

# РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМЫ РАДИОПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НИЗКОБЮДЖЕТНОЙ ПЛАТФОРМЫ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*Дмитриев А.С.*

*Научный руководитель: д.т.н., профессор, академик МАЭН Школьников В.М.*  
НИИСМ, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

## RADIO DATA TRANSMISSION SUBSYSTEM IMPLEMENTATION FOR EXTREMELY LOW-COST PICOSATELLITE EQUIPMENT FOR SHORT DURATION MISSIONS

**Dmitriev A.S.**

*Supervisor: Ph.D., professor, Shkolnikov V.M.*  
Bauman Moscow State Technical University

### **Аннотация**

В докладе рассмотрен вариант практической реализации системы радиопередачи данных низкобюджетной платформы сверхмалого космического аппарата. Приведено описание используемых компонентов, принцип работы системы. Продемонстрировано применение спроектированной конструкции на примере технологического пикоспутника с солнечным парусом. Показана изготовленная печатная плата устройства, успешно выдержавшая термовакуумные и вибрационные испытания на воздействие факторов, сопровождающих запуск космического аппарата и его орбитальный полёт.

### **Abstract**

The report shows a variant of practical implementation of a radio data transmission subsystem for extremely low-cost picosatellite equipment for short duration missions. Used components and system's principles are described in the paper. Developed construction is shown in the report, as an example there is a technological picosatellite with solar sail. Designed and manufactured PCB successfully passed thermo-vacuum and vibration space qualification tests, it's basic description is also included in the paper.

### **Введение**

Существует ряд краткосрочных космических экспериментов (длительностью до нескольких дней) проводимых на сверхмалых космических аппаратах, например эксперименты по раскрытию солнечных парусов и тросовых систем. Существующие решения космической техники имеют чрезмерный ресурс для выполнения поставленных задач. Учёт особенностей проведения краткосрочного космического эксперимента позволяет упростить бортовую радиоэлектронную аппаратуру космического аппарата, снизить её стоимость и массово-габаритные характеристики. В результате использования этого подхода была создана специализированная платформа сверхмалого космического аппарата. Данное устройство обеспечивает следующие функции: управление полезной нагрузкой, системой электропитания, терморегулирования, сбор телеметрической информации, контроль за исполнением команд управления, определение ориентации космического аппарата в пространстве. Платформа снабжена различными распространёнными интерфейсами, такими как UART, SPI, I2C, 1-wire для дальнейшего увеличения её функциональных возможностей. Центральной частью платформы является 8-битный RISC микроконтроллер, со встроенным аналогово-цифровым преобразователем. Платформа имеет в своём составе радиоприёмное/радиопередающее устройство диапазона УВЧ. Габариты устройства: 40x52x16 мм (без элементов питания). В конструкции используются электронные компоненты общепромышленного применения с рыночной стоимостью не более 150\$. Для обеспечения передачи информации о ходе орбитального эксперимента, показаний датчиков, состоянии бортовых систем и полезной нагрузки на наземные специализированные пункты приема информации и радиолюбительские приемные станции предусмотрена подсистема радиопередачи данных.



Передающие антенны могут быть выполнены из упругих материалов и размещены в компактных контейнерах. В простейшем случае, представляют собой полоски из токопроводящего материала длиной 35 см. (рис. 3).

## 2. Подсистема радиопередачи данных низкобюджетной платформы сверхмалого космического аппарата

Рассмотрим пример орбитального технологического эксперимента по разворачиванию 2-лопастного тонкопленочного солнечного паруса. После старта космического аппарата из транспортно-пускового контейнера, через расчетный интервал времени управляющий микроконтроллер подает команду соответствующим исполнительным элементам на раскрытие антенн и проведение эксперимента в соответствии с заложенной программой. Действие подсистемы радиопередачи данных состоит в следующем: после активации датчиков и накопления в буфере встроенной памяти управляющего микроконтроллера данных о ходе эксперимента, состоянии микроклимата внутри герметичного газонаполненного контейнера, работоспособности основных систем и исполнительных элементов, микроконтроллер начинает периодически формировать пакеты телеметрических кадров, отправлять их в буфер последовательного порта UART/USART и включать радиочастотный усилитель ra07h4047. Через последовательный порт данные попадают в буфер модуля-радиопередатчика HM-TRP433, который формирует последовательности частотно-модулированных радиосигналов. Эти сигналы, усиленные до 7 Вт в модуле ra07h4047 поступают на передающие антенны.

## 3. Практическая реализация

Разработана печатная плата-прототип платформы пикоспутника для проведения орбитальных технологических экспериментов. На рис. 4 показано расположение микроконтроллера, модуля-радиопередатчика и радиочастотного усилителя.

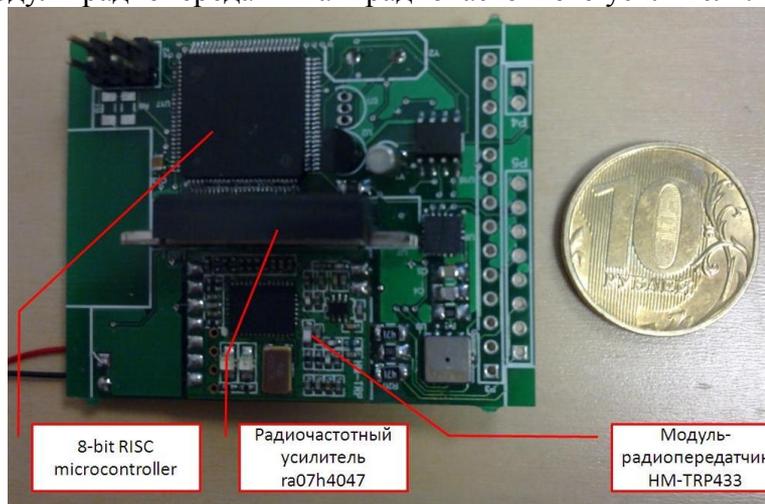


Рисунок 4 - Изготовленная печатная плата платформы пикоспутника, прошедшая вибрационные и термовакуумные испытания

В сборе с газонаполненным герметичным контейнером и полезной нагрузкой устройство прошло термовакуумные испытания и виброиспытания на воздействие факторов сопровождающих запуск космического аппарата и его орбитальный полёт. По результатам испытаний, в течении всего времени расчетного активного существования сверхмалого космического аппарата система сохраняла работоспособность. Данное устройство планируется использовать для космического эксперимента, разработанного студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана, по разворачиванию двухлопастного солнечного паруса.

## Литература

1. Дмитриев А.С. Разработка бортового передающего комплекса пикоспутника с солнечным парусом. Сборник тезисов «Студенческая весна», 2010 г.
2. Дмитриев А.С. Разработка системы, обеспечивающей определение координат пикоспутника с солнечным парусом и управление технологическим экспериментом. Сборник тезисов «Студенческая весна», 2011 г.
3. Сборник: Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках: Тезисы докладов второй международной конференции «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках». Самара, 27-30 июня 2011 г. – Самара, Изд-во СНЦ РАН, 2011. - 402 с.
4. Д.А. Рачкин, С.М. Тененбаум, Н.А. Неровный, А.С. Дмитриев, О.С. Коцур, IAC-11.E2.3.8 2-BLADES DEPLOYING BY CENTRIFUGAL FORCE SOLAR SAIL EXPERIMENT Сборник тезисов международной конференции IAC 2011.
5. Д.А. Рачкин, С.М. Тененбаум, Н.А. Неровный, А.С. Дмитриев, О.С. Коцур, А.А. Марченко, А.С. Попов, В.И. Майорова. Технологический эксперимент по разворачиванию двухлопастной бескаркасной тонкопленочной конструкции с использованием сверхмалых космических аппаратов, Сборник тезисов международной конференции SPEXP2011, 2011 г
6. [[http://www.hoperf.com/upload/rf\\_app/НМ-TRP.pdf](http://www.hoperf.com/upload/rf_app/НМ-TRP.pdf) электронный ресурс]
7. [<http://www.ic2ic.com/search.jsp?sSearchWord=RA07H4047.pdf> электронный ресурс]

# РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОРНОГО МОДУЛЯ 16И РАЗРЯДНОГО ПРОЦЕССОРА НА БАЗЕ ПЛИС

**Смурыгин И.М.**

*Научный руководитель: ст. преподаватель Шниев В.А.*

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

## 16S BIT PROCESSOR CHIPSET'S WORKED OUT ON PLIS

**Smurygin I.M.**

*Supervisor: Шниев В.А.*

MSTU, Moscow, Russia

### **Аннотация**

В работе представлен процессорный модуль состоящий из периферийных элементов(контроллера прерываний, шинного контроллера, регистра адреса, генератора тактовых импульсов), реализованных на базе 2ух ПЛИС. Подробно исследованы временные циклы передачи информации при работе процессорных систем и обработка внешних прерываний. Кратко представлены варианты реализации отдельных элементов, разработанные для решения поставленных задач.

### **Annotation**

In this article processor module, which consists of peripheral elements based on PLIS, is presented. Time cycles of transferring information at the work by working processor systems and processing external interrupts researched in details. Variants of realization certain parts oa this system is shown briefly.

### **Введение**

Ядром любой вычислительной системы является вычислительный модуль и его периферийные компоненты, обеспечивающие синхронизацию работы вычислительного ядра и всей системы в целом. Любому инженеру занимающемуся разработкой аппаратуры необходимо знать основы построения процессорных систем и распределения временного пространства.

В работе представлен шинный контролер, обеспечивающий управление временным пространством модуля и контроллер прерываний, отвечающий на прерывания от внешних устройств. Модули реализованы на ПЛИС, т.к. данный метод является наиболее дешевым и позволяет отладить проекты перед запуском в производство на интегральных схемах.

### **Реализация процессорного модуля**

Модуль на 2-х ПЛИС CPLD необходим для реализации временных циклов шины для взаимодействия с асинхронной шиной для передачи различного рода информации. Функциональная схема «мезонина» с интегрированным модулем представлена на рисунке 1.

Основными элементами структурной схемы являются:

- **CPU 80286** – шестнадцатиразрядный процессор Intel i286;
- **кварцевый генератор** – является источником тактирующего сигнала;
- **DS1232L** – микросхема формирования сигнала сброса;
- **2\*SN74LS245** – двунаправленный буфер для хранения и передачи данных;
- **CPLD XC 95108** – ПЛИС, внутри которой реализованы шинный контроллер и регистры для хранения текущего адреса выполняемой команды;
- **CPLD XC 9536** – ПЛИС, внутри которой реализованы контроллер прерываний и генератор тактовых импульсов;
- **AB** (Asynchronous Bus) – асинхронная шина.



### Шинный контроллер (Bus Controller).

Шинный контроллер предназначен для управления временными циклами шины. Управляется от процессора при помощи следующих сигналов:

- **S1, S0** (Bus cycle status)– сигналы формирующие подциклы в работе цикла шины.
- **COD/INTA** (/Interrupt acknowledge). Определяет циклы работы с устройствами (памятью или внешним устройством), или цикл обработки прерывания ;
- **M/IO** (Memory or Input Output select). Определяет цикл работы с памятью или с внешним устройством. По активному уровню сигнала производится цикл чтения памяти, а по низкому – цикл чтения внешнего устройства.

Структурная схема реализации шинного контроллера представлена на рисунке 3.

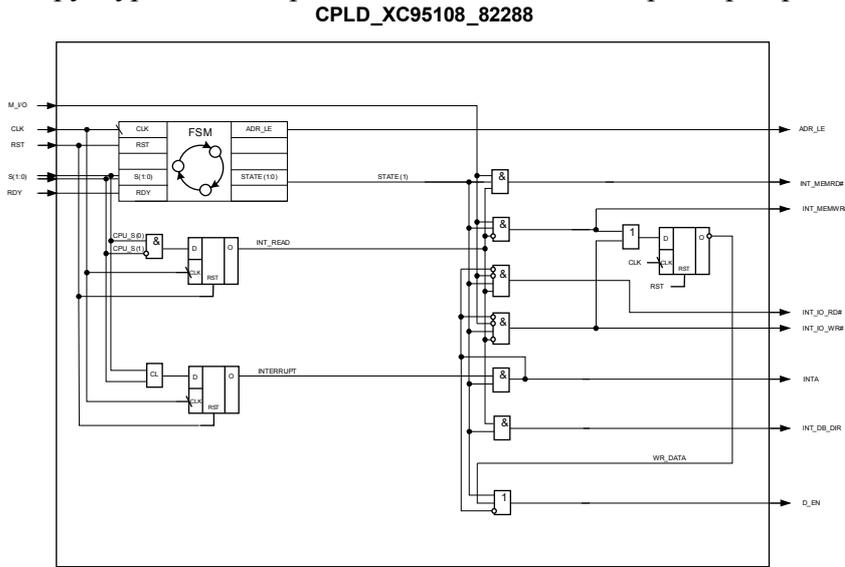


Рисунок 3 – Структурная схема модуля шинного контроллера

Основную функцию формирования сигналов управления играет схема функционального автомата (FSM). Временная диаграмма его функционирования представлен на рисунке 4.

Спецификация сигналов, отображенных на временной диаграмме, представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Спецификация сигналов временной диаграммы функционального автомата шинного контроллера

Сигнал	Описание сигнала
CLK	Сигнал тактовой частоты. Синхронизация работы схемы осуществляется по заднему фронту сигнала
S10	Сигнал, являющийся комбинацией сигналов S1 и S0, получен в результате их перемножения. Имеет активный уровень логического нуля
FSM STATE	Состояние функционального автомата
CMD#	Command delay. Позволяет задержать начало команды. Имеет активный уровень логического нуля.
RDY	Сигнал готовности. Сигнализирует о возможности передачи данных по шине.

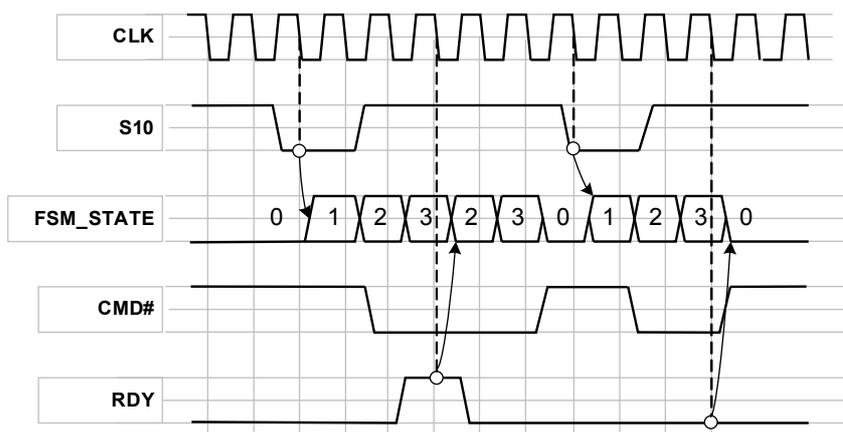


Рисунок 4 – Временная диаграмма работы ступенчатого автомата шинного контроллера

Смысл работы схемы заключается в обработке сигнала RDY. Если процессор сигнализирует о том, что предыдущая операция не закончена (сигнал RDY имеет активный уровень), необходимо вставить дополнительный цикл задержки T

При помощи сигнала FSM\_STATE и простейшей логики формируются сигналы управления шиной и всего модуля, такие как ADR\_LE, MEMRD, MEMWR, IORD, IOWR, INTA, DB\_DIR, D\_EN.

### Контроллер прерываний (Interrupt controller)

В данной задаче необходимо последовательно обрабатывать 4 обычных прерывания и одно немаскируемое прерывание (NMI-Not Maskeable Interrupt). Для этой цели был разработан контроллер прерываний. Его структурная схема состоит из двух частей. Первая хранит данные о текущем состоянии (рисунок 5), а вторая производит последовательный опрос линий прерываний (рисунок 6).

Тракт данных содержит ряд регистров для хранения информации. Спецификация регистров представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Спецификация регистров контроллера прерываний

Регистр	Выходной сигнал	Выполняемые функции
Смещение вектора	INT_REG(1:0)	Для управления четырьмя векторами прерывания нужно два разряда. Они необходимы для задания смещения относительно главного вектора прерывания при чтении программы из оперативной памяти.
Базовая часть вектора прерываний	INT_REG(7:2)	Собственно, вектор прерывания
Регистр маски	INT_REG(11:8)	Есть возможность отключить обработку прерываний при записи маски(8ой разряд отвечает за чтение 0-го прерывания, 11ый – 3его прерывания)
Текущие прерывания	INT_REG(15:12)	Побитовые значения текущих прерываний

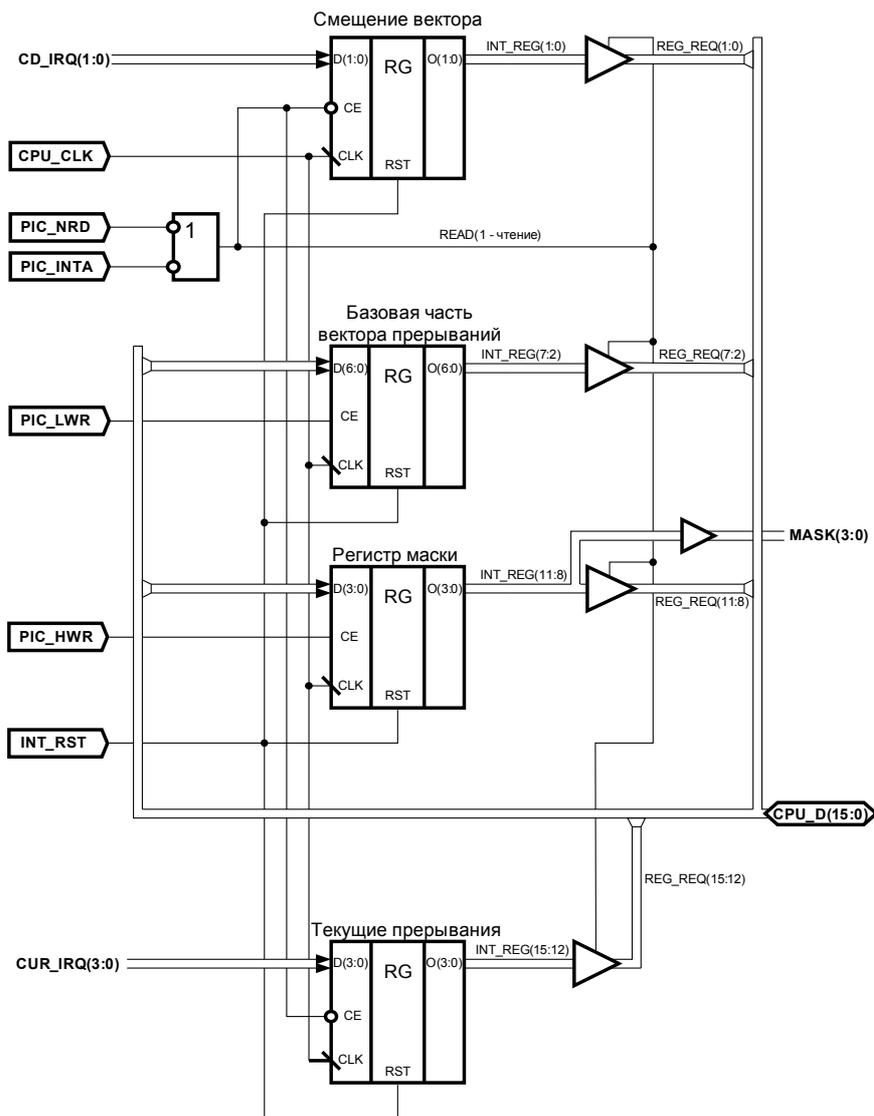


Рисунок 5 – Структурная схема тракта данных контроллера прерываний

В результате есть все необходимые значения для чтения определенной инструкции из оперативной памяти. Также имеется возможность работы по отдельным прерываниям при помощи записи маски прерываний.

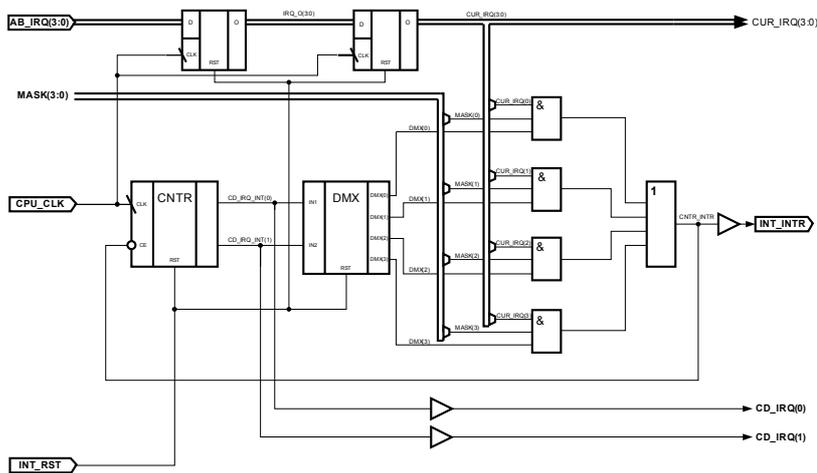


Рисунок 6 – Структурная схема обработки прерываний контроллера прерываний

Данная схема осуществляет последовательный опрос значений прерываний **AB\_IRQ(3:0)**, поступивших с асинхронной шины, а также отключает обработку прерываний, значения маски которых установлены в 0.

### Тактовый генератор

Предназначен для формирования стабильного сигнала синхронизации с необходимой частотой. Также при помощи тактового генератора формируется сигнал сброса и готовности. Структурная схема тактового генератора представлена на рис. 7

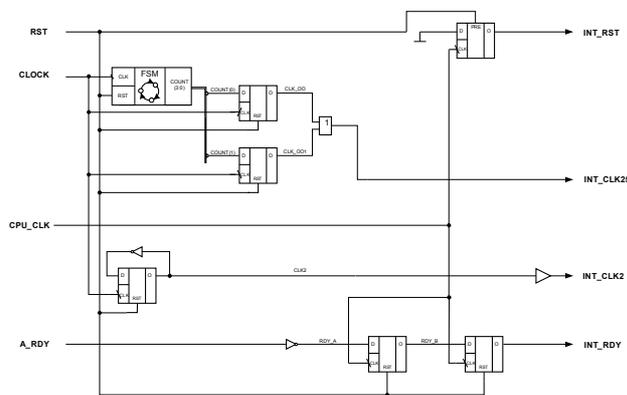


Рисунок 7 – Структурная схема тактового генератора

В данном проекте имеется возможность работать с двумя частотами – 12,5 МГц и 10 МГц, что достигается путем деления частоты кварцевого генератора на 2 и 2,5. Тактовым генератором генерируется две частоты. Частота, на которой будет работать процессор, выбирается при помощи переключки на плате. Установление переключки предусмотрено перед включением устройства.

Данные модули были реализованы на языке VHDL и интегрированы в соответствующие ПЛИС:

- контроллер прерывания и тактовый генератор были интегрированы в ПЛИС Xilinx CPLD XC 9536;

- шинный контроллер и буфер ввода вывода адреса были интегрированы в ПЛИС Xilinx CPLD XC 95108.

В результате работы был создан модуль для обработки данных и обработки прерываний. Данный модуль предполагается использовать в системах управления и передачи данных. Конструкция макетного устройства предусматривает установку разработанного процессорного модуля на мезонине. Конструкция макетного устройства представлена на рисунке 8.

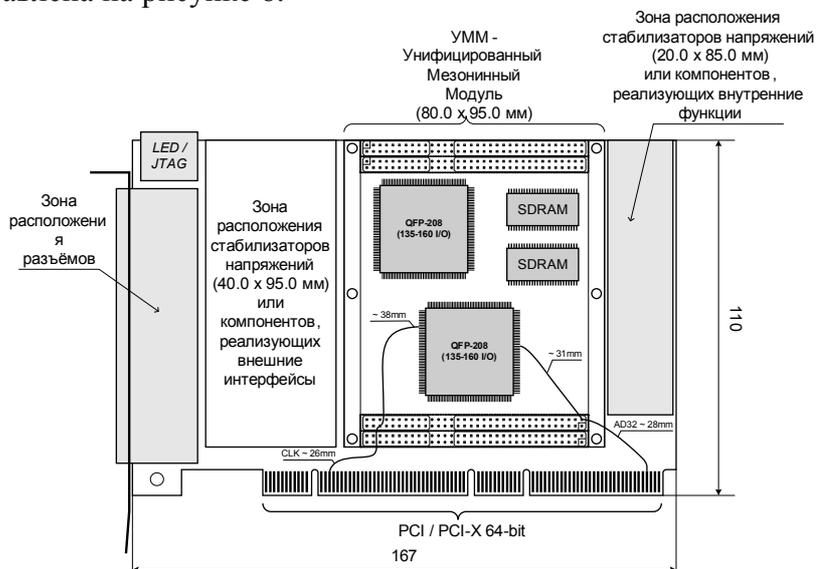


Рисунок 8 – Установка мезонина на основную плату макетируемого устройства

В результате был спроектирован мезонинный модуль, который может быть установлен на плату для обработки различной информации.

### Заключение

Разработка процессорного модуля и распределение временного пространства шины является одной из основных задач при разработке вычислительных систем.

Преимуществом аппаратной реализации проектов на языках HDL на базе ПЛИС является то, что у разработчика есть возможность за небольшую стоимость протестировать определенные варианты решения поставленных задач. Проектирование на ПЛИС обеспечивает легкость реализации различных решений при проектировании.

### Литература

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: Учеб. Пособие для вузов – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.: ил.
2. Б.Брей Микропроцессоры Intel. Архитектура, программирование и интерфейсы. Шестое издание: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. -1328 с.: ил

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖТРАНЗИСТОРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Гладких А.А.<sup>1</sup>, Столяров А.А.<sup>2</sup>

*Научный руководитель: член-корр. РАН, д.т.н, профессор Шахнов В.А.<sup>1</sup>*

*Научные консультанты: доцент, к.т.н. Макаrchук В.В.<sup>1</sup>, к.ф-м.н. Амирханов А.В.<sup>2</sup>*

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

2 - Россия, Москва, НИИСИ РАН

## ANALYSIS OF CMOS FIELD OXIDE FORMATION PROCESSES

Gladkikh A.A.<sup>1</sup>, Stolyarov A.A.<sup>2</sup>

*The supervisor of studies: RAS corr. member, doctor of technical science, prof. Shakhnov V.A.<sup>1</sup>*

*Scientific advisers: candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.<sup>1</sup>,*

*candidate of physico-mathematical science Amirkhanov A.V.<sup>2</sup>*

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

2 - Russia, Moscow, SRISA RAS

e-mail: [GladkikhAlexei@gmail.com](mailto:GladkikhAlexei@gmail.com)

### Аннотация

В работе рассмотрены технологические решения формирования межтранзисторной изоляции для субмикронных СБИС, модели для расчета результатов операции ХМП в стандартном *STI*-процессе, а также проведен анализ мелкощелевой изоляции (*STI*), с точки зрения моделирования операции ХМП, в которой планаризация завершается до достижения защитного слоя транзисторных областей.

### Abstract

The technology of formation field oxide for submicron VLSI was discussed in this work. The models for calculating the results of *CMP* operation in standard *STI* process was considered, as well as an analysis in terms of *CMP* operation simulation for *STI* technology, where *CMP* is finished before the protective layer of the active areas of transistors reached.

### Введение

Известно, что элементной базой современной электронно-вычислительной аппаратуры являются сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС). Причем процесс их развития и совершенствования неразрывно связан с ростом их сложности, который выражается в непрерывном увеличении числа элементов СБИС.

Если иное не требуется согласно принципиальной схеме цифрового устройства, то в СБИС активные области каждого транзистора должны быть изолированы друг от друга. В настоящее время промышленно применяются два вида технологических решений, позволяющие решить эту задачу для активных областей транзисторов типа металл-окисел-полупроводник (МОП): *LOCOS* (*LOC*al *O*xidation of *S*ilicon) и *STI* (*S*hallow *t*rench *i*solation). Отметим, что для производства СБИС с минимальным критическим размером 500 нм и менее предпочтение отдано *STI*-процессу, поскольку он позволяет обеспечить более плотное размещение транзисторов на кристалле.

В технологической последовательности формирования *STI* используется операция химико-механической планаризации (ХМП) поверхности кристалла будущей СБИС, которая, как известно из работ [1, 2], не может обеспечить равную толщину остаточного диоксида кремния между островками транзисторных структур, в результате чего поверхность кристалла будущей СБИС имеет остаточный рельеф поверхности. Для его минимизации применяют различные конструктивные методы [1, 3], в том числе и методы, основанные на моделировании операции ХМП.

В работе [4] рассмотрены модели операции ХМП для блока технологических операций формирования многоуровневой металлизации, а в работе [5] приведена модель операции ХМП для *STI*-процесса. Однако эта модель не учитывает особенностей такого *STI*-технологического процесса формирования многоуровневой металлизации (она будет

рассмотрена далее), при которой над островками транзисторных структур перед операцией ХМП на поверхности слоя диоксида кремния возникает двойная ступенька.

В предлагаемой статье рассмотрены два варианта технологической реализации *STI*-процесса: стандартный вариант, в котором в качестве изолирующего слоя используется нитрид кремния и планаризация проводится до вскрытия всех областей нитрида, и вариант *STI*-процесса, в котором планаризация завершается до достижения областей защитного слоя, в качестве которого используется диоксид кремния. Для стандартного процесса рассмотрена модель операции ХМП, предложенная в работе [5], которая позволяет рассчитать разброс в толщине диэлектрика в изоляционной канавке между транзисторными структурами после проведения операции ХМП.

### Формирование межтранзисторной изоляции

При производстве СБИС изоляция транзисторных структур друг от друга осуществляется на начальных этапах технологического маршрута производства (*Front-End Of Line, FEOL*). Как уже было упомянуто выше, *STI*-процесс применяют для электрической изоляции друг от друга транзисторных структур с минимальной проектной нормой 500 нм и менее, тогда как для СБИС, имеющих большую минимальную проектную норму, используют более простой и дешевый вариант техпроцесса локального окисления кремния (*LOCOS*).

Он состоит из следующих технологических операций:

1. Формирования тонкого слоя двуокиси кремния  $SiO_2$  на поверхности пластины.
2. Осаждения на него слоя нитрида кремния  $Si_3N_4$ , служащего маской для формирования изолирующих областей.
3. Формирования фоторезистивной маски (ФРМ), необходимой для получения областей под изоляцию.
4. Травления нитрида кремния по полученной ФРМ.
5. Термического окисления тех областей, с которых удален нитрид кремния.
6. Удаления оставшегося нитрида кремния с помощью селективного травления.

Основным недостатком этой технологии является эффект так называемого «птичьего клюва» (рисунок 1). Именно его наличие не дает возможным получить высокую плотность размещения активных компонентов СБИС вследствие разрастания слоя двуокиси кремния под нитрид кремния во время процесса термического окисления. Сразу заметит, что этот эффект полностью отсутствует в *STI*-процессе.

