the wafer during the fabrication and characterization processes.

Since the membrane occupies major part of the structure, it is important to make sure that it will be rigid enough. Therefore additional spacing between the membrane periphery and the die boundaries has to be added.

In order to make simple and clear layout with well aligned structures, the same structure size is used. This configuration has the largest free membrane size ($1500\ \mu\text{m}$) and therefore the largest die area. So, all the other configurations will fit to it very well.

Therefore, 4-inch wafer is capable of fitting 144 dies (within rectangle inscribed to it).

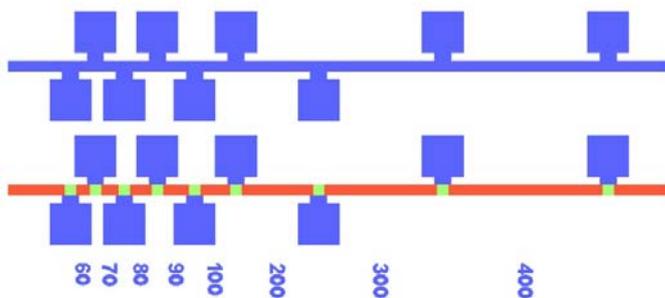


Fig. 4.2. TLM structures (resistivity).
In green – vias openings

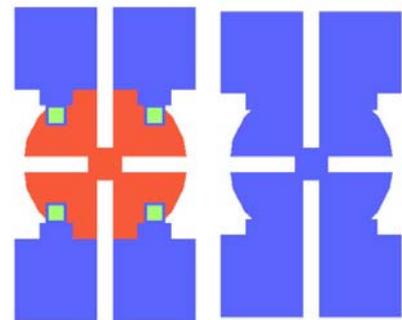


Fig. 4.3. Van der Pauw structures (resistivity, doping type, mobility)

1. Substrate: Si, p-type, (100)



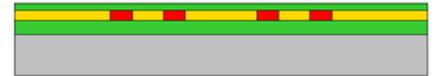
2. Deposition of SiO_2 (0.4 μm), PolySi (0.3 μm) and sacrificial oxide (50 nm)



3. Making resistive rings in PolySi – implantation through the oxide (10^{19} , 70 KeV, P) (mask1, Lay20)



4. Deposition of SiO_2 (0.2 μm)



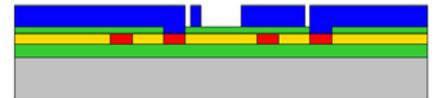
5. Opening vias for the rings (mask2, Lay34)



6. Deposition of metal (Al, 2 μm) (0.5 μm – 4 μm)



7. Selective Me etching – defining Me ring and pads, separating the rings (mask3, Lay35)



8. Backside etching – forming the membrane and bass structure (mask4, Lay10)

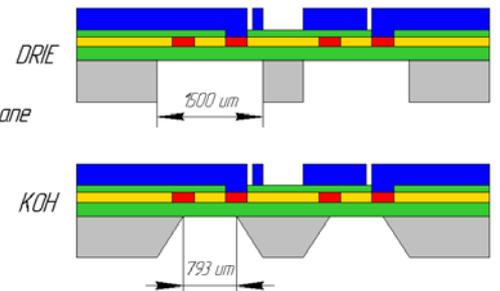


Fig 4.1. Process flow of the micropump top substrate

In order to control the process parameters as well as the device operating conditions different sensors and control structures are used. Whenever possible, control structures are used both for Al layer (blue) and polysilicon (red). *TLM* (Transmission line measurement) (Fig. 4.2) and *Van der Pauw* (Fig. 4.3) structures are used for measuring the resistivity of material. In addition, *Van der Pauw* structures can also be used for determining the doping type and measuring the mobility of majority carriers [14]. It is also possible to control the quality of photolithography steps, DRIE, CVD and oxide quality with other structures and techniques.

Thermal sensors are used for temperature control. The active sensor area is polysilicon layer which changes its resistivity being heated. The sensors are placed in the critical areas of the membrane – close to the diffused rings – and allow monitoring the membrane temperature during the actuation. The thermal sensors placed on the substrate allow monitoring its temperature, heat distribution as well as estimating the thermal gradients.

5. Characterization of the micropump with bimetallic actuation

The top substrate of the micropump contains the actuation driver – the bimetallic membrane and the central boss structures – which will define the overall micropump performance (flow rate, power consumption and the packaging size). The analysis of the FEA results showed that there are several critical design parameters affecting the device performance significantly: width of Al ring, relative position of heated area and free membrane size.

The comparative analysis of FEA and experimental results requires development of the micropump actuation unit (the bimetallic membrane structure) characterization procedure with the optical profilometric equipment (membrane deflection and central boss displacement versus applied voltage to the diffused rings) as well as electrical characterization equipment (power consumption, membrane temperature and thermal distribution).

For the experimental investigation of the micropump actuation unit (membrane deflection and central boss displacement) the optical profiler PHOTOMAP 3D (FOGALE nanotech, France) is used. PHOTOMAP 3D is a high-performance cost-effective 3D surface profiler for fast and accurate measurements. It works in sub-nanometer vertical resolution (down to 0.1 nm) at all magnifications, has large working area, automated step height and surface flattening function, sub-nanometric roughness measurements and is a very compact device. Using several measurement techniques (non-contact, three-dimensional scanning, white light and phase-shifting interferometry), different light sources (white or monochromatic with automatic switching and intensity adjustment) this device is very well suited for performing MEMS structural and vibrations analysis.



Fig. 5.1. PHOTOMAP 3D

Fig. 5.2 and 5.3 illustrate several examples of PHOTOMAP 3D application in MEMS structural and vibrations analysis.

