

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Маруныч К.В.

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

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

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROJECTION LITHOGRAPHY

Marunych K.V

the senior lecturer, Cand.Tech.Sci. Makarchuk V.V.

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

Аннотация

В работе изложены результаты оптимизации технологических параметров процесса проекционной литографии, обеспечивающих возможность получения поликремниевых затворов транзисторов с заданными технологическими ограничениями, независимо от их шага расположения. Определены параметры кольцевого источника освещения и фигур коррекции оптического эффекта близости, при которых обеспечивается проработка затворов транзисторов при любом шаге расположения.

Abstract

The paper presents the results of optimization of technological parameters of the projection lithography, providing the possibility of a polysilicon gate transistors with a given technological constraints, regardless of pitch location. It was defined the parameters of the annular illumination and optical proximity correction figures, which provide elaboration of the transistor gate at any step of the location.

Введение

В последние годы значительные успехи полупроводниковой промышленности были достигнуты благодаря процессу проекционной литографии, который обеспечивает формирование рисунка требуемой конфигурации в пленках различных материалов, сформированных на поверхности полупроводниковой подложки. Минимальный размер топологического элемента определяет плотность упаковки, надёжность, стоимость и такие важные параметры, как быстродействие и потребляемая мощность СБИС. Исторически проектные нормы, используемые при производстве СБИС, продолжают уменьшаться в 2 раза каждые 6 лет. Такой стабильный прогресс обусловлен совершенствованием оборудования и материалов, используемых в процессе литографии, а также развитием теоретической базы знаний, описывающей физику литографического процесса [1].

Одним из важнейших инструментов изучения самого литографического процесса является моделирование. С помощью литографических моделей, основанных на законах физики и химии, возможно просто и быстро проводить сложные расчёты, в то время как проведение реальных экспериментов может быть слишком дорогим или сложным или занимать много времени. Поэтому моделирование является наиболее удобным инструментом оптимизации технологических режимов процесса проекционной литографии.

Основным схемотехническим элементом СБИС является полевой транзистор, ширина затвора которого является наименьшим линейным размером элемента топологии микросхемы (проектной нормой). Она определяет его частотные и мощностные свойства. Поэтому оптимизация технологических параметров литографического процесса с целью получения стабильных размеров затвора транзистора является актуальной задачей.

Построение процессных окон

Стабильность технологического процесса проекционной литографии может быть оценена по ширине процессного окна. Процессное окно – это область допустимых значений

технологических параметров процесса проекционной литографии (дозы экспозиции и фокуса), внутри которой выполняются допуски на геометрические размеры профиля резиста [2]. В используемой модели фокус отсчитывается от его верхней границы. Профиль резиста характеризуется тремя параметрами: размером контролируемого элемента, углом наклона боковой стенки профиля и уменьшением толщины резиста относительно начального значения (рисунок 1).



Рисунок 1 – Геометрические параметры профиля резиста

Процессное окно строится в зоне допустимых значений дозы экспозиции и фокуса с учётом следующих ограничений:

1. Ширина основания профиля проявленного резиста (CD) должна отличаться не более, чем на 10% от желаемой ширины линии (240 нм);
2. Угол профиля проявленного резиста (*sidewall angle*) должен быть больше 75° ;
3. Уход резиста (разность между толщиной резиста и высотой профиля проявленного резиста, *resist loss*) должен составлять не более 15% от его толщины.

В область значений дозы экспозиции и фокуса, в которой выполняются указанные технологические ограничения вписывается прямоугольник. При этом его высота – это диапазон допустимых значений дозы экспонирования (разброс по дозе – *exposure latitude*), а ширина – диапазон допустимых значений расположения фокуса (глубина фокуса – *Depth Of Focus*). Координаты центра прямоугольника – оптимальная доза экспозиции и оптимальное положение фокуса, значения которых задаются при работе установки проекционной литографии. Таким образом, при отклонениях дозы и фокуса от оптимальных значений, допуски на размеры резиста всё равно будут выполнены. Для технологии производства КМОП СБИС, созданной в НИИСИ РАН разброс по дозе составляет менее 8%. При этом необходимо обеспечить максимальное значение глубины фокуса.

При изготовлении затворов полевых транзисторов возникает необходимость одновременной проработки изолированных и плотно упакованных линий затворов в едином технологическом процессе. При этом из-за различных дифракционных эффектов происходит изменение дозы экспозиции и положения фокуса, что может привести к выходу геометрических размеров профиля резиста за пределы установленных допусков. На рисунке 2 показано изменение оптимального значения дозы экспозиции в зависимости от шага линий. Процессные окна, которые были построены для получения этой зависимости, соответствуют стандартному технологическому режиму – параметры кольцевого источника освещения $\sigma_{out} = 0.7$, $\sigma_{in} = 0.35$, толщина резиста марки “Ultra-i123” - 0,36 мкм, толщина нижнего антиотражающего покрытия XHRi компании “Brewer science” - 160 нм.

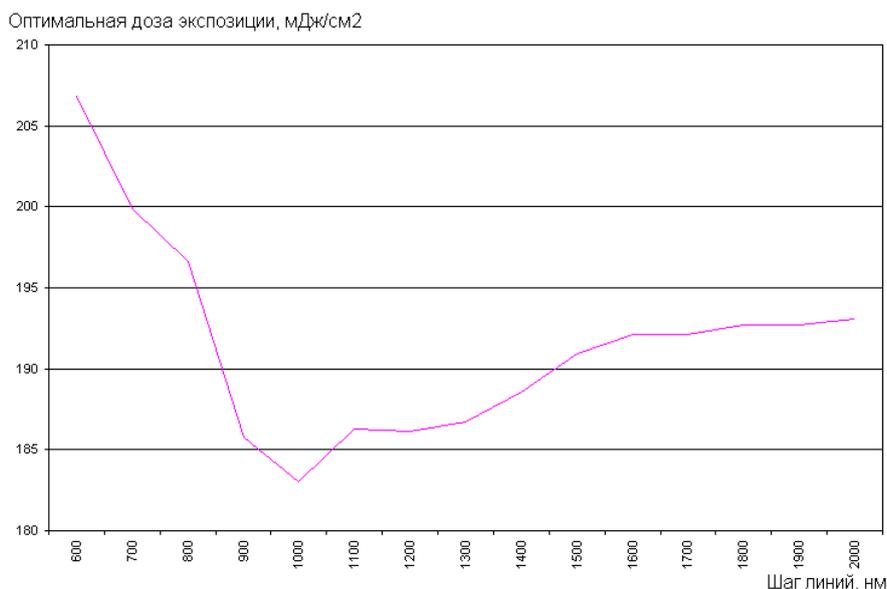


Рисунок 2 – Изменение оптимальной дозы экспозиции в зависимости от шага линий

Как видно из рисунка 2, при изменении шага линий, оптимальная доза экспозиции, определяющая положение процессного окна сильно изменяется, что приводит к выходу одного из параметров профиля резиста за границы установленного допуска. Этот эффект наиболее сильно проявляется в области так называемого «запрещённого шага» (от 800 до 1100 нм). Из-за такого смещения положения процессного окна, оказывается невозможным выбрать дозу экспонирования и фокус, при которых будут выполнены допуски на профиль резиста на любых шагах линий. В связи с этим возникает необходимость подбора таких параметров источника освещения, при которых положение процессного окна не будет изменяться (либо незначительно изменяться) во всем диапазоне изменения шага линий [3].

Выбор параметров источника кольцевого освещения

Для обеспечения максимальной глубины фокуса при проработке групповых структур в модельных экспериментах использовался кольцевой источник освещения, поскольку применение частично когерентного источника не позволяет достичь приемлемых значений глубины фокуса при малых шагах линий.

При выборе параметров источника кольцевого освещения была поставлена задача найти такие его параметры, при которых положение процессного окна при изменении шага линий менялось бы незначительно. С этой целью был проведён ряд модельных экспериментов, в результате которых были построены процессные окна в пространстве доза экспозиции - фокус при различных шагах линии и для каждого процессного окна определены оптимальное значение дозы экспозиции и фокуса. В результате были получены параметры источника освещения, при которых смещение процессного окна при изменении шага линий минимально.

Из рисунка 3 видно, что при выбранных параметрах источника освещения, наблюдаются колебания в положении процессного окна на шагах до 1000 нм. При больших шагах линий, оптимальная доза экспозиции уменьшается, что приведёт к уменьшению глубины фокуса для изолированных линий. Для обеспечения наилучшей проработки изолированных линий, в шаблон необходимо ввести фигуры коррекции оптического эффекта близости.

Выбор параметров фигур коррекции оптического эффекта близости

Для уменьшения чувствительности оптимальной дозы экспозиции к шагу линий в шаблон были добавлены фигуры коррекции оптического эффекта близости (ОРС-фигуры). При этом, хотя размеры ОРС-фигур подбирались для каждого шага, они должны были оставаться

постоянными в определенном диапазоне шагов. В ходе проведения модельных экспериментов были выявлены четыре диапазона шагов линий, в пределах которых размеры ОРС-фигур остаются постоянными. Результаты модельных экспериментов и параметры ОРС фигур приведены в таблице 1.