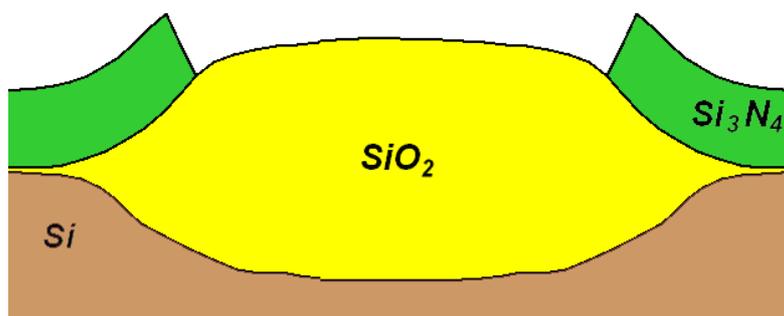


Рисунок 1 – Эффект «птичьего клюва», возникающий в технологии LOCOS

В свою очередь *STI*-процесс, хотя и позволяет получить более высокую плотность размещения компонентов СБИС на поверхности кристалла по сравнению с *LOCOS*-процессом, но является более дорогостоящим, поскольку требует выполнения более сложных технологических операций.

Сам *STI*-процесс показан на рисунке 2. Как видно из рисунка он состоит из операций формирования тонкого слоя диоксида кремния, осаждения на него защитного слоя нитрида кремния, создания ФРМ, травления структуры  $Si_3N_4/SiO_2/Si$  на заданную глубину в изолирующих областях по сформированной ФРМ, удаления ФРМ, термического окисления

кремния в канавках, осаждения диэлектрического слоя и удаления лишнего диэлектрика с помощью операции ХМП. Наконец на заключительном этапе процесса удаляется слой нитрида кремния.

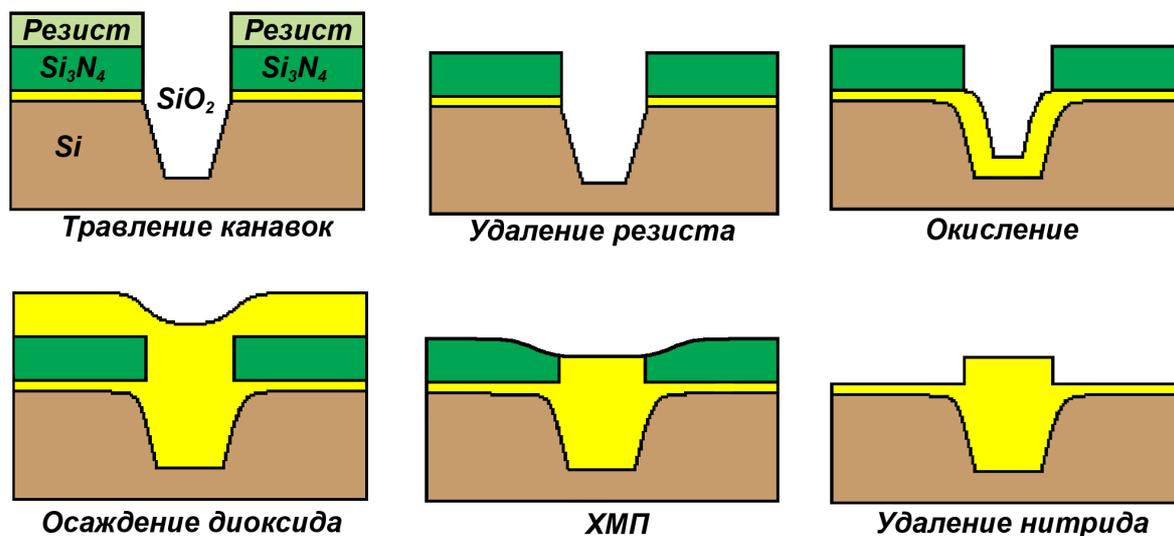


Рисунок 2 – Технология мелкощелевой изоляции (*STI*)

Следует отметить различные функции слоя нитрида кремния в рассматриваемых процессах. Если в первом случае он предотвращает рост окисла на поверхности пластины при термическом окислении, то во втором – защищает поверхность активных областей кристалла от повреждения при выполнении операции ХМП и выполняет роль селективного к окислу стопорного слоя. В идеальных условиях после операции ХМП должны быть выполнены следующие условия:

1. Диоксид над нитридом кремния должен быть полностью удален.
2. Недопустимо удаление слоя  $SiO_2$  между активными областями ниже уровня  $Si_3N_4$
3. Во время операции ХМП толщина слоя  $Si_3N_4$  должна оставаться постоянной.

В реальных условиях производства СБИС полное выполнение всех вышеперечисленных требований невозможно по двум основным причинам: в силу естественной изменчивости операции ХМП и конструктивных параметров схемы – различия в плотностях заполнения областей топологии кристалла СБИС.

Для *STI*-процесса плотность размещения активных областей транзисторов влияет на скорость планаризации различных участков кристалла СБИС, что является причиной либо неполного удаления диоксида кремния с одних областей кристалла, либо повреждения островков транзисторных структур в других его областях. Оба этих возможных случая показаны на рисунке 3.

Получение работоспособных СБИС с кремниевой пластины требует, чтобы поверхность нитрида кремния была полностью «очищена» от диоксида кремния. В противном случае на участках травления останется материал, который в дальнейшем будет мешать, как формированию поликремниевых затворов, так и легированию кремния. Чтобы, по возможности, этого избежать время планаризации надо выбирать минимально необходимым для того, чтобы диоксид кремния в областях с высокой плотностью заполнения рисунка топологии был полностью удален. Благодаря высокой селективности планаризации нитрида и диоксида кремния при малых временах проведения процесса ХМП значительного удаления диоксида кремния в канавках даже в областях кристалла СБИС с низкой плотностью заполнения нитридом кремния удается избежать. Однако при больших временах проведения процесса планаризации, избежать удаления диоксида кремния в канавках между активными областями не удастся.

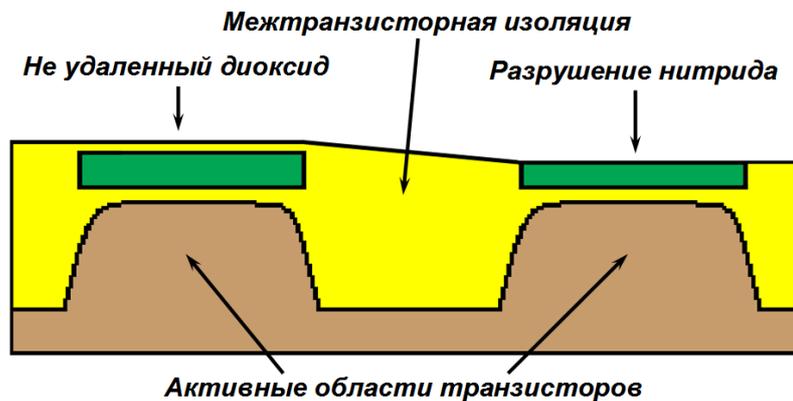


Рисунок 3 – Дефекты, возникающие на этапе планаризации в *STI*-процессе

Другая проблема больших времен процесса планаризации состоит в разрушении или утонении слоя нитрида кремния над транзисторными областями, которое называют эрозией нитрида («*nitride erosion*») и которая количественно определяется как толщина слоя нитрида удаленного в процессе планаризации. Излишнее удаление диоксида кремния между островками транзисторных структур и эрозия нитрида приводят к проблемам с электрическими характеристиками элементов СБИС: возникновением боковой паразитной проводимости и высокой напряженности электрического поля в подзатворном окисле на границах транзисторных областей. Отметим, что высокая напряженность электрического поля на острых углах транзисторных областей вызывает снижение порогового напряжения [6].

### Способы повышения качества процесса формирования мелкощелевой изоляции

Разработка модели технологического процесса формирования мелкощелевой изоляции является важным инструментом при выборе режимов проведения составляющих его технологических операций. Такая модель, адекватно отражая процесс формирования *STI*, дает возможность предсказать величину удаленного разделяющего диоксида и эрозии нитрида для СБИС произвольной топологии, обеспечивая, таким образом, разработчика ключевым инструментом анализа и коррекции топологии [5].

В работах [2, 3, 4] изложены результаты по моделированию операции ХМП для диэлектрических слоев (диоксида кремния), используемых на этапе формирования многоуровневой металлизации. Эта методика моделирования основана на, так называемой, эффективной плотности заполнения, которая является сверткой локальной плотности заполнения и ядра свертки, учитывающего характеристики полирующей подушки. С ее помощью возможен анализ топологии СБИС, необходимый для характеристики процесса формирования межслойной или межметалльной изоляции. Путем коррекции рисунка топологии проектного слоя СБИС возможно добиться значительного снижения разброса толщины диоксида кремния от плотности заполнения [5].

Рассмотрим два основных метода коррекции рисунка топологического слоя, применяемых в *STI*-процессе, использование которых позволяет существенно повысить качество выполнения операции ХМП.

Первый метод основан на введении структур заполнения (*dummy features filling*). В нем пустые области рисунка топологии заполняются электрически нерабочими и несвязанными структурами. Повышая, таким образом, плотность заполнения первоначально пустых областей, их стремятся приблизить по плотности заполнения к остальной части площади кристалла. Как и при формировании многоуровневой металлизации, так и при формировании *STI*, с помощью моделирования операции ХМП возможно добиться оптимального размещения структур заполнения.

Второй метод заключается в травлении по так называемой обратной маске (*reverse etchback*). В этом случае используют второй шаблон с инверсной тональностью по

отношению к шаблону, с помощью которого формируют транзисторные области. Причем размеры топологических фигур на исходном и инверсном шаблонах могут не совпадать. При этом в технологический процесс добавляется дополнительный шаг, который заключается в том, что после осаждения слоя диоксида кремния из газовой фазы формирование защитной маски из фоторезиста проводится с использованием инверсного шаблона. Затем выполняется травление диоксида кремния над островками транзисторных областей. Вертикальный профиль структуры, получающейся до операции ХМП после описанных выше шагов, показан на рисунке 4.

В результате количество диоксида кремния в областях с высокой плотностью размещения транзисторных структур значительно снижается, благодаря чему скорость его удаления по кристаллу во время операции ХМП выравнивается. Этот эффект аналогичен тому, как если бы в этих областях была снижена плотность заполнения (рисунок 5). Следует отметить, что для данного метода проблема наличия остаточного окисла над поверхностью  $Si_3N_4$  устраняется еще до начала операции ХМП. Для этого случая использование моделирования для повышения качества *STI*-процесса будет рассмотрено далее.

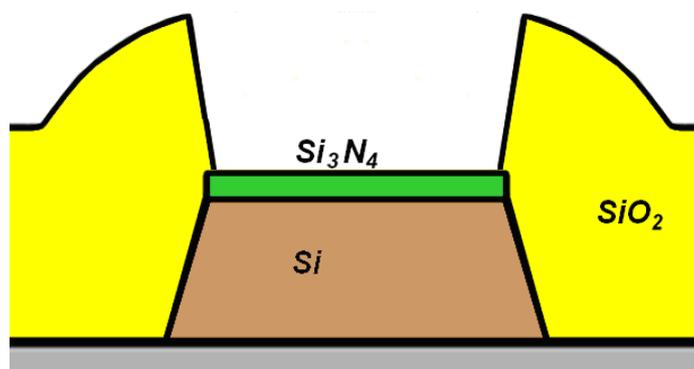


Рисунок 4 – Вертикальный профиль структуры перед операцией ХМП при использовании метода травления по обратной маске

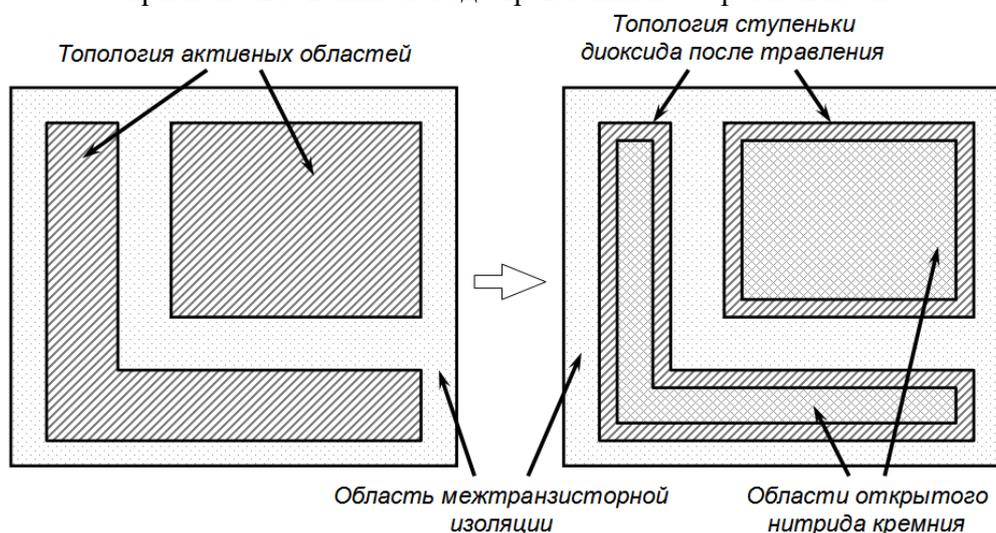


Рисунок 5 – Изменение плотности заполнения после травления по обратной маске

В процессе формирования *STI* применение процедуры травления по обратной маске позволяет выровнять количество материала, удаляемого с разных частей кремниевой пластины во время последующей операции ХМП. Однако введение структур заполнения все же оказывается необходимым, поскольку их наличие позволяет создать равномерную плотность заполнения нитрида кремния по всему кристаллу, и, таким образом, избежать проблем с эрозией нитрида и образованием впадин диоксида кремния.

## Моделирование операции ХМП в технологии STI

Рассмотрим модель операции ХМП приведенную в работе [5]. Стоит отметить, что такая модель применима только для стандартного STI-процесса (то есть процесса с применением защитного слоя нитрида и без использования технологии травления по обратной маске). Как уже было отмечено выше, в этом случае процесс проведения операции ХМП при формировании мелкощелевой изоляции можно разделить на две фазы. Первая фаза – это удаление «лишнего» диоксида кремния. Вторая фаза – это планаризация нитрида, с одновременным удалением остаточного диоксида кремния над островками транзисторных областей.

Для первой фазы операции ХМП в процессе формирования структуры STI (в этот момент происходит планаризация только одного диэлектрического материала) используется модель, аналогичная предложенной в работе [7], поскольку она была получена автором работы [5] на основе тех же закономерностей, что и модель, описанная в [7]. Использование модели [4] в этом случае также оказывается возможным. Для второй фазы операции ХМП в работе [5], также были предложены модели, позволяющие вычислить скорость планаризации для системы нитрид/диоксид. На основе этих зависимостей в этой работе были получены следующие выражения (в данной статье они приведены без расшифровки параметров) для расчета эрозии нитрида кремния  $E(t)$  и величины впадин диоксида кремния после планаризации  $D(t)$ :

$$D(t) = (h_n - D_{ss}) \cdot e^{-\frac{t-t_n}{\tau_{nit}}} + D_{ss} \quad (1)$$

$$E(t) = K_{ss}(t - t_n) + \frac{(h_n - D_{ss})(1 - \rho_{nit})}{1 + \rho_{nit}(s - 1)} \left( 1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau_{nit}}} \right) \quad (2)$$

где  $t_n$  – время касания областей нитрида,  $\tau_{nit}$  – постоянная времени планаризации нитрида,  $D_{ss}$  – величина впадин диоксида кремния между островками транзисторных структур для установившегося состояния планаризации,  $\rho_{nit}$  – эффективная плотность нитрида кремния,  $s$  – селективность планаризации нитрида кремния,  $K_{ss}$  – скорость планаризации материала для установившегося состояния,  $h_n$  – высота ступеньки нитрида кремния.

Параметры данной модели, как и в случае модели многоуровневой металлизации, получают путем ее калибровки с помощью тестового шаблона.

С использованием приведенных выражений размещение структур заполнения в топологическом слое формирования транзисторных областей может быть оптимизировано. Это позволяет получить гарантированное вскрытие областей нитрида и минимизировать как эрозию нитрида, так и величину впадин диоксида кремния.

### Анализ «нестандартного» STI-процесса

В некоторых случаях для производства СБИС используется вариант формирования STI, в котором операция ХМП завершается до достижения защитного слоя (планаризация STI-структуры «на весу»), что дает возможность избежать проблем с эрозией нитрида и планаризацией диоксида кремния в изолирующей канавке. В этом случае допустимо сокращение времени проведения операции ХМП до значения, необходимого для удаления ступеньки. Достижение же необходимой толщины в этом случае осуществляется путем последующего плазмохимического или жидкостного травления. Сокращение времени планаризации позволяет снизить разброс толщины диоксида после завершения операции ХМП.

Формирование же исходной структуры в рассматриваемом процессе происходит с помощью следующих трех дополнительных операций. Первая операция состоит в травлении

по обратной маске, в результате которой возникает двойная ступенька окисла перед операцией ХМП. Вторая операция заключается в ХМП структуры, вертикальный профиль которой приведен на рисунке 6. Третья дополнительная операция состоит в травлении слоя диоксида до необходимой толщины. С этой целью применяются процессы плазменного и жидкостного травления диоксида кремния. С их помощью обеспечивается точная подгонка конечной толщины окисла в изоляционной канавке.

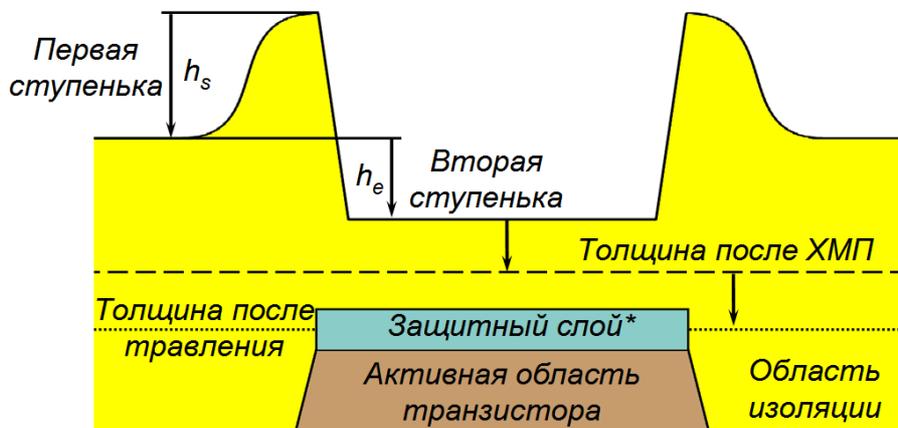


Рисунок 6 – Вертикальный разрез структуры активной области перед операцией ХМП (\* – в данном случае защитный слой играет роль маски в процессе травления)

Следует обратить внимание, что в данном процессе защитный слой необходим только для обеспечения селективности при травлении. Травление же по обратной маске позволяет уменьшить объем удаляемого перед операцией ХМП материала, что в свою очередь снижает размер конечной ступеньки. Однако если области топологического слоя СБИС имеют различную плотность заполнения, а расстановка структур заполнения в областях с низкой плотностью запрещена правилами проектирования, то после операции ХМП величина разброса толщины окисла в изоляционных канавках может быть все же выше допустимого значения (данная проблема присуща также и стандартной *STI* технологии). В таком случае для ее снижения можно использовать различные варианты локальной модификации метода обратной маски. Это значит, что если обычно при травлении по обратной маске ее получают прямой инверсией топологии транзисторных областей, то с целью повышения их планарности в зонах с низкой плотностью заполнения шаблон обратной маски следует выполнить не путем простой инверсии, а с некоторым сужением (рисунок 7).

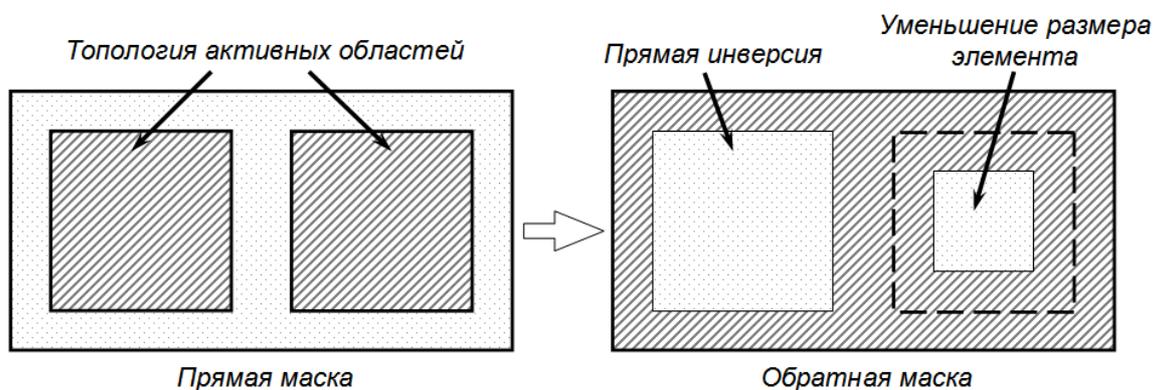


Рисунок 7 – Уменьшение размеров элементов на обратной маске для повышения планарности после операции ХМП

Другим вариантом модификации обратной маски является полное или частичное объединение открытых областей на обратной маске (рисунок 8) для той части площади кристалла, где плотность заполнения транзисторными областями достаточно высока. При этом для того, чтобы травление по такой маске не привело к переносу рельефа в донную

часть области вскрытия, топология транзисторных областей должна отвечать следующему требованию: расстояние между транзисторными областями, для которых на обратной маске будет проводиться объединение должно быть меньше, чем расстояние, при котором происходит смыкание боковых фронтов осаждаемого диэлектрика (см. рисунок 9). Если данное условие выполняется, то поверхность кристалла в данной области можно считать локально планарной. Это позволяет проводить процесс травления и между транзисторными областями. В этом случае размер области вскрытия в инверсном слое (определяется параметрами операции ХМП) должен быть таковым, чтобы в процессе планаризации не получить чрезмерного удаления окисла.

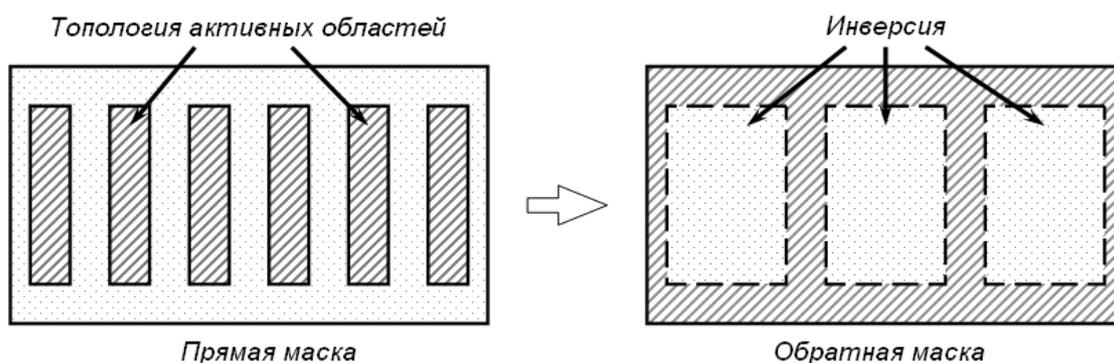


Рисунок 8 – Частичное объединение элементов на обратной маске

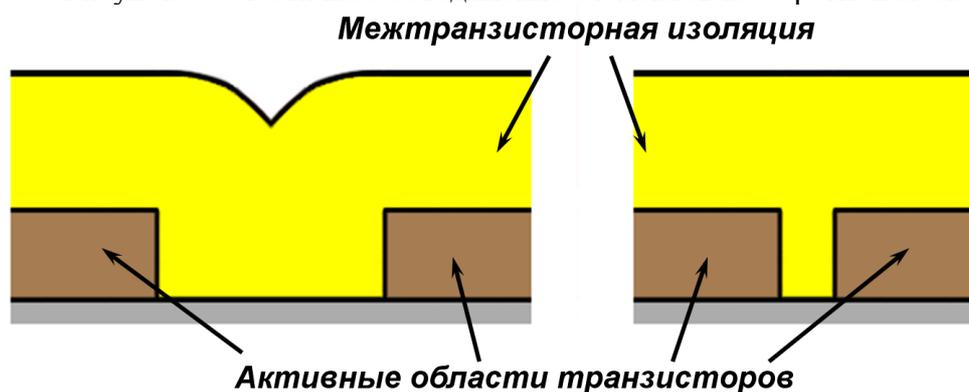


Рисунок 9 – Объединение уширения при CVD-процессе

Однако такое изменение размеров элементов на шаблоне обратной маски возможно только с использованием моделирования операции ХМП и требует наличия адекватной модели.

В заключение следует отметить, что для *STI*-процесса с двойной ступенькой в рельефе поверхности кристалла перед операцией ХМП применяемые материалы по сравнению с процессом формирования многоуровневой металлизации остались прежними, однако начальная конфигурация вертикального профиля формируемой структуры изменилась. Из этого следует, что использовать предложенную ранее в [4] полиномиальную модель в данном случае возможно. Однако в связи с изменением начального рельефа поверхности требуется ее доработка, поскольку в случае, когда при планаризации в некоторой области первая ступенька оказывается полностью удаленной, скачком изменяется плотность заполнения и, следовательно, скорость удаления материала.

## Заключение

В дальнейшей работе по моделированию операции ХМП необходима модификация ранее разработанной модели применительно к случаю наличия двойной ступеньки в исходной *STI*-структуре. Это даст возможность проводить как оптимизацию размещения структур заполнения, так и оптимизацию размеров элементов обратной маски, что в свою очередь позволит минимизировать разброс толщины остаточного диоксида кремния между островками активных структур в процессе формирования межтранзисторной изоляции.

## Литература

1. Гладких А.А. *Алгоритм расчета локальной плотности заполнения топологии субмикронных СБИС для оптимального размещения dummy-структур* – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, Сборник трудов Третьей Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия», 2010. – стр. 256-267. ISBN 978-5-7038-3453-4
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. – 228 p.
3. Амирханов А.В., Волков С.И., Гладких А.А., Демин С.В., Родионов И.А., Столяров А.А. Оптимизация плотности заполнения топологии слоев СБИС, направленная на повышение стабильности технологического процесса химико-механической планаризации. – М., НИИСИ РАН, Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты, 2009. – стр. 50-55.
4. Гладких А.А. Анализ повторяемости и точности моделирования операции химико-механической планаризации слоя двуокиси кремния. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 13-я Молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011», 2011. – стр. 324-338
5. Brian Lee, Ph. D. *Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Shallow Trench Isolation*
6. S. Wolf, *Silicon Processing for the VLSI Era: Vol. 2 - Process Integration*, Lattice Press, Sunset Beach CA, Chapter 13, 1990.
7. T. H. Smith. *Device Independent Process Control of Dielectric Chemical Mechanical Polishing*. – Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 162 p.

## СПОСОБЫ ВЗВЕШИВАНИЯ МИКРО И НАНО ОБЪЕКТОВ

**Черников А.В.**

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

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

## WEIGHING METHODS FOR MICRO AND NANO OBJECTS

**Chernikov A.V.**

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

IU4, BMSTU, Moscow, Russian Federation

### **Аннотация**

Настоящая работа посвящена способам взвешивания микро и нано объектов. Способы взвешивания основаны на измерении собственных резонансных частот измерительных элементов – кантилеверов и измерении сопротивления тензорезисторов сформированных в объеме кантилеверов.

### **Abstract**

The present work is devoted to a weighing methods for micro and nano objects. Weighing methods are based on measurement of own resonance frequencies of measuring elements – cantilevers and measurement of resistance of resistors strain gates generated in volume of cantilever.

В настоящее время в научных исследованиях и технических приложениях все чаще делается акцент на использование микроминиатюрных измерительных устройств. Английские аббревиатуры MEMS и NEMS, которыми обозначают соответственно микро- и нано электромеханические системы, все чаще встречаются в самых разных областях науки и техники. Эти микроскопические измерительные устройства имеют рекордные параметры и характеристики по сравнению с их макроскопическими аналогами. Они открывают путь к исследованиям в новых областях науки и техники и делают возможными реализацию таких технологий, которые еще совсем недавно казались фантастикой. Одной из современных технических проблем является регистрация малых масс.

*Один из вариантов* ее решения основывается на сканирующей зондовой микроскопии. Были предложены различные микроскопические резонансные системы, которые, согласно теоретическим оценкам, позволяют достичь порога чувствительности в  $1 \text{ дальтон} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  [1-5].

Высокочувствительные резонансные системы могут основываться на различных физических принципах. В качестве таковой используется комплекс на основе сканирующего зондового микроскопа «Solver» P-47-PRO фирмы «НТ МДТ» (Россия) и потенциальные технические характеристики такого комплекса.

Платформа «Solver» – это платформа сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) которая предназначена для исследования свойств поверхности различных объектов в масштабе нанометров. Она позволяет визуализировать и количественно измерять механические (твердость, упругость, вязкость и т.д.), электрические (проводимость, емкость, распределение поверхностного заряда и т.д.) и магнитные свойства объектов с размерами от нескольких микрон до единиц ангстрем. В арсенале платформы «Solver» имеется более 40 измерительных методик, которые можно использовать для исследований поверхности объектов как в неконтролируемой по составу газовой среде, так и в контролируемой среде, а также в жидкости.



Рисунок 1 – СЗМ «Solver» P47-PRO [[www.ntmdt.com](http://www.ntmdt.com)]

Особенностью СЗМ «Solver» P47-PRO является его универсальность и гибкость. Число измерительных методик и способов воздействия на поверхность достигает несколько десятков. Схема сканирования зондом позволяет исследовать образцы размерами до  $10 \times 10 \times 2$  мм. Измерительная головка может быть использована для работы в качестве выносной измерительной системы (*stand alone*). Таким образом, прибор успешно используется для исследований в медицине и биологии, исследовании материалов, изучении различных покрытий и тонких пленок, полимеров и наноструктур, химии и химической промышленности, физике и т.д. Прибор можно использовать как в небольших компаниях и университетских лабораториях, так и в больших исследовательских центрах.

Сканирование в СЗМ «Solver» P47-PRO осуществляется при помощи СЗМ-зондов. Изображение нескольких таких СЗМ-зондов приведено на рисунке 2.

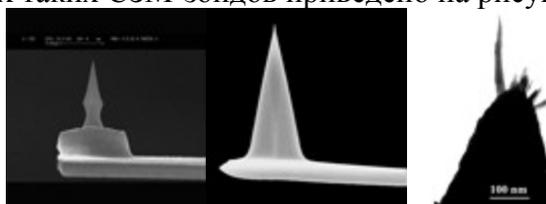


Рисунок 2 – Кантилеверы для СЗМ [[www.ntmdt.com](http://www.ntmdt.com)]

В качестве основы для реализации микромеханической системы был выбран кантилевер NSG-01/Au, изображение которого показано на рисунке 3.