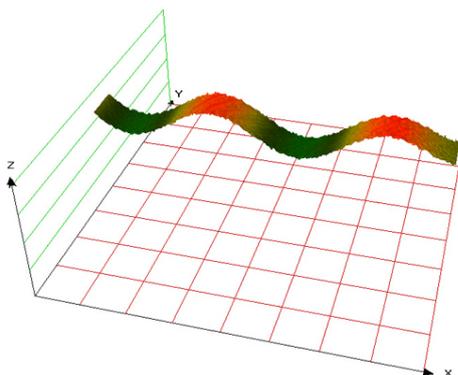


Fig. 5.2. Cantilever vibration on the 4th resonant frequency (~500-600 KHz)

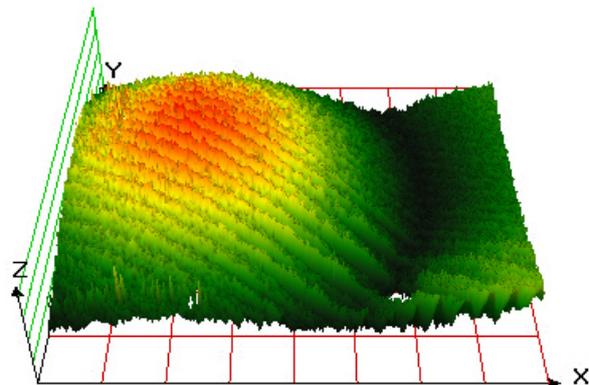


Fig. 5.3. Membrane deflection

The resonant frequency reported in Fig. 5.2 is more than 500 *KHz*. Therefore, even the maximum membrane actuation frequency of several *KHz* can be easily implemented and characterized.

Several process control structures and sensors were placed on the wafer in order to study electrical parameters and monitor device operating conditions (ref. p. 3.2.3). In order to apply potential difference to the diffused rings (with different pulse shape and duration) and measure electrical parameters (current, capacitance, doping type, charge density etc.) Agilent 4156C (Precision Semiconductor Parameter Analyzer) equipment is used [16].



Fig. 5.4. Agilent 4156C

The Agilent 4156C Precision Semiconductor Parameter Analyzer is a highly accurate laboratory bench top solution for advanced device characterization. The superior low-current and low-voltage resolution and built-in quasi-static CV measurement capability of the 4156C provide a versatile solution for electrical characterization.

References

- [1] “FlowMap – Microfluidics Roadmap for the Life Sciences” by IMTEK, CBC, HSG-IMIT, and Yole Développement. Editors: Jens Ducrée and Roland Zengerle. www.microfluidics-roadmap.com
- [2] Nan-Chyuan Tsai, Chung-Yang Sue. Review of MEMS-based drug delivery and dosing systems. *Sensors and Actuators A* 134 (2007) 555–564.
- [3] D. J. Laser and J. G. Santiago. A review of micropumps. *J. Micromech. Microeng.* 14 (2004) R35–R64.
- [4] A. K. Dash G. C. Cudworth. Therapeutic applications of implantable drug delivery systems. *J. Pharmacol. Toxicol. Methods* 40 1–12, 1998.
- [5] Hal Jerman. Electrically-activated, normally-closed diaphragm valves. *J. Micromech. Microeng.* 4 (1994) 210-216.
- [6] Hal Jerman. Electrically-Activated, Micromachined Diaphragm Valves. Proceedings for IEEE Conference On Solid State Sensors and Actuators, Jun. 4-7, 1990.
- [7] C. Zhan, T. Lo, L. Liu, P. Tsien, A silicon membrane micropump with integrated bimetallic actuator. *Chin. J. Electron.* 5 (1996) 29–35.
- [8] Y. Yang, Z. Zhou, X. Ye, X. Jiang. Bimetallic thermally actuated micropump. *ASME 1996, Dynamic Systems and Control Division DSC*, v59, MEMS 351–354.
- [9] H. T. G. van Lintel, F. C. M. van de Poland S. Bouwstra. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon. *Sensors Actuators* 15 153–67, 1988.
- [10] D.J. Griffiths. “Introduction to Electrodynamics”, Prentice-Hall International (1999), p.213.
F.M. White. “Fluid Dynamics”, New York McGraw-Hill (1986), p. 361.
- [11] ANSYS web-site. <http://www.ansys.com>
- [12] ANSYS 11.0 Workbench Tutorial. <http://www.ansys.com>
- [13] S.D. Senturia. “Microsystem design”. Kluwer academic publishers (2002), pp. 173-178.
- [14] L.J. Van der Pauw. “A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape”. *Philips Research Reports* 13: 1–9, 1958.
- [15] FOGALE nanotech. “PHOTOMAP 3D – interferometric sensor for fast 3D measurements”. <http://www.fogale.fr>
- [16] Agilent Technologies. “Agilent 4156C – Precision Semiconductor Parameter Analyzer”. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-0932EN.pdf>

TFI - ТЕХНОЛОГИЯ В ЛИТОГРАФИИ

Саттаров М.Д.

Научный руководитель: Власов А.И.

Научный консультант: ученый секретарь ФТИАН, Кальнов В.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра Иу4, Москва, Россия

TFI-TECHNOLOGY IN LITHOGRAPHY

Sattarov M.D.

Research supervisor: Vlasov A.I.

Research consultant: C.t.s., academic secretary or IPTRAS, Kalnov V.A.

BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

Технология формирования изображения в тонком слое резиста является перспективным направлением развития современной литографии. В данной работе рассказывается о различных реализациях данной технологии для фоторезистов, их достоинствах и недостатках. Также приводится концепция технологии для электронной литографии.

Abstract

Thin film imaging technology is promising area of the modern lithography. Several ways of implementing this method for photoresist, their advantages and disadvantages are described in this work. Conception for electron beam lithography is presented.

Введение

Фотолитография занимает центральное место в современной технологии изготовления изделий микроэлектроники. Уменьшение размеров и рост плотности компоновки интегральных схем, увеличение их быстродействия и снижение себестоимости - все это зависит от процесса фотолитографии как одного из самых распространенных способов получения рисунка на полупроводниковых подложках в массовом производстве.

Технология формирования изображения в тонком слое резиста (Thin film imaging, TFI) позволяет улучшить параметры традиционного литографического процесса. Существует несколько реализаций TFI-технологии в фотолитографии [1]: использование многослойных резистов, формирование изображения в тонком верхнем слое за счет силилирования из газовой или паровой фазы, селективная привитая полимеризация. Формирование изображения в тонком верхнем слое благодаря силилированию также возможно для резистов, облучаемых электронным пучком.

1. Многослойные фоторезисты

Современные фоторезисты должны обладать целым набором противоречивых свойств, например таких, как высокая чувствительность и высокая стойкость к плазмохимическому травлению. Подобные свойства трудно совместить в однослойном фоторезисте. Возможным решением проблемы является использование многослойных структур, в которых несовместимые свойства обеспечиваются разными слоями.