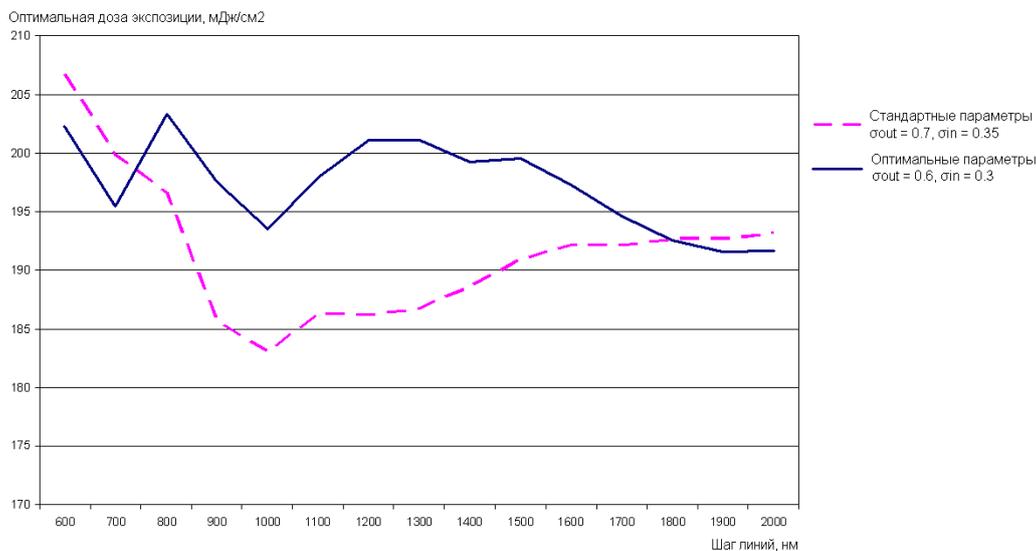


Рисунок 3 – Изменение оптимальной дозы экспозиции в зависимости от шага линий

Сравнение стандартного режима и выбранных параметров освещения.

Таблица 1 - Параметры фигур коррекции оптического эффекта близости.

Диапазон шага линий, нм	Параметры ОРС-фигур
600-850	Без ОРС-коррекции;
850-1050	Утолщение ширины линий (<i>bias</i>) на 20 нм
1050-1400	Одна дополнительная линия (<i>SRAF</i>) шириной 140 нм между основными
>1400	Две дополнительные линии шириной 140 нм на расстоянии 340 нм от основной.

При указанных параметрах фигур ОРС-коррекции, процессные окна, построенные в каждом диапазоне шага линий, пересекаются в достаточно широкой области с оптимальной дозой экспонирования, равной 206,5 мДж/см² и фокусом -0,23 мкм. При этом глубина фокуса в области пересечения процессных окон составляет 0,32 мкм.

Литература

1. Chris. A. Mack Modeling Solvent Effects in Optical Lithography: PhD Thesis /Chris Alan Mack// The University of Texas at Austin —1998
2. KLA-Tencor Corporation, PROLITH Workbook //KLA-Tencor, Austin, 2002
3. Jo Finders, Plamen Tzviatkov, Kurt Ronse, Luc Van den Hove Optimizing i-line lithography for 0.3-um poly-gate manufacturing // Solid State Technology. — 1997. — March. — P. 6-14.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ СВЧ-МОДУЛЕЙ

Леонидов В.В., Григорян Р.М.

*Научные руководители: к.т.н., доцент Макаρχук В.В. к.ф.-м.н. Гуляев И.Б.**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, *ФГУП «НПП «Пульсар» Москва, Россия.

UNIVERSAL PLATFORM FOR DEVELOPING OF SOFTWARE-HARDWARE COMPLEXES FOR AUTOMATED MEASUREMENT OF ELECTRICAL PARAMETERS OF TRANSMITTING MULTI-CHANNEL MICROWAVE-MODULES

Leonidov V.V., Grigoryan R.M.

*Supervisor of studies: Ph.D. Makarchuk V.V., Ph.D. Gulyaev I.B.**

*FSUE "S&PE "Pulsar", BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Обобщён опыт разработки специализированных программно-аппаратных комплексов для тестирования мощных СВЧ-передающих модулей. Рассмотрена масштабируемая платформа, функционал которой может быть расширен за счёт введения дополнительных периферийных устройств. Представлены основные блоки и элементы, которые могут входить в состав измерительных комплексов, а также интерфейсы взаимодействия между ними.

Abstract

The experience of the development of specialized software and hardware systems for testing high-power microwave transmitter modules are summarized. Scalable platform, the functional which can be extended by introducing additional peripherals are considered here. The basic components and elements that may be part of such measurement systems, as well as the interface between them are presented.

Измерение параметров электронных СВЧ-передающих модулей является обязательной частью технологического процесса при их производстве. Автоматизация измерений позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на проверку функционирования и наладку аппаратуры, исключить «человеческий фактор», что во много раз повышает точность и достоверность получаемых результатов. Следующим этапом проведения приёмо-сдаточных операций является создание протокола результатов измерений. Обычно это продолжительный и трудоёмкий процесс, требующий от сотрудника определённой квалификации и опыта. Разработанная платформа включает в себя систему автоматизированного создания протоколов с возможностью хранения результатов измерений в базе данных. Это позволяет систематизировать и структурировать параметры каждого из выпускаемых приборов или модулей, а также вести статистику по годной и бракованной продукции.

В данной статье рассмотрен модульный принцип проектирования программно-аппаратных комплексов. Он основывается на объединении отдельных функционально законченных модулей в единый измерительный стенд. В качестве таких модулей могут выступать как стандартные приборы (например, осциллограф, анализатор спектра, измеритель мощности), так и специально разработанные с учётом требований, предъявляемых к функционалу комплекса. Типичная структурная схема стенда измерения электрических параметров мощных многоканальных передающих модулей представлена на рисунке 1.

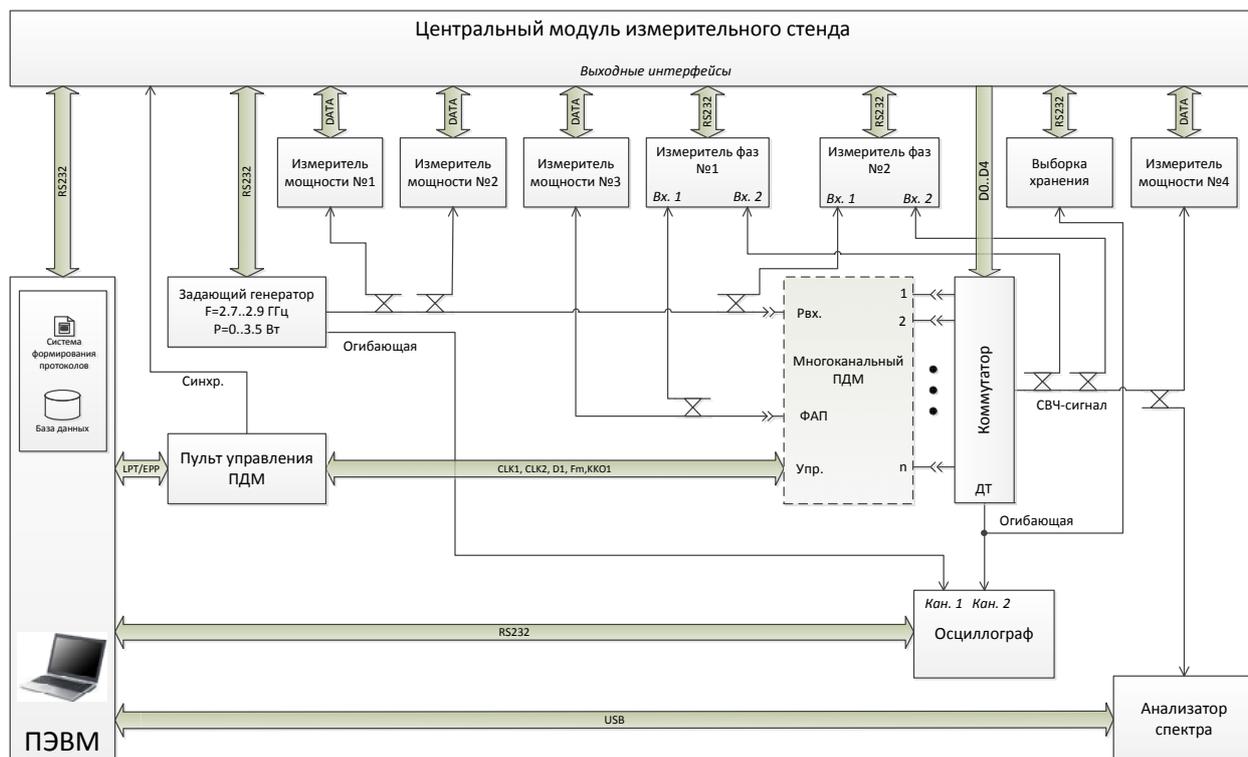


Рисунок 1 – Программно-аппаратный комплекс автоматизированного измерения параметров мощных многоканальных СВЧ-передающих модулей

Центральный модуль измерительного стенда является основным функциональным блоком данного комплекса. В его задачу входят управление и сбор информации с периферийных устройств и обмен данными с ПЭВМ. Данный модуль имеет возможность подключения до 16 периферийных плат расширения, которые через штатный разъем коммутируются с источниками $\pm 15\text{В}$, сигналами синхронизации и информационной шиной центрального модуля (рисунок 2).

Также в состав данного комплекса входят специально разработанные генератор входной мощности, измерители фаз, коммутатор СВЧ сигнала, выборка хранения параметров огибающей радиоимпульса и изделия от сторонних производителей: измерители мощности Я2М-66, анализатор спектра фирмы Agilent, а также цифровой осциллограф GwInstek.