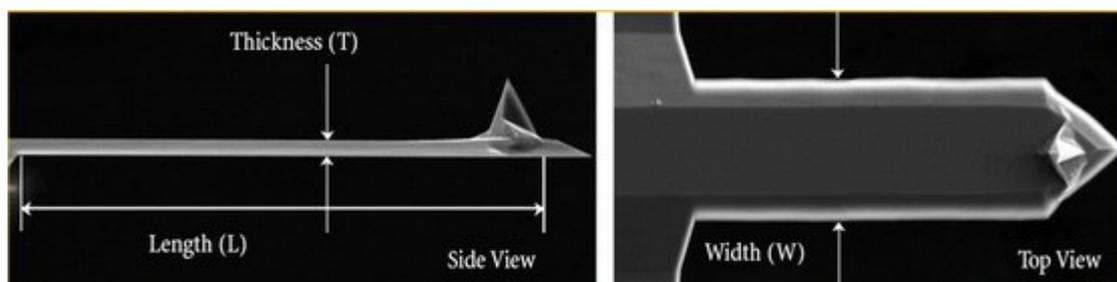


Рисунок 3 – Кантилевер NSG-01/Au

В результате проведенного исследования адгезии паров этилового спирта  $C_2H_5OH$  и воды  $H_2O$  кантилевером NSG-01/Au минимальная масса, детектируемая данной микромеханической системой, составила  $53 \times 10^8$  молекул первого и  $95 \times 10^9$  молекул второго вещества.

Для создания микромеханической системы резонансного взвешивания, позволяющей измерять с большей точностью, необходимо применять кантилеверы определенной геометрической формы. Изображения кантилевера для резонансного взвешивания приведено на рисунке 4.

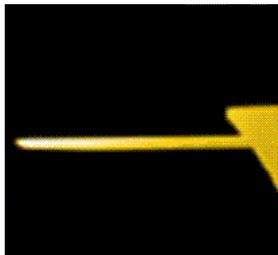


Рисунок 4 – Кантилевер NSG-11\_tipless [www.ntmdt.ru]

На приведенном выше рисунке изображен так называемый «tipless»-зонд, то есть кантилевер, лишенный иглы на конце консоли. Данной упрощение позволяет более точно вычислить собственные резонансные частоты кантилевера –  $f_0$ , определение геометрического момента инерции консоли –  $I$ , константу жесткости консоли –  $k$ , присоединенную массу –  $\Delta m$ .

Тогда присоединенную к кантилеверу массу можно измерять с точностью до  $\Delta m = 2.17 \times 10^{-17}$  кг. При уменьшении длины кантилевера в 2 раза до его собственной резонансная частота будет иметь величину  $f_0 = 306,7$  кГц, а измерение присоединенной массы к кантилеверу можно измерять с точностью до  $\Delta m = 3.55 \times 10^{-18}$  кг.

Заметим, что данная присоединенная масса соответствует 0,01 от массы молекулы ДНК. Известно, что молекулы ДНК являются самыми крупными биологическими молекулами. Их длина составляет от 0,25 (у некоторых бактерий) до 40 мкм (у человека). Это значительно больше самой крупной молекулы белка, которая в развернутом виде достигает длины не более 100–200 нм. Поскольку масса средней по величине молекулы ДНК составляет  $6 \times 10^{-15}$  кг, то она может быть достаточно легко протектирована с помощью метода резонансного взвешивания.

Для осуществления процесса измерения присоединенной к микромеханической системе массы необходимо использовать специальные активные адгезивные слои, наносимые на поверхность кантилеверов. Анализируемое вещество должно вступать в химическую реакцию с активным слоем на поверхности кантилевера, в результате которой оно должно “присоединиться” к его поверхности.

В качестве одного из вариантов активного слоя для детектирования газа  $H_2$ , возможно использование скрученного углеродного нановолокна. Известно, что углеродные нанотрубки имеют структуру в виде тонкого свернутого в трубку тонкого слоя углерода. Такие структуры помимо прочих свойств могут выступать в роль топливной ячейки для хранения водорода и получения чистого источника энергии. Микрофотография реализации присоединения углеродных нанотрубок к концу кантилевера приведена на рисунке 5.

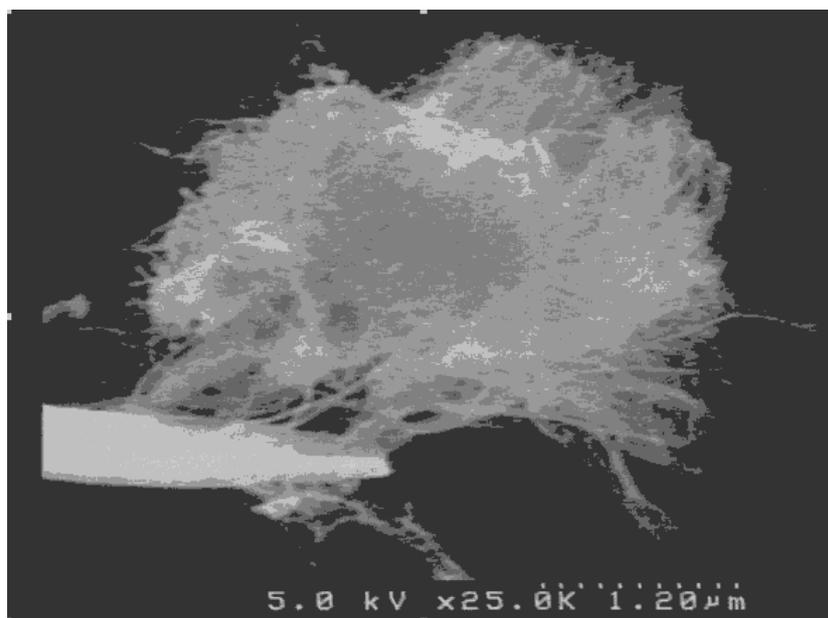


Рисунок 5 – Углеродные нанотрубки, присоединенные к поверхности кантилевера [2]

Помимо сказанного ряд других веществ–полимеров аналогичным образом могут применяться в качестве активного слоя кантилевера. Данные по покрытиям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Покрытия для кантилеверов, наносимые из растворов

	Покрытие	Раствор
1	Карбоксиметилцеллюлоза ( <i>CRC</i> )	Вода
2	Поливиниловый спирт ( <i>PVA</i> )	Вода
3	Поливинилпирролидон ( <i>PVP</i> )	Этанол
4	Поливинилхлорид ( <i>PVC</i> )	Ацетон
5	Полиуретан ( <i>PU</i> )	Дихлорметан
6	Полистирол ( <i>PS</i> )	-
7	Пара-метоксиметамфетамин ( <i>PMMA</i> )	-

Увеличения точности измерений можно добиться и посредством использования массива микрокантилеверов расположенных на одной балке. В этом случае часть из них покрывается активным слоем, а часть - инертным, таким как золото или платина. Точное значение присоединенной массы вычисляется как разница собственных резонансных частот микрокантилеверов. В этом случае исключается влияние температурного дрейфа. Пример реализации такого массива микрокантилеверов приведен на рисунке 6.

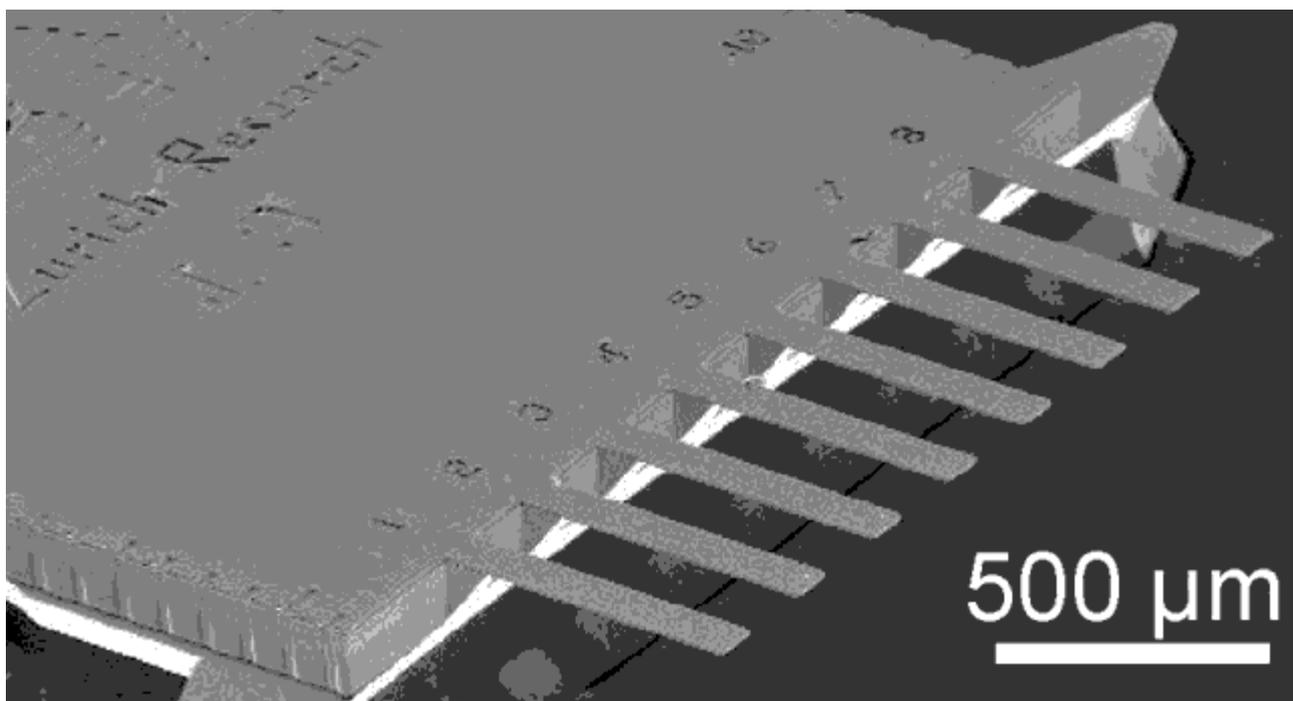


Рисунок 6 – Массив микрокантилеров [6]

Наилучшими покрытиями для детектирования паров воды являются полимеры *PVA*, *CMC* и *PVP*. Вследствие адсорбции водяных паров данными полимерами происходило и изменение собственной резонансной частоты кантилевера. Помимо этого наблюдалось и изменение поверхностного напряжения между активным слоем и кантилевером, которое приводило к его изгибу.

Наилучшим покрытием для детектирования спиртов и алканов является *PVC*.

Альтернативным вариантом решения проблемы детектирования малых масс является использование микромеханических систем основанных на использовании пьезорезистивного способа определения отклонения кантилевера [2]. Принцип измерения отклонения кантилевера представлен на рисунке 7.

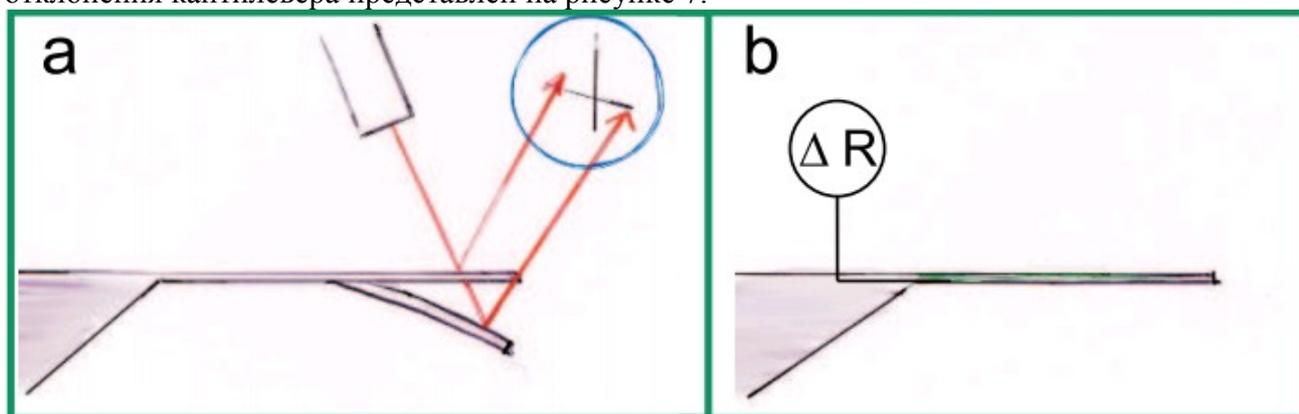


Рисунок 7 – Принципы измерения отклонения микрокантилевера:  
*a*- оптический, *b* – при помощи интегрированного пьезорезистора

Пьезорезисторы интегрируются в кантилевер в виде тонкого слоя легированного поликремния, формируемого на верхней поверхности датчика. Номинальные значения сопротивления пьезорезистора 6 кОм. Для дальнейшей работы датчика в жидкостях поверхность микрокантилевера покрывается слоем нитрида или оксида кремния. Результирующая структура такого многослойного датчика-биосенсора показана на рисунке 7.

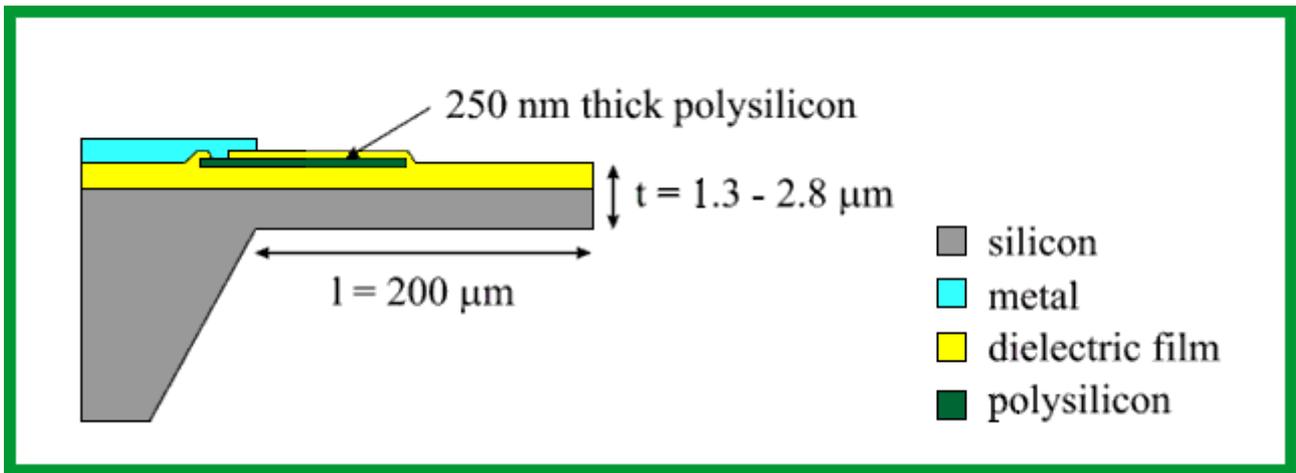


Рисунок 7 - Многослойная структура микрокантилевера с интегрированным пьезорезистором

От толщины слоев микрокантилевера зависит чувствительность самого датчика-биосенсора. Типовые параметры составляющих его слоев представлены в таблице 2

Таблица 2 – Толщины слоев микрокантилевера

Слой	Толщина, мкм
Верхнее покрытие ( $Si_3N_4$ )	0.12
Диэлектрик ( $SiO_2$ )	0.095
Резистор (Poly Si $p^+$ )	0.36
Диэлектрик ( $SiO_2$ )	1.0
Основа (Poly Si)	0.5

При использовании пьезорезистивного датчика измерение выходного параметра производится при помощи моста Уитстона. В этом случае сам пьезорезистор включается в одно из плеч моста, а два дополнительных резистора, размещенных на теле датчика, эквивалентны пьезорезисторам, размещенным в кантилеверах.

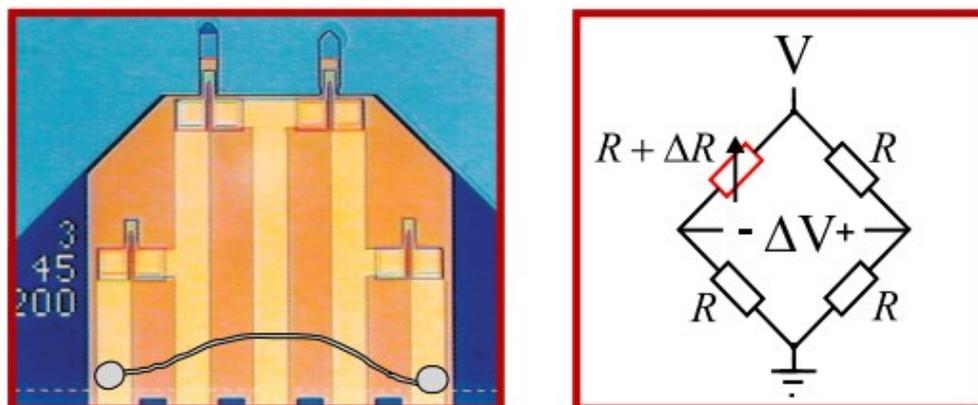


Рисунок 8 – Оптическое изображение датчика (вид сверху)

Как показано на рисунке 8, резисторы расположены в основании микрокантилеверов и за ними на теле датчика. Все резисторы объединяются в мост Уитстона. Измерение изменения напряжения на мосте -  $\Delta V$  - это непосредственное измерение изменения сопротивления измерительного кантилевера -  $\Delta R$ .

При условии, что  $\Delta R \ll R$ , значение выходного напряжения может быть вычислено по формуле:

$$\Delta V = 0,25 * V * (\Delta R / R), \quad (1)$$

где  $V$  - напряжение, подводимое к мостовой схеме измерения.

Для случая молекулярной диагностики обычное напряжение питания, подаваемое на мост Уитстона составляет 4V. При данном значении питающего напряжения отношение сигнала к шуму близко к оптимальному.

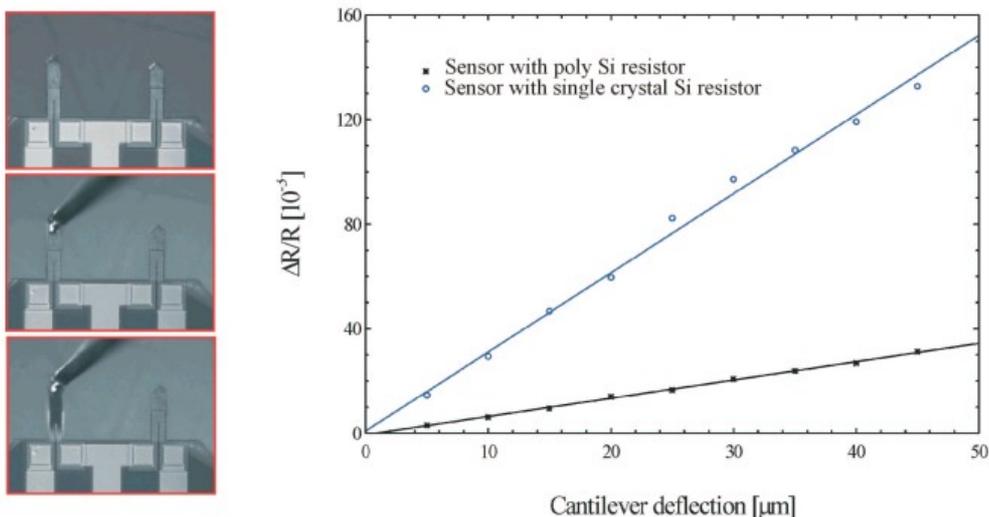


Рисунок 9 - Относительное изменение сопротивления как функции изгиба

В левой части рисунка 9 показан процесс изгиба микрокантилевера при помощи микроманипулятора. На этом же рисунке приведен график зависимости чувствительности двух сенсоров на основе монокристаллического и поликристаллического Si-пьезорезистора.

На рисунке 10 представлено второе поколение биодатчиков на основе микрокантилеверов с пьезорезисторами. На нем показана конструкция биодатчика, получившего название «FagPakke».

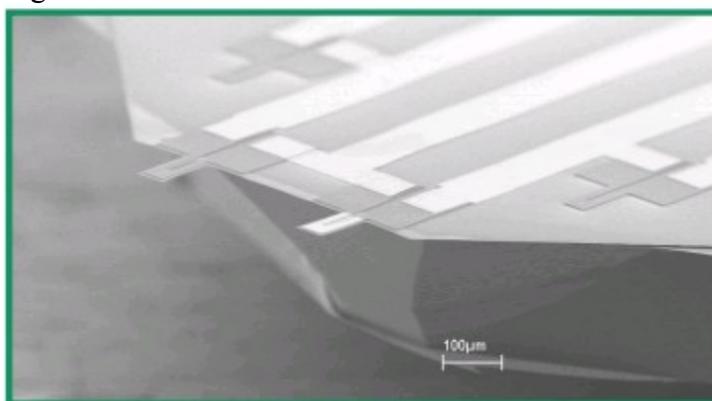


Рисунок 10 – Изображение биодатчика 2-го поколения, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа

Она включает в себя два геометрически одинаковых кантилевера, которые с целью увеличения чувствительности по всей длине покрыты пьезорезисторами. Верхняя поверхность кантилевера покрыта слоем золота, используемым в качестве материала адсорбирующего детектируемые молекулы вещества.

Подводя итог, можно заключить что резонансное взвешивание микро- и нанообъектов основанное на изменении резонансной частоты используемой микромеханической системы является предпочтительным. Чувствительность зависит от ряда параметров: собственной резонансной частоты используемых кантилеверов, коэффициента жесткости кантилеверов и точности самого измерительного оборудования. Первый параметр оказывает наибольшее влияние на чувствительность микромеханической системы.

Экспериментально была детектирована присоединенная к кантилеверу масса порядка  $10^9$  молекул этилового спирта  $C_2H_5OH$  и  $10^{11}$  молекул воды  $H_2O$ . Теоретически возможный предел детектирования массы составляет порядка  $10^{-20}$  кг, что соответствует

массе сложного полимера или молекулы ДНК. Данный факт доказывает возможность применение микромеханических систем, основанных на резонансном взвешивании для молекулярной диагностики.

Исследованы пути повышения точности детектирования присоединенной массы.

Путь 1-й – использование специальных активных покрытий, наносимых на поверхность кантилевера, для улучшения адгезии анализируемого вещества или адгезии строго определенного вещества.

Путь 2-й – использование массивов микрокантилеверов, в которых часть из них покрывается активным слоем, а часть - инертным для анализируемого вещества слоем, например пленкой золота Au или платина Pt. Данный способ позволяет исключить температурный дрейф микромеханической системы.

Чувствительность метода резонансного взвешивания увеличивается с уменьшением габаритных размеров кантилеверов. На данный момент разработаны технологии получения кантилеверов с заданными механическими свойствами ультратонких однокристалльных кремниевых кантилеверов, толщиной 60 нм. Увеличение чувствительности является серьезной проблемой.

Путь 3-й – изготовление собственных микрокантилеверов с заданными механическими свойствами.

## Литература

1. Ekinci K.L., Yang Y.T., Roukes M.L. Ultimate limits to inertial mass sensing based upon nanoelectromechanical systems // J. Appl. Phys. 2004. P. 95, 5.

2. Drummond T.G., Hill M.G., Barton J.K. //Nature Biotechnology. 2003. P. 21, 10, 1192-1199.

3. А.И.Власов, А.А.Денисов, К.А.Елсуков Бионаноинженерия: Учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. - 224 с.: ил. (Библиотека "Наноинженерия": в 17 кн. Кн.15).

4. Власов А.И., Елсуков К.А., Шахнов В.А. Интеллектуальный комплекс молекулярной диагностики // Альманах современной науки и образования - Тамбов: "Грамота", 2008. - №7(14): Математика, физика, строительство, архитектура, технические науки и методика их преподавания. С.43-45.

5. Власов А.И., Елсуков К.А., Шахнов В.А. Программно-технический комплекс молекулярной диагностики// Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: тезисы докладов 7-ой международной конференции - Москва, 11-13 марта 2008 г. - М.: Машиностроение, 2008. - 208 с.: ил. С.165-167.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ В ТЕХНОЛОГИИ КНИ

Захаров Е.В.

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

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

*Морозов С.А., Соколов С.А.*

НИИСИ РАН, Москва, Российская Федерация

## RESEARCH METHODS IN CREATION OF CAPACITOR IN SOI TECHNOLOGY

Zaharov E.V.

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

BMSTU, Moscow, Russian Federation

*Morozov S.A., Sokolov S.A.*

SRISA RAS, Moscow, Russian Federation

### Аннотация

В статье изложены результаты исследования по созданию конденсаторов в технологии КНИ, а также приводятся результаты измерения тестовых структур разной геометрии, изготовленных по технологии 0,35мкм КНИ.

### Abstract

In the paper presents the results of studies on the establishment of capacitors in SOI technology, as well as the results of measurements of test structures with different geometries fabricated on SOI technology 0.35um.

### Введение

Конденсаторы широко используются в радиоэлектронной аппаратуре для самых различных целей. В технологии «кремний на изоляторе» (КНИ), конденсаторы представляют собой трехслойную структуру, в которой наружные слои формируются из проводящего материала, а внутренний слой – из диэлектрика.

В качестве конденсаторов также может быть использован либо один из электронно-дырочных переходов биполярного транзистора, либо транзисторная структура типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). В МДП-структуре роль нижней обкладки конденсатора выполняет область подложки, а роль межслойного диэлектрика играет подзатворный слой двуокиси кремния  $SiO_2$ . Наконец, роль верхней обкладки конденсатора играет слой поликремния.

Помимо сказанного выше существуют разновидности КНИ-технологии, в которых для формирования емкостной структуры используются два слоя поликремния. В них роль обкладок конденсатора выполняют слои поликремния, а роль изолирующего диэлектрика – слой двуокиси кремния, разделяющий оба поликремниевых слоя.

Таким образом, все конденсаторные структуры, которые можно изготовить с помощью технологий микроэлектроники, можно условно разделить на следующие три группы:

### **Конденсаторы, выполненные с использованием слоев металлизации.**

В технологии КНИ наименьшая толщина разделительного диэлектрика у подзатворного окисла и у разделяющего два слоя поликремния диэлектрика. А так как величина емкости конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между его обкладками, то конденсаторы, выполненные на МДП структурах и на двух слоях поликремния имеют большую удельную емкость на единицу площади, чем конденсаторы, выполненные на слоях металлизации.

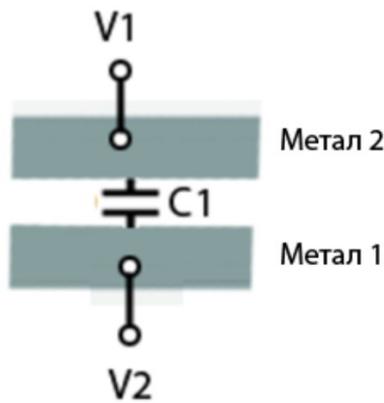


Рисунок 1 – Структура конденсатора, выполненного на слоях металлизации.

- 1) Конденсаторы, выполненные на МДП-структурах.

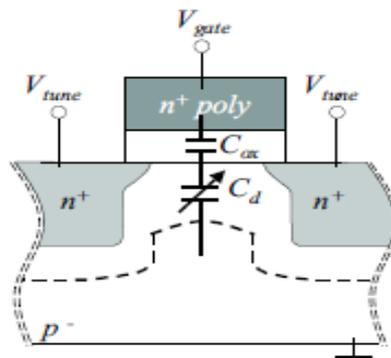


Рисунок 2 – Структура конденсатора, выполненного на МДП-структуре.

- 2) Конденсаторы, выполненные на двух слоях поликремния

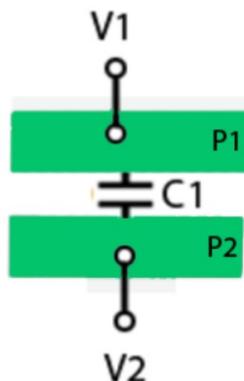


Рисунок 3 – Структура конденсатора, выполненного на двух слоях поликремния (P1 и P2).

Емкость конденсаторов, сформированных на слоях металлизации, также как и емкость конденсаторов, выполненных на двух слоях поликремния, практически не зависит от внешнего приложенного напряжения. В отличие от них емкость конденсаторов, выполненных на МДП структурах, сильно зависит от напряжения, приложенного к их обкладкам. Она объясняется тем, что в зависимости от величины внешнего напряжения МДП-структура оказывается либо в подпороговой области, либо в линейной области, либо в области насыщения. При этом в зависимости от состояния МДП-структуры расстояние между зарядами, образующими обкладки конденсатора, будет различным. Именно поэтому конденсаторы на МДП-структурах применяются в генераторах, управляемых напряжением, в качестве варакторов [1].

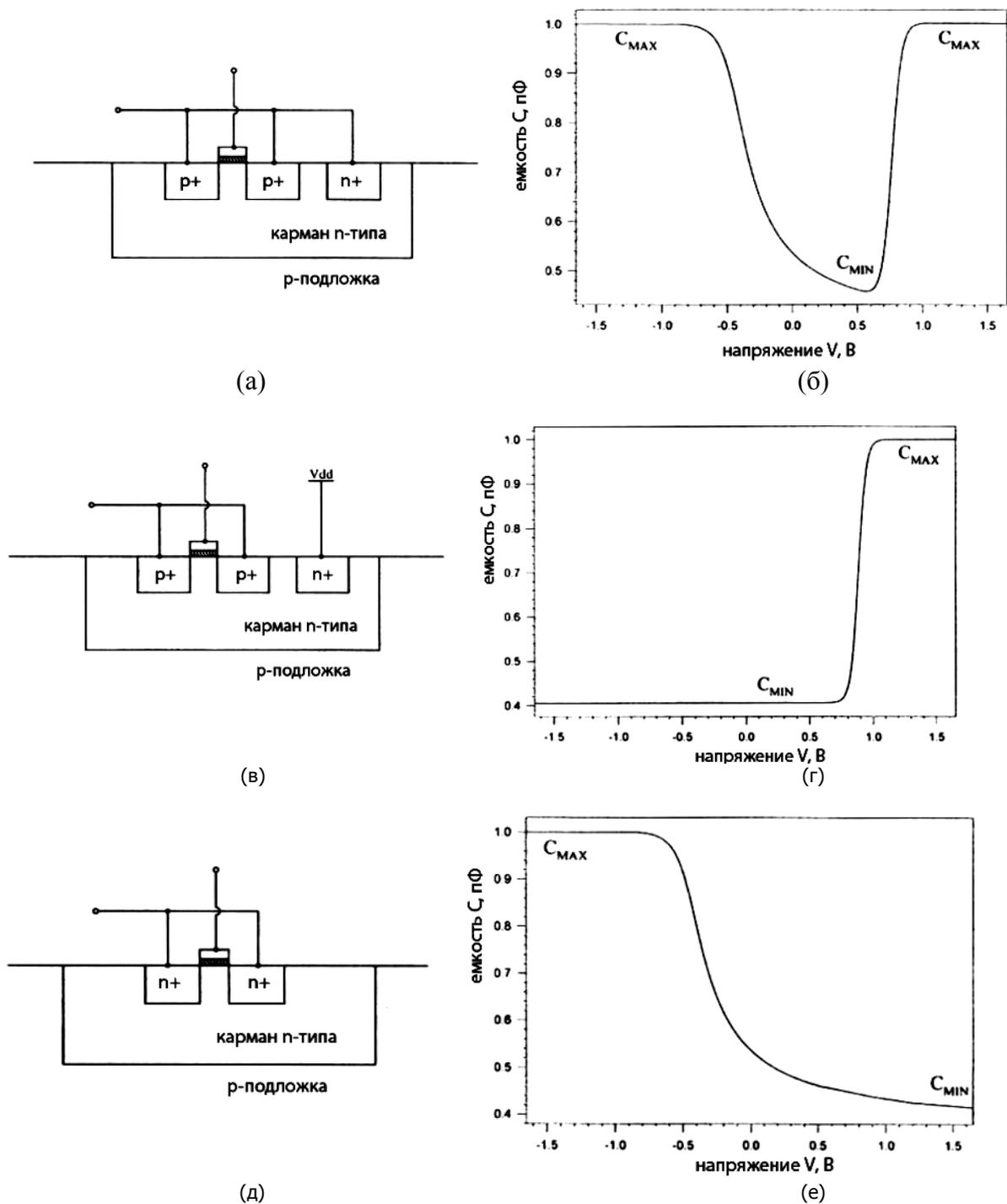


Рисунок 4 – C-V кривые (б,г,е) зависимости емкости МДП-структуры при различных схемах включения

Изготовление конденсаторов на двух слоях поликремния связано с дополнительными технологическими сложностями. По этой причине такие структуре целесообразно применять в КНИ технологии, используемой для производства аналоговых схем.