Двухслойные фоторезисты формируют [2] из толстого (1.0 -1.2 мкм) нижнего слоя, имеющего среднюю величину плазмостойкости, и тонкого (0.06 -0.1 мкм) верхнего слоя, обладающего высокой плазмостойкостью. Малая толщина верхнего слоя позволяет формировать в нем плазмостойкие конформные резистные маски, применяемые для дальнейшего переноса изображения в толстый нижний слой посредством реактивно-ионного травления. В качестве нижнего слоя применяют полистирол и его сополимеры, позитивный резист на основе фенолформальдегидной смолы (AZ 1450j), полиимид и т.п. Верхним слоем чаще всего является кремнийсодержащий полимер [2-4]. На рис. 1 представлен процесс фотолитографии с использованием двухслойного фоторезиста.

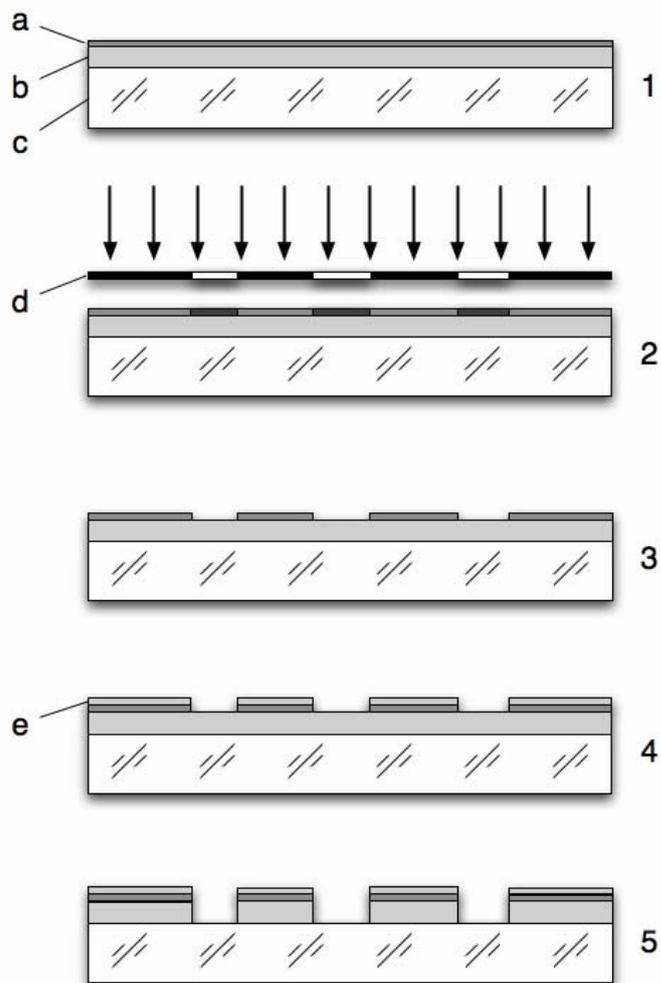


Рис. 1. Схема TFI-процесса с использованием фоторезиста (полиимид или стирол) двухслойного фоторезиста (а -ангидрид-методом реактивно-ионного содержащий фоторезист, б-стирол или травления. Кремнийсодержащий слой, полиимид, с -Si, d -фотошаблон,е-полученный в процессе кремнийсодержащий слой) силилирования, играет роль маски.

1. Нанесение двухслойного фоторезиста на кремниевую подложку.
2. Экспонирование верхнего слоя глубоким УФ светом через фотошаблон.
3. Проявление верхнего слоя. В результате полностью растворяются проэкспонированные участки ангидрид-содержащего фоторезиста (схема приведена для позитивного резиста).
4. Силилирование агентом, находящимся в жидкой фазе. Кремний вводится в состав оставшегося резиста при помощи аминосодержащих силосанов, которые химически реагируют с ангидридными остатками с образованием тонкого кремнийсодержащего слоя на поверхности элементов фоторезистной маски.
5. Удаление нижнего толстого слоя

Недостатком этого процесса является технологическая сложность. Преимуществами - хорошая стойкость фоторезистных масок к травлению, высокая светочувствительность, высокое аспектное отношение для формируемых масок, большая глубина фокуса при экспонировании фоторезиста.

2. Формирование изображения в тонком верхнем слое однослойного фоторезиста

Экспонированный УФ светом фоторезист на основе нафтохинондиазида и новолачной смолы силилируется при повышенной температуре агентом в газовой фазе, таким как гексаметилдисилазан (ГМДС). В ходе процесса кремний-содержащие группы внедряются на глубину до 60 нм. Необходимость температуры выше 120 °С объясняется высокой селективностью проникновения ГМДС. Далее с помощью плазмохимического травления в смеси CF_4/O_2 с поверхности удаляется тонкий (до 10%) силилированный слой. После получения маски в тонком верхнем слое фоторезиста применяется реактивно-ионное травление для удаления толстого слоя. Также возможно применение негативного фоторезиста. В отличие от позитивного резиста, где диффузия ГМДС происходит за счет химического взаимодействия с инденкарбоновой кислотой и гидроксильными группами полимерной основы, в процессе экспонирования образуются межмолекулярные сшивки, препятствующие диффузии. На рис.2 представлен TFI-процесс для позитивного фоторезиста.

1. Нанесение однослойного резиста на подложку из кремния.
2. Экспонирование УФ светом через фотошаблон. Под действием излучения нафтохинондиазид разлагается, что делает возможным диффузию ГМДС.
3. Нагрев до 120 оС и введение силилирующего агента (ГМДС). На данном этапе происходит внедрение кремнийсодержащих групп в приповерхностную область фоторезиста на глубину до 60 нм и проходит реакция силилирования.
4. Применяется кратковременное плазмохимическое травления для удаления тонкого силилированного слоя с поверхности (толщина слоя может достигать 5-6 нм).
5. Получение толстой резистивной маски.