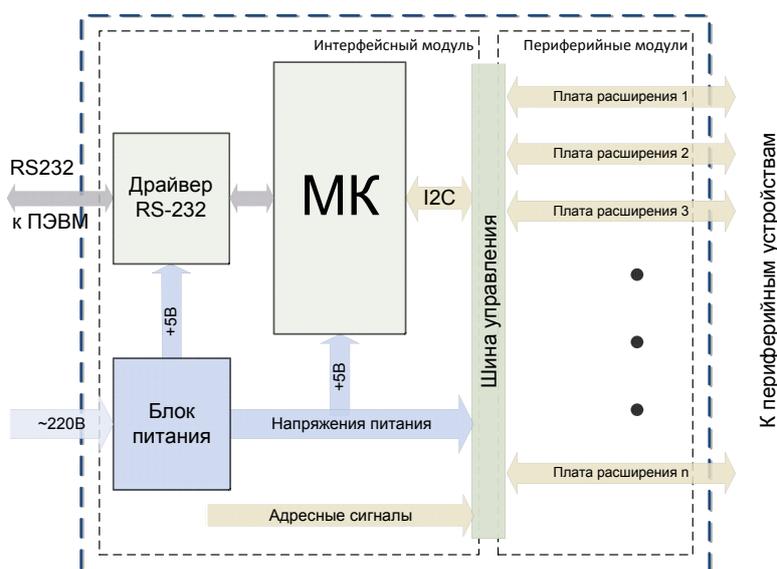


Рисунок 2 – Структурная схема центрального модуля измерительного стенда

Задающий генератор задаёт мощность на вход измеряемого модуля в диапазоне от 0 до 3.5Вт. Его структурная схема представлена на рисунке 3. На синтезаторе ADF4350[1] формируется СВЧ-сигнал, который после предусилителя и модулятора HMC349[2] усиливается на выходном каскаде. Коэффициент усиления (КУ) задаётся схемой генератора тока, управляемого путём установки напряжения на ЦАПе. Подстройка КУ выходного усилителя с помощью поправочных коэффициентов для каждой из рабочих частот позволяет получить практически идеальную АЧХ на выходе разработанного генератора.

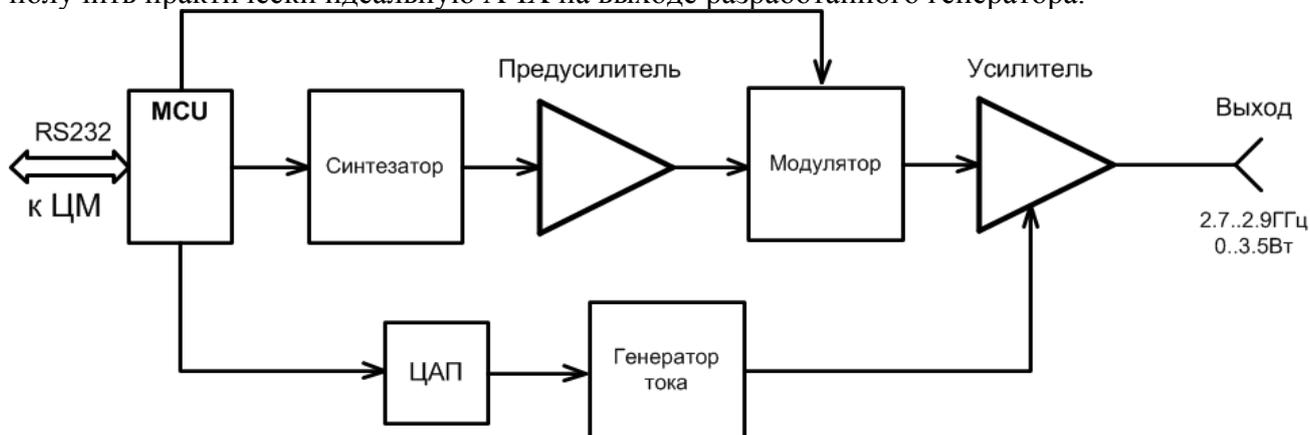


Рисунок 3 – Структурная схема задающего СВЧ-генератора

Коммутатор предназначен для переключения одного из выходных каналов модуля на измерительный тракт (рисунок 4). Входная мощность понижается на аттенюаторах и поступает на коммутатор СВЧ-сигнала, разработанный на основе микросхемы HMC321LP4[3]. Установленные детекторы позволяют формировать огибающую радиопульса, которая отдельным коммутатором переключается на вход цифрового осциллографа и блок формирования и запоминания выборки хранения.

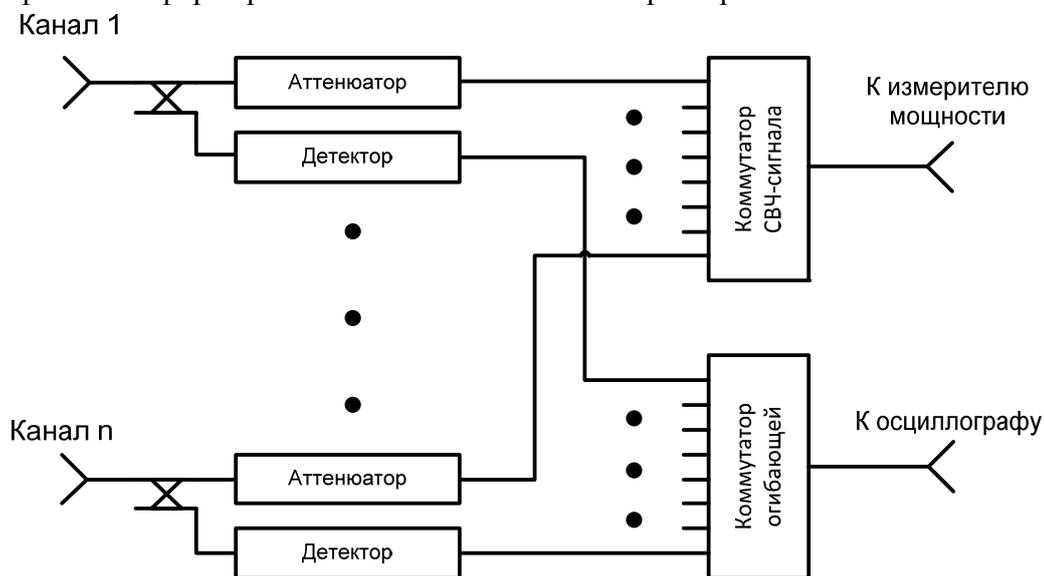


Рисунок 4 – Структурная схема коммутатора СВЧ-сигнала

Измеритель фаз разработан на основе фазового детектора AD8302[4] и позволяют измерять фазовые характеристики модуля. Его структурная схема представлена на рисунке 5.

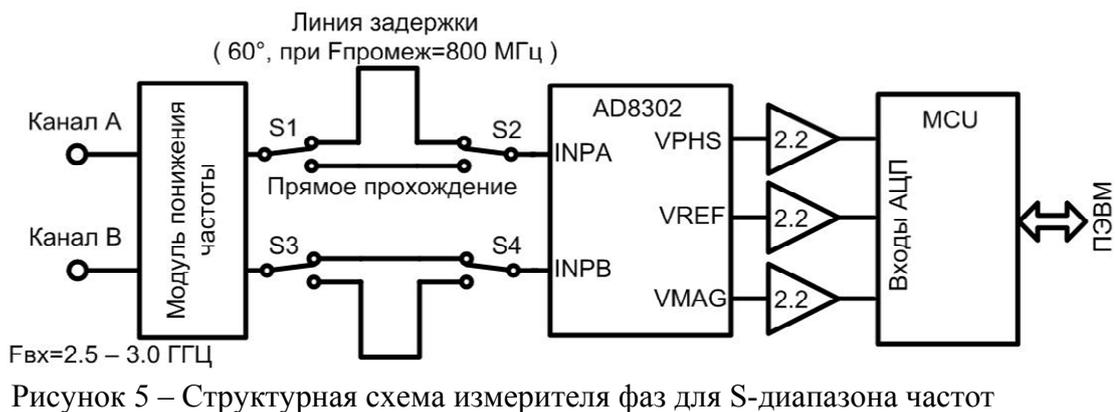


Рисунок 5 – Структурная схема измерителя фаз для S-диапазона частот

Из-за нелинейности характеристики детектора на частотах S-диапазона, было принято решение о введении на входные каналы модуля понижения частоты до 800МГц и линий задержки для смещения рабочей точки в линейную область детектора, а также для определения знака полученного результата.

Программная часть разработанной платформы состоит из программ низкого уровня для микроконтроллеров аппаратной части и программного обеспечения ПЭВМ. На рисунке 6 представлен типовой внешний вид основных модулей пользовательского программного обеспечения. ПО ПЭВМ интегрирует управление периферийными выносными модулями, обмен данными с осциллографом и анализатором спектра, управление измеряемым модулем, автоматическое измерение его параметров, а также сохранение полученных результатов в базу данных и формирование протоколов измерений. ПО ПЭВМ имеет оконный интерфейс и предоставляет оператору полный контроль над измерительным комплексом и передающим модулем.