На величину емкости конденсатора, выполненного на МДП-структурах, сильное влияние оказывает схема их включения [2]. Основные схемы включения МДП-структуры в качестве емкости приведены на рисунке 4.

На рисунке 5 представлен результат измерения емкости тестовой МДП-структуры включенной по схеме (д) рисунка 4. При этом площадь тестовой структуры составляла 12485 мкм<sup>2</sup>.

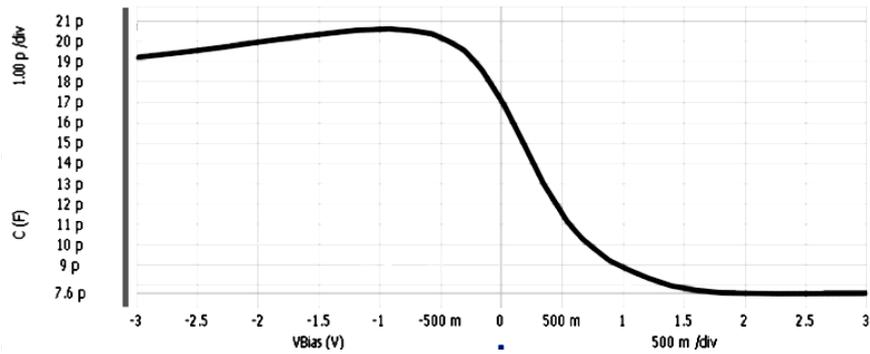


Рисунок 5 – Результаты измерения емкости конденсатора тестовой структуры

Как видно из рисунка 5 C-V-характеристика структуры идентична той, которая показана на рисунке 4(е) с той лишь разницей, что в силу погрешности измерений при отрицательных напряжениях максимальное значение емкости не соответствует самому большому отрицательному напряжению.

Для получения симметричной характеристики изменения емкости конденсатора в зависимости от приложенного между его обкладками напряжения применяют параллельное соединение двух конденсаторов, выполненных на МДП-транзисторах с дополняющими типами проводимости канала. На рисунке 6 приведены результаты измерения емкости такого конденсатора.

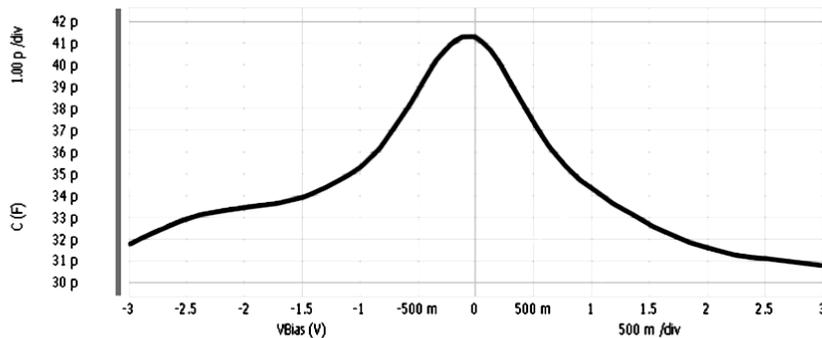


Рисунок 6 – Результаты измерения емкости конденсатора тестовой структуры, выполненной на МДП-транзисторах с дополняющими типами проводимости каналов

Для увеличения удельного значения емкости конденсатора на единицу площади возможно применение следующих методов:

**1) использование «гребенчатой» структуры.**

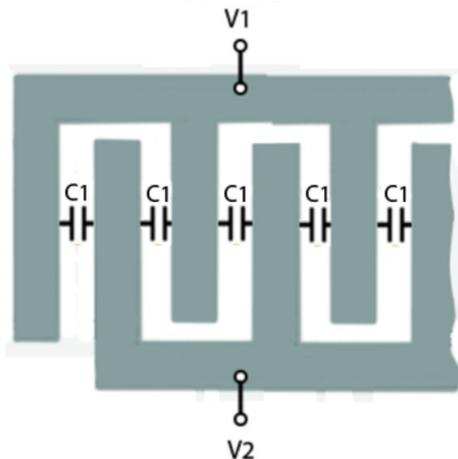


Рисунок 7 – Схема конденсатора «гребенчатой» конструкции

2) создание многослойных конденсаторов.

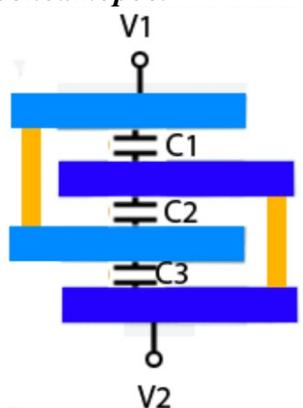


Рисунок 8 – Конструкция многослойного конденсатора, выполненного на слоях металлизации

На рисунке 7 изображен конденсатор «гребенчатой» конструкции, изготовленный на одном слое металла. В таком конденсаторе емкость будет возникать между соседними боковыми гранями металлической пленки, которые в данном случае выступают в роли обкладок конденсатора. По этой причине суммарная емкость в таком конденсаторе будет пропорциональна площади контакта между соседними гранями. При этом уменьшение ширины слоя металлизации, не изменяя емкости конденсаторной структуры, позволяет уменьшить занимаемую им площадь. Сокращение же расстояния между металлическими гранями позволяет одновременно и уменьшить занимаемую им площадь и увеличить его емкость. По этой причине данный метод наиболее эффективен в случае изготовления конденсатора по минимальным проектным нормам.

Другой способ увеличения удельной емкости конденсатора показан на рисунке 8. В многослойном конденсаторе слои соединяются попарно, что соответствует параллельному соединению отдельных конденсаторов, в результате чего их емкости будут складываться. По этой причине использование нескольких слоев металлизации дает очевидное увеличение удельной емкости конденсатора на единицу площади.

Для оценки эффективности использования конденсаторов обоих типов были изготовлены тестовые образцы указанных структур и проведены измерения их емкости. Обе структуры на кристалле имели одинаковые площади. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения емкости конденсаторных структур различной конструкции

		Гребенчатая конструкция	Сплошная конструкция
Среднее значение емкости конденсатора, выполненного на слоях металлизации		3,95 пФ	1,495 пФ
Емкость конденсатора, выполненного на МДП-структуре	минимальная	32,9 пФ	31,8 пФ
	максимальная	48,2 пФ	41,2 пФ

Как видно из таблицы 1 для конденсаторов, выполненных на слоях металлизации, применение гребенчатой конструкции дает увеличение удельного значения емкости более чем в 2 раза. В то время как для конденсаторов, выполненных на МДП-структурах, гребенчатая конструкция позволяет повысить удельное значение емкости в среднем только на 15%.

**Заключение**

Рассмотрены возможные конструкции конденсаторных структур, реализуемых по технологии КНИ. Показаны способы увеличения их емкости. Представлены результаты измерения тестовых структур конденсаторов различной конструкции, по результатам которых можно сделать выводы о целесообразности применения конденсаторов гребенчатой конструкции на МДП-структурах, как имеющих самую большую удельную емкость.

### Литература

1. **Inigo Gutierrez, Juan Meléndez and Erik Hernández**, Varactors and inductors for integrated RF circuits in standard MOS technologies, 2002, Universitat Der Bundeswehr Munchen, 168p.
2. R.L. Bunch, S.Raman. Large-Signal Analysis of MOS Varactors in CMOS –Gm LC VCOs, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.38, №.8, AUGUST 2003, pp.1325-1332

# 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ О-ТИПА С СУБМИКРОННЫМИ РАЗМЕРАМИ ОБЛАСТЕЙ

**Зотов С.К.**

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

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

*к. ф.–м. н. Амирханов А.В.,*

НИИСИ РАН, Москва, Российская Федерация

## 3D-MODELLING OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SUBMICRON SOI MOSFET O-TYPE

**Zotov S.K.**

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

IU4, BMSTU, Moscow, Russian Federation

*Candidate of physicomathematical science Amirkhanov A.V.,*

SRISA RAS, Moscow, Russian Federation

### **Аннотация**

Работа посвящена трехмерному моделированию электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов О-типа с использованием новой методики построения сетки в системе TCAD, которая основана на использовании стандартных средств генерации сетки системы TCAD и предлагаемых алгоритмов выделения областей разбиения с использованием топологических масок и выделения областей р-п-перехода при построении трехмерной сетки.

### **Abstract**

The present work is devoted to the three-dimensional modeling of the electrical characteristics of SOI MOSFET O-type using a new method of constructing a grid in the TCAD, which is based on standard TCAD system grid generating facilities and proposed algorithms of areas highlighting with use of topological masks and pn-junction isolation in the construction of three-dimensional grid.

В настоящее время микроэлектроника является одной из наиболее динамично развивающихся и востребованных отраслей науки и техники. Элементы современных СБИС представляют собой сложные структуры, в основу функционирования которых положены разнообразные физические эффекты. При этом с каждым годом увеличивается количество транзисторов на единицу площади и, следовательно, уменьшаются размеры транзисторов, и увеличивается сложность проектируемых микросхем.

Одной из трудоемких задач в производстве СБИС является получение динамических, в частном случае емкостных характеристик МОП-транзисторов. При использовании измерительных комплексов емкость МОП-транзисторов сопоставима с погрешностью измерения, что приводит к искаженным результатам. Вследствие этого для получения вольт-фарадных характеристик транзисторов важнейшим инструментом становится компьютерное моделирование.

Построение модели и расчет электрических характеристик различных элементов СБИС проводят с использованием САПР конструктивно-технологического моделирования. В настоящее время существует несколько таких систем, называемых *TCAD (Technology Computer Aided Design)*, разработанными фирмами *TMA Inc.* (США), *ISE Integrated Systems Engineering AG* (Швейцария), *Synopsys Inc.* (США) и *Silvaco International* (США). Эти системы обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса производства СБИС.

Для расчета электрических характеристик КНИ МОП-структур применяется трехмерное моделирование в системе *TCAD*. На каждом этапе необходимо решить ряд задач, обеспечивающих получение электрических характеристик с приемлемой точностью. Одной из наиболее важных задач, которую требуется решить при моделировании трехмерной структуры любого компонента СБИС, является генерация сетки для расчета электрических

характеристик, поскольку неверное разбиение структуры приводит к возрастанию погрешности моделирования и, что еще хуже, к расходимости процесса решения системы дифференциальных уравнений.

В наиболее распространенной системе *TCAD Sentaurus* используется метод конечных элементов, который предполагает дискретизацию дифференциальных уравнений на так называемых триангулярных координатных сетках [1].

В этом случае для моделирования электрических характеристик необходимо задать параметры дискретизации, а именно область разбиения и максимальный и минимальный шаг сетки в этой области. При этом, чем больше область и меньше шаги сетки, тем больше узлов в ней будет на выходе генератора сетки, что в свою очередь приводит к увеличению времени расчета электрических характеристик [2].

При двухмерном моделировании возможно выделить всю структуру с минимальным шагом сетки порядка  $1 - 10 \text{ \AA}$ . В этом случае точность расчета электрических характеристик будет зависеть только от используемых моделей, а не от дискретизации структуры. Но применение двухмерного моделирования адекватно только для простых структур таких, как транзистор с плавающим карманом и МОП-конденсатор. Поэтому для расчета электрических характеристик транзисторов сложной конфигурации (рисунок 1) необходимо использовать трехмерное моделирование.

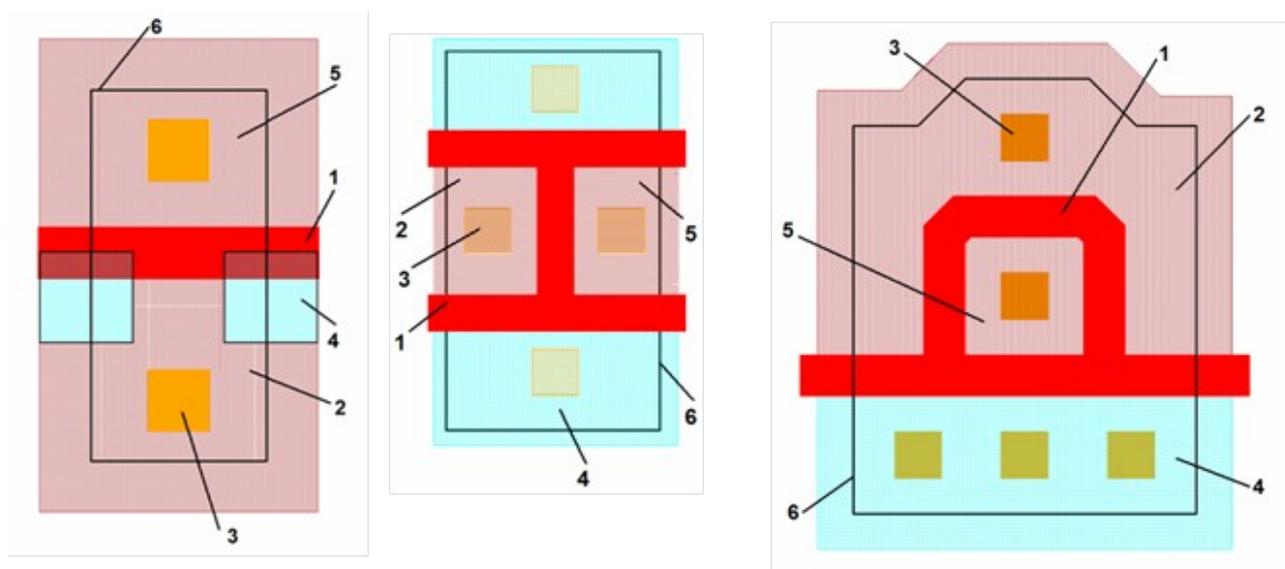


Рисунок 1 - Топологии КНИ МОП-транзисторов А-, Н- и О-типа (слева направо):  
1 – затвор; 2– исток; 3 – контакт к активной области; 4 – контакт к карману; 5 – сток;  
6 – граница активной области транзистора

В случае же трехмерного моделирования, если разбить всю структуру с минимальным шагом порядка  $1 \text{ \AA}$ , то это приведет к избыточному количеству вершин и невозможности расчета электрических характеристик практически на любом вычислительном комплексе. При грубом разбиении получается структура, существенно отличающаяся от начальной, вследствие чего погрешность расчета электрических характеристик составляет порядка  $50 - 100 \%$ . Выходом из данного положения является определение критических областей, в которых разбиение в наибольшей степени оказывает влияние на точность расчета электрических характеристик, и построение в них сетки с наименее возможным шагом.

В результате двухмерного моделирования параметров МОП-структур было установлено, что наибольшее влияние на точность расчета статических характеристик оказывает шаг сетки в приповерхностной области канала и прилегающих *LDD*-областях (рисунок 2). Рекомендуемый размер элемента сетки по оси *Z* для этих областей составляет величину порядка  $1 \text{ \AA}$  [3], поскольку такой размер позволяет корректно учесть эффект

«прижимающего» электрического поля. Однако в случае трехмерного моделирования провести расчеты с таким шагом сетки даже на самом мощном вычислительном комплексе весьма затруднительно, вследствие большого числа узлов в ней и требующихся огромных вычислительных затрат. В итоге был выбран подход, заключающийся в использовании сетки с шагом  $1\text{ нм}$ , который постепенно увеличивается при движении от поверхности канала в глубь МОП-структуры. Рассчитанные электрические характеристики в этом случае корректируются на основе результатов двухмерного моделирования [4].

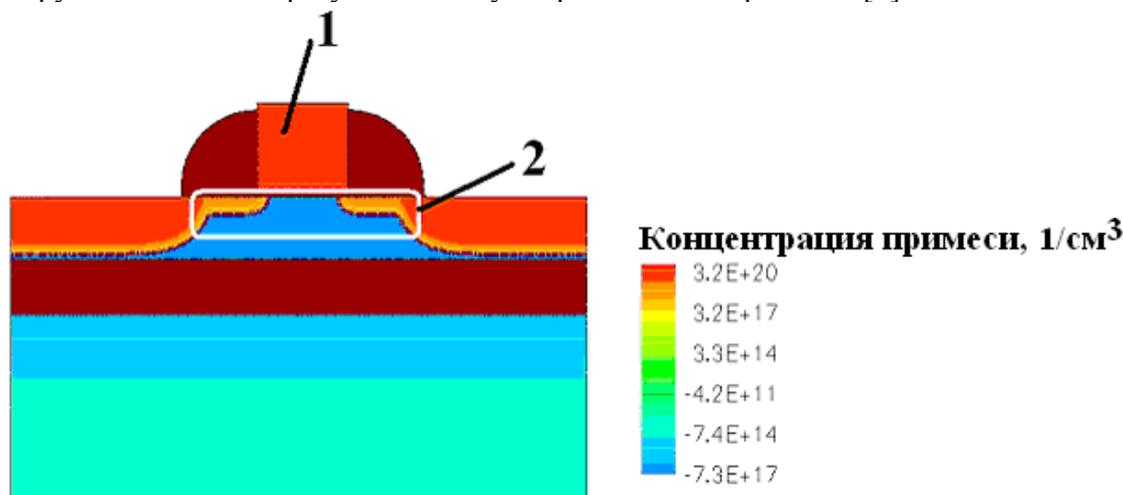


Рисунок 2 - Двухмерная структура КНИ МОП-транзистора:

1 – поликремниевый затвор; 2 – область канала и прилегающие к ней *LDD*-области

Для расчета динамических характеристик необходимо выделить области *p-n*-перехода, так как именно они определяют емкостные параметры структуры. В данном случае, основной задачей при построении сетки является минимизация искажений профиля *p-n*-перехода, полученного при моделировании технологического процесса.

Построение сетки в системе *TCAD Sentaurus* состоит из следующих этапов:

- построение макроэлементов. На данном этапе формируется геометрическая структура;
- построение микроэлементов, удовлетворяющих заданным условиям. Эти условиями представляют собой области разбиения и максимальные и минимальные размеры элементов в этих областях;
- улучшение сетки в смысле Делоне [1]. Данный этап необходим для расчета электрических характеристик.

При формировании геометрической структуры, возможно, выделить критические области, тем самым, обеспечив равномерное распределение узлов в каждой из областей. Однако при таком формировании структуры многократно дублируются одни и те же точки, находящиеся на границе регионов, что ухудшает сходимость итерационного процесса. Таким образом, на первом этапе необходимо формировать структуру, в которой активная область транзистора представляет собой единый геометрический объект.

Основное влияние на распределение узлов в сетке оказывает второй этап, а именно: условия формирования сетки конечных элементов. В связи с этим, основной задачей при построении сетки для трехмерного моделирования является описание регионов ее наиболее мелкого разбиения, но в этом случае в качестве входных параметров необходимо описывать координаты вершин всех геометрических элементов, используемых при генерации сетки.

При проектировании радиационно-стойких СБИС используются КНИ МОП-транзисторы различных конструкций, отличающихся как формой затвора, так и расположением областей контакта к карману транзистора. К таким транзисторам относятся транзисторы А-типа, Н-типа и О-типа.

Наибольшую трудность для расчета электрических характеристик в системе *TCAD* представляет транзистор О-типа, поскольку он имеет затвор сложной формы, что

подразумевает большее количество вершин в моделируемой структуре по сравнению с транзисторами с прямолинейным затвором и необходимость построения в области канала и прилегающих к ней *LDD*-областях сетки конечных элементов сложной конфигурации.

На рисунке 3 показано распределение легирующих примесей в транзисторе *O*-типа, служащее исходными данными для построения сетки и последующего расчета электрических характеристик транзистора данного типа.

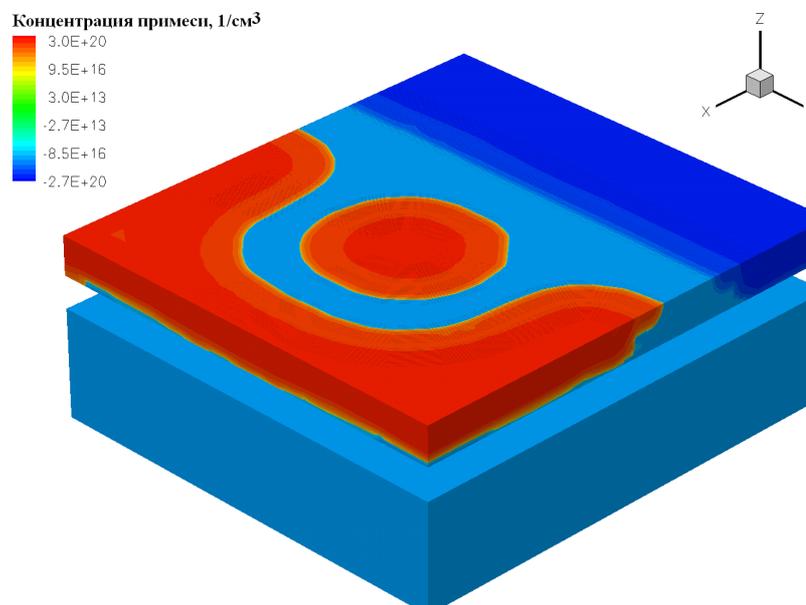


Рисунок 3 - Распределение легирующих примесей в транзисторе *O*-типа, полученное в результате моделирования технологического процесса

Координатная сетка, предназначенная для моделирования электрических характеристик этой структуры, оценивается следующими критериями:

- равномерностью расположения узлов сетки в области канала;
- числом узлов сетки;
- возможностью приповерхностного разбиения области канала;
- возможностью выделения области *p-n*-перехода.

Система *TCAD Sentaurus* предоставляет пользователю три инструмента для генерации сетки: *Mesh*, *Noffset3D* и *SnMesh*. При построении сетки для последующего расчета электрических характеристик используются генераторы *Mesh* и *Noffset3D*, так как *SnMesh* имеет схожий набор параметров, что и *Mesh*, но при этом затраты по времени построения превышают 24 ч, а точность расчета на основе построенной сетки заметно ниже, чем у других инструментов.

Первый генератор сетки *Mesh*, предназначенный для моделирования одномерных, двумерных и трехмерных структур, использует следующие исходные данные:

- положение областей разбиения;
- максимальные и минимальные размеры элементов сетки в этих областях;
- концентрационный профиль структуры.

Участки разбиения задаются посредством описания координат многогранников, что затрудняет выделение криволинейной области. Поэтому для расчета электрических характеристик транзистора *O*-типа область канала была задана 4-мя параллелепипедами. В остальной части структуры сетка была построена с параметрами, используемыми по умолчанию.

Распределение узлов такой сетки в области канала МОП-транзистора неравномерно, что при расчете его электрических характеристик приводит к уменьшению скорости сходимости итерационных процессов. Выделение параллелепипедами областей транзистора в случае структур с затвором, имеющим форму, отличную от параллелепипеда, является

слишком грубым и приводит к избыточному числу узлов сетки конечных элементов. Кроме того, в этом случае оказывается невыделенной область, примыкающая к переходу кремний – подзатворный окисел (приповерхностная область канала – рисунок 2), поскольку ее выделение также приводит к заметному росту (в 2 – 3 раза) числа узлов сетки и ухудшению равномерности их расположения.

Для полученной структуры в системе *TCAD* была рассчитана пороговая и выходная характеристики. В результате расхождение между расчетными и экспериментальными характеристиками составило порядка 20 %.

Для повышения точности результатов и увеличения скорости сходимости необходимо расширить описание параметров сетки, т.е. определить выделяемую область более детально, а также задать разбиение в приповерхностном слое, что в рассмотренном случае является затруднительным. Помимо этого нет возможности выделить область *p-n*-перехода, что затрудняет расчет динамических характеристик, так как приходится разбивать область заведомо больших размеров.

Второй генератор сетки *Noffset3D* в отличие от уже рассмотренного имеет расширенный набор параметров, что позволяет более гибко задавать условия изменения шага сетки. С целью расчета статических характеристик МОП-транзистора *O*-типа были заданы следующие параметры сетки:

- разбиение приповерхностного слоя кремния с начальным шагом сетки  $1 \text{ нм}$  и последовательным увеличением шага в 10 раз при движении от границы окисел-кремний в глубь кармана;
- области канала и *LDD*-области выделены 4-мя параллелепипедами.

Распределение узлов сетки в области канала МОП-транзистора в этом случае неравномерно. Кроме того, она содержит большое число узлов (около 75 000), что связано с задаваемыми размерами ее элементов. Их увеличение ведет к уменьшению числа узлов сетки, но вместе с тем и к искажению концентрационного профиля.

Для полученной структуры была рассчитана пороговая и выходная характеристики. Расхождения между экспериментальными и расчетными данными для этого случая достигали 25%. Использование данного варианта генерации сетки с текущими настройками повысило точность моделирования характеристик МОП-транзистора в режиме насыщения, но привело к снижению точности моделирования в надпороговом режиме при значительном увеличении вычислительных затрат.

При использовании генератора *Noffset3D* для последующего моделирования динамических характеристик применялось разбиение по *p-n*-переходу. При этом даже для структур, имеющих прямолинейный затвор, результирующая сетка содержала более 100 000 точек, а при использовании *Noffset3D* для более сложных структур сгенерировать сетку на имеющемся вычислительном комплексе не представлялось возможным. В связи с этим применение разбиения по *p-n*-переходу генератором *Noffset3D* целесообразно только для структур, имеющих сравнительно меньшую поверхность *p-n*-перехода, чем размеры моделируемой структуры.

Кроме того, при построении сетки для последующего моделирования динамических характеристик необходимо минимизировать искажения областей *p-n*-перехода, полученных при моделировании технологического процесса, вследствие перестроения сетки, так как любое такое искажение приводит к изменению емкостных параметров, что, в свою очередь, снижает точность расчета. Стандартные инструменты *TCAD* не позволяют точно разбивать поверхность *p-n*-перехода для сложных структур.

С целью устранения выявленных недостатков был разработан новый модуль генерации параметров, написанный на языке *C++* и встраиваемый в проект средствами *Tcl* (*Tool Command Language*). Данный модуль объединяет два алгоритма – выделения областей разбиения с использованием топологических масок (рисунок 4) и выделения области *p-n*-перехода (рисунок 5).

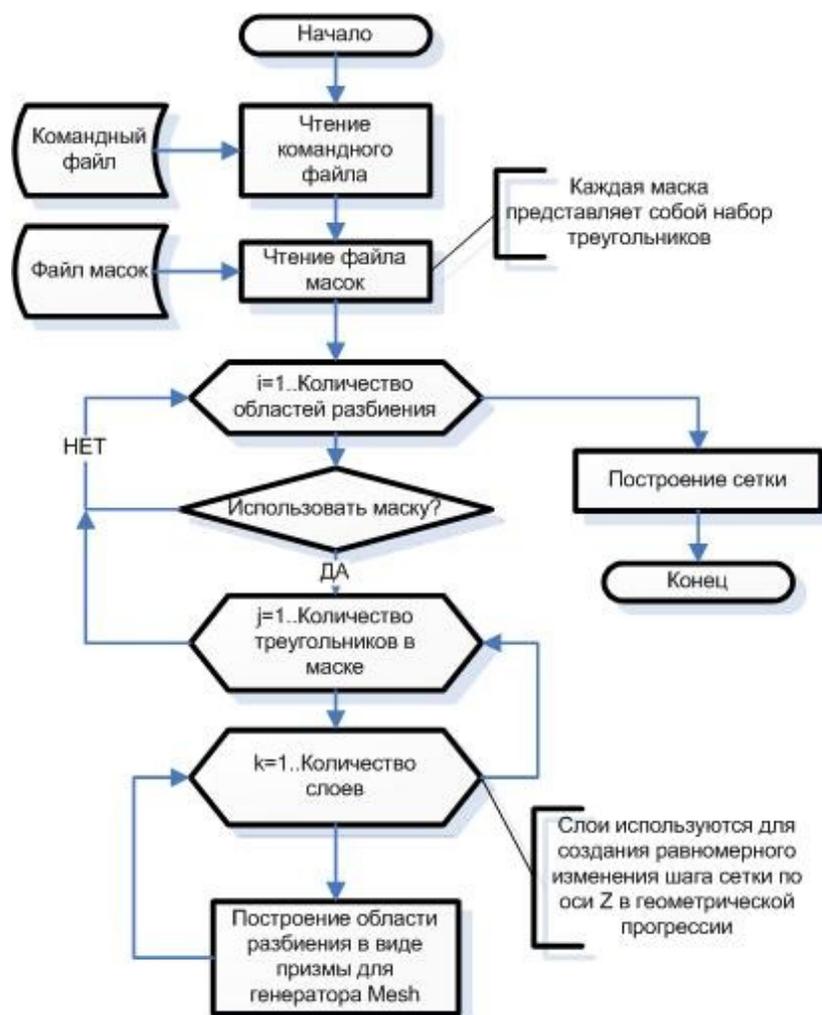


Рисунок 4 - Алгоритм выделения областей разбиения с использованием топологических масок

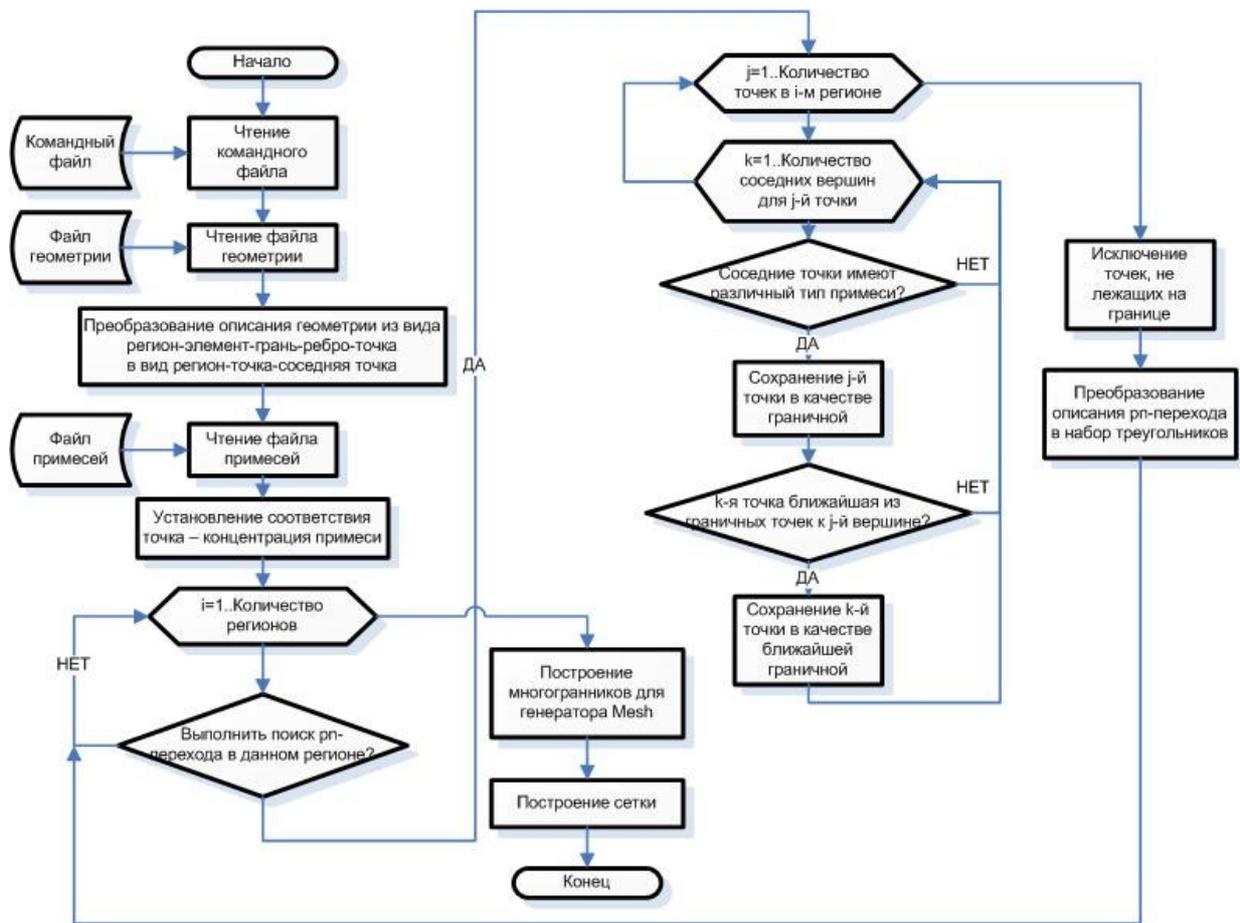


Рисунок 5 - Алгоритм поиска поверхности  $p$ - $n$ -перехода

Синтаксис файла исходных параметров соответствует стандартному командному файлу генератора сетки в системе *TCAD* с добавлением следующих новых функций:

- возможности использования масок, применяемых при формировании структуры, для построения сетки, что позволяет сделать параметры сетки для МОП-структур универсальными;
- возможности изменения шага сетки по оси  $Z$  для заданной маски в геометрической прогрессии. Это позволяет выделять приповерхностную область канала, не нарушая равномерности шага сетки;
- возможности описания разбиения области  $p$ - $n$ -перехода.