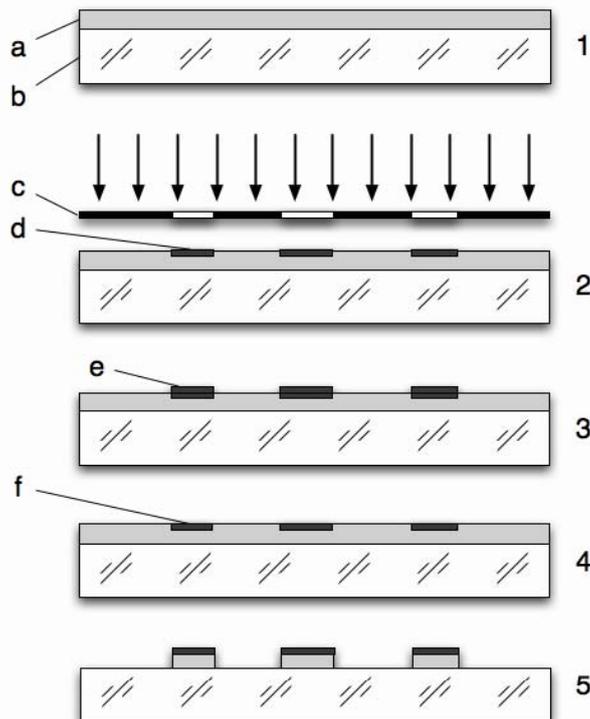


Рис. 2. Схема TFI-процесса с использованием маски путем анизотропного однослойного фоторезиста (a -фоторезист на реактивно-ионного травления в основе нафтохинондиазида, b -Si, c -фотошаблон, d кислороде. Силилированные -экспонированный слой, e - силилированный слой, области выполняют роль маски. f -резистивная маска в тонком слое фоторезиста)

Описанный метод устраняет противоречие между высоким разрешением элементов резистной маски и высокой плазмотойкостью резиста. Из недостатков можно отметить появление механических напряжений при высокой концентрации кремнийсодержащего соединения и низкую светочувствительность материала резиста. Эти недостатки можно устранить применяя метод привитой полимеризации.

3. Метод привитой полимеризации

Одна из вариаций этого метода, описанная в [5] заключается в следующем. На полупроводниковую подложку наносится слой из легко окисляемого полимерного материала (например, полипропилена). Далее через фотошаблон верхний слой подвергается фотоокислительному старению с образованием на поверхности большого количества гидроперекисных групп. Затем фоторезист нагревается в парах кремнийорганических мономеров, способных к аддитивной радикальной полимеризации. Следующим этапом является травление всего слоя резиста в кислородной плазме. Общая схема процесса представлена на рис. 3.

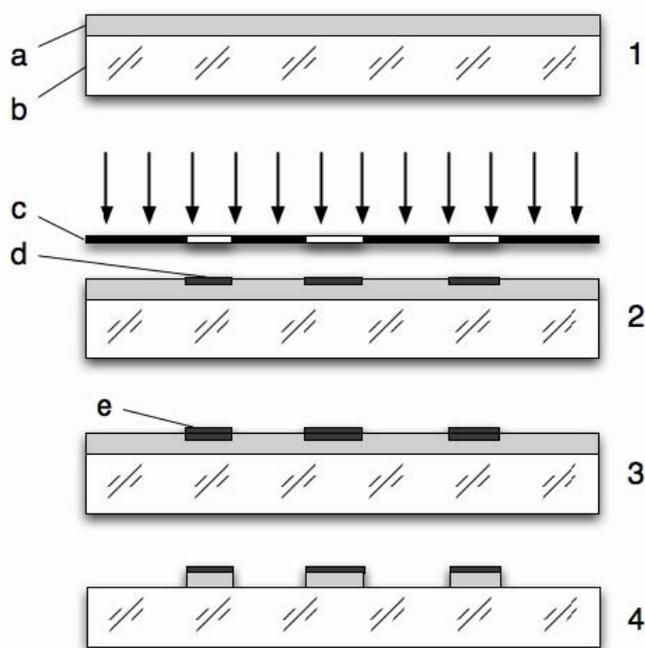


Рис. 3. Схема процесса на основе привитой незащищенной маской полимеризации (a - полипропилен, b - Si, c - фотошаблон, d - экспонированные участки, e - резистная маска).

1. Нанесение полипропилена на полупроводниковую подложку.
2. Фотоокислительное старение с образованием гидроперекисных групп. Резист обладает негативными свойствами - неэкспонированные области впоследствии будут удалены.
3. Нагрев в парах кремнийорганических мономеров приводит к образованию стойкой к травлению в кислородной плазме маски.
4. Реактивно-ионным травлением в кислороде удаляется полимер,

Данный метод позволяет получать резистную маску с большим аспектным отношением. Недостатком можно назвать малую эффективность процесса привитой полимеризации на границе раздела газ-твердое тело. Альтернативой является применение жидкого или твердого мономера (например октавинилсилсесквиоксиана).

4. Применение TFI-технологии для электронной литографии

Полученные для процесса фотолитографии наработки можно применить к методу электронной литографии. Такие недостатки, как эффекты близости, не позволяющие достигнуть разрешения, сопоставимого с диаметром электронного пучка, можно преодолеть, используя технологию силилирования. Механизм образования свободных радикалов в различных резистах при облучении электронным пучком требует дополнительных исследований. Но благодаря тому, что изменениям подвергается только верхний слой, отсутствуют вторичные и отраженные электроны, а достаточная доза излучения и энергия электронов могут оказаться ниже стандартных значений для традиционной электронной литографии.

Выводы

Рассмотренные процессы преодолевают недостатки традиционной фотолитографии и совмещают конфликтующие свойства резистов, высокое разрешение, плазмостойкость. Использование технологии TFI для электронной литографии в перспективе может сделать процесс быстрее и повысить разрешение, что расширит область применения и откроет новые перспективы в производстве изделий микроэлектроники и микроэлектромеханики.

Литература

1. Зеленцов С.В., Зеленцова Н.В. Современная фотолитография. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем» // Нижний Новгород, 2006, 56 с.
2. E. Reichmanis, C.W. Wilkins Jr., Bilevel resist, Пат. США No 4521274, кл. 156/643, B44C 1/22, C03C 15/00. Оpubл. 4.06.85. Заявл. 24.05.84. [AT&T Bell Lab].
3. E. Reichmanis, G. Smolinsky, Bilevel resist, Пат. США No 4481049, кл. 156/643, B44C 1/22, C03C 15/00. Оpubл. 6.11.84. Заявл. 2.03.84. [AT&T Bell Lab].
4. Y. Saotome, H. Gokan, K. Saigo, M. Suzuki, Y. Ohnishi, A silicon containing positive photoresist (SIPP) for a bilayer resist system // J. Electrochem. Soc. 1985, V.132, No.4, P.909.
5. R.G. Brault, Graft polymerized SiO₂ lithographic masks, Междунар. заявка No 85/02030, кл. G03F 7/26. Оpubл. 9.05.85. Заявл. 16.02.84, [Hughes Aircraft Co.]. Приор. США от 2.11.83.