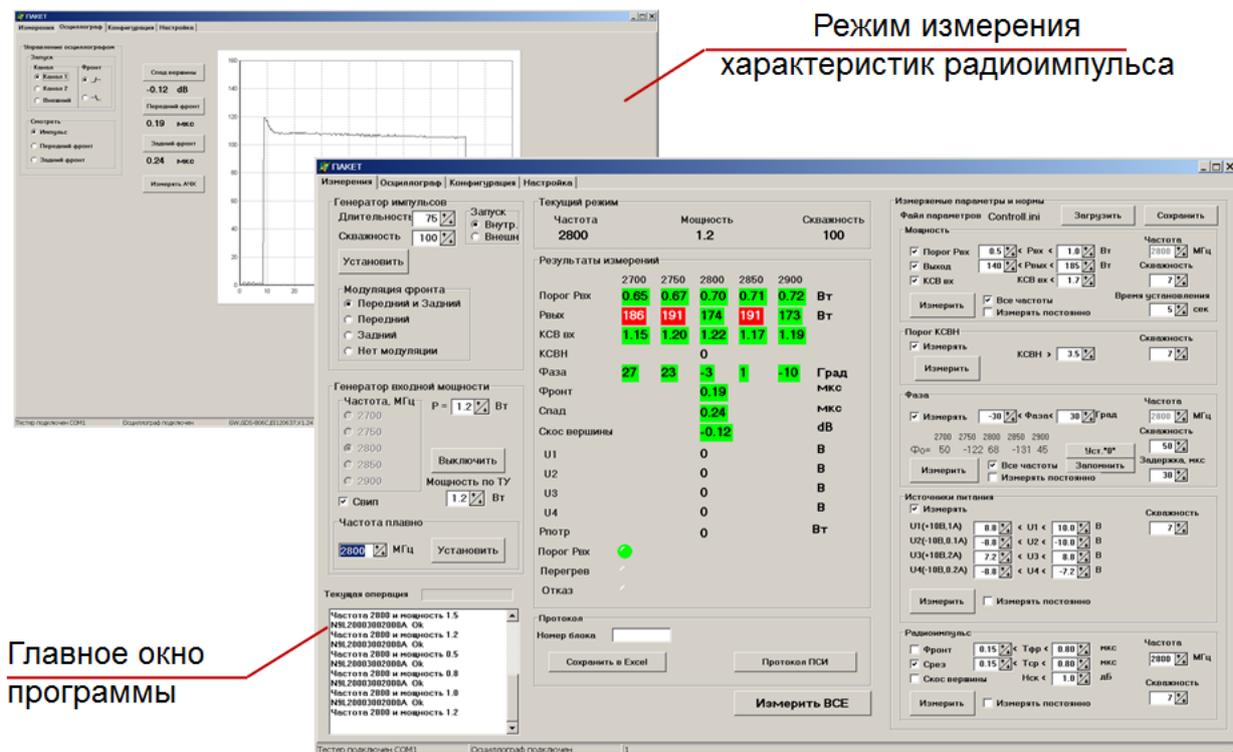


Рисунок 6 – Внешний вид окон пользовательского ПО

Таким образом, описанная выше платформа позволяет измерять следующие параметры многоканальных передающих модулей:

- Амплитудно-частотная характеристика передающих каналов
- Фазо-частотная характеристика передающих каналов

- Выходная импульсная мощность передающих каналов
- Выходная импульсная мощность контрольного сигнала (ФАП)
- Значение установки фазы передающих каналов
- Значение фазы передающих каналов по каналу контрольного сигнала (ФАП)
- Длительность фронта и спада радиоимпульса
- Уровень мощности на вершине радиоимпульса
- Нестабильность амплитуды радиоимпульса
- Ширина спектра выходного сигнала
- Уровень гармоник выходного сигнала

Количество и состав данных параметров может изменяться в зависимости от требуемой конфигурации измерительного стенда.

Применение подобных программно-аппаратных комплексов позволяет учесть нелинейности входных и выходных СВЧ-трактов во всей полосе частот путём введения соответствующих поправочных коэффициентов, что значительно повышает точность получаемых результатов.

Литература

1. ADF4350 – Wideband Synthesizer with Integrated VCO. Analog Devices.
2. HMC349 – High-Isolation SPDT Non-Reflective Switch for DC-4GHz.
3. HMC321LP4 – GaAs MMIC SP8T non-reflective positive control switch, DC - 8 GHz.
4. AD8302 – LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector Datasheet. Analog Devices.

ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ МОДУЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Однокольцев А. В.

Научные руководители: Стешенко В.Б.

*к.т.н, начальник комплекса космической микроэлектроники,
зам ген. конструктора ОАО «Российские космические системы»,*

доцент, к.т.н., Власов А.И.

МГТУ им. Баумана, Москва, РФ

ACOUSTIC EMISSION MODULE PREAMPLIFIER

Odnokoltcev A.V.

Research advisor: docent, Ph.D., Steshenko V.D., docent, Ph.D., Vlasov A.I.

Bauman University, Moscow, RF

Аннотация

Рассмотрен метод неразрушающего контроля, основанный на явлении акустической эмиссии и схемотехнические решения при построении усилителя модуля акустической эмиссии для систем неразрушающего контроля и мониторинга.

Abstract

Considered a method of nondestructive testing based on the phenomenon of acoustic emission and circuit solutions for the construction of the amplifier module of acoustic emission systems for nondestructive testing and monitoring.

Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) - это мощное техническое средство неразрушающего тестирования и оценки материалов. Оно основано на обнаружении упругих волн, генерируемых внезапной деформацией напряженного материала (рис.1). Эти волны распространяются от источника к датчику (датчикам), где они преобразуются в электрические сигналы.

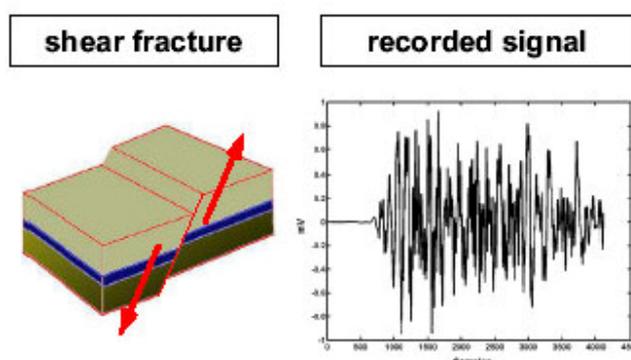


Рисунок 1 – Сигнал, генерируемый внезапной деформацией материала

Приборы АЭ измеряют эти сигналы и отображают данные, на основе которых оператор оценивает состояние и поведение структуры под напряжением. Традиционные методы неразрушающего контроля (такие, как ультразвуковой, радиационный, токовихревой) обнаруживают геометрические неоднородности путем излучения в исследуемую структуру некоторой формы энергии. Акустическая эмиссия использует другой подход: она обнаруживает микроскопические движения, а не геометрические

неоднородности. Рост трещины, разлом включения и утечка жидкости или газа - вот примеры из сотен процессов, производящих акустическую эмиссию, которая может быть обнаружена и эффективно исследована с помощью этой технологии.

С точки зрения АЭ растущий дефект производит свой собственный сигнал, который проходит метры, а иногда и десятки метров, пока не достигнет датчиков. Дефект не только может быть обнаружен дистанционно; часто представляется возможным найти его местоположение путем обработки разницы времен прихода волн к различным датчикам. Акустическая эмиссия это такое широко распространенное явление, что очень трудно перечислить все материалы, процессы и структуры, к которым она может быть приложена.

В соответствии с правилами применения метода АЭ, данный метод обеспечивает выявление развивающихся дефектов посредством регистрации и анализа акустических волн, возникающих в процессе рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте. Указанные свойства метода АЭ дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Характерными особенностями метода АЭ, определяющими его преимущества, возможности, параметры и области применения, являются следующие:

1. Метод АЭ обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности.

2. В производственных условиях метод АЭ позволяет выявить приращение трещины на десятые доли миллиметра. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по расчетным оценкам составляет порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм, что указывает на весьма высокую чувствительностью к растущим дефектам.

3. Свойство интегральности метода АЭ обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ, неподвижно установленных на

поверхности объекта за один раз.

4. Положение и ориентация дефекта не влияет на выявляемость дефектов.

5. Метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой конструкционных материалов, чем другие методы неразрушающего контроля.

6. Контроль зон недоступных для других методов (тепло- и гидро-изоляция, конструктивные особенности).

7. Предотвращение катастрофических разрушений конструкций при испытаниях и эксплуатации за счет оценки скорости развития дефектов.

8. Определение мест течей.

Эти уникальные свойства позволяют АЭ занять достойное место при диагностике разнообразного оборудования.

Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с дефектами сварных соединений и основного металла объектов. АЭ метод может быть использован также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения эксплуатации или испытаний и предотвращения разрушения изделия. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках, арматуре и фланцевых соединениях.

АЭ контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний.