С целью расчета электрических характеристик транзистора  $O$ -типа была задана область канала и выделена в нем приповерхностная область размером  $1 \text{ нм}$ , с постепенным увеличением размера элемента сетки в глубь кармана транзистора. Также было задано разбиение по  $p$ - $n$ -переходу.

Результат применения данной методики представлен на рисунке 6.

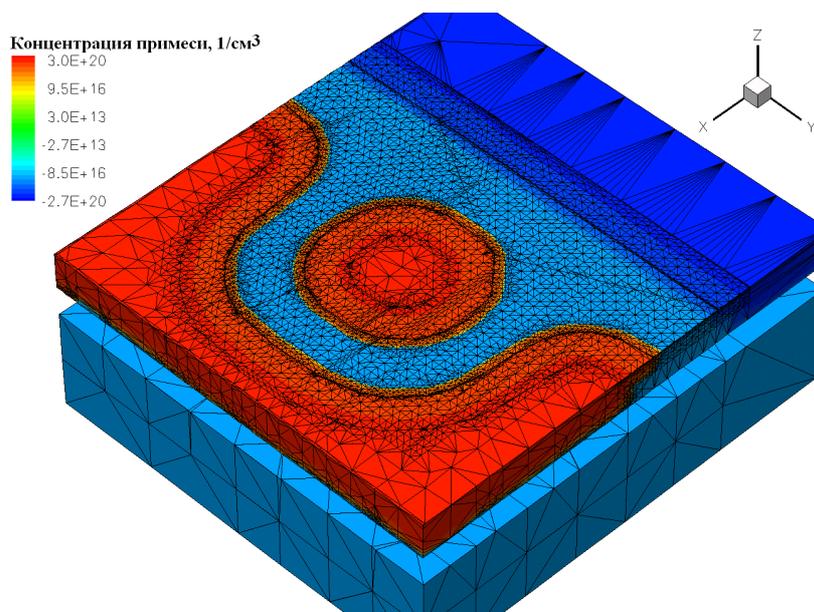


Рисунок 6 – Результат применения генератора *Mesh* совместно с разработанным алгоритмом выделения *p-n*-перехода

Как видно из представленного рисунка, в области *p-n*-перехода, а также в области канала шаг сетки меньше по сравнению с другими областями структуры. Такой способ разбиения позволяет в широких пределах варьировать количество узлов, сохраняя их равномерное распределение.

Для структур с полученной сеткой с помощью системы *TCAD* были рассчитаны пороговая (рисунок 7) и выходная характеристики МОП-транзистора О-типа.

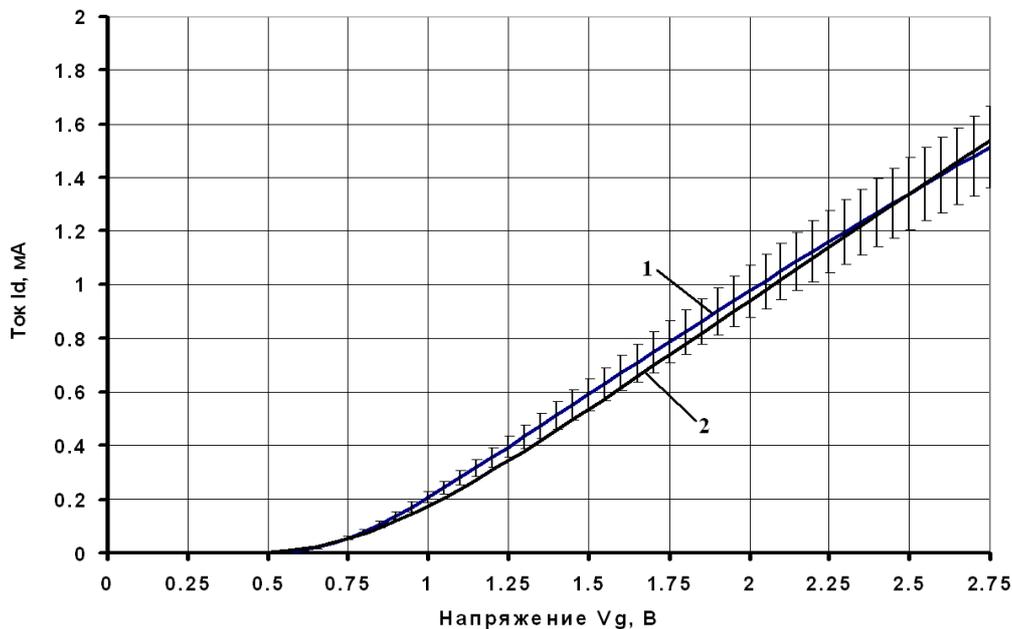


Рисунок 7 - Измеренная (1) и расчетная (2) пороговые характеристики КНИ МОП-транзистора О-типа. Сетка построена генератором *Mesh* с применением разработанной методики

В результате применения разработанного модуля расширения функциональности удалось сократить расхождение между статическими характеристиками, полученными при моделировании, и результатами измерений с 20 % до 10 %.

Основная трудность при апробации предложенной методики, применяемой для моделирования динамических характеристик субмикронных КНИ МОП-транзисторов,

заключается в том, что нет возможности экспериментально измерить эти характеристики на существующем оборудовании. В связи с этим сравнение результатов моделирования будет проводиться между структурами, имеющими разные параметры генерации сетки.

Моделируемая структура представляет собой КНИ МОП-транзистор О-типа, подключенный в качестве конденсатора, в котором роль обкладок выполняют поликремниевый затвор и кремниевый карман, а роль диэлектрика – подзатворный окисел (рисунок 8).

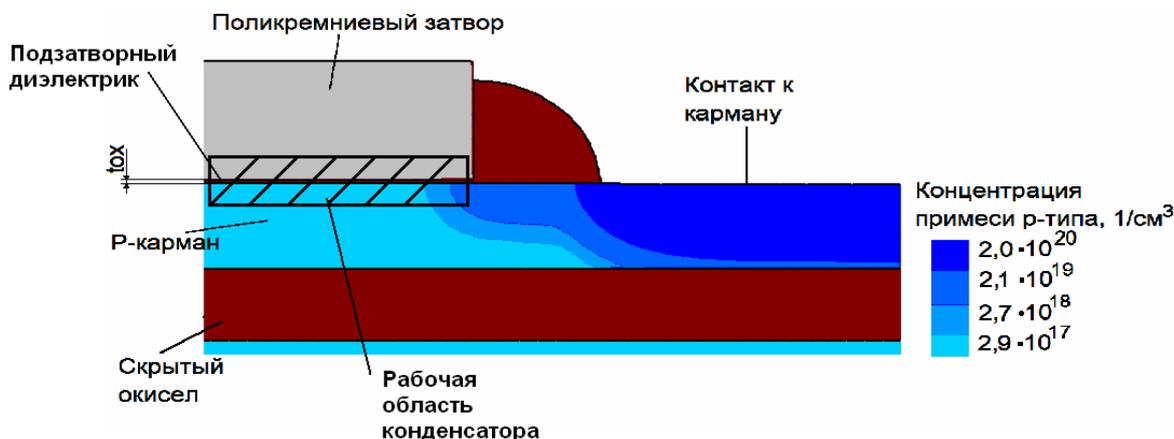


Рисунок 8 – Структура КНИ МОП-транзистора, подключенного в качестве конденсатора

С целью определения влияния параметров сетки на точность расчета характеристик, варьировались разбиения в следующих областях:

- *LDD*-области;
- *p-n*-переход;
- приповерхностная область канала;

Первый вариант построения сетки основывался на задании ее параметров без использования разработанной методики. В этом случае адекватное разбиение для моделирования динамических характеристик достигнуто только в области канала.

Во втором случае задавались параметры разбиения сетки для приповерхностной области канала и для областей *LDD* с помощью разработанной методики.

Третий и четвертый набор параметров включал в себя разбиение по всем трем исследуемым областям. Отличие четвертого варианта заключается в более жестких условиях разбиения – меньших размерах элементов сетки по сравнению с третьим вариантом. При использовании четвертого варианта параметров получившаяся сетка имела наибольшее количество вершин, по сравнению с остальными тремя случаями: 90 000 узлов.

На рисунке 9 представлены результаты моделирования с различными параметрами генерации сетки.

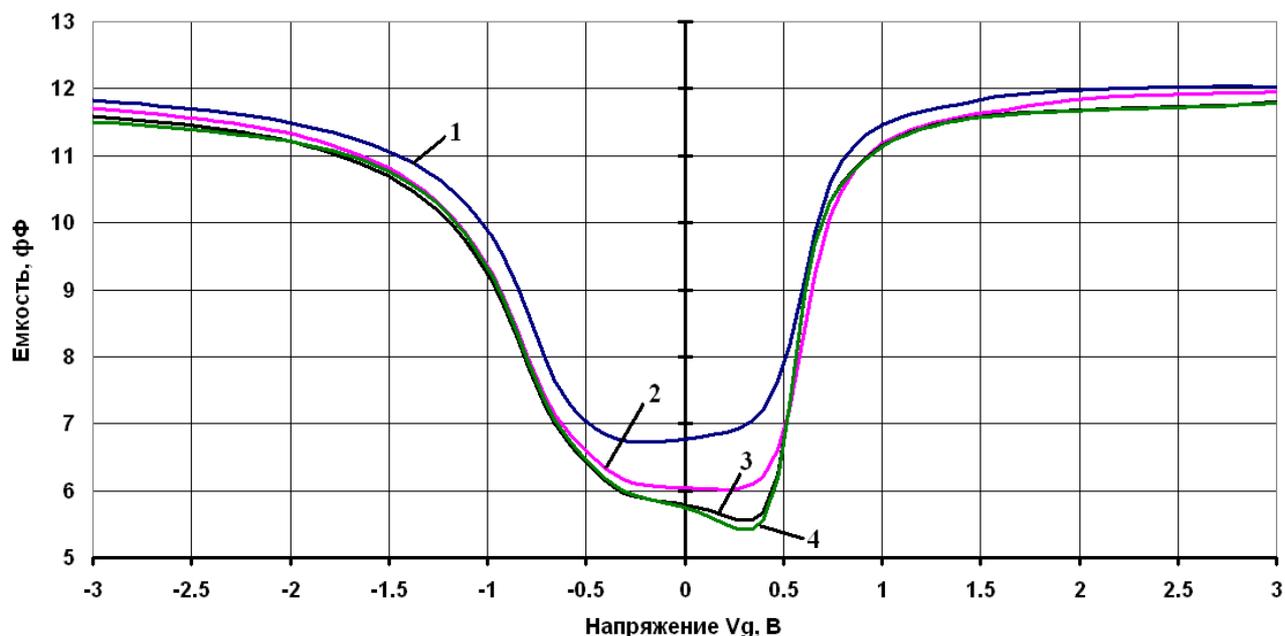


Рисунок 9 – Вольт-фарадные характеристики КНИ МОП-транзистора О-типа для 4-х вариантов построения сетки

Как видно из представленного рисунка, третий и четвертый набор параметров разбиения сетки дают практически идентичный результат (расхождение не превышает 2 %), что в свою очередь означает, что для точного расчета вольт-фарадных характеристик следует обеспечить выделение *LDD*-областей, приповерхностной области канала и области *p-n*-перехода, при этом нет необходимости задавать минимально допустимые значения для размеров элементов сетки.

Представленные результаты показали, что применение разработанной методики позволило повысить точность расчета емкостных характеристик на 10 - 20 % по сравнению с моделированием без ее использования.

### Заключение

В результате применения разработанной методики удалось повысить точность расчета электрических характеристик МОП-структур на 10 - 20 % по сравнению с моделированием без ее использования. Хотя применение методики и привело к заметному увеличению количества вершин и времени моделирования, связанному с детализацией разбиения сетки, но при этом оно позволило существенно сократить расхождение между экспериментальными и расчетными данными. Помимо повышения точности моделирования разработанный модуль упрощает задание параметров сетки и позволяет гибко описывать каждую из рассматриваемых областей.

Файл параметров для разработанного модуля и командный файл для генератора сетки в системе *TCAD* имеют схожий синтаксис. Это позволяет с незначительными изменениями использовать уже созданные командные файлы предыдущих проектов.

Разработанный модуль может быть применен для построения координатной сетки МОП-структур любой конфигурации, так как в нем предусмотрено задание областей по названиям масок и по типу материала для *p-n*-перехода. В итоге, задание параметров генерации сетки сводится к определению масок для выделения областей разбиения с помощью топологического редактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. (Госконтракт №П-338)

## Благодарности

Авторы благодарят сотрудника отделения микротехнологий НИИСИ РАН А.С. Новоселову за предоставленные результаты измерений электрических характеристик МОП-транзисторов.

## Литература

1. Рындин Е.А. Методы решения задач математической физики: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 119 с.
2. Mesh Generation Tools User Guide, version F-2011.09, 2011, Synopsys.
3. Sentaurus Device User Guide, version F-2011.09, 2011, Synopsys.
4. Глушко А.А., Зотов С.К. Особенности калибровки моделей 3D-транзисторных КНИ МОП-структур // 13-ая молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011». 27-28 апреля 2011г., г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. – С.373-380.

# ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

**Фомина Т., Симайте А.**  
*Научный руководитель: профессор Коэн Клаус*  
К.У.Лёвен, Лёвен, Бельгия

## FLUORESCENCE IN PHOTONIC CRYSTAL

**Fomina T., Simaite A.**  
*Supervisor: prof. Koen Clays*  
K.U. Leuven, Belgium

### **Аннотация**

Интерес к фотонным кристаллам как материалу для создания фотонных компьютеров, аналогичному Si в современной электронике, постоянно растет. В статье рассматривается влияние фотонной запрещенной зоны на распространение сигнала от внутреннего источника света в кристалле. Наиболее важным эффектом является подавление распространения сигнала на определенных длинах волн и угловая зависимость этого подавления.

### **The Abstract**

There is an increasing interest for photonic crystals as a material for photonic computers, analogous for Si in nowadays electronics. In our experiment, the effect of the photonic band gap on the emission spectrum of internal light source was investigated. One of the most important effects was the inhibition of the emission of light signal at particular wavelengths and angle dependance of this effect.

### **Introduction**

Photonic materials are loosely defined as materials that interact unusually with light: they are periodic dielectric structures with a periodicity on the order of the wavelength of visible light. Photons propagate through this structure or not, depending on their wavelength and propagation direction (different crystal directions have different periodicity). Similar to how the periodic potential in a semiconductor crystal affects the electron motion by defining allowed and forbidden electronic energy bands, in photonic crystals, the forbidden energy range where photons cannot be transmitted through the material is called photonic band gap or stopband. Furthermore, the light velocity can be changed, so the light-matter interaction time is altered.

Recently, important theoretical and experimental research on photonic crystals as a tool to manipulate the interaction between light and matter has emerged. The incorporation of the light source in the photonic crystal and the external control of the emitted light is one interesting approach. Photonic crystals can significantly modify the emission characteristics of the embedded optically-active materials (dyes, polymers semiconductors, etc.) as the emission wavelengths of the active materials overlap the stopband.

In our experiment, fluorescent dyes were the internal light sources in photonic crystals. The effect of the photonic band gap on the emission spectrum of an infiltrated dye was investigated. One of the most important effects is the inhibition of the emission. Recently, control of the emission of internal fluorescent proteins by photonic crystals was reported[1]. For our task, fluorescent dye molecules were more suitable because of their high quantum efficiency and ease of excitation.

### **1-photon fluorescence**

The dye was infiltrated into crystals. After infiltration photonic crystal was still translucent and opalescent. As the amount of the dye is low, it has negligible effect on the refractive index.

Fluorescence was observed in both crystals (Figure 1). The left peak (350 nm) is related to light from the source, a 325 nm UV LED, and it was the same for both crystals. In the active crystal suppression of the right side of the emission peak (around 590 nm) was observed when compared to

the emission from the reference crystal. This completely matches with what was theoretically predicted.

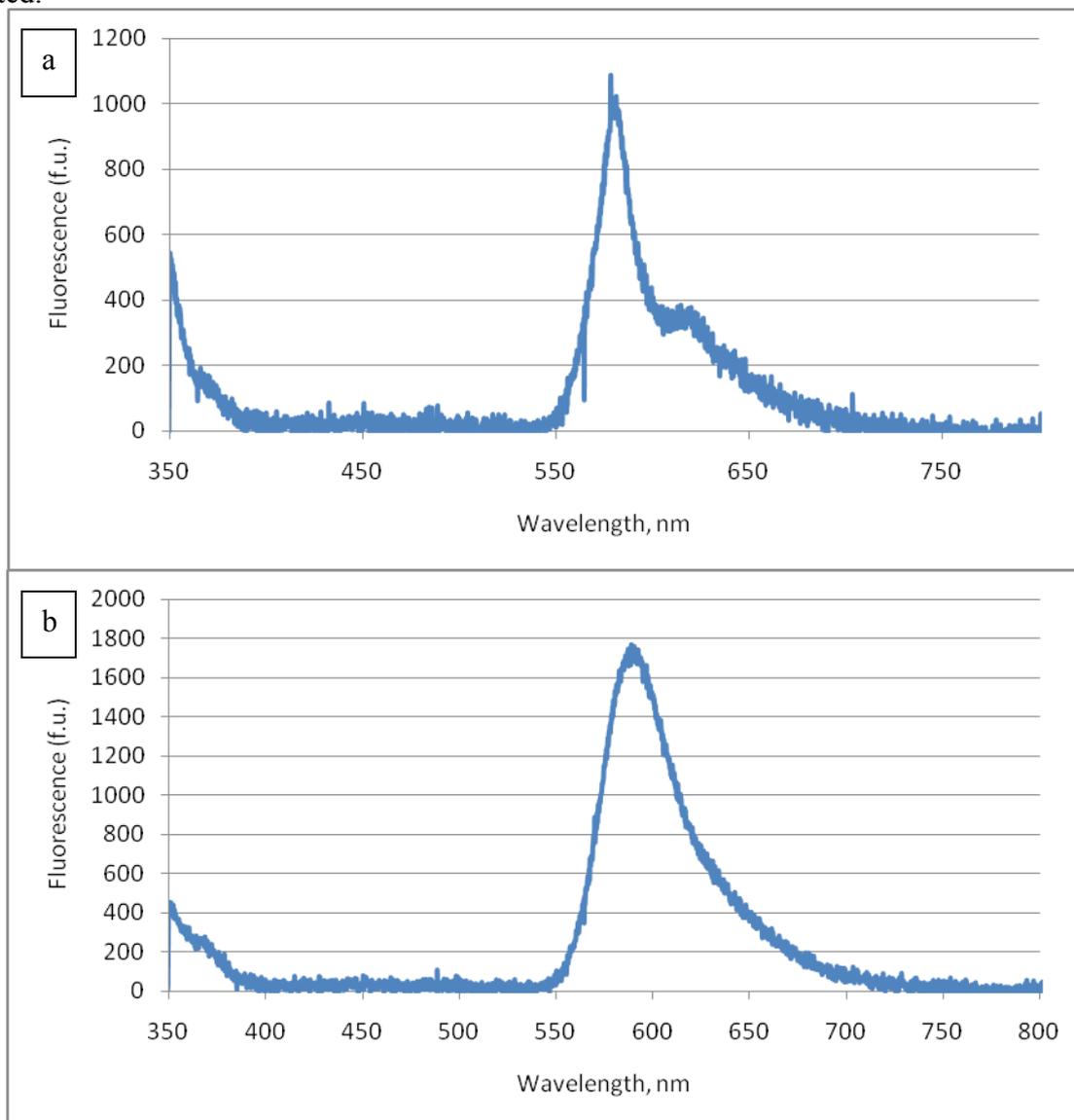


Figure 1 - Fluorescence in active (a) and reference (b) crystals

### Angle dependence

The angle dependence was studied for 1-photon fluorescence. The photonic band gap position depends on periodicity. The periodicity of spheres packed in face centered cubic fashion is not the same for the different directions in the crystal, thus the photonic band gap is predicted to be dependent on the angle of incidence, and consequently the suppression on fluorescence emission is also predicted to be dependent on the angle of collection.

When the photonic crystal was turned away from normal incidence, the band gap maximum shifted to the blue side of the spectrum (Figure 2). Thus by changing the angle from  $0^\circ$  to  $45^\circ$  crystal the sample changed from active to reference. The photonic band gap for  $45^\circ$  appeared deformed and noisy, probably because of reflection from the holder, occurring when turning the sample in the spectrophotometer.

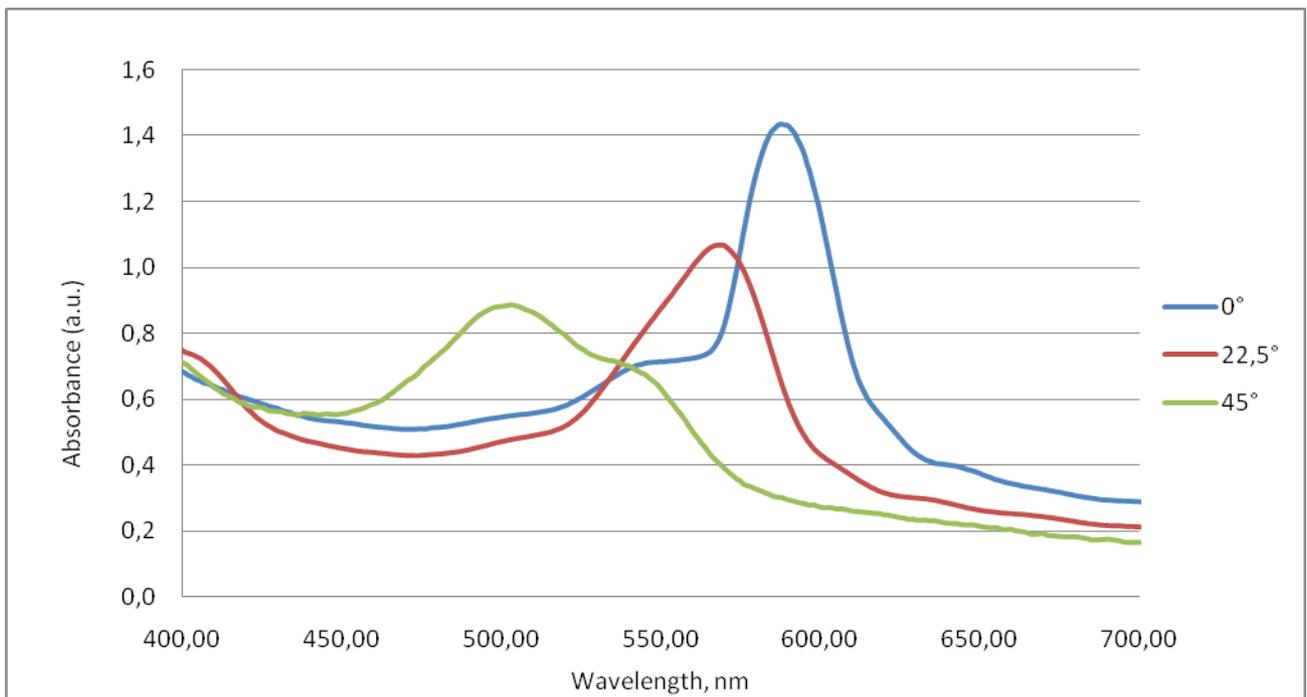


Figure 2 - Angle dependence for photonic band gap (a,0°; b,45°; c, 22,5°)

In the set of experiments presented in Figure 3 differences in the fluorescence spectra were observed (Figure 4).

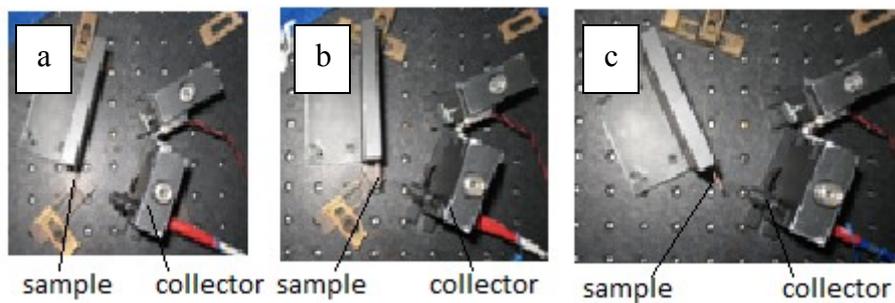


Figure 3 - Positions of substrate holder for angle dependence experiments (a, 0°; b, 22,5°; c, 45°)

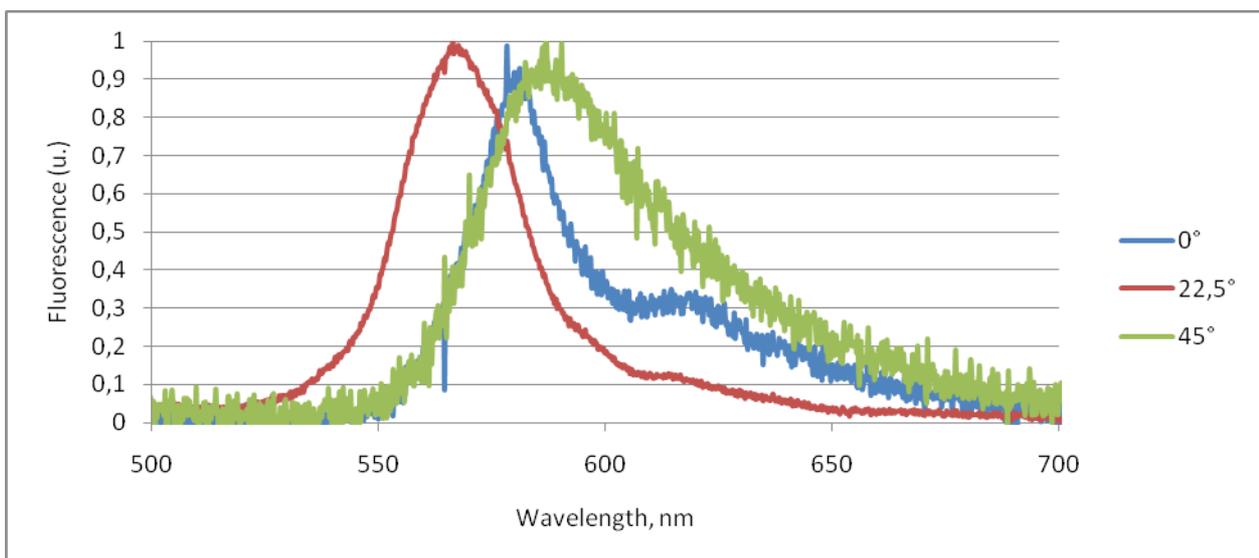


Figure 4 - Angle dependence for fluorescence

For  $0^\circ$  suppression is observed, for  $45^\circ$  there is no influence of photonic crystal on fluorescence (active photonic crystal acts as a reference for this incidence), for  $22,5^\circ$  sharpening of the curve occurs due to partial suppression. Here,  $0^\circ$  was corresponded to normal incidence to (111) crystal plane.

The difference in emission intensity is probably due to the different concentration of dyes in the pores and the difference in the sample area illuminated when turning the sample.

### **Conclusions**

In this work fluorescence in opal photonic crystals was studied. Opal crystals with different optical properties were synthesized. Different temperature of reaction led to crystals with 280 nm and 175 nm particle diameter with their respective 590 nm and 370 nm peaks for the photonic band gaps. So, the photonic band gap dependence on the size of colloidal particles was proved.

Most of the experiments have shown that fluorescent spectra changes when the photonic band gap of crystal overlaps with the emission peak of the fluorescent sample. The crystal which had a photonic band gap that overlapped with emission spectra was used as an active and other one as a reference.

One-photon fluorescence was observed in crystals with infiltrated dye. Suppression of fluorescence due to photonic band gap was proved: suppression was observed only for the active crystal, not for the reference one.

Photonic band gap dependence on angle of light incidence was shown and applied to emission suppression. Band gap shifted to the blue when the crystal was turned, and consequently partial and no suppression were observed for  $22,5^\circ$  and  $45^\circ$  angle of incidence respectively.

### **References**

1. Blum C, Mosk AP, Nikolaev IS, Subramaniam V, Vos WL. Color control of natural fluorescence proteins by photonic crystals. *Small*. 2008, 4 (4), 492-496.

# АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА ОГРАНИЧЕНИЙ ТОПОЛОГИИ СБИС НА ОСНОВЕ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

А.В. Ященко

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

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

## ALGORITHM OF VLSI TOPOLOGY CONSTRAINTS GRAPH CONSTRUCTION BASED ON VORONOI DIAGRAM

Yaschenko A.V.

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

MSTU, Moscow, Russia

### Аннотация

В статье рассматривается алгоритм динамического построения графа ограничений элементов топологии СБИС. Подробно исследован способ построения графа ограничений с помощью диаграммы Вороного. Кратко представлены оценки эффективности в сравнении с другими методами. В заключении представлены преимущества динамического алгоритма.

### Abstract

In this article the dynamic algorithm for constraints graph of topology elements construction is presented. The approach of constraints graph constructing, based on Voronoi diagram, are explained in details. Main advantages are briefly considered. In conclusion, brief assessment of efficiency is presented.

### Введение

С усложнением процесса производства интегральных схем, возникает потребность в поиске новых способов производства СБИС, так как при переходе к проектным нормам глубокого субмикрона начинают сказываться ограничения используемого оборудования для фотолитографии. Поэтому развитие получили такие технологии как технология двойного фотшаблона [3]. Для реализации процесса декомпозиции топологии, требуется специальное алгоритмическое и программное обеспечение. В работе [2] предложены алгоритмы, позволяющие осуществлять такую трансформацию. В основе математического аппарата процесса трансформации топологии СБИС лежит понятие графа ограничений (рис. 1).

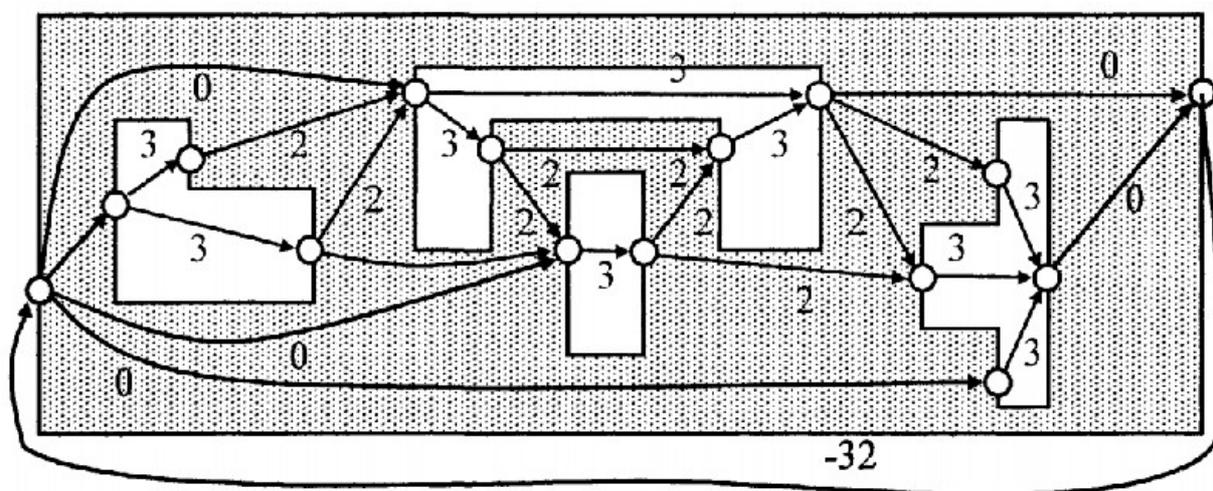


Рисунок 1 – Пример графа ограничений, построенного на вертикальных сторонах элементов топологии [1]

Для построения графа ограничений могут быть использованы хорошо известные методы сканирующей линии и отбрасывания тени [2].

Однако, в последнее время возрастает интерес к методам трансформации, основанным на моделях, которые способны перестраиваться динамически. В этом смысле актуальным становится использование динамического построения диаграммы Вороного [4, 5] в системах ТП.

### Применение абстрактной диаграммы Вороного с метрикой Евклида

В работе [1] показано, что диаграмма Вороного естественным образом сохраняет информацию о взаимном расположении соседних элементов топологии и расстояниях. Диаграмма Вороного хранит только топологическую информацию и представляется графом.

Для построения диаграммы, в работе используется библиотека CGAL [6], которая предоставляет набор классов для создания графа Делоне и двойственной ему диаграммы Вороного для произвольных сегментов линий (рис. 2).

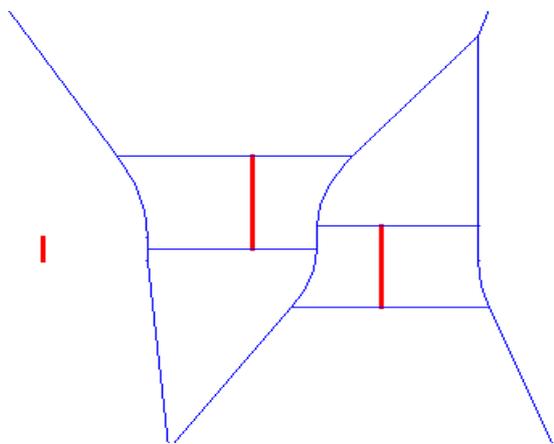


Рисунок 2 - Диаграмма Вороного для вертикальных отрезков

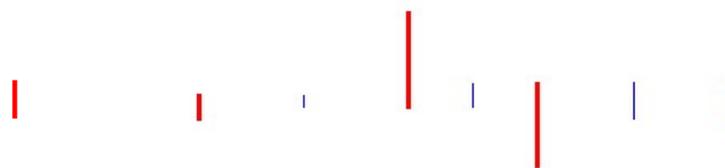


Рисунок 3 - Вертикальные ребра Вороного, вычлененные из диаграммы

В этой диаграмме особый интерес представляют вертикальные ребра Вороного (рис. 3), разделяющие два соседних отрезка. Последовательно анализируя вертикальные ребра, можно заносить информацию об ограничениях (расстояниях) в граф ограничений.

Диаграмма Вороного, - структура, которую можно менять динамически, добавляя и удаляя из нее объекты. Метод сканирующей линии и метод отбрасывания тени [2], позволяют строить граф ограничений с временной сложностью  $O(n^2)$ , и предполагают полное перестроение графа ограничений при внесении изменений. Представленный метод при перестроении графа имеет вычислительную сложность  $O(n \log n)$  [1].

### Построение графа ограничений с помощью диаграммы Вороного

В основе построения графа ограничений лежит построение диаграммы Вороного для всех вертикальных (горизонтальных) отрезков топологии. В вершинах графа ограничений находятся элементы топологии, а ребра соответствуют расстояниям (рис. 1), причем знак определяет тип ограничения: ограничение ширины или ограничение расстояния, которые должны удовлетворять технологическим требованиям. Предложенный алгоритм показан на рис. 4.

Для построения графа ограничений производится последовательный перебор ребер Вороного, содержащих вертикальные участки, и анализируются ячейки с вертикальными

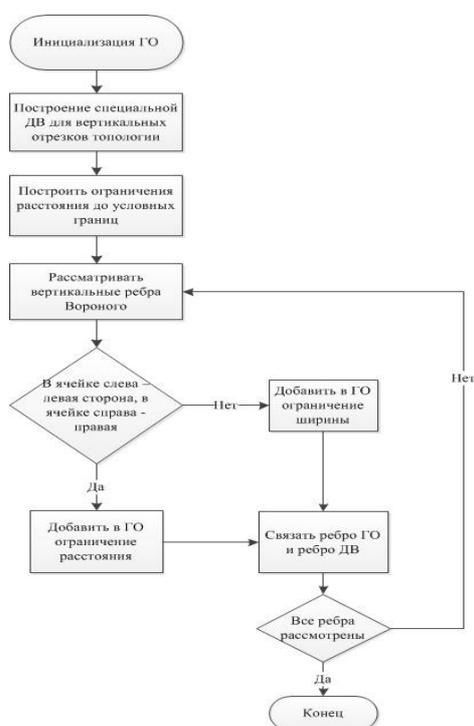


Рисунок 4 – Алгоритм построения графа ограничений

(горизонтальными) отрезками слева и справа от ребра. Если в левой ячейке содержится левая сторона многоугольника топологии, а в правой правая, то добавляется ограничение ширины. Если в левой ячейке содержится правая сторона, а в правой левая сторона, то добавляется ограничение расстояния (рис. 4).

### Заключение

В работе показаны преимущества построения графа ограничений на основе диаграммы Вороного. Основным достоинством алгоритма является то, что он является динамическим, что является немаловажным аспектом, особенно для интерактивных систем. Построенная диаграмма естественным образом сохраняет структуру топологии и позволяет корректировать граф ограничений динамически с вносимыми изменениями.

### Литература

1. Малинаускас К.К. Разработка математического и программного обеспечения систем топологического проектирования СБИС с использованием диаграмм Вороного : диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук . М., 2007.
2. Аверьянихин А.Е. Исследование и разработка алгоритмов трансформации топологии субмикронных СБИС // Сборник трудов XIII научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010». – Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
3. Andrew B. Kahng, Fellow, IEEE, Chul-Hong Park Layout Decomposition Approaches for Double Patterning Lithography. . In Proc. Of IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, vol. 29, no. 6, June 2010.
4. Choi S.-G., Kyung C.-M. A floorplanning algorithm using rectangular Voronoi diagram and force-directed block shaping. In Proc. Of IEEE International Conference on Computer-Aided Design, –1991. – С. 56–59.
5. Paradopoulou E., Lee D.T. The Voronoi diagram of segments and VLSI applications. International Journal of Computational Geometry and Applications. – 2001. – С. 503-528.
6. [CGAL - Computational Geometry Algorithms Library](http://www.cgal.org/). [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <http://www.cgal.org/>.

# КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА КАК МЕТОД АНАЛИЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Волкова Я.Б, Янович С.В.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Кононенко О.В.\*  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,\*ИПТМ г. Черноголовка, Россия.

## RAMAN SCATTERING AS A METHOD FOR THE ANALYSIS OF CARBON NANOSTRUCTURES

Volkova.Y.B, Yanovitch S.V.

Supervisor of studies: Ph.D. Kononenko O.V.\*  
BMSTU, Moscow, Russian Federation,  
\*IMT RAS Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation.

### Аннотация

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) мощный инструмент для анализа различных углеродных наноструктур  $sp^2$  (углеродных нанотрубок, графена), которые имеют как много общих свойств, так и различий. Аллотропные модификации углерода имеют различную структуру элементарных ячеек, в зависимости от которой, углеродные наноструктуры обладают различными уникальными свойствами. Углерод исследовался на протяжении полувека, но и по сей день ученые стран Мира открывают новые свойства, параметры и возможные области применения углеродных материалов в нано- и микро- электронике. Одним из интереснейших направлений исследований, является особая форма гибридного углерода  $sp^2$ , анализ которого и проводится.

### Abstract

Raman spectroscopy is here shown to provide a powerful tool to differentiate between two different  $sp^2$  carbon nanostructures (carbon nanotubes and graphene) which have many properties in common and others that differ. Emphasis is given to the richness of both carbon nanostructures as prototype examples of nanostructured materials. Carbon occurs in many forms, and the dependence of the properties of each form on its special structure makes carbon a truly unique building block for nanomaterials. For this reason carbon has been investigated for more than half a century without exhausting its wonders and challenges. Especially with the dawn of nanoscience now unfolding, we are still finding new properties for carbon nanostructures, thereby opening breathtaking opportunities for the discovery of new science and applications. We will here focus on one special form of carbon that has intrigued many scientists over the years, namely,  $sp^2$  hybridized carbon.

### Введение

Идеальная углеродная наноструктура  $sp^2$  начинается с одного листа графена, монослоя обозначается 1-LG. Эта система может быть большой (в идеале бесконечной плоскостью), толщиной в один атом, таким образом, образуя двумерную (2D)  $sp^2$  структуру, содержащую два атома в элементарной ячейке, A и B (рис. 1a).

Когда два листа графена сложены, формируется материал называемый биграфеном (2-LG) (рис. 1, b, c). Три листа образуют трехслойный графен (3-LG), как показано на рисунке 1d, и множество графеновых слоев наложенных друг на друга являются графитом.

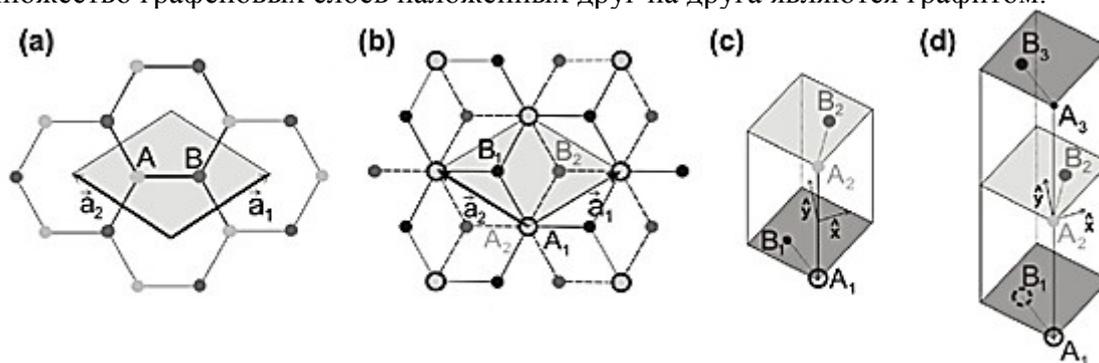


Рисунок 1 – Методы формирования элементарных ячеек углеродных структур  $sp^2$

На рисунке 1(a) показан монослой графена (1-LG). Два вектора  $a_1$ ,  $a_2$  определяют элементарную ячейку (серый ромб), содержащие два атома А и В, на рисунке 1(b) - двухслойный графен (2-LG), единичный вектор, ячейки, и четырех атомов (A1, B1 от одного слоя плюс A2, B2 от другого) в пределах элементарной ячейки, на рисунке 1(c) - трехмерный (3D) с учетом структуры (b) и на рисунке 1(d) - 3D вид ячейки на три слоя графена (3-LG).

## 1 Основные характеристики углеродных $sp^2$ наноструктур

Узкая полоска графена (меньше 100 нм в ширину) называется графеновой нанолентой, и наноленты могут быть сложены, чтобы одномерный (1D) слой углерода превратился в многослойную наноленту.

В формировании такой многослойной наноленты, важен порядок расположения элементарных ячеек АВ, так называемой Берналь укладки (см. рис. 2), и как показано на рисунке 1b-d, что приводит к низкой энергии геометрии (основное состояние) и равновесию с осью, постоянной решетки 0,335 нм.

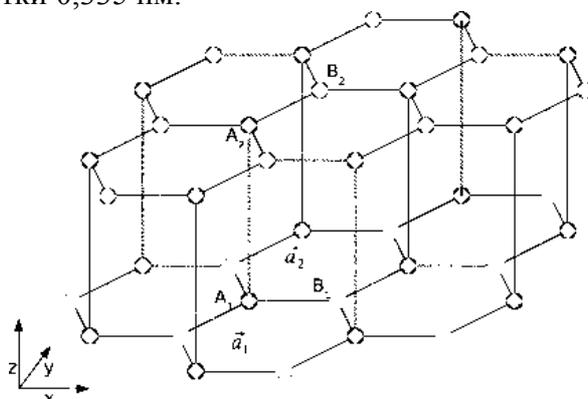


Рисунок 2 – Структура решетки бислоя графена(2-LG). Элементарная ячейка – параллелепипед, сформированная по методу Берналя

Подвижная узкая полоска монослой графена преобразуется «бесшовным» способом в цилиндрическую форму, одностенную углеродную нанотрубку (ОНТ). Концептуально нанолента и нанотрубка могут быть бесконечно длинными, таким образом, представляя одномерную систему. Добавляя одно- или двухслойный концентрический цилиндр, мы получаем двойную и тройную углеродную нанотрубку, а также путем добавления множества свернутых концентрических цилиндров, многослойные углеродные нанотрубки (УНТ).

## 2 Спектроскопия КРС углеродных наноструктур

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) исторически играла важную роль в изучении и характеристике графитовых материалов, широко используется на протяжении последних четырех десятилетий, чтобы охарактеризовать свойства пиролитического графита, углеродных волокон, стеклоуглерода, смолы на основе графитовой пены, лент наногрфита, фуллеренов, углеродных нанотрубок, и графена.

Для  $sp^2$  наноструктур углерода: графена и нанотрубок, спектроскопия КРС может дать информацию о размере кристаллитов, фазы кластеризации  $sp^2$ , наличие  $sp^2$ -  $sp^3$  гибридизации и внедрение химических примесей, оптической ширины запрещенной зоны, упругих постоянных, дефектов и других параметров кристаллов, структуры края, оценить, количество слоев графена, диаметр нанотрубок, хиральность, кривизну, и наконец, металлические и полупроводниковые характеристики, которые делают уникальными различные виды углеродных структур и определяют их возможное применение в современной нано- и молекулярной электронике [1].

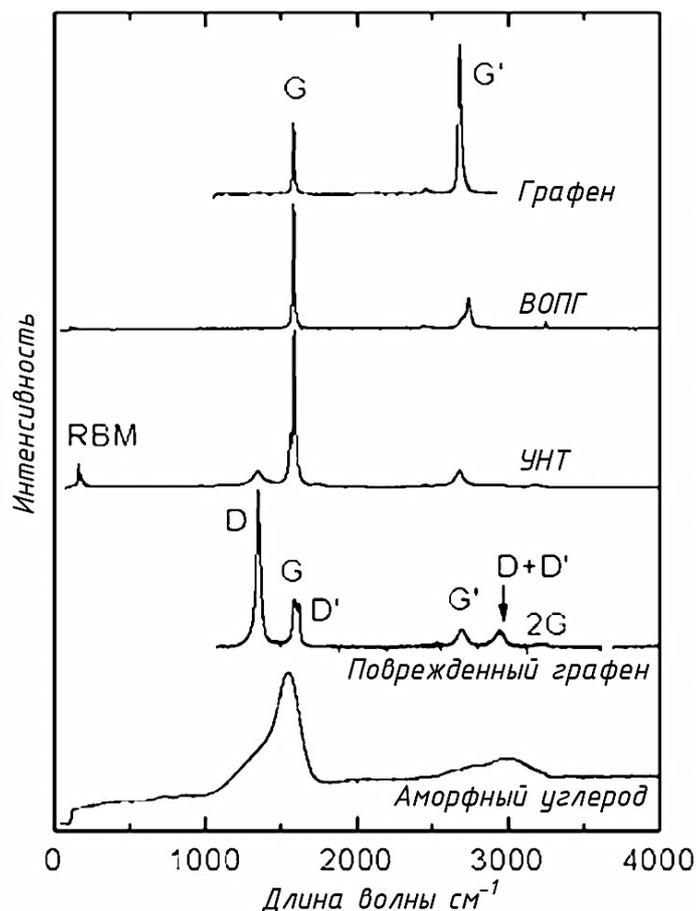


Рисунок 3 – Спектры КРС для различных типов  $sp^2$  углеродных наноструктур

Рассмотрим спектры КРС, особенности G – линии при  $\sim 1582 \text{ см}^{-1}$ \*, которая является общей для всех форм  $sp^2$  углерода, радиальной дышащей спектральной линией (Radial breathing mode (RBM)), что позволяет проанализировать диаметр УНТ и провести оптический анализ энергетического перехода нанотрубок, и D и G' линии, которые имеют важное значение в предоставлении информации об электронной и атомарной структуре через двойной процесс резонанса (обертон).

Представленные спектры не исчерпывают богатство спектров комбинационного рассеяния в углеродных наноструктур  $sp^2$ , которые могут проявлять иные спектральные линии второго и высших порядков (см. Рисунок 3). Тем не менее, анализ именно этих спектральных линий, является базисом спектроскопии комбинационного рассеяния света углеродных наноструктур.

Основные спектральные характеристики  $sp^2$  углеродных наноструктур:

- Radial breathing mode (RBM) – радиальная дышащая спектральная линия;
- D, D' and D + D' – спектральная линия определяющая деформации в кристаллической структуре  $sp^2$  углеродных материалах.
- G – комбинационное рассеяние, спектральная полоса G первого порядка
- G' и 2G – комбинационное рассеяние, спектральная полоса G' и 2G второго порядка (обертон G).

Проведем детальный анализ частоты, формы спектральной линии и интенсивности спектральных полос, что объяснит принцип определения характеристик углеродных наноструктур.

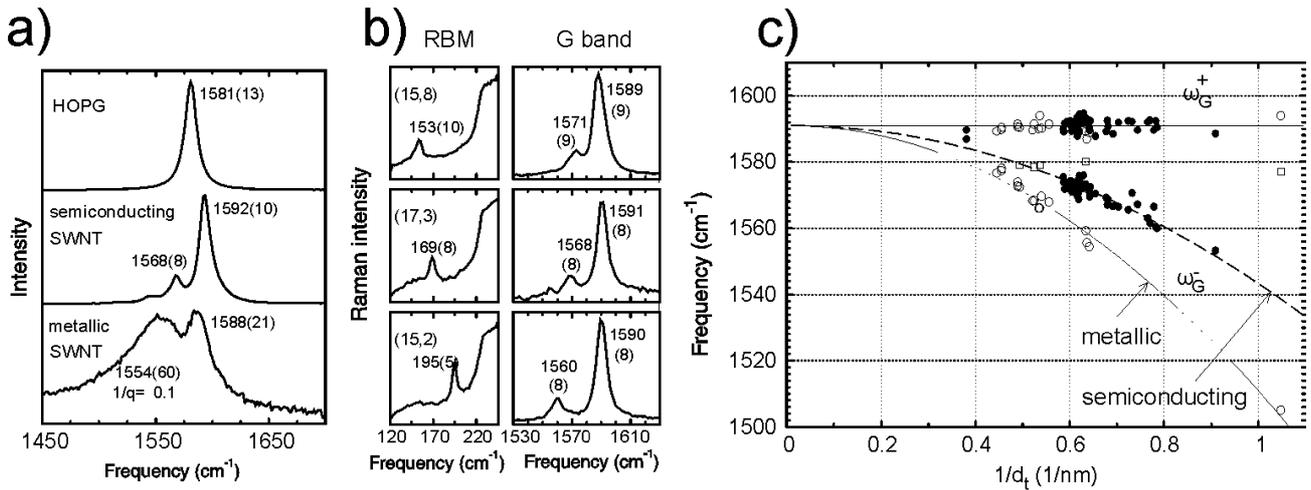


Рисунок 4 – анализ спектральных линий углеродных  $sp^2$  наноструктур

- G-линия для пиролитического графита (HOPG), для полупроводниковых УНТ (SWNT), и для металлических УНТ (SWNT).
- Радиальная дышащая спектральная линия и G-линия КРС для трех полупроводниковых изолированных УНТ (SWNT) с указанными (n,m) значениями хиральности нанотрубок.
- Частота  $\nu_s$  к  $1/d_t$  для двух наиболее интенсивных G-линий КРС функции ( $\omega_{G^-}$  и  $\omega_{G^+}$ ) изолированных нанотрубок с металлическим и полупроводниковым типом проводимости соответственно.

Спектральные линии представлены  $\omega_G = 1591 - A/d_t^2$ , где

$$A_{G^+} = 0, \quad A_{G^-} = 4 \pi |c \dot{m} n \dot{m}| \quad (\text{для полупроводника}), \quad \text{и} \quad A_{G^-M} = 79,5 [cm^{-1} nm^2] \quad (\text{для металла})$$

штриховая и длинные – штрих-пунктирные линии соответственно.

### 3 Спектральные линии углеродных $sp^2$ наноструктур первого порядка

#### 3.1 G – полоса спектра углеродных $sp^2$ наноструктур

Растяжение связи C-C в графитовых материалах приводит к так называемой G – линии в спектре КРС, которая является общей для всех  $sp^2$  углеродных структур (рис. 3 и 4). Эта спектральная линия аналогична для графенов и нанотрубок, но все же обладает свойствами, позволяющими отличить одну углеродную структуру от другой.

G – линия, весьма чувствительна к деформации в атомарной структуре, возникающий эффект, может использоваться, чтобы исследовать любые изменения в геометрии структуры графена, такое как напряжение, индуцированное внешними силами одного слоя графена на другой в нескольких слоях графена или многослойных нанотрубках, или даже кривизну боковой стенки при выращивании нанотрубок.

Эффект кривизны, происходящий в углеродных нанотрубках, приводит к появлению нескольких G-линий спектра для УНТ (SWNT), в то время как один пик ( $\omega_G \approx 1582 [cm^{-1}]$ ) иллюстрирует 2D – лист графена (см. рис 2.2).

#### 3.2 RBM – радиальная дышащая спектральная линия

Радиальная дышащая (свободная) спектральная линия, характеризует два важнейших параметра УНТ:

- Определение диаметра УНТ, согласно  $\omega_{RBM}$  относительно  $d_t$
- Взаимосвязь  $\omega_{RBM}$  и резонансного оптического перехода энергии  $E_{ii}$  УНТ.

### 3.3 Дисперсионная G' спектральная линия, двойной процесс резонанса.

Все виды  $sp^2$  углерода обладают важной особенностью, наличием спектральной линией КРС в диапазоне длин волн  $2500\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ , показано на рисунок 3 .

Вместе с G линией ( $1582\text{ cm}^{-1}$ ), G' – линия присутствует во всех углеродных  $sp^2$  спектрах, называется G' с целью подчеркнуть, что это линия является линией второго порядка (обертон), относительно первой.

Интересно, что группа G' второго порядка двухфононного процесса, проявляет сильную зависимость от частоты лазерного возбуждения энергии  $E_{laser}$ . Это дисперсионное поведение ( $\omega_{G'} = \omega_{G'}(E_{laser})$ ) является необычным в комбинационном рассеянии, так комбинационно-активном режиме частоты, как правило, не зависят от  $E_{laser}$ . Спектральная линия G', в частности, процесс второго порядка, связанные с фоновым резонансом вблизи точки K в графене, активирует процесс двойного резонанса (DR), который отвечает за его дисперсионный характер и вызывают сильную зависимость от любых возмущений в электронной и / или фононной структуре графена.

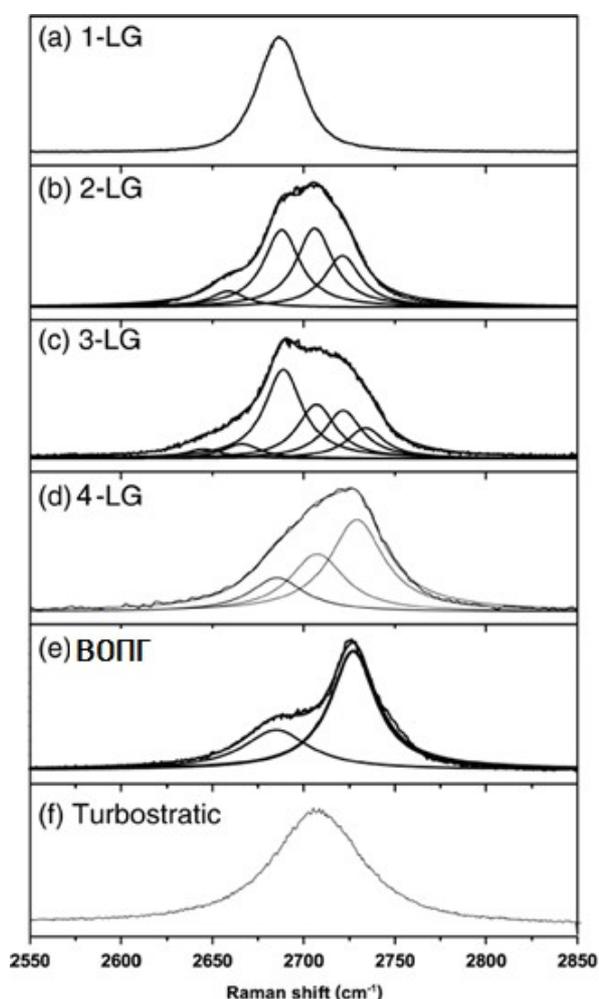


Рисунок 5 – Зависимость G'- спектральной линии от количества слоев графена

По этой причине линия G' – очень чувствительный датчик для характеристики конкретных углеродных  $sp^2$  наноструктур. Например, спектральная линия G' может быть использована для различения одно- и двухслойного графена с AB строением элементарной ячейки для исследования аспектов электронной структуры одностенных углеродных нанотрубок.

### 3.4 Спектральная D линия разупорядоченности углеродных $sp^2$ наноструктур

Разупорядоченность в  $sp^2$ -гибридизированных углеродных системах приводит к разнообразным явлениям в резонансе спектров комбинационного рассеяния, в результате чего спектры КРС характеризуют разупорядоченность в  $sp^2$  углеродных наноструктурах. Спектроскопии комбинационного рассеяния света, таким образом, становится одним из ключевых инструментов для выявления дефектов в структуре  $sp^2$  углеродных систем, таких как алмазоподобный углерод, аморфный углерод, наноструктурный углерод, а также углеродные нановолокна, нанотрубки.

#### 4 Экспериментальные результаты КРС анализа углеродных $sp^2$ наноструктур

Экспериментальные спектральные характеристики КРС полученные на измерительном комплексе AIST\_NT SmartRaman – AFM, углеродных  $sp^2$  наноструктур, выращенных методом CVD.

Спектр представленный на рисунке 6, получен с образца сформированного методом химического осаждения этилового спирта из газовой фазы на установке CVDomna. Спектральные линии характеризуют одностенную углеродную нанотрубку, чему соответствует RBM – радиальная дышащая спектральная линия на  $164\text{cm}^{-1}$ , наличие спектральной линии  $G = 1545\text{cm}^{-1}$  определяет полупроводниковый тип проводимости УНТ, спектральная линия  $G^2=2652\text{cm}^{-1}$  обуславливает высокую степень  $sp^2$  гибридизации.

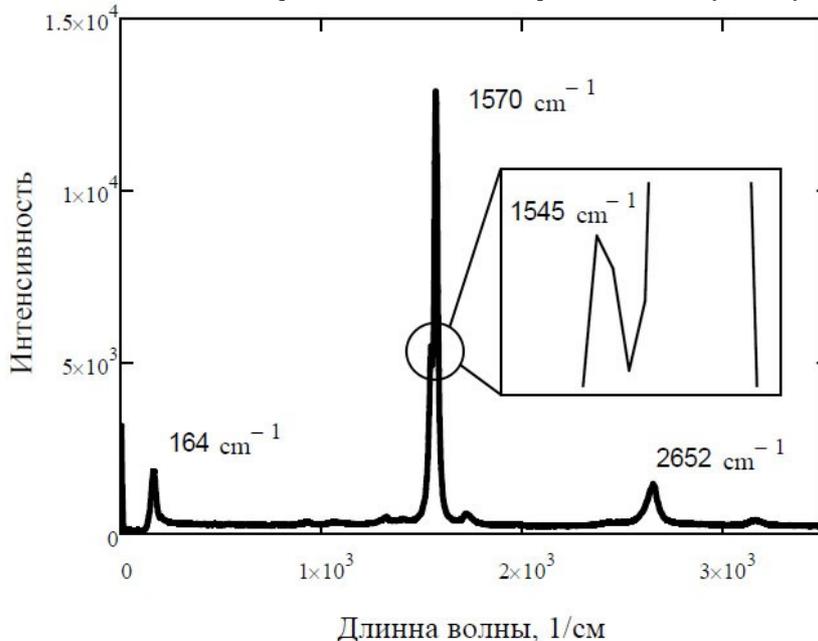


Рисунок 6 – Спектральные характеристики УНТ

Спектр на рисунке 7, иллюстрирует спектральную характеристику графена, полученного методом CVD, спектральная линия  $G^2=2685\text{cm}^{-1}$  характеризует 1 – LG монослой графена, наличие D и D' спектральной линии обуславливает, наличие напряжений в кристаллической структуре графена.