ТЕХНОЛОГИИ МОБИЛЬНОГО ВЕЩАНИЯ

Занникова Б.Н.

Научный руководитель: Власов А.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра Иу4, Москва, Россия

THE ANNOUNCEMENT STANDARD DVB-H

Zannikova B.N.

Research supervisor: Vlasov A.I.

Research consultant: C.t.s., academic secretary or IPTRAS, Kalnov V.A.

BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация:

На сегодняшний день существует 8 форматов вещания, ориентированных на прием мобильными терминалами. Во-первых, это форматы DVB-T и DVB-H. Во-вторых, MediaFLO, закрытая система разработки компании Qualcomm. В третьих, группа форматов, базирующихся на системе радиовещания DAB. К ней относятся Movio System (бывшая Live Time), разработанная British Telecom, корейские форматы T-DMB и S-DMB, а также европейский профиль формата T-DMB. И, наконец, существует японский стандарт эфирного вещания ISDB-T, по своей гибкости пригодный для любых видов эфирного вещания на любые терминалы.

Summary

For today exists 8 formats of an announcement focused on reception by mobile terminals. First, it is formats DVB-T and DVB-H. Secondly, MediaFLO, the closed system of working out of company Qualcomm. In the third, group of the formats which are based on system of broadcasting DAB. It concern Movio System (were Live Time), developed British Telecom, the Korean formats T-DMB and S-DMB, and also the European cross-section of format T-DMB. And, at last, there is a Japanese standard of on-air broadcasting ISDB-T, on the flexibility suitable for on-air broadcasting any kinds on any terminals.

В работе проанализирован стандарт вещания DVB-H, так как эта система является очень перспективной и актуальной. Система DVB-H разработана на базе DVB-T, что обеспечивает их частичную совместимость. Она заключается в том, что трансляции DVB-H за исключением одного режима модуляции могут приниматься приемниками DVB-T, и в одном мультиплексированном потоке возможно совмещение трансляций DVB-H и DVB-T. В то же время в DVB-H введен ряд добавлений на физическом уровне и заметно изменен канальный уровень.

DVB-T

Рассмотрим только его основные особенности. Главным отличием DVB-T от кабельной и спутниковой версий стандарта DVB является использование COFDM (Coded Orthogonal Division Multiplexing) модуляции. При таком способе модуляции применяется частотное мультиплексирование ортогональных несущих в сочетании с помехоустойчивым кодированием. Использование большого числа несущих позволяет удлинить время передачи каждого символа и выделить период защитного интервала для отстройки от помех многолучевого приема. В зависимости от количества ортогональных несущих в стандарте выделяется два режима 8К (8192 несущих) и 2К (2048 несущих). DVB-T предусматривает возможность использования трех видов модуляции — QPSK, 16 QAM и 64 QAM, четырех вариантов относительной длительности защитного интервала, а также пяти вариантов относительной скорости при наложении сверточного помехозащитного кодирования. Сочетания этих параметров позволяют гибко выбирать режим в зависимости от радиуса охвата соты, ландшафта и РЧ обстановки. Наличие защитного интервала дает возможность использовать DVB-T и для передачи на мобильные терминалы, в том числе движущиеся с большой скоростью. Но для передачи ТВ на мобильные телефоны и другие миниатюрные приемники эта система оказалась малоприменимой. DVB-T оптимизирован для передачи стандартных ТВ потоков, в то время как карманные приемники имеют небольшие экраны,

позволяющие воспроизвести картинку формата не более чем 1/4 CIF или 1/8 CIF. Кроме того, эти терминалы питаются от слабых аккумуляторных батарей, которые желательно эксплуатировать в максимально экономичном режиме. И, наконец, они имеют слабые приемные антенны и часто должны принимать сигнал в неблагоприятных условиях, в то время как размещение стационарных эфирных антенн может быть оптимизировано. С учетом всех этих обстоятельств для эфирной передачи на карманные мобильные терминалы была разработана специальная система DVB-H (Digital Video Broadcasting-Handheld), по возможности совместимая с DVB-T, но одновременно учитывающая перечисленные особенности приема.

Физический уровень

На физическом уровне система DVB-H максимально приближена к DVB-T. Поэтому укажем только дополнительные возможности появившиеся в DVB-H.

Во-первых, к режимам модуляции 2К и 8К был добавлен еще один — 4К. Это дало дополнительную степень свободы в плане обмена максимальной скорости передвижения приемника на радиус охвата одной соты. Чем меньшее количество ортогональных несущих используется при COFDM модуляции, тем больший частотный интервал образуется между соседними несущими, и, соответственно, тем выше скорость движения терминала, при котором прием срывается из-за Доплеровского смещения частот.

С другой стороны, чем меньше несущих, тем короче период, выделенный для передачи каждого COFDM символа и, соответственно, короче защитный интервал. А сокращение защитного интервала снижает возможности отстройки от многолучевого приема, то есть уменьшает допустимый радиус соты. Для сетей DVB-T, рассчитанных в основном на стационарный прием, значительно более важным фактором является зона охвата. Что же касается сетей DVB-H, то там большую значимость приобретает возможность приема на скорости, а зона охвата в сильной мере ограничивается уровнем сигнала на входе тюнера.

Для возможности выбора компромиссного варианта был добавлен режим модуляции 4К, заполняющий нишу между 2К и 8К. Трансляции в режиме 4К могут приниматься только приемниками DVB-H.

Вторым дополнением на физическом уровне стала возможность более глубокого перемежения данных в режимах 4К и 2К. Канальное кодирование DVB-T предусматривает перемежение данных внутри одного COFDM символа. Оно в основном предназначено для компенсации селективных замираний несущих при многолучевом приеме. В то же время мобильные терминалы с большей вероятностью могут оказаться в зоне действия широкополосных импульсных помех. И, как уже отмечалось, при приеме на скорости появляется доплеровское смещение частотного спектра, также приводящее к искажениям сигнала. Поэтому в стандартах мобильного вещания на базе COFDM (DAB, ISDB -T) для борьбы с последствиями длительных помех в цикл канального кодирования введено перемежение длинных серий данных, охватывающее десятки, а то и сотни OFDM символов. Чем длиннее последовательность данных, участвующих в перемежении, тем эффективнее оказывается борьба с последствиями затуханий. Но для DVB-H такой путь невозможен. Во-первых, восстановление длинных последовательностей потребовало бы непрерывного приема, в то время как для целей энергосбережения в DVB-H реализован описанный ниже импульсный режим передачи. Во-вторых, для его осуществления необходимы большие объемы памяти, удорожающие приемник. И, наконец, это противоречит требованию совместимости с DVB-T. Поэтому было выбрано компромиссное решение. Для режима модуляции 8К, наиболее актуального для DVB-T, в DVB-H сохранено перемежение битов в рамках одного символа. А в режимах 4К и 2К, где каждый COFDM символ переносит меньшее количество информации, в качестве опции введена возможность временного перемежения, допускаемого объемами выделенной для этих целей памяти. Для 4К перемежение выполняется с глубиной в 2 COFDM символа, а для режима 2К — с глубиной в