Системы акустической эмиссии (рис.2) строятся из следующих основных компонентов:

- Датчики;
- Усилители;
- Системы сбора информации;
- Системы обработки информации;

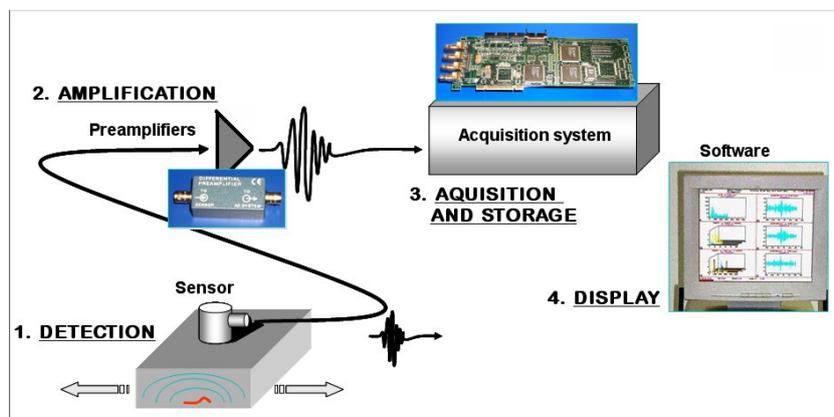


Рисунок 2 – Пример построения системы акустической эмиссии

Важным компонентом системы является **усилитель модуля акустической эмиссии (УМА)**. Среди многочисленных факторов, влияющих на результаты измерений параметров вибрации, особое значение имеет изменение температуры окружающей среды в месте размещения вибропреобразователя. Коэффициент преобразования современных пьезоэлектрических вибропреобразователей практически не зависит от температуры, но, как отмечено в ряде работ, изменение температуры по объему вибропреобразователя приводит к появлению паразитных зарядов. Влияние эффекта генерирования паразитных зарядов особенно проявляется при проведении измерений на низких частотах. Предлагаемая реализация УМА позволяет снизить влияние пьезоэлектрических токов на показания приборов акустической эмиссии, что дает возможность использовать модули акустической эмиссии в условиях изменения температуры в широких пределах, что важно в системах мониторинга и неразрушающего контроля ракетно-космической техники.

Пьезоэлектрические вибропреобразователи имеют емкостной импеданс и генерируют электрический заряд мощностью $10^{-12} \dots 10^{-14}$ Вт. Для преобразования заряда в напряжение используются операционные усилители (оу) с большим коэффициентом усиления, охваченные петлей глубокой отрицательной обратной связи через C_{oc} (рис.3).

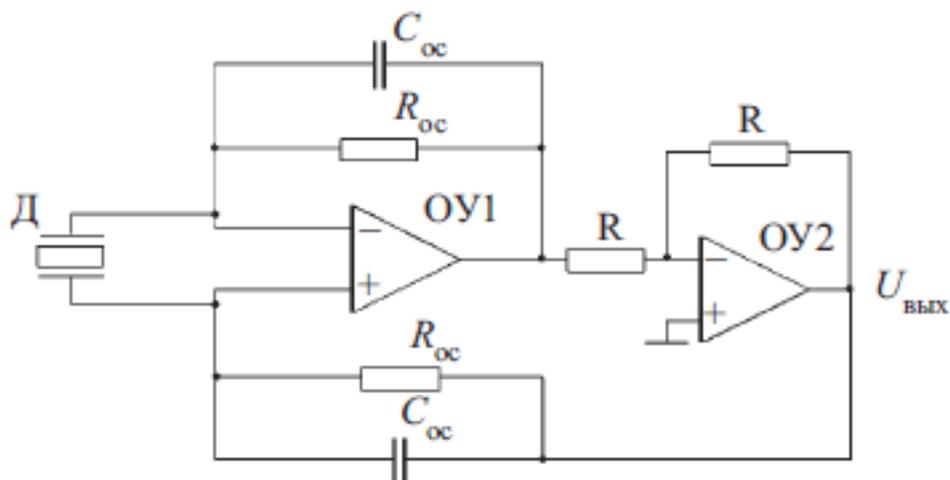


Рисунок 3 - Симметричный зарядочувствительный усилитель с параллельной ООС

Оба плеча дифференциального усилителя заряда охвачены отрицательной обратной связью через емкости C_{oc} и сопротивления R_{oc} . На положительный вход сигнал по второй цепи C_{oc}

и R_{oc} подается через инвертор. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}^* = (q_1 - q_2) / C_{oc}$ где q_1 и q_2 - заряды на электродах вибропреобразователя.

Частотная характеристика в области низких частот описывается выражением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_i}{\omega}\right)^2}}$$

Где $\omega_n = 1 / R_{oc} C_{oc}$ - нижняя частота среза усилителя заряда по уровню 0.707 (при заданной чувствительности C_{oc}). Величина нижней граничной частоты при этом определяется величиной R_{oc} .

Постоянный перепад температуры приводит к появлению паразитной пьезоэлектрической электризации датчика и медленно меняющегося тока ($I_{пз}$), протекающего на вход зарядочувствительного усилителя.

При больших значениях R_{oc} , т.е. при малых значениях нижней граничной частоты усилителя под действием этих токов происходит перегрузка усилителя, и аппаратура может потерять работоспособность на длительное время. При этом емкость в цепи обратной связи зарядочувствительного усилителя должна быть выбрана исходя из чувствительности пьезоэлектрического датчика, а также из ожидаемого уровня виброускорения.

Для устранения такой ситуации предпринимаются следующие меры.

1. Выбор датчиков с максимальной чувствительностью к изменению температуры.
2. Уменьшение влияния температуры с помощью специальных теплоизолирующих покрытий.
3. Уменьшение сопротивления резистора в цепи обратной связи.

Действительно, так как $U_{\text{вых}} = I_{пз} R_{oc} \Delta T$, то уменьшение R_{oc} позволит снизить величину изменения уровня выходного напряжения ЗЧУ под действием паразитного пьезоэлектрического тока, но в этом случае происходит увеличение нижней граничной частоты ЗЧУ:

$$f_i = \frac{1}{2\pi R_{oc} C_{oc}},$$

что недопустимо, особенно при пусковых режимах работы механизмов.

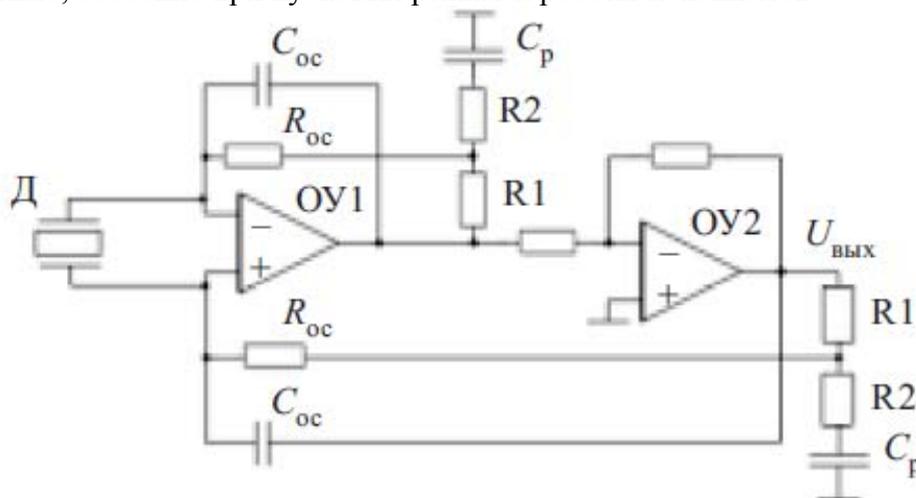


Рисунок 4 - Схема ЗЧУ с частотно-зависимым делителем в цепи ООС

Использование частотно-зависимого делителя, включенного между выходом усилителя и резистором R_{oc} , позволяет уменьшать сопротивление этого резистора с сохранением полосы пропускания в области низких частот (см.рис.4) Коэффициент передачи в этом случае будет иметь вид :

$$K = \frac{C_d}{C_\alpha} \frac{1}{1 + \frac{j\omega\tau_k}{1 + j\omega\tau_k}}$$

Где C_d – емкость датчика;

$$\tau_k = R_2 C_p;$$

C_p – разделительная емкость;

$$\tau = R_{oc} C_{oc};$$

$$\alpha = (1 + R_1/R_2)$$

Анализ показал, что максимально плоскую форму амплитудно-частотной характеристики можно получить только при выборе C_p из выражения $\tau_k = R_2 C_p = 2\tau(\alpha - 1)$.

Номинал резистора R_{oc} в этом случае можно уменьшить в α раз. Полоса пропускания в области низких частот не изменится, а смещение выходного напряжения усилителя под действием пьезоэлектрического эффекта уменьшится во столько же раз.

Литература

1. Акустико-эмиссионная система серии СДС 1008 [<http://www.sds.ru>]
2. Шарпов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи.-Черкассы: ЧГТУ, 2004.
3. В.И. Старцев, Ю.С. Ямпольский Зарядочувствительный усилитель. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2008, №1

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ЧАСТНОЙ ЗАДАЧЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Чистяков М.Г.

Научный руководитель: Юдин А.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

CALCULATION OF MOBILE ROBOT MARCHING TRAJECTORY IN PARTICULAR TASK OF OBJECT MOVING

Chistyakov M.G.

Research advisor: Yudin A.V.

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

Аннотация

В данной статье приведен алгоритм для расчета траектории движения мобильного робота при расстановке объектов на плоскости, разделенной на клетки. Алгоритм основан на методе перебора, снабженного дополнительной логикой. Рассмотрены различные модификации алгоритма, в зависимости от технических возможностей устройств на которых он будет выполняться. Приведены возможные приложения алгоритма, а также рассмотрены дальнейшие планы по решению описанной в статье задачи.

Abstract

In this article an algorithm is presented for calculating the trajectory of mobile robot for placement of objects on the plane, divided into cells. The algorithm is based on brute force, equipped with additional logic. Various modifications of the algorithm are considered, depending on the technical capabilities of devices on which they are executed. The possible applications of the algorithm are presented and also future plans to address the problem described in this article are reviewed.