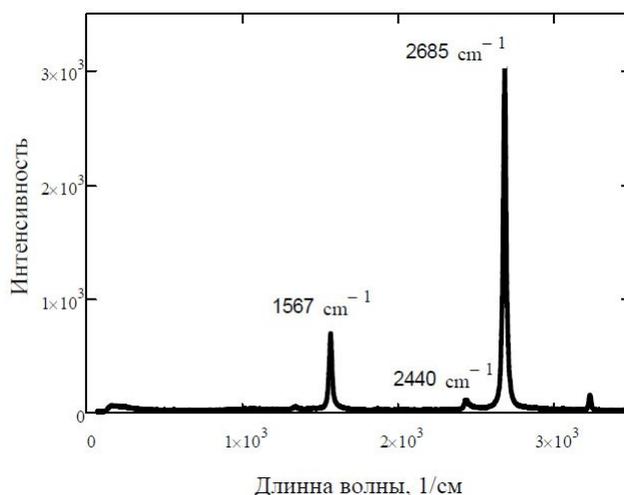


Рисунок 7 – Спектральные характеристики графена

Больше усилий в настоящее время должно быть направлено на нахождение конкретных зависимостей спектров КРС от вида углеродной  $sp^2$  наноструктуры, наличия дефектов и деформаций в кристаллической структуре, её строения, присутствия примесей и локальных напряжений, как в самом углеродном материале, так и в подложке.

### Заключение

Полученные экспериментальные спектральные характеристики характеризуют тип проводимости УНТ а так же её вид, выраженный  $G'$  пик четко характеризует монослой графена, все эти параметры необходимы уже сейчас, для анализа экспериментальных образцов рабочих областей тезометрического датчика, анализа встроенного канала из графена полевого транзистора нового поколения микро- и нано- электроники.

На данный момент анализ спектральных характеристик КРС, охватывает широкую область параметров углеродных материалов, учитывая, что сама методика КРС довольно тривиальна, и не вызывает сложностей в использовании, дальнейшее развитие этого метода анализа даст базовую основу характеризации получаемых компонентов микро- и нано- электроники на основе углеродных  $sp^2$  наноструктур, графена и УНТ.

### Литература

1. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes R. Saito, M. Hofmann , G. Dresselhaus , A. Jorio. M. S. Dresselhaus, Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139-4307, USA Available online: 01 Jul 2011, <http://www.tandfonline.com/loi/tadp20>
2. Raman Scattering in Carbon Nanotubes Thomas Sand Jespersen, Ms.sc. Thesis Faculty of Science, University of Copenhagen, Ørsted Laboratory Niels Bohr Institute for Astronomy, Physics and Geophysics
3. Макаrchук В.В., Родионов И.А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ НАНОСИСТЕМ: Библиотека Наноинженерии. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. - 61 с.: ил.
4. Варламов П.И., Елсуков К.А., Макаrchук В.В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОИНЖЕНЕРИИ: Библиотека Наноинженерии. - М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. - 90 с.: ил.
5. Кононенко О.В., Матвеев В.Н., Касумов Ю.А., Ходос И.И., Матвеев Д.В., Божко С.И., Волков В.Т., Князев М.А., Фирсов А.А., Ильин А.И. Селективный рост одностенных углеродных нанотрубок и изготовление устройств на их основе. - Известия РАН, сер.Физическая, V74, N7, с.1032, 2010.

# ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ PROTEUS VSM

**Зверев А. В.**

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

Московский государственный технический университет

им. Н. Э. Баумана

## BASIC FEATURES AND CHARACTERISTICS OF SIMULATION AND PROTOTYPING ELECTRONIC DEVICES IN PROTEUS VSM SOFTWARE

**Zverev A. V.**

*Scientific Adviser:* Professor Zinchenko L. A.

Bauman Moscow State Technical University

### **Аннотация**

Статья посвящена проектированию электронных устройств в программном пакете PROTEUS VSM. В статье на основе проектирования примера рассматриваются основные функциональные возможности.

### **Abstract**

Article describes the design of electronic devices in the PROTEUS VSM software package. This article is showing basic functionality on the basis of example.

### **Введение**

Проектирование электронных устройств всегда было достаточно трудоемким процессом. В связи с быстрым развитием электронной промышленности с каждым годом выпускается все больше электронных компонентов с различным функционалом. Производители помещают электронные компоненты во все более миниатюрные корпуса, добавляя новые функции. Поэтому при проектировании новых электронных устройств прибегают к системам схемотехнического моделирования.

Одной из систем автоматизированного проектирования электронных устройств является пакет программ PROTEUS VSM, разработанный компанией Labcenter Electronics. Пакет базируется на основе моделей электронных компонентов принятых в PSpice. PROTEUS VSM позволяет моделировать работу программируемых устройств:

- Микроконтроллеров;
- Микропроцессоров;
- Цифровых сигнальных процессоров;
- Других цифровых устройств.

Пакет состоит из двух программ:

ISIS – программа предназначенная для синтеза и моделирования непосредственно электронных схем;

ARES – программа для разработки печатных плат.

Редактор печатных плат ARES позволяет проектировать печатные платы до 16 слоев, содержит мощные средства, как интерактивного размещения, так и размещения компонентов по заданной сетке. Трассировка проводников возможна как с помощью встроенного ядра ELECTRA, в котором используются наиболее прогрессивные алгоритмы трассировки печатных проводников, так и с выгрузкой данных в стороннее программное обеспечение трассировки.

Работа над всеми частями проекта ведется в единой управляющей оболочке. При внесении изменений на любом этапе разработки, изменения отражаются на всех связанных стадиях проекта.

## 1. Создание принципиальной схемы

Для создания принципиальной схемы электронного устройства откроем программу ISIS. Упрощенная реализация создания иерархических и многоканальных структур позволяет преобразовывать большие сложные схемы в набор простых подсхем. Создадим новый проект. Добавим нужные компоненты из библиотеки. После соединения компонентов схема готова к отладке.

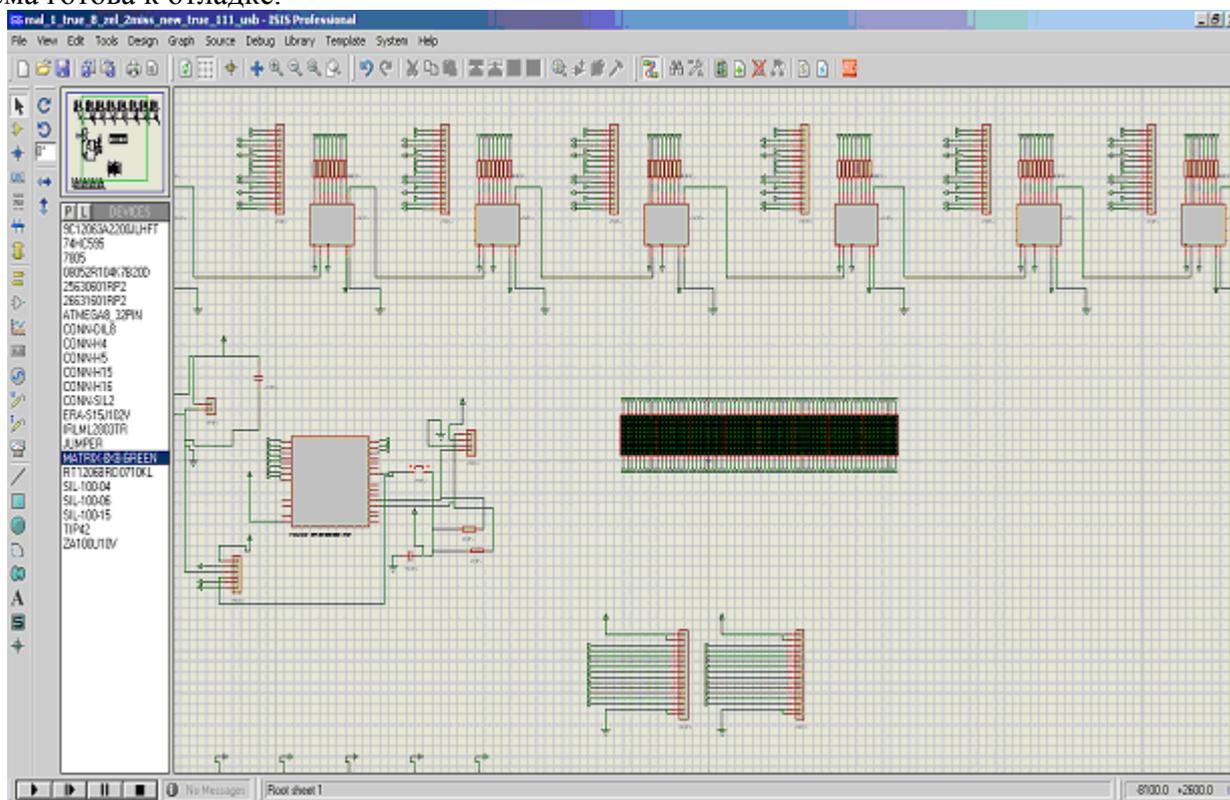


Рисунок 1 – Принципиальная схема устройства в PROTEUS-VSM ISIS

Для анализа схемы можно воспользоваться различными виртуальными приборами:

- Осциллографом;
- Логическим анализатором;
- Счетчиком;
- Терминалом;
- Анализатором шины I2C;
- Анализатором SPI;
- Вольтметром;
- Амперметром.

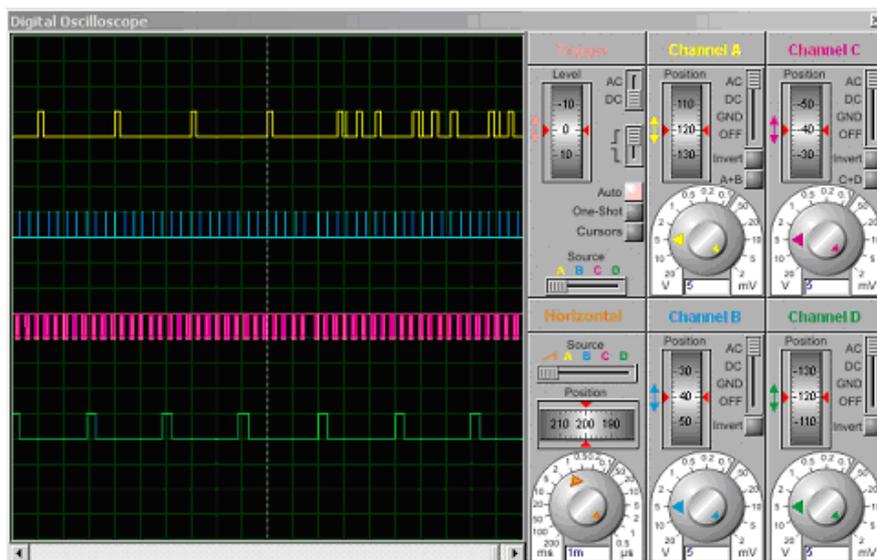


Рисунок 2 – Анализ работы схемы с помощью виртуального цифрового осциллографа

PROTEUS-VSM ISIS позволяет выполнять стандартный набор процедур смешанного цифро-аналогового моделирования.

## 2. Создание печатной платы

После анализа и корректной работы схемы данные передаются в редактор печатных плат – ARES. Программа ARES обладает мощной визуализированной системой задания и проверки правил проектирования (design rules). Пользователь получает контроль над процессом разработки топологии на каждой стадии проектирования печатной платы. Все вносимы изменения автоматически применяются во все связанных стадиях. Воспользуемся автоматической расстановкой компонентов.

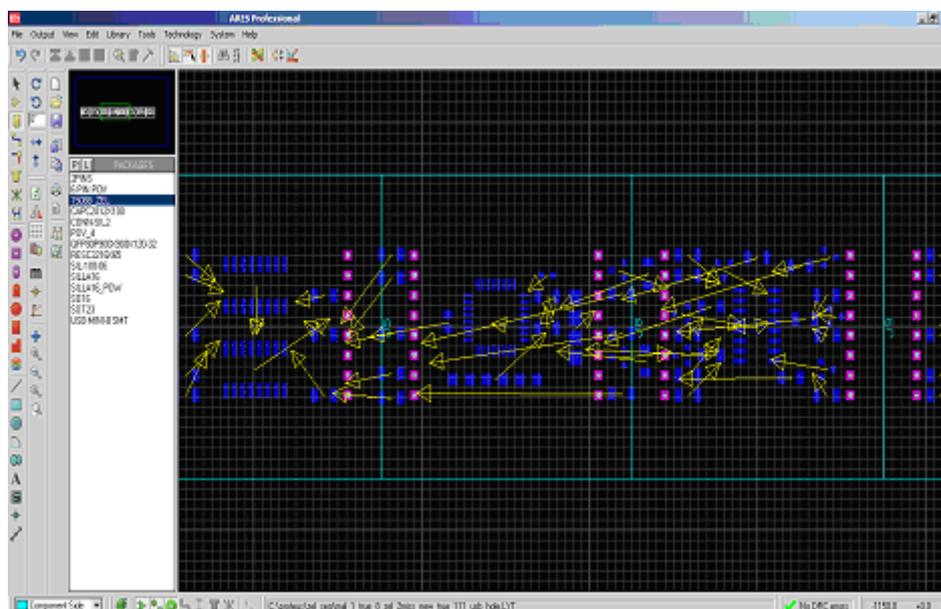


Рисунок 3 – Результат автоматической расстановки компонентов в PROTEUS-VSM ARES

После расстановки компонентов приступаем к трассировке. Воспользуемся встроенной программой трассировки ELECTRA.

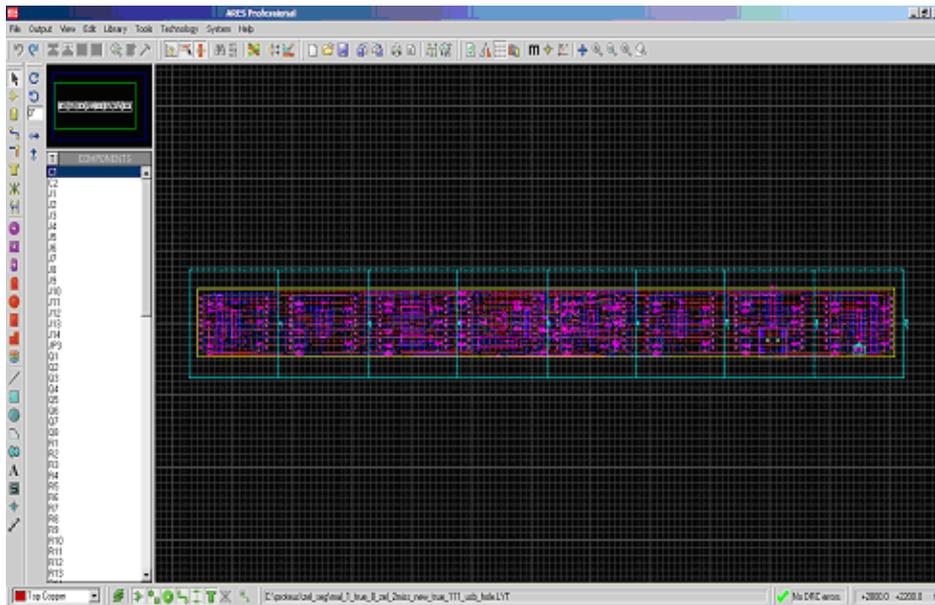


Рисунок 4 –Результат автоматической трассировки

В PROTEUS-VSM ARES есть возможность просмотра готового устройства в виде трехмерной модели с возможностью сохранения в основных 3D форматах.

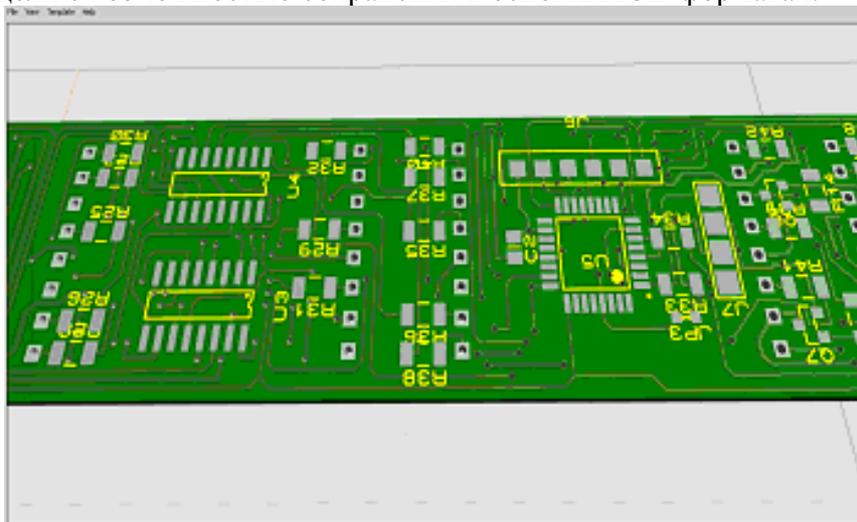


Рисунок 5 – Трехмерная модель устройства без компонентов

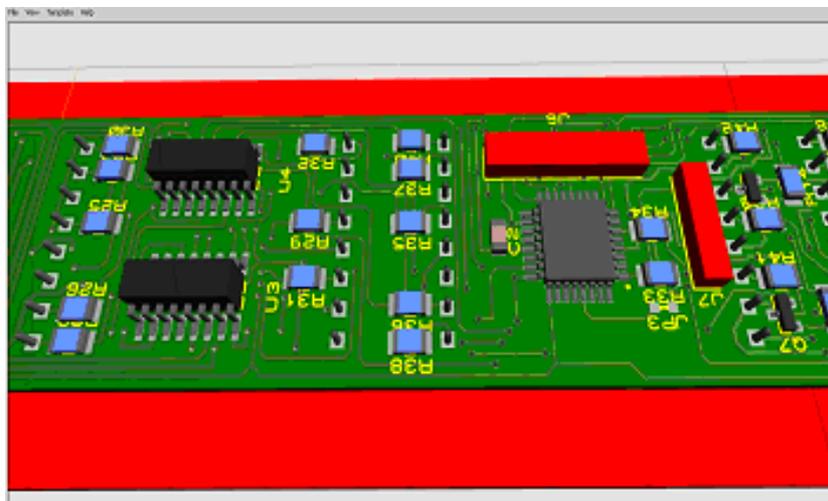


Рисунок 6 – Трехмерная модель устройства с компонентами

PROTEUS-VSM ARES поддерживает широкий перечень выходных форматов, таких как:

- GERBER;
- ODB++
- IPF
- DXF
- PDF

Также формат для установки компонентов на промышленном оборудовании – PICK AND PLACE, формат для тестирования на короткое замыкание TESTPOINT INFORMATION. Экспорт графической информации в растровые и векторные форматы.

### **Заключение**

Программный пакет PROTEUS-VSM обладает большими возможностями для проектирования и отладки цифровых устройств. Простой визуальный интерфейс программы позволяет наглядно и в режиме реального времени симулировать работу устройства. Отличительной особенностью PROTEUS-VSM является возможность обмена данными виртуального устройства с реальным через COM порт или USB интерфейс. При трассировке проводников возможно использовать пользовательские скрипты маршрутизации. В случае отсутствия электронного компонента можно скачать PSpice модель с сайта производителя компонента. На данный момент программный пакет PROTEUS-VSM является оптимальным вариантом для разработки электронных устройств среднего уровня сложности.

### **Литература**

1. Labcenter Electronics - a leading developer of electronics CAD (schematic, simulation and PCB autorouting) software. <http://www.labcenter.com/index.cfm>
2. The Proteus Design Suite Product Guide. <http://downloads.labcenter.co.uk/proteus7brochure.pdf>

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Саяпин В.Е., Смuryгин И.М.*

Научный руководитель: ассистент В.А.Шпиев  
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

## CONTROL SYSTEM FOR BRUSHLESS SENSORLESS DC (BLDC) MOTOR

*Sayapin V.E., Smurygin I.M.*

Supervisor: Schpiev V.A.  
MSTU, Moscow, Russia

### **Аннотация**

В работе представлена система управления для бесколлекторного трехфазного двигателя, реализованный на базе микроконтроллера и силовых ключей, коммутирующих обмотки. Подробно исследованы физические принципы функционирования различных видов бесколлекторных двигателей и способы их управления. Кратко представлен физический вариант реализации системы управления для бесколлекторного двигателя с внешним вращающимся ротором.

### **Annotation**

This article is about a control system for a brushless three-phase motor, based on the microcontroller and power FETs, which are in charge of switching the windings. Information about physical principles of operation of various types of brushless motors and methods for their control is given in detail. Briefly presented the physical implementation of the control system for brushless outrunner motor.

### **Введение**

В настоящее время широко распространены различные виды радиоуправляемых воздушных моделей. Одной из отличительных особенностей таких моделей является наличие бесколлекторных двигателей.

В работе представлены бесколлекторные двигатели и система управления, основанная на микроконтроллере и полевых транзисторах. Применение бесколлекторных трехфазных двигателей является перспективным, т.к. это дает предпосылки к созданию различного рода беспилотных систем.

### **Описание функционирования работы бесколлекторного трехфазного двигателя постоянного тока (БТДПТ).**

Применение бесколлекторного трехфазного двигателя постоянного тока (БТДПТ) обусловлено тем, что его использование предоставляет разработчику ряд преимуществ:

- отсутствуют трущиеся поверхности, что увеличивает срок службы системы;
- генерация более низкого уровня акустического и электрического шума по сравнению с универсальными коллекторными двигателями постоянного тока;
- возможность работы в опасных средах (с воспламеняемыми продуктами) из-за отсутствия искрения.
- хорошее соотношение массогабаритных характеристик и мощности.

Двигатели такого типа характеризуются небольшой инерционностью ротора, т.к. обмотки расположены на статоре. Коммутация управляется электроникой. Моменты коммутации определяются путем измерения обратной ЭДС, генерируемой обмотками. Схема замещения бесколлекторного трехфазного двигателя представлена на рисунке 1[1].

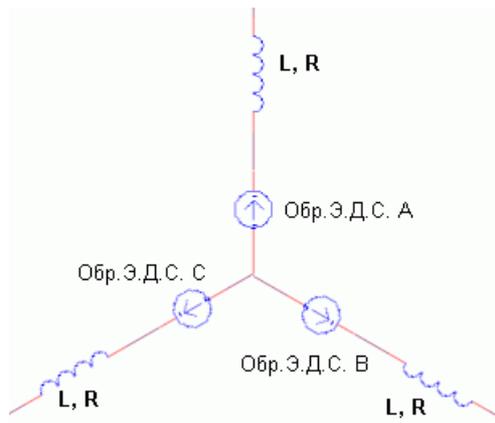


Рисунок 1 - Схема замещения статора БТДПТ

От силы магнитного поля зависит мощность и частота вращения двигателя. Регулировать частоту вращения и вращающий момент двигателя можно за счет изменения тока через обмотки. Наиболее распространенный способ управления током через обмотки является управление средним током. Для этого используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), рабочий цикл которой определяет среднее значение напряжения на обмотках, а, следовательно, и среднее значение тока и, как следствие, частоту вращения. Скорость может регулироваться при частотах от 20 до 60 кГц. Вращающееся поле трехфазного, трехобмоточного БТДПТ показано на рисунке 2 [2].

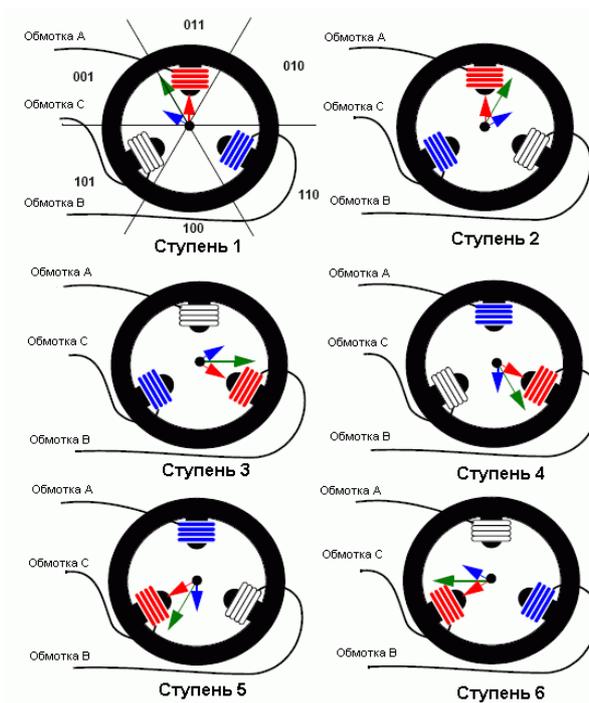


Рисунок 2 - Ступени коммутации и вращающееся поле БТДПТ

Управление переключением фаз БТДПТ происходит посредством измерения обратных ЭДС (ОЭДС), возникающих при вращении катушки в магнитном поле. Типичный вид ОЭДС для БТДПТ представлен на рисунке 3.

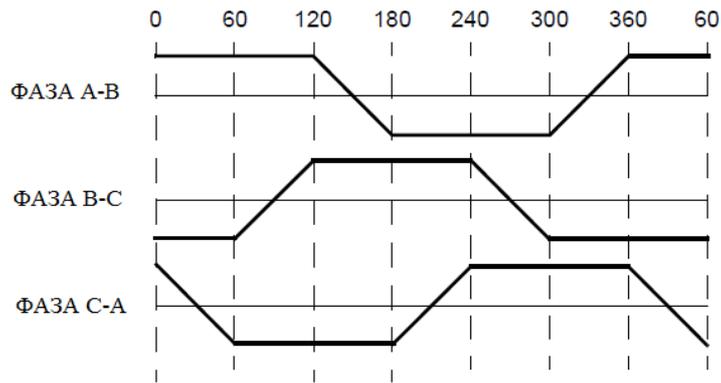


Рисунок 3 – Вид ОЭДС для БТДПТ

В один промежуток времени ОЭДС на первой фазе имеет положительное значение, вторая - отрицательное, а ОЭДС на третьей в это время имеет нулевое значение. На третьей обмотке возникает состояние, когда напряжение пересекается со средним напряжением, которое получается в результате сложения положительной и отрицательной ОЭДС. Пересечение со средней линией происходит посередине между двух коммутаций. При постоянной скорости вращения двигателя, временной промежуток от коммутации до пересечения со средним напряжением равен промежутку времени от пересечения средней линии до момента следующего переключения. Этот принцип лежит в основе бессенсорного управления коммутаций обмоток.

Если следовать последовательности коммутаций, представленной на рисунке 3, то получим шесть различных векторов магнитного потока, соответствующих шести ступеням коммутации. Шесть ступеней соответствуют одному обороту ротора. На рисунке 4 представлена схема переключения обмоток БТДПТ [3].

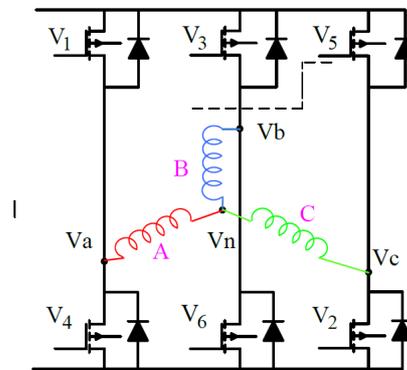


Рисунок 4 – Схема переключения обмоток БТДПТ

Где  $V_a$ ,  $V_b$  и  $V_c$  – напряжения на соответствующих фазах, а  $V_n$  – напряжение виртуальной нейтральной точки.

Произведем основные теоретические расчеты для определения момента. Сделаем предположение, что фаза С отключенная фаза, получим следующие уравнения для трех напряжений.

$$V_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_a + V_n \quad (1)$$

$$V_b = RI_b + L \frac{dI_b}{dt} + E_b + V_n \quad (2)$$

$$V_c = E_c + V_n \quad (3)$$

где  $V_c$  - Обратная ЭДС,  $I_a$  - ток в фазы,  $L$  - индуктивность.

Поскольку только два тока могут протекать в обмотках статора одновременно, токи двух фаз равны и противоположны по направлению. Это показано в уравнении 4.

$$I_a = -I_b \quad (4)$$

Складывая (1),(2) и (3) и учитывая (4), получим:

$$V_a + V_b + V_c = E_a + E_b + E_c + 3V_n \quad (5)$$

Очевидно, что в моменты времени, при которых обратная ЭДС равна нулю, сумма обратных ЭДС фаз равна нулю. Исходя из этого уравнение 6 принимает вид.

$$V_a + V_b + V_c = 3V_n \quad (6)$$

Для незадействованной фазы С обратная ЭДС состоит из:

$$E_c = V_c - V_n \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует:

$$3E_c = 2V_c - (V_a + V_b) \quad (8)$$

На этом предположение основан следующий метод определения момента переключения обмоток.

Как показано в уравнении 5 момент пересечения обратной ЭДС фазы С нуля можно обнаружить, сравнивая  $V_c$  и  $V_n$ . Тем не менее,  $V_c$ , как правило, не доступно в бесколлекторном двигателе постоянного тока. Так же необходим фильтр нижних частот для обработки сигналов. Схема, отображающая принцип сравнения общей точки с обратной ЭДС на катушке представлена на рисунке 5 [3].

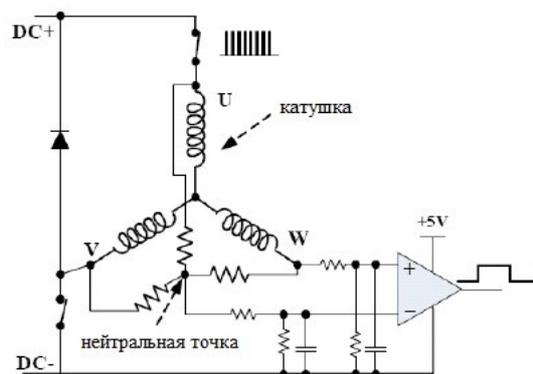


Рисунок 5 – Схема определения момента пересечения ОЭДС нуля

Из рисунка можно сделать вывод, что напряжение, снимаемое с незадействованной обмотки, сравнивается с напряжением виртуальной нейтральной точки. Результирующий сигнал подается на микроконтроллер для составления программы переключения плечами транзисторов для правильной коммутации обмоток БТДПТ.

## Разработка алгоритма программы управления БТДПТ

Граф, отображающий алгоритм работы программы микроконтроллера, управляющего переключениями обмоток БТДПТ, представлен на рисунке 6.