4 COFDM символа. При активизации этой опции совместная передача трансляций DVB-H и DVB-T невозможна. Остальные механизмы внешнего и внутреннего канального кодирования, используемые в DVB-T, без изменения перенесены в DVB-H. Третье дополнение касается транспортной сигнализации (TPS — Transmission Parameter Signalling)², в которую добавлены два бита, индицирующие наличие в потоке услуг, передаваемых в формате DVB-H, а также наличие дополнительной кодозащиты, реализуемой на базе IP дейтаграмм.

Четвертым дополнением стала возможность использования полосы 5 МГц при условии, что эта она выделяется не в вещательном диапазоне. Она добавлена к полосам 6, 7 и 8 МГц, допускаемых к использованию в DVB-T. Ее планируется применять при развертывании сетей DVB-H в США в L-диапазоне (1,670-1,675 ГГц).

Канальный уровень

Одно из основных отличий DVB-H от DVB-T заключается в том, что в новой системе вся информация должна передаваться в форме IP дейтаграмм, инкапсулируемых в транспортные пакеты MPEG-2 TS с использованием метода многопротокольной инкапсуляции (MPE Multi Protocol Encapsulation). Это один из четырех методов инкапсуляции пакетов данных в транспортные пакеты MPEG-2 TS, определенных DVB, единственно пригодный для передачи потоковых услуг.

IP пакеты инкапсулируются в MPE секции, а те, в свою очередь, — в транспортные пакеты MPEG-2 TS, переносящие элементарные потоки. Каждый IP пакет занимает одну MPE секцию, длина которой практически не коррелирована с емкостью пакетов MPEG2-TS. В одном пакете может передаваться множество MPE секций, и, наоборот, одна секция может занимать несколько транспортных пакетов.

Данные, относящиеся к одной услуге, инкапсулируются в транспортные пакеты MPEG-2 с постоянным идентификационным номером PID. Использование такого стека обусловлено тремя причинами.

Во-первых, в системах DVB-H предполагается передавать ТВ потоки, компрессированные не в MPEG-2, а в более эффективных форматах, в первую очередь, в H.264 /AVC3, для которых процесс инкапсуляции компрессированных аудио и видео в транспортные пакеты MPEG-2 TS жестко не специфицирован и обычно реализуется как раз через IP/MPE инкапсуляцию. Более того, DVB-H потенциально рассматривается как составная часть гибридной системы доставки мультимедийных услуг (IPDC).

В связи с этим понятие элементарного потока в DVB-H определяется иначе, чем в стандарте MPEG-2. В DVB-H это просто поток, передаваемый в пакетах с одним PID-ом. Снята жесткая корреляция элементарного потока с данными определенного типа. В одном элементарном потоке могут передаваться все данные, относящиеся к определенной ТВ программе или даже к нескольким программам. В последнем случае потоки разных ТВ программ будут передаваться в дейтаграммах с разным мультикастовым IP адресом и заключаться в MPE секции с разными MAC адресами. Аналогичным образом могут передаваться и не телевизионные услуги.

MPE-FEC

В стандартах мобильного телевидения стараются предусмотреть помехозащитное кодирование длинных последовательностей. В DVB-H такое кодирование накладывается на всю последовательность IP дейтаграмм, передаваемых в одном слоте, то есть на максимально возможный объем данных. Это кодирование введено в качестве опции и выполняется кодом Рида-Соломона.

IP дейтаграммы помещаются в таблицу Application Data Table, в которой последовательно заполняются столбцы начиная с левого верхнего угла. Высота столбцов может составлять от 1 до 1024 байт в зависимости длины дейтограмм, а их количество всегда

одинаково — 191. Если в таблице остается пустое место, то оно заполняется холостыми байтами. Затем каждый ряд таблицы кодируется, в результате чего формируется 64 контрольных байта. Затем обе таблицы инкапсулируются в пакеты MPEG-2 TS и транслируются в одном слоте. Вначале — информационная часть, а затем — контрольная. Причем байты контрольной таблицы при инкапсуляции считываются не рядами, как формируются, а колонками. Так создается виртуальное перемежение контрольных байт, требующее минимальных ресурсов приемника для восстановления их последовательности. Этот метод помехозащитного кодирования получил название MPE-FEC.

Таким образом, особенности канального уровня формата DVB-H не препятствуют приему трансляций ресиверами DVB-T. Они просто будут принимать их неоптимальным образом. различными будут и условия приема трансляций DVB-T и DVB-H. Экспериментальные измерения показали, что для достижения передатчиками DVB-H и DVB-T одинаковой зоны охвата мощность первого должна быть на 20 дБ больше. В то же время требуемый для устойчивого приема уровень несущая/шум в DVB-H в среднем на 30% ниже, а максимально возможная скорость движения приемника — на 40% выше.

IPDC

В заключение хотелось бы отметить, что транспортная система DVB-H рассматривается в DVB как потенциальная часть более общей системы передачи мультисервисных услуг, в которой в качестве основного транспортного протокола выступает IP, а в качестве приемников — карманные терминалы с небольшой мощностью аккумуляторов и ограниченными компьютерными возможностями. Это платформа для создания гибридных сетей, в которых однонаправленные вещательные каналы передачи будет предоставляться системой DVB-H, а двунаправленные каналы — системами сотовой телефонии. Она получила название IPDC (IP DataCast).

Поэтому система DVB-H должна подчиняться ряду общих спецификаций, касающихся организации систем IPDC. В частности, в рамках платформы специфицируется необходимая сигнализация в потоках DVB-H, передаваемая в таблицах SI/PSI, порядок формирования электронного гида ESG (Electronic Service Guide) для мультисервисных услуг, стеки протоколов передачи, используемые на верхних уровнях модели ISO/OSI, форматы кодирования видео и аудио, иерархическая система защиты услуг от несанкционированного доступа, включающая контроль за воспроизведением, и даже схемы предоставления платных услуг. Все эти механизмы в рамках платформы должны быть едиными и поддерживаться комплексами для создания и администрирования приложений.