1. Введение

В современных условиях все большую актуальность приобретают автономные, не управляемые человеком, транспортные средства. Примером таких систем могут служить: автомобили с системой автопилота, когда человек на некоторое время может передать управление транспортным средством системе автоматического управления; роботизированные мобильные устройства, выполняющие опасные для человека задачи, например, в зонах катастроф различной природы, а также выполняющие рутинные операции, поддающиеся алгоритмизации, освобождая тем самым человека от скучной работы, а продукцию от возможных ошибок человека.

Если рассмотреть задачи, стоящие перед разработчиками подобных автономных транспортных средств, то неминуемо встанет вопрос об организации системы навигации, которая позволит транспортному средству эффективно перемещаться в пространстве. При этом важно отметить, что как способ передвижения, так и прикладная задача, возложенная на транспортное средство, влияют на алгоритм движения и навигации. Далее рассмотрим одну из частных задач подобного рода.

2. Постановка задачи

Рассмотрим некоторое поле (плоскость), разделенное на шахматные клетки. Клетки соответственно отличаются по цвету (рис.1). Кроме того, на поле находится некоторое количество объектов. Изначально объекты находятся на поле в случайных позициях. Робот, перемещаясь по полю и взаимодействуя с объектами, должен расставить их по клеткам определенного цвета. Помимо прочих, существуют особые клетки, занять которые было бы выгоднее, чем остальные. Задача: Написать алгоритм для расстановки объектов на клетки определенного цвета, при этом установить большинство объектов на выгодные клетки.

3. Вводимые упрощения

Для расчетов требуются следующие упрощения:

- поле имеет конечные размеры (6x6 клеток);
- количество объектов на поле конечно (9 штук);
- размер каждого объекта равняется половине размера клетки;
- на одну клетку можно установить только один объект.

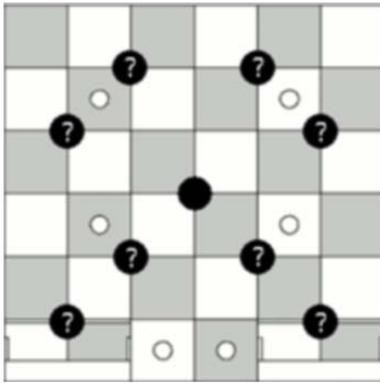


Рисунок 1 - Пример части поля с объектами и выгодными клетками (они помечены кругами)

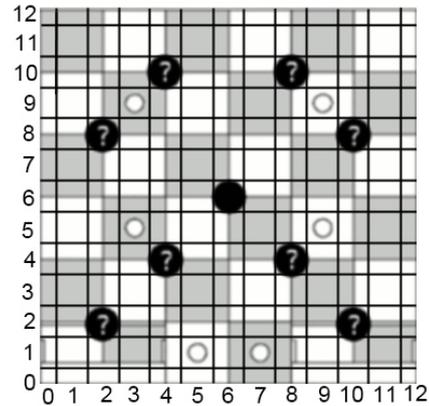


Рисунок 2 – Разбивка поля

4. Варианты решения

Имея возможность консультации со специалистами в таких областях как математика и робототехника, а также обладая некоторым опытом в области разработки робототехнических систем, авторам удалось выявить возможные пути решения поставленной задачи. Такими методами могут быть: методы искусственного интеллекта, метод локальных вариаций, метод частичного повторения, метод перебора, трассировочный метод.

5. Сравнение методов

Для сравнения методов, зададим определенное время действия на поле, например 90 секунд. Оценка эффективности будет проводиться с помощью бальной системы. Так установка объекта на нужную клетку приносит 10 баллов. А если любой из объектов на поле поставить на выгодную клетку, то количество баллов за объект увеличивается на 30. Таким образом, мы имеем возможность сравнить результаты работы различных алгоритмов по количеству заработанных баллов: по принципу «чем больше баллов, тем лучше».

Для решения данной задачи из всех вышеперечисленных методов оптимальным и базовым оказался метод перебора. Так как задача решается на вычислительной машине, то использование данного метода, позволяет найти решение, которое другие методы пока не в силах обеспечить. Основной недостаток метода состоит в том, что необходимо выполнить большое количество вычислений, что приводит к значительным временным затратам на расчеты.

Стоит отметить, что в рамках работы над данной задачей ставится также вопрос о выработке наиболее формального математического решения, что позволило бы ускорить принятие решения о дальнейших действиях робота.

6. Алгоритм решения

Для решения задачи навигации разобьем поле на клетки, по размерам равные размерам объектов. Каждую клетку будем считать как точку с определенными координатами (рис 2). Траектория движения записывается как последовательный массив из координат точек. Из точек составляются векторы движения. Далее с помощью векторов движения получаем путь

и углы поворота. С помощью векторов можно найти кратчайший путь при движении по заданным точкам. Далее введем оценку действия, т.к. ближайший объект не всегда может оказаться оптимальным при дальнейших действиях. Для этого произведем трассировку объектов, т.е. просчитаем, какое количество раз каждый объект встречается при движении на каждую точку поля. И, соответственно, выгодным будет тот объект, который встречается большее количество раз. Т.к. не все объекты равнозначны, введем у каждого объекта свой коэффициент, чем коэффициент больше, тем выгодней объект. Конечная клетка, для постановки объекта, так же близостью, но т.к. клетки тоже разные по «цене» то у каждой вводится свой коэффициент.

Описанный алгоритм (рис. 3) повторяется столько раз, сколько необходимо, либо по времени, либо по количеству действий.

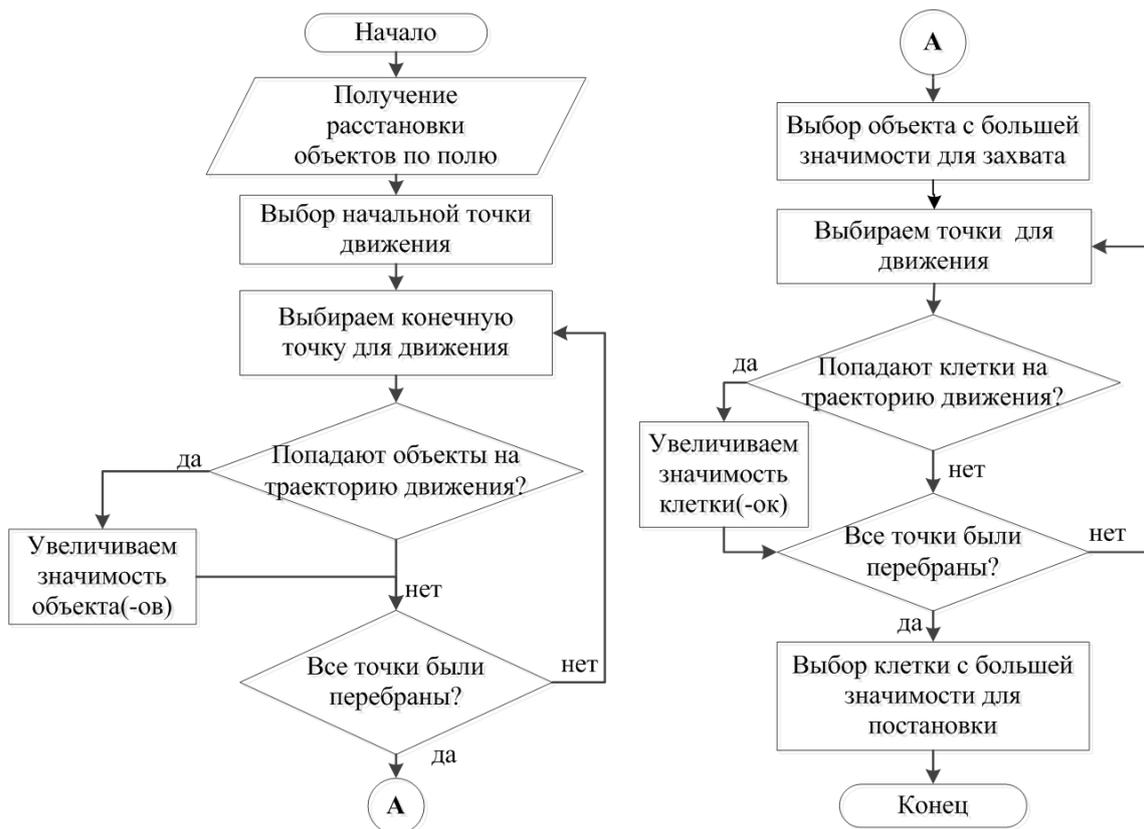


Рисунок 3 - Алгоритм со степенью вложенности один для перестановки одного объекта

В зависимости от выбора начальной точки, он может быть с разной степенью вложенности.

6.1. Степень вложенности один

За начальную точку каждый раз принимается текущее положение робота. Данная модификация алгоритма дает четкий ответ, какое действие выгодней выполнить на данном этапе, но не учитывает следующие действия, из-за чего некоторые действия могут оказаться не оптимальными.

6.2. Степень вложенности два

Степень вложенности два позволяет рассчитывать действие с учетом одного следующего действия. Для этого после определения выгодности всех объектов необходимо повторить алгоритм, но, уже считая, что действие с каждым из них было выполнено, и за начальную точку берется местоположения робота после мнимо сделанного действия. Затем необходимо сравнить результаты каждой последовательности действий и выбрать результат дающий наиболее выгодный результат (большее количество баллов).