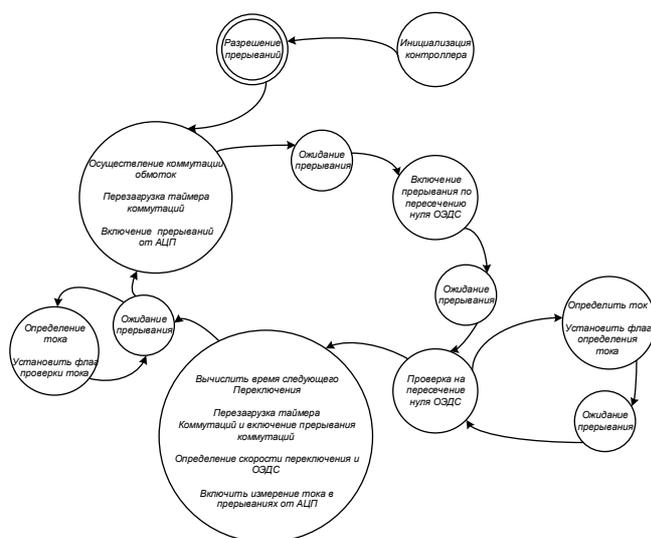


Рисунок 6 – Диаграмма состояния работы программы микроконтроллера, управляющего переключениями обмоток БТДПТ

Основные состояния микроконтроллера при выполнении программы управлением БТДПТ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Спецификация диаграммы состояний работы программы управления БТДПТ

Состояние	Описание
<i>Инициализация микроконтроллера</i>	Происходит настройка портов ввода/вывода и аппаратных ресурсов(таймеров, АЦП, компараторов)
<i>Осуществление коммутации обмоток и перезагрузка таймера</i>	При первом вызове происходит запуск двигателя. Запускается счетчик.
<i>Ожидание прерывания</i>	Состояние бездействия, до тех пор, пока не произойдет определенное событие: изменение на выходе компаратора, переполнение счетчика, обнуление таймера
<i>Проверка на пересечение нуля ОЭДС</i>	Сработал компаратор, т.е. произошло пересечение ОЭДС нуля. Запуск таймера на время, полученное из счетчика

### Практическая реализация системы управления БТДПТ.

Схема, осуществляющая управление БТДПТ, построенная на базе микроконтроллера AVR ATMega 88 представлена на рисунке 7.

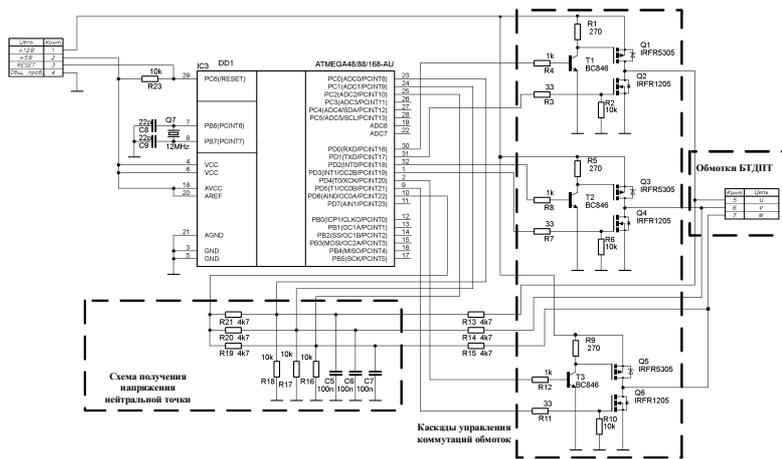


Рисунок 7 – Схема электрическая принципиальная управления БДПТ

Данную схему можно разделить на несколько основных частей:

- *Схема получения напряжения нейтральной точки.* Используется для снятия напряжения с нейтральной точки.
- *Каскады управления коммутацией обмоток.* Данная схема содержит три каскада переключения обмоток БДПТ, по количеству обмоток двигателя. Каждый каскад состоит из двух полевых транзисторов. В данной схеме необходимо использовать полевые транзисторы из-за наличия больших токов.
- *Микроконтроллер.* Производит коммутацию обмоток по алгоритму, путем управления транзисторными ключами.

### Заключение

Разработка программы управления БДПТ является одной из основных задач при построении радиоуправляемых моделей. Правильная настройка регулятора оборотов БДПТ является хорошим фундаментом для создания сложных систем управления.

Система управления на базе БДПТ может иметь применение в ряде приложений. Например, может быть использована как система слежения за определенными объектами. На базе системы управления с БДПТ может быть построено беспилотное транспортное средство, которое способно выполнять различные функции, заложенные в программе автопилота.

### Литература

1. AVR492: Управление бесколлекторным электродвигателем постоянного тока с помощью AT90PWM3.
2. Padmaraja Yedamale. “AN885.Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”. Microchip Technology Inc.
3. Daniel Torres. “AN1160. Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function”. Microchip Technology Inc.

## СИНТЕЗ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАРШРУТИЗАТОРОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ «АНГАРА»

**Котельницкий А.В.**

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

## USE OF THE PROGRAM BEHAVIORAL MODELS IN THE DESIGN OF THE SUPERCOMPUTER NETWORK “ANGARA” ROUTER

**Kotelnitsky A.V.**

*The senior lecturer, Cand. Tech. Sci. Vlasov A.I.*  
Russia, Moscow, MSTU named after N.E.Bauman, faculty IU4

### **Аннотация**

В работе изложены современные подходы к проектированию СБИС СнК, направленные на резкое сокращение сроков и, соответственно, стоимости разработки. Также подробно описаны применения программных поведенческих моделей в рамках маршрута проектирования. Отдельно рассмотрены перспективы применения поведенческого моделирования при проектировании маршрутизатора суперкомпьютерной сети «Ангара».

### **Abstract**

The paper deals with the current approaches to the design of VLSI SoC aimed at sharply reducing time and, correspondingly, the cost of development. Use of software behavioral models in the design route is also described. The prospects for the use of behavioral modeling in the design of the supercomputer network “Angara” router are separately considered.

Суперкомпьютерная сеть «Ангара», как и большинство современных вычислительных комплексов, строится по принципу разделяемой памяти с общим адресным пространством, что приводит к повышению межзвлового трафика сети. В таких условиях ВОКС (Высокоскоростная Отказоустойчивая Коммуникационная Сеть) является одной из важнейших частей суперкомпьютера, определяющей его производительность и масштабируемость. Для достижения высоких скоростей передачи данных и низких задержек маршрутизатор планируется изготовить в виде СБИС СнК(Система на Кристалле)[3]. Однако разработка современной СнК является сложной и очень трудоемкой задачей. К примеру, если допустить что разработчик способен проектировать в среднем 100 вентиляей в день, то для того чтобы спроектировать СБИС сложностью 10 млн. вентиляей в течение года, потребуется команда из 500 человек, что неприемлемо с экономической точки зрения[1]. В связи с этим, современные методы проектирования направлены, прежде всего, на максимальное сокращение трудоемкости разработки СнК.

В процессе разработки СБИС СнК выделяются различные уровни абстракции в зависимости от стадии проектирования. Как показано на рисунке 1, на разных уровнях объектом абстракции могут быть система, регистр, вентиль или геометрия элемента на кристалле [1].



Рисунок 1 – Уровни абстракции проекта

На самом верхнем, системном уровне создается поведенческое описание устройства: описываются общие алгоритмы функционирования, прорабатывается архитектура модели, определяется количество функциональных блоков. На уровне регистровых передач (RTL - register transfer level) проект описывается более подробно и включает в себя логические узлы, элементы памяти и т.д. На вентильном или логическом уровне схема представляется совокупностью логических вентилях и триггеров. Эти логические элементы затем представляются в виде топологических элементов на кремнии.

Традиционно в процессе проектирования используется нисходящая модель проектирования (waterfall model), при которой проект, проходя различные этапы, постоянно увеличивает уровень детализации. На рисунке 2 показана последовательность выполнения начальных этапов разработки СнК.



Рисунок 2 – Этапы разработки СнК

Процесс начинается с разработки технических требований, их последующего анализа и проведения предварительного моделирования. После функциональной проверки

технических требований в полученной модели выделяются подзадачи, выполняемые аппаратными или программными средствами. В результате проект разбивается на две части: программную и аппаратную. В дальнейшем разработка программного обеспечения ведется параллельно основному проекту. На следующем этапе создается RTL модель проекта, описывающая схему на уровне регистров. Для разработки используется один из языков описания аппаратуры (VHDL, Verilog). Затем по RTL описанию с помощью программы логического синтеза формируется список цепей и топология схемы. Недостаток данной модели проектирования в том, что понять насколько разрабатываемая БИС соответствует исходным требованиям возможно лишь в конце процесса проектирования. В последнее время стала популярна спиралевидная методология [2]. После этапа постановки задачи (спецификации исходных требований), на стадии ее выполнения, происходит оценка различных элементов системы для реализации функциональных возможностей. Технические требования модифицируются на стадии доводки проекта в соответствии с решениями, выполненными на стадии реализации. Таким образом, параллельно может выполняться сразу несколько этапов проектирования. При этом в процессе разработки группы разработчиков обмениваются результатами проектирования. Эта методология ведет к лучшему пониманию функциональных системных возможностей на очень ранней стадии в процессе проектирования.

Поскольку методология спиралевидного проектирования предполагает изменения технических требований в процессе проектирования СнК, немаловажную роль играет программное поведенческое моделирование. К примеру, при пересмотре технического задания, может возникнуть необходимость в реализации дополнительного СФ-блока. Для того чтобы избежать возможных ошибок, перед созданием RTL кода проводится предварительное моделирование его работы [2]. С этой целью разрабатывается программная поведенческая модель, которая отражает архитектуру и функциональность блока. Такая модель обычно разрабатывается на высокоуровневых языках программирования (C, C++), поскольку на данном этапе не требуется детального описания схемы. При внесении изменений в уже разработанные блоки предварительное моделирование позволит оценить и оптимизировать вносимые изменения.

Разработанная модель может в дальнейшем применяться в процессе верификации RTL модели. В этом случае программная поведенческая модель используется в качестве эталонной (golden model): все результаты полученные в результате тестирования будут сравниваться с результатами работы этой модели. Для проверки соответствия RTL кода техническим требованиям, разрабатывается тестовое окружение, которое генерирует тестовые воздействия и подает их на вход поведенческой и верифицируемой модели. Затем результаты работы двух моделей сравниваются и делается вывод о правильности работы RTL кода.

Другим применением программных поведенческих моделей в процессе проектирования СБИС СнК является отладка ПО. Обычно для этих целей используют ПЛИС или прототип кристалла. Однако это возможно только на последних стадиях проектирования, когда в распоряжении разработчиков уже есть отлаженная RTL модель, из которой можно было бы сгенерировать код для программирования ПЛИС. Для сокращения сроков выпуска изделия на первых этапах проектирования СнК в качестве виртуального кристалла используют поведенческую модель. В этом случае ПО разрабатывается поверх модели, а при симуляции коды объединяются и компилируются вместе. Отладка при помощи виртуального кристалла может также применяться при ограниченном финансировании проекта, поскольку данный метод не предполагает дополнительных затрат на покупку ПЛИС. Недостатком такого метода является низкая скорость выполнения кода по сравнению с ПЛИС. Поскольку весь проект выполнен на программном уровне, нагрузка на вычислительные устройства, на которых производится симуляция, возрастает, и скорость работы снижается.

В настоящий момент программной поведенческой модели маршрутизатора «Ангара», соответствующей сегодняшнему состоянию проекта, нет. Решения о внесении изменений в технические требования принимаются без предварительного моделирования, а верификация

проводится при помощи локальных тестов. Для увеличения эффективности разработки СнК было принято решение о создании подобной модели. Помимо вышеперечисленных применений, поведенческую модель также планируется применить при моделировании работы сети. Подобное моделирование проводится для оценки эффективности принятых алгоритмов маршрутизации и их отладки. Поскольку вычислительная сеть «Ангара» разрабатывается как сеть с тороидальной топологией, то в каждом ее узле находится отдельный маршрутизатор. Таким образом, для проведения моделирования сети необходимо размножить модель маршрутизатора до количества узлов. На сегодняшний день работа сети моделируется при помощи RTL модели, однако время исполнения кода данной модели очень велико. Моделирование нескольких секунд работы сети с 9 узлами может достигать нескольких часов. Поскольку реальные сети могут достигать размера в десятки тысяч узлов, подобное время моделирования неприемлемо. Для увеличения скорости моделирования RTL модели в узлах планируется заменить поведенческими моделями. С целью верификации RTL модель останется лишь в одном из узлов. Замена моделей увеличит скорость моделирования в десятки раз.

Исходя из вышеизложенного, для достижения максимальной эффективности, разработка программной поведенческой модели будет вестись с учетом всех возможных применений данной модели в рамках проектирования маршрутизатора.

### **Литература**

1. Стешенко В., Руткевич А., Гладкова Е., Шишкин Г., Воронков Д. Проектирование СБИС типа «Система на кристалле». Маршрут проектирования. Синтез схемы. // ИД «Электроника»: Электронные компоненты №1 2009
2. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. // Издательство «Техносфера». 2004. С. 69–80.
3. Макагон Д., Сыромятников Е. Сети для суперкомпьютеров. // «Открытые системы» №7 2011.

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ И МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

**Замятин Д.С., Коновалов К.А., Матазов Н.А.**  
*Научный руководитель к.т.н., доц. Журавлева Л.В.*  
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

## AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF ELECTRONIC FUNDS ASSEMBLY AND INSTALLATION TECHNOLOGICAL PROCESS GENERATION

**Zamyatin D.S., Konovalov K.A., Matazov N.A.**  
*Supervisor: Juravleva L.V.*  
MSTU, Moscow, Russia

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается автоматизированная информационная система (в дальнейшем – «система») генерации технологического процесса сборки и монтажа электронной аппаратуры. Рассмотрены общие принципы разработки техпроцесса, этапы работы с системой, преимущества автоматизации и визуализации.

### **Annotation**

This article describes an automated information system (hereinafter - the "system"), the generation process of assembly and installation of electronic equipment. The general principles for the development of process technology, the stages of the system, the benefits of automation and visualization.

### **Введение**

Проектирование любого изделия электронной аппаратуры требует разработки технологического процесса сборки. Система позволяет повысить производительность труда технологов, обеспечить контроль качества работ, а так же визуализировать полученные результаты, при этом возможна одновременная работа нескольких пользователей, в том числе удаленно. Это возможно благодаря использованию современных веб-технологий, таких как PHP, JavaScript, CSS. Система использует базу данных MySQL, что облегчает задачи администрирования и обеспечивает высокую производительность.

### **Общее описание системы**

В системе содержится база оборудования, операций и оснастки, которая может быть дополнена или изменена пользователями. Для каждой позиции возможно указать поясняющую информацию и прикрепить изображения: вид сверху для планировки помещения, общий вид для визуализации и схему устройства для пояснения принципа работ.

Система имеет встроенный механизм авторизации пользователей, что позволяет разграничивать права доступа и вести одновременную работу над разными проектами. В системе предусмотрены две роли. Первая роль - администратор, который заполняет задания и исходную информацию, а так же осуществляет контроль над работой других пользователей. Вторая – технолог, который непосредственно производит разработку технологического процесса. При малых объемах работ возможно совмещение ролей.

Работа в системе разбита на этапы, что позволяет структурировать разработку техпроцесса, планировать сроки выполнения работ, проводить оценку качества. Справочник этапов возможно изменять администратору системы. Работа технологов контролируется по завершению этапов. Если предыдущий этап не выполнен, система не позволит перейти к следующему. Для контроля качества работы время выполнения этапов фиксируется.

## Этапы работы с системой - Ввод исходных данных

Данный этап выполняется один раз при запуске системы. Сначала в систему вводятся списки сотрудников и этапов работы. Для каждого сотрудника назначаются права доступа и пароль для входа в систему.

Далее создается список разрабатываемых устройств, к каждому из которых прилагаются документы (схемы, чертежи, перечни элементов). В дальнейшем этот этап повторяется при изменении номенклатуры электронных модулей (добавление новых или модификации имеющихся).

### Этап 2. Выбор задания на разработку техпроцесса сборки электронного модуля

При первом входе в систему технолог должен выбрать, для какого устройства будет разрабатываться техпроцесс. За каждым технологом закрепляется одно устройство, или один модуль, если устройство состоит из нескольких частей. Это исключает возможность разработки разными людьми одного и того же техпроцесса.



Рис. 1 – Выбор устройства для разработки техпроцесса

После выбора задания можно увидеть этапы и последовательность выполнения работ. Навигатор этапов содержит интерактивную справку по работе с программой.

### Этап 3. Выбор операций технологического процесса из базы данных

На следующем этапе происходит разработка техпроцесса сборки устройства. Технолог выбирает последовательность операций из базы, и указывает используемое оборудование и оснастку. Некоторые операции могут выполняться без оснастки. Так же, для каждой единицы оборудования указывается расположение в цехе по координатам X и Y. Эти данные используются в дальнейшем для построения маршрутной карты и визуализации схемы расположения оборудования.

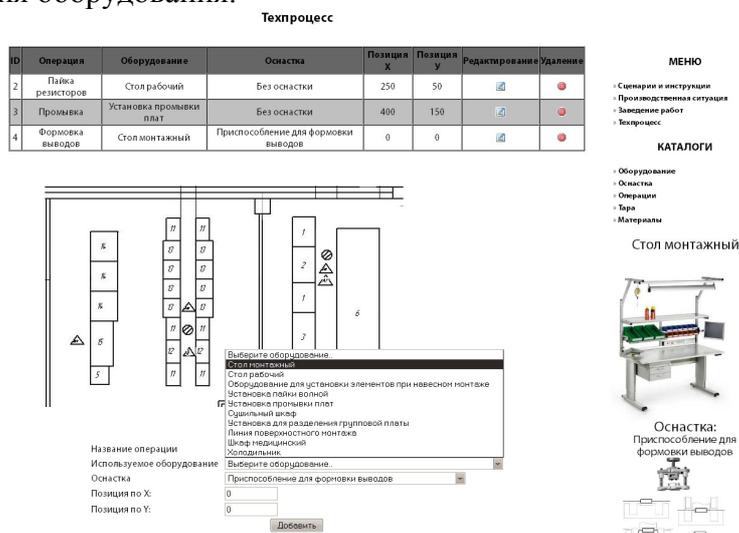


Рисунок 2 – Набор операций техпроцесса и расстановка оборудования

По мере набора операций обновляется схема оборудования, в наглядной форме показывающая его расположение в помещении. По ней можно проследить путь цепочки техпроцесса, и заранее планировать места установки последующего оборудования. Система позволяет, если это требуется, вводить координаты по заранее установленным линиям, что удобно при больших объемах помещений.

При выборе оборудования с информационной панели отображается поясняющая информация и изображение, а после размещения в цеху сразу обновляется карта помещения с видом сверху. Информацию по операции можно получить, наведя курсор мыши на нужную область.

#### Этап 4. Просмотр и оценка результатов

После завершения разработки техпроцесса администратор имеет возможность просмотреть результаты работы технологов, сравнить и оценить их. Текущее состояние работ отображается в виде таблицы.

пользователи				группы				сотрудники				ПЛАН				ОЦЕНКА			
Контроль выполнения:																			
<b>Технолог</b>	<b>Устройство</b>			<b>Статус</b>															
Кузнецов Е.	Блок питания БП-45А			Завершен 															
Морозов С.	Входной модуль ВМК-01			Разработка маршрутной карты 															
Абрамов Д.	-			Не выбрано устройство 															
Сергеев И.	Входной модуль ВМК-02			Ожидает подтверждения 															

*Дмитрий Зайятин,  
Вы авторизованы с ролью  
"Администратор" Выход*

**МЕНЮ**

- » Сценарии и инструкции
- » Производственная ситуация
- » Заведение работ
- » Техпроцесс

**КАТАЛОГИ**

- » Оборудование
- » Оснастка
- » Операции
- » Тара
- » Материалы

Рисунок 3 – Таблица результатов оценки работы

По ссылкам на статусы можно просмотреть документы, подготовленные технологом.

### Заключение

Рассмотренная система может быть использована как на производстве для разработки технологического процесса сборки электронной аппаратуры, так и в курсовом проектировании для обучения студентов, так как совмещает функционал технологический (база оборудования и оснастки, механизм визуализации и планировки помещения) и административный (просмотр и оценка результатов, контроль этапов выполнения работ).

### Литература

1. К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др. Под общей редакцией В.А. Шахнова. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для ВУЗов. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Е.М. Парфенов, Э.Н. Камышная, В.П. Усачов. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. Пособие для вузов. Радио и связь, 1989.

# ДЕЦЕНТРАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ ПОТОКОВОГО ВИДЕОВЕЩАНИЯ

Белов Н.А.

*Научный руководитель: ассистент, Аверьянихин А.Е.*

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

## DECENTRALIZED NETWORK MODEL OF STREAM VIDEO BROADCASTING

Belov N.A.

*Supervisor: assist., Averyanikhin A.E.*

MSTU, Moscow, Russia

### Аннотация

Статья посвящена вопросом реализации гибридной модели сети потокового вещания. Описаны структура и работа модели. Особое внимание уделено работе координационного центра, его функциям и основным измеряемым характеристикам; представлены простейшие математические формулы расчета характеристик.

### Abstract

The article is devoted to realization of hybrid network model of stream broadcasting. Drawing of structure and description of model's work are presented. Particular attention is paid to work of coordination center, its functions and foundation features; easy mathematical formulas for calculating of features are presented.

### Введение

Потоковая передача видеосигнала – довольно распространенный сейчас вид информационных услуг. В настоящее время можно часто слышать о таком явлении, как интернет-телевидение или IPTV. Данное явление непосредственно связано с потоковым видеовещанием.

Как бы просто и понятно это ни звучало, но организация потока видеоизображения представляет ряд трудностей для представителя данной услуги: в связи с разнообразием технического оборудования вычислительных сетей в различных ее частях возможны значительные перегрузки, что может отрицательно сказаться на качестве картинки на экране монитора клиента, а следовательно, на заинтересованности в данной предоставляемой услуге.

На сегодняшний день потоковая передача реализуется двумя способами: однонаправленное вещание (unicast) и групповое вещание (multicast) [1].

Основной недостаток первого – огромная нагрузка на базовый сегмент сети (сервер), второго – неподдержка на уровне оборудования многоканальной передачи информации.

Решить проблемы предыдущих двух моделей вещания позволяет следующая гибридная модель с центром управления потоками (координационный центр).

### 1 Потоковое вещание

Потоковое вещание представляет собой непрерывный поток информации, исходящий от источника и воспроизводимый, к примеру, на экране монитора пользователя, посредством какой-то среды. К примеру, телевидение и радио являются образцами потокового вещания, где в качестве среды для передачи электромагнитных волн является воздух.

Потоковая передача видео в сети Интернет очень требовательна к ресурсам. Видеопоток стандартного телевизионного качества требует от канала передачи скорости около 2Mbit/s, HD-видео еще больше [1].

На данный момент, как уже было сказано ранее, используются однонаправленный и групповой способы реализации передачи информации; чаще первый, так как он не требователен к оборудованию. Стандартная схема формально представляет собой сервер с

множеством подключенных к нему клиентов. Каждый запрос, посылаемый клиентом, обрабатывается сервером индивидуально, что приводит к перегрузкам в части сети сервера. Это основная проблема, которую необходимо решить. Для этого предлагается следующая модель.

## 2 Описание структуры и работы модели

Предлагаемая система представляет собой модель частично децентрализованной сети (рис. 1).

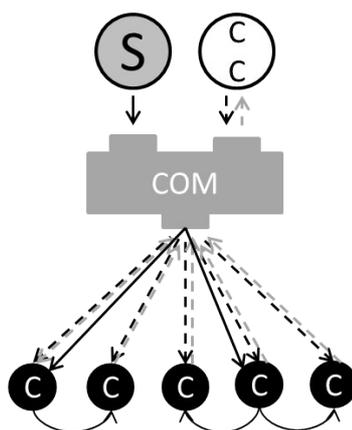


Рисунок 1 - Графическая интерпретация децентрализованной сети

Как видно из Рисунка 1, схема представляет собой сервер (S) с множеством подключенных к нему клиентов (C). Стоит обратить внимание, что в сети также имеется координационный центр (CC). Также можно видеть, что некоторые клиенты напрямую не соединены с сервером, а (в нашем случае) видеопоток идет с таких же клиентов. Отбором таких клиентов занимается координационный центр.

Необходимо сказать, как данная система в общем будет работать. Клиент, желающий воспользоваться услугой потоковой передачи видео в нашей сети, посылает запрос, который обрабатывается координационным центром. В свою очередь, координационный центр предоставляет пользователю список источников с указанием необходимых для него параметров (скорость передачи и т.д.). Клиент, выбрав для себя источник вещания (а также резервный источник, в случае разрыва соединения), получит наиболее оптимальный вариант воспроизведения видеопотока на своем компьютере. Наличие резервного источника необходимо для поддержания воспроизведения, когда первоначальный источник по каким-либо причинам более не может поддерживать соединение с клиентом. Тогда система клиента автоматически запросит переподключение, воспроизведение видео продолжится уже с него [1]. Подробнее остановимся на работе координационного центра.

## 3 Функции координационного центра

Для установления функций КЦ необходимо разобраться с характеристиками каналов связи, с которыми тот будет оперировать.

Основными характеристиками работы сети являются производительность, надежность и безопасность [2]. В данном случае безопасность нас мало интересует, займемся первыми двумя. Характеристику производительности можно разделить на характеристики обработки пакетов и скорости передачи информации.

Рассмотрим характеристики обработки пакетов.

1) Одностороннее время задержки (One-Way Delay, OWD).

OWD определяется как интервал времени между моментом помещения в исходящую линию связи первого бита пакета узлом-отправителем и моментом приема последнего бита пакета с входящей линии связи узла-получателя [2].

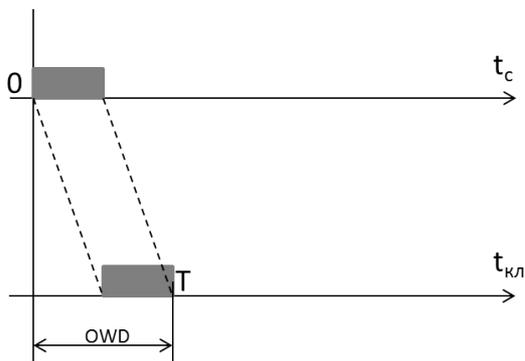


Рисунок 2 - Одностороннее время задержки

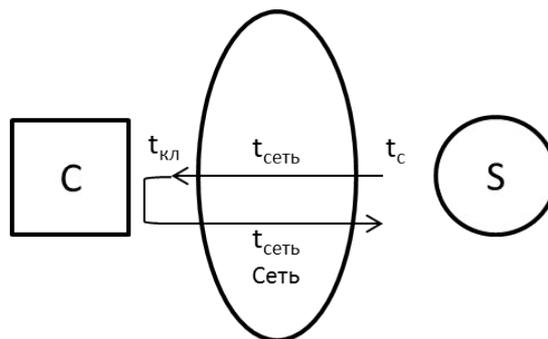


Рисунок 3 - Время обработки пакета

На Рисунке 2 одностороннее время задержки

$$OWD = T - 0 = T.$$

2) Время оборота пакета (Round Trip Time, RTT).

RTT определяется как интервал времени между отправкой первого бита пакета определенного типа узлом-отправителем узлу-получателю и получением последнего бита данного пакета узлом-отправителем после того, как пакет будет получен узлом получателя и отправлен обратно [2].

На Рисунке 3 графически показан путь используемого пакета. Основным требованием является малость времени нахождения пакета на сервере, т.к. это вносит достаточно большую погрешность в измерения. Тогда RTT можно выразить формулой:

$$RTT = 2xt_c$$

3) Вариация задержки пакета (IP Packet Delay Variation, IPDV или Jitter).

IPDV – разность односторонних задержек для пары пакетов заданного типа, полученных на интервале измерений T [2] (рис. 4).

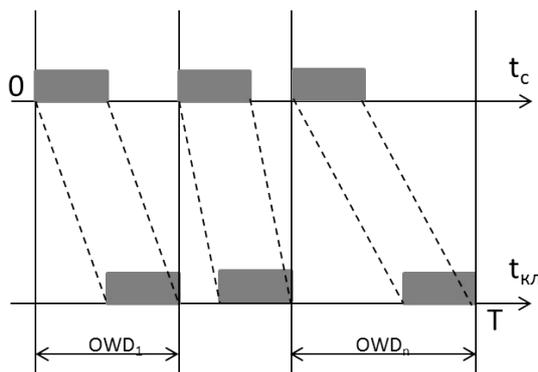


Рисунок 4 - Вариация задержки пакета

$$IPDV = OWD_n - OWD_1$$

Выделим основные требования для данных характеристик:

- 1) Пакеты одного типа с типом пакетов, характеристики которых будут измеряться.
- 2) Пакеты одного размера (от этого зависит время буферизации пакета, которое значительным образом влияет на конечный результат замеров).
- 3) Разные интервалы времени посылки пакетов (это необходимо для того, чтобы по каким-либо причинам не возникала синхронизация).

Также очень полезной характеристикой является средняя скорость передачи данных (Sustained Information Rate, SIR), значение которой определяется по формуле

$$SIR = V/T$$

т.е. объем данных  $V$ , передаваемый за время  $T$  [2].

Еще одна важная характеристика – доля потерянных пакетов [2].

$$L = NL/N$$

где  $L$  – доля потерянных пакетов

$NL$  – количество потерянных пакетов

$N$  – общее число пакетов.

Данные характеристики в полной мере определяют функционал координационного центра. Так как сеть будет работать с видео-трафиком, необходимо удовлетворить следующим критериям:

- постоянная битовая скорость
- высокая чувствительность к задержкам пакетов.

Для этого достаточно использовать измерения следующих характеристик:

- одностороннее время задержки
- вариация задержки пакета
- средняя битовая скорость

Несмотря на то, что видеопоток не слишком чувствителен к потерям пакетов, при большой доле их потерь они скажутся на качестве изображения, поэтому к указанным выше характеристикам стоит добавить долю потерянных пакетов.

Наконец, можно конкретно описать функции координационного центра:

- 1) Организация замеров OWD, IPDV, CBR, доли потерянных пакетов.
- 2) Статистическая обработка измерений данных характеристик.
- 3) Составление динамической базы данных источников с указанием всех необходимых для пользователей характеристик.
- 4) В случае, если канал связи с клиентом удовлетворяет всем характеристикам, позволяя одновременно принимать и передавать поток, определение клиента в качестве источника.

### **Заключение**

Разработанная модель является оптимальным вариантом работы с потоковым вещанием в сетях корпоративного и глобального масштабов. Координационный центр позволяет разгрузить сервер, а также эффективно определить источники вещания среди клиентов.

### **Литература**

1. Аверьянихин А.Е., Афанасьев А.В., Гибридная модель маршрутизации потокового вещания // Сборник докладов научной конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – с. 29-31.
2. Олифер В.Г., Олифер Н.А., Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для ВУЗов. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944с.: ил.