Литература

1. Index of MPEG resources on the Internet // <http://www.mpeg.org/>
2. SECAM, PAL, NTSC... // Stereo&Video Июнь 2000
http://www.stereo.ru/whatiswhat.php?article_id=168
3. Корнев Д. Обзоры железа, внутренние TV тюнеры, AVerMedia AVerTV PVR // <http://www.pctuner.ru/page-al-averpvr.html>
4. DVB Project // <http://www.dvb.org/>
5. Локшин Б.А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю. - М.: Сайрус системс, 2001
6. MPEG 2 Layer 2, VideoCD (VCD) ISO format // http://programming.finta.ru/download/dl_fmt.php?sec=11&id=243&file=mpeg2-2.zip
7. Афанасьев А.В. Аппаратно-программный комплекс для предоставления мультимедиа контента в IP сетях // Материалы 7-ой Молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2005» 20-21 апреля 2005 г., М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана – С.123-129

МЕТОД ДИКТОРОНЕЗАВИСИМОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОВ

Алфимцев А. Н.

Научные руководители: Недашковский В.В., Семенцов С.Г.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

SPEAKER INDEPENDENT WORD RECOGNITION METHOD

Alfimtsev A.N.

Research consultant: Nedashkovsky V.V. Sementsov S.G.
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

Создание человеко-машинных интерфейсов, основанных на распознавании голосовых команд, является одним из перспективных направлений развития современных интеллектуальных систем. Предлагаемый метод дикторонезависимого распознавания слов является комбинацией шагов захвата, отслеживания и распознавания аудиообраза в реальном времени, не требующий дополнительного обучения и специальной аппаратной поддержки.

Abstract

Creating the human-machine interfaces based on the recognition of voice commands is one of the promising directions of modern intelligent systems development. The proposed method of speaker independent word recognition is a combination of steps for capture, tracking and recognition audio pattern in the real time, without requiring additional training and special hardware support.

Разработка и исследование человеко-машинных интерфейсов, основанных на распознавании образов и визуальном представлении мультимедийной информации, становится передним краем в развитии современного математического и программного обеспечения [1, 2, 5]. Перед разработчиками подобных интерфейсов ставится задача использования естественных для человека способов общения с компьютерами с помощью жестов, голоса, мимики и других модальностей [3, 11]. Голосовые команды являются особенно перспективными для построения интерфейсов управления программным и аппаратным обеспечением компьютеров, роботов, позволяют расширить возможности интерфейса.

Широкую популярность приобрели такие программы распознавания слов, как IBM ViaVoice [11], MS Speech API [12], Dragon Dictate [13], Julius [14] и Sphinx [14], работающие в операционных системах Windows и Linux. К недостатку этих и аналогичных используемых программ можно отнести: отсутствие автоматического выделения слов в аудиопотоке, применение специальных дорогостоящих аппаратных средств для предобработки аудиопотока, использование в качестве классификатора Скрытых Марковских моделей (СММ) или Нейронных сетей (НС). Оценки вычислительной сложности распознавания с помощью этих моделей зависят от квадрата числа состояний (СММ) или нейронов (НС), используемых для распознавания, умноженных на число символов наблюдаемой последовательности. Вследствие этого, с ростом этих величин, практическое использование для распознавания слов в реальном времени указанных моделей, из-за высоких затрат процессорного времени и памяти компьютера, не всегда является возможным. Также, не всегда есть возможность обучения этих математических моделей в не лабораторных условиях. Поэтому возникает необходимость развития существующих подходов с целью создания вычислительно-эффективного метода дикторонезависимого распознавания слов в реальном времени не требующего специальной аппаратной поддержки и дополнительного обучения.

Разработанный метод состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Захват и отслеживание слова в аудиопотоке. На данном шаге происходит выделение слова из входящего сигнала. Для того чтобы повысить вероятность правильного выделения слова, в начале происходит удаление из сигнала шума. Для решения этой задачи был использован алгоритм спектрального вычитания шума, широко применяющийся для снижения аддитивного стационарного и квазистационарного окрашенного шума в мобильных устройствах связи и других устройствах [7].

Данный шаг метода на программном уровне непосредственно работает с буферами приходящими от звуковой карты (модель SoundMAX Integrated Digital HD Audio), к которой присоединен микрофон (Dialog Mic). Буферы (при частоте дискретизации равной 16 кГц, 16 бит на отсчет, моно) имеют размер 0.013 с. Каждый буфер при условии, что он распознан, как речь, а так же, если анализ предыдущих буферов показал, что слово началось, записывается во временное хранилище.

Для того чтобы принять решение о принадлежности каждого текущего буфера к шуму или к речи используются следующие параметры: средняя энергия, количество пересечений с нулем, минимальное и максимальное значение. Минимальное и максимальное значение сигнала является менее весомым параметром, по сравнению с двумя первыми параметрами, но при совместном использовании всех параметров получается надежный алгоритм выделения слова в аудиопотоке для закрытых помещений.

На данном шаге не применяется анализ спектра сигнала, это позволяет достичь более высокой скорости работы и уменьшить требования к вычислительным ресурсам, но точность выделения слова в сильно зашумленных помещениях снижается. Таким образом, как только достигнут конец слова, оно оказывается полностью записанным в памяти. Далее проверяется длина слова на соответствие максимальному (120 буферов) и минимальному (35 буферов) порогам. Если проверка пройдена успешно, осуществляется переход к следующему шагу, иначе временное хранилище очищается и первый шаг повторяется.

Шаг 2. Выделение характерных признаков. Для выделения характерных признаков в слове на втором шаге метода, используется алгоритм вычисления кепстральных коэффициентов. Данный алгоритм наилучшим образом, из имеющихся сегодня алгоритмов, обеспечивают доступ к характерным свойствам сигнала [9].

Шаг 2.1. На первом шаге данного алгоритма каждый речевой фрагмент разделяется на перекрывающиеся фреймы с длиной 10 мс (256 отсчетов). Такой фрейм может быть рассмотрен как результат умножения входных отсчетов на прямоугольное окно, которое имеет длину равную длине фрейма. Но при этом, в начале и конце каждого фрейма из-за внезапных изменений с нуля на сигнал и с сигнала на ноль, появляются высокие частоты. Для уменьшения этого эффекта к каждому фрейму применяется 256-точечное окно Хэмминга, задающиеся следующим образом [5].