6.3. Степень вложенности три и более

Данная степень вложенности уже позволяет определить длинные выгодные пути. Аналогично предыдущему пункту после выбора объекта проводится сравнение последующих. Количество выборов точек для расчета напрямую зависит от вложенности.

6.4. Степень вложенности бесконечность

Алгоритм со степенью вложенности бесконечность аналогичен модификации алгоритма со степенью вложенности три, но он выбирает точку для последующего расчета до тех пор, пока не достигнута оптимальная расстановка, и последующее перемещение объектов только ухудшают результат. В нашем случае поле ограничено, поэтому мы имеем счетное количество вариантов расположения точек для расчета.

7. Реализация алгоритма

Рассмотренный алгоритм разрабатывался для нужд навигации мобильного робота, выполняющего регламент соревнований Eurobot 2011. Базовый алгоритм реализован на языке C и используется для выявления наиболее выгодных тактик действия робота на стационарном компьютере. Также он используется в исследовании возможных методов решения поставленной задачи, т.к. дает глобальное, а не локальное решение. Таким образом, мы имеем возможность проверять различные подходы, которые могут давать лишь локальное, не оптимальное решение.

Кроме чисто исследовательского использования, представленный алгоритм используется в работе мобильного робота на базе контролера ATmega128 и непосредственно участвует в организации планирования действий роботом.

8. Выводы

Применение рассмотренного алгоритма позволяет найти наилучшие пути расстановки объектов. В зависимости от быстродействия вычислительной машины можно применять разные модификации алгоритма. Т.к. алгоритм выполняется в реальном времени, то каждая степень вложенности напрямую влияет на время принятия решения. Величина погрешности алгоритма обратно пропорциональна степени вложенности алгоритма, т.е. чем больше степень вложенности, тем оптимальней решение.

Хотя предлагаемый алгоритм разрабатывается и используется для нужд соревнований мобильных роботов, его применение этим не ограничивается. Например, его можно адаптировать для складской работы, где есть необходимость расставить привезенный товар по определенным местам. Также можно адаптировать его и для нужд автоматической расстановки радиоэлементов на печатную плату.

В дальнейшем планируется продолжить исследования по выявлению наиболее формального решения рассмотренной задачи, а также более сложных ее вариантов, когда объекты могут быть собраны в «башни», действия на поле выполняются несколькими равноправными участниками и т.п. Отдельно рассматривается вопрос о решении заявленной задачи методами искусственного интеллекта.

Литература

1. Таха, Хэмди А. Введение в исследование операций, 7-е издание, Пер с англ. -М.: Издательский дом "Вильямс", 2007. - 912с.:ил.
2. Волков И.К., Загоруйко Е.А. Исследование операций: Учеб для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А. П. Крищенко. - М.: Изд-во МГГУ им. Н.Э. Баумана. 2000 - 436 с (Сер Математика в техническом университете. Вып. XX).
3. <http://www.eurobot.org>.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СЛОВАРЯ ДЛЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ РОССИИ

Рузанова А.А., Шишкунова Е.В.
Научный руководитель: к.т.н. Журавлева Л.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

IMPLEMENTATION OF ELECTRONIC DICTIONARY FOR FOREIGN STUDENTS OF RUSSIAN TECHNICAL UNIVERSITIES

Ruzanova A.A., Shiskunova E.V.
Ph.D. Juravleva L.V.
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В данной работе представлено описание реализации электронного словаря, разработанного для иностранных студентов, обучающихся в технических вузах России. Словарь помогает преодолеть высокий языковой барьер технических терминов, используя различные формы представления информации: текстовую, графическую, видеоряды.

Abstract

In this paper we present a description of realization of the electronic dictionary designed for foreign students studying in the technical universities of Russia. The dictionary helps to overcome difficulties relating to technical terms using various forms of information presentation: text, graphics, video sequences.

Имея многочисленные контакты с другими странами, МГТУ им. Н.Э. Баумана, как и любой другой ВУЗ, сталкивается с проблемой обучения иностранных студентов, недостаточно владеющих русским языком. Особую сложность в данном вопросе представляет высокий языковой барьер технических терминов, так как многие понятия являются абсолютно новыми для понимания студентами. Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронных средств» приняла в свои ряды студентов из Мьянмы, и для улучшения их коммуникативных навыков были проведены многочисленные мероприятия, но проблема с обучением решена не была. Одним из вариантов решения стало создание электронного словаря. Словарь включает расширенный набор функций: пользователь словаря при вводе незнакомого ему слова сможет получить лексическое значение, грамматический пример использования, изображение, видео, синонимы или общеупотребительные эквиваленты, а также сможет просмотреть разделы науки и техники, к которым относится изучаемое понятие.

Данный электронный словарь представляет собой базу данных, выполненную при помощи Microsoft SQL Server 2005, содержащую словарные статьи, которые позволяют осуществлять быстрый поиск нужных слов и словосочетаний, и Windows-приложение, реализованное на языке Java#.

Выбор понятий для первоначального заполнения базы данных производился на основании личного опыта преподавателей кафедры, обучающих иностранных студентов, и он охватывает круг именно тех общепринятых и узкоспециальных терминов, которые так сложны для понимания.

Реализация интерфейса пользователя словаря на данном этапе его развития заключается в 2 формах ввода/вывода информации. 1 форма для ввода интересующего слова (рис.1) максимально упрощена требует лишь введения слова, а 2 форма (рис. 2) максимально насыщена всеми видами информации. Кроме того авторами предусмотрены разработки дополнительных форм для возможности упрощенных пополнения и изменения базы данных преподавателями, что позволит словарю стать универсальным шаблоном для работы в различных областях знаний. Практика показала необходимость внедрения видеорядов, как минимум, упрощенной флэш-анимации, которая тоже будет использоваться.

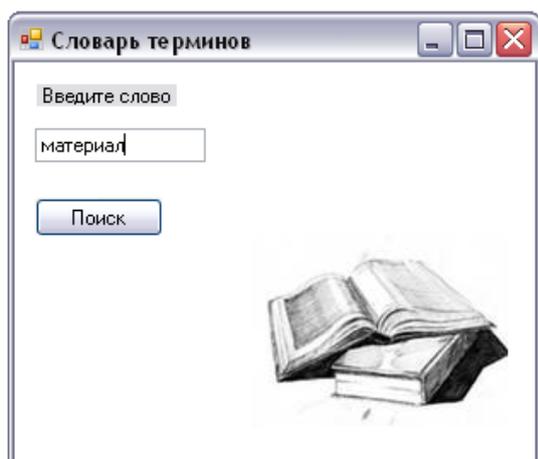


Рисунок 1 – Форма начала поиска электронного словаря

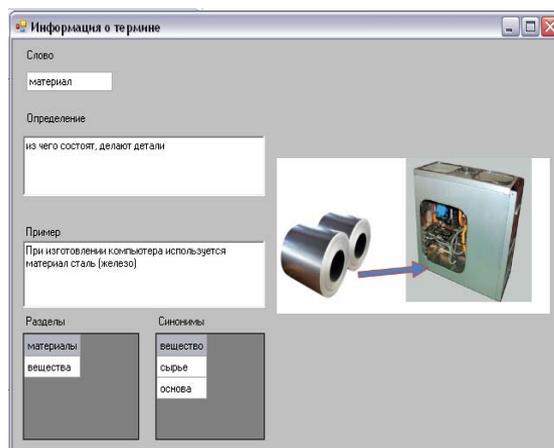


Рисунок 2 - Форма для вывода результатов поиска

Главными достоинствами разработанного продукта являются:

1. Универсальность - возможность заполнения терминами преподавателями и их помощниками любой области, исходя из потребностей учебного процесса;
2. Насыщенность - получение исчерпывающей информации о понятии. Результатом использования словаря является некий законченный образ термина, подкрепленный визуальным изображением и ассоциациями с областями науки и техники.
3. Простота - использование упрощенного для восприятия толкования терминов (в отличие от толковых словарей русского языка, изобилирующих сложными оборотами).
4. Интуитивно понятный интерфейс.
5. Продукт распространяется на некоммерческой основе.

К основным направлениям, над которыми продолжается работа, словаря относятся:

1. Расширение базы данных при сотрудничестве с иностранными студентами- наличие обратной связи;
2. Включение возможности воспроизведения видео;
3. Мониторинг работы продукта и, как следствие, устранение ошибок функционирования и улучшение интерфейса.

Выводы

1. Пример данного электронного словаря наглядно показывает, как студенты МГТУ могут успешно использовать свой набор стандартных программных знаний для решения конкретных проблем.
2. Результатом работы является практическое использование представленного продукта в организации работы кафедры.

Литература

1. Электронный словарь [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%8C . Проверено 31.01.2011
2. Электронные словари и компьютерная лексикография[Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.lingvoda.ru/transforum/articles/selegey_a1.asp. Проверено 31.01.2011

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, проект П2333 (НК-416).

МОДУЛЬ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ ПЛИС FPGA НА БАЗЕ ПЛИС CPLD С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИНХРОННОЙ ШИНЫ ПРОЦЕССОРА

Смурыгин И.М.

Научный руководитель к.т.н., доц. Шпиев В.А.

МГТУ им.Н.Э.Баумана, г.Москва

Аннотация

В работе представлен модуль для загрузки информации с асинхронной шины процессора в ПЛИС FPGA через ПЛИС CPLD для выполнения заложенных функций. Данный модуль используется на «мезонине».