Шаг 2.2. На втором шаге алгоритма происходит преобразования сигнала из временной области в частотную область с помощью 256-точечного дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Шаг 2.3. На третьем шаге алгоритма вычисляется амплитуда каждой гармоники.

Шаг 2.4. В спектре содержится множество флуктуаций и обычно в системах распознавания речи они не участвуют. В большинстве случаев используется только огибающая спектра. Другая причина для сглаживания спектра – это снижение размера спектральных векторов. Для реализации такого сглаживания и получения огибающей мы умножаем спектр на заранее подготовленную группу фильтров. Группа фильтров представляет собой серию полосовых фильтров, которые по очереди перемножаются со спектром, чтобы получить среднее значение в данной частотной полосе. Группа фильтров задается формой фильтров и их расположением на частотной оси. Были использованы

треугольные фильтры, равномерно распределенные по Мел шкале, поскольку она лучше всего соответствует шкале восприятия звуков человеческим ухом.

В методе были использованы параметры фильтров НТК MFCC FB-24 из Open Source НТК Toolkit [15]. Данная группа содержит 24 треугольных фильтра распределенных от 0 до 8 кГц.

Шаг 2.5. На пятом шаге, сразу после применения группы фильтров, начинается вычисление кепстральных коэффициентов. Затем, могут быть вычислены и дельта кепстральные коэффициенты [6], которые несут информацию о динамике сигнала. Однако эта информация в рассматриваемом методе не учитывается, так как в ходе экспериментов было установлено, что набор производных от кепстральных коэффициентов содержит ярко выраженную дикторозависимую информацию.

Шаг 3. Распознавание слова. В общем случае распознавание - это процесс установления сходства между входным и сохраненным образом. Сохраненный образ также называется шаблоном или эталоном, который получается на этапе обучения алгоритма распознавания (программной системы). Распознавание слова осуществляется с использованием алгоритма динамического искажения времени (ДИВ, Dynamic Time Wrapping[6]). Предпочтение было отдано данному алгоритму, так как, во-первых он позволяет распознавать образы, имеющие разные размеры (поэтому например, напрямую Евклидову, Махаланобиса или другую норму использовать не удастся), во-вторых имеет невысокую вычислительную сложность, равную произведению длины входной последовательности на длину сохраненной последовательности.

В предлагаемом методе, на этапе обучения, для каждого распознаваемого слова было записано три образца произношения данного слова (разными людьми и в разных условиях, здесь существует прямая корреляция между, точностью распознавания при большом количестве образцов для одной команды и временем распознавания). Затем были вычислены все соответственные ДИВ-расстояния для каждой группы образов и найдено их среднее арифметическое (далее $AVRdist$).

Кроме того, оригинальной идеей увеличения точности и устойчивости, на этапе распознавания, является использование порога Th_1 , на который умножается среднее расстояние $AVRdist$ в группе, к которой принадлежит образ ДИВ-расстояние которого оказалось минимальным (далее $DTWdist$). Таким образом, если выражение $DTWdist \leq Th_1 \cdot AVRdist$ истинно, то слово считается распознанным и относится к выбранному эталону, иначе выдается сообщение, что данное слово не содержится в списке распознаваемых команд. Значение порога Th_1 было найдено экспериментально и равно: $Th_1 = 2.3$.

Рассмотренный метод дикторонезависимого распознавания слов в реальном времени апробирован в программной системе «Интуитивный мультимодальный интерфейс человек-телевизор» разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. С помощью этого метода, в проведенных экспериментах, семь команд управления интерфейсом на английском языке распознавались с точностью не менее девяносто пяти процентов, причем неустойчивость, то есть вероятность принятия одной голосовой команды за другую, не превышала одного процента.

Программная реализация метода, кроме персонального компьютера, была портирована на мультимедийную платформу STB810 с процессором TriMedia (200 МГц, ОЗУ 16 мб), где также продемонстрировала работу в реальном времени и точность сравнимую с существующими сильными классификаторами: Скрытыми Марковскими моделями, Нейронными сетями, Байесовыми сетями, Нечеткими конечными автоматами.

В дальнейшем планируется расширить алфавит распознаваемых слов, усовершенствовать систему с целью распознавания не только конкретного слова, но и конкретного человека, который использует голосовую команду. Данная возможность может быть востребована как в человеко-машинных интерфейсах, так и в системах интеллектуализации человеческого окружения.

Литература

- [1] Ронжин А.Л., Карпов А.А., Ли И.В. Речевой и многомодальный интерфейсы. - М.: Наука, 2006. - 172 с.
- [2] Carbini S., Viallet J.E., Bernier O., Bascle B. Tracking body parts of multiple people for multi-person multimodal interface// Computer Vision in Human-Computer Interaction in ICCV 2005 Workshop.-Beijing, 2005.- pp. 16-25.
- [3] Ong C.W., Ranganath S., Venkatesh Y.V. Understanding gestures with systematic variations in movement dynamics // Pattern recognition.-2006.-Vol.39, №9.-P. 1633-1648.
- [4] Sharma R. Speech-Gesture Driven Multimodal Interfaces for Crisis Management// The IEEE Proceedings.-2003.-Vol. 91, №9.- P. 1327-1354.
- [5] Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка звуковых сигналов // Москва, «Радио и связь».- 1981.
- [6] Rabiner L., Juang B. Fundamentals of speech recognition // Prentice Hall International, Inc.-1993.
- [7] Saeed V. Vaseghi Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition.// John Wiley & Sons Ltd.-2000.
- [8] Аграновский А.В., Леднов Д.А. Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов.// Москва, «Радио и связь».-2004.
- [9] Ganchev T., Fakotakis N., Kokkinakis G. Comparative Evaluation of Various MFCC Implementations // Greece, Wire Communications Laboratory, University of Patras.- 2005.
- [10] http://www-01.ibm.com/software/pervasive/embedded_viavoice/
- [11] <http://www.microsoft.com/speech/speech2007/default.msp>
- [12] <http://www.dragontalk.com/>
- [13] http://julius.sourceforge.jp/en_index.php
- [14] <http://cmusphinx.sourceforge.net/html/cmusphinx.php>
- [15] <http://htk.eng.cam.ac.uk/>