Модуль на ПЛИС CPLD необходим для осуществления загрузки конфигураций из памяти ROM/Flash (параллельная организация передачи данных) в ПЛИС FPGA с использованием асинхронной шины процессора 80286. Структурная схема «мезонина» с интегрированным модулем представлена на рисунке 1.

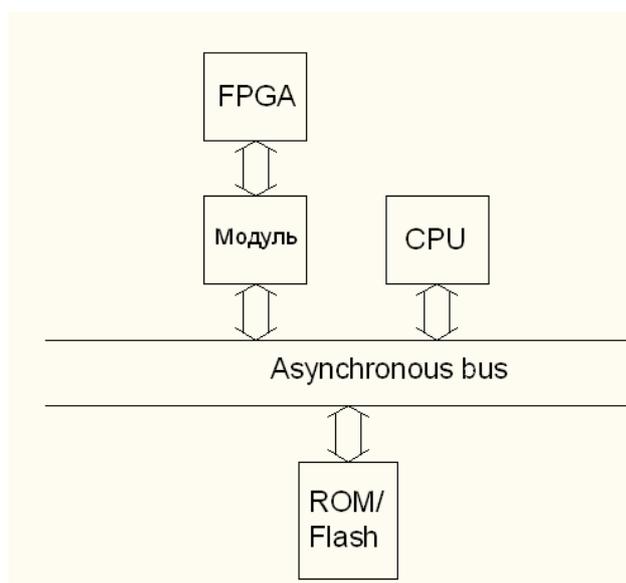


Рисунок 1 – Структурная схема «мезонина» с интегрированным модулем

Одной из главной задачи реализации модуля является минимизация занимаемого места на плате (мезонине). Для выполнения данной задачи выбрана ПЛИС CPLD XC9536XL в корпусе PLCC44, которая имеет всего 34 пользовательских контактов. Так как количество доступных пользователю контактов недостаточно для выполнения задачи, то для ее подключения предложено использовать мультиплексирование шин адреса и данных. Структурная схема модуля представлена на рисунке 2.

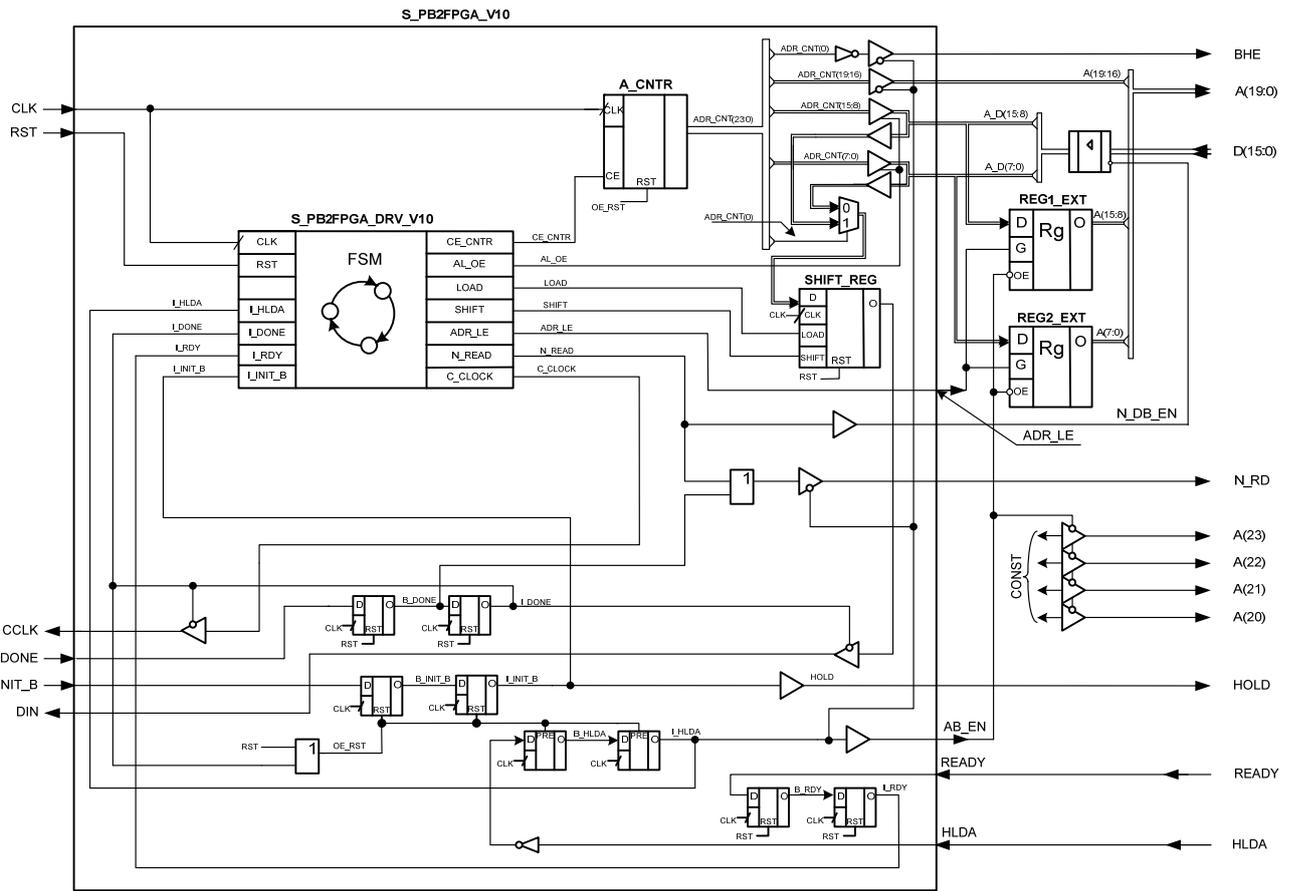


Рисунок 2 – Структурная схема модуля

Для реализации функций загрузки информации использованы следующие элементы в объеме ПЛИС.

Функциональный 32-х ступенчатый автомат (FSM), который выполняет основную функцию формирования управляющих логических сигналов. Граф, отображающий работу ступенчатого автомата, представлен на рисунке 3.

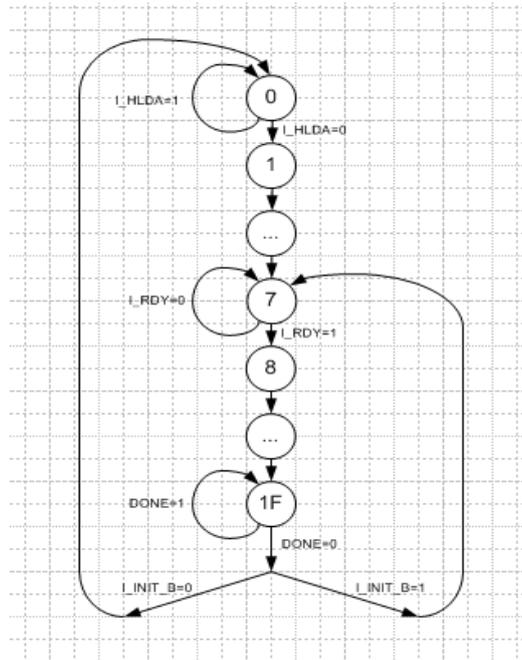


Рисунок 3 – Граф переходов ступенчатого автомата

Цепи синхронизации асинхронных сигналов. Сигналы с асинхронной шины и сигналы ПЛИС FPGA требуют синхронизации с рабочей частотой модуля. Для синхронизации используются два последовательно соединенных два D FF триггера. Также подобное соединение исключает восприятие модулем помех на асинхронной шине в качестве рабочих сигналов.

23- х разрядный счетчик адреса. Используется для формирования адреса, по которому будет прочитана информация из памяти.

Блок ввода вывода, включающий в себя тристабильные буферы, мультиплексор и сдвиговый регистр. Тристабильные буферы используются для обеспечения мультиплексирования. Сначала передается адрес с выходов счетчика, затем буферы переводятся в третье состояние и производится чтение данных (в зависимости от четности бита A0 выборка данных при помощи мультиплексора), которые записываются в сдвиговый регистр.

Для функционирования проекта были использованы следующие внешние элементы. **Два внешних регистра защелки (SN74ACT573)** для защелкивания адреса по которому нужно получить данные.

Буфер для передачи данных в ПЛИС CPLD.

Поддача констант A(20:23) для полного использования объема памяти.

В данном модуле предполагается использование ПЛИС фирмы Xilinx. Поэтому для его реализации был выбран САПР Xilinx ISE. Описание работы модуля производилось на универсальном языке описания аппаратуры (ЯОА) VHDL. При моделировании важно проверить работу модуля вместе с внешними устройствами. Поэтому тестирование проводилось на языке Verilog, позволяющем моделирование внешних объектов. Временная диаграмма, характеризующая работу «мезонина» с интегрированным модулем, представлена на рисунке 4.

На временной диаграмме отражены все промежутки работы модуля.

1. Запрос ПЛИСой FPGA информации (сигнал INIT_B).
2. Запрос на получение прямого доступа к памяти от процессора (получение разрешения при поступлении логической 1 на HLDA). Также на данной стадии производится проверка прерываний других устройств (сигнал READY).
3. Передача адреса для чтения информации.
4. Получение информации и запись в сдвиговый регистр.
5. Вывод из сдвигового регистра информации по сигналу SHIFT и, соответственно, загрузка в ПЛИС по сигналу CCLK (используется режим загрузки ПЛИС FPGA с внешней подачей сигнала).
6. Проверяется загрузка ПЛИС. Если ПЛИС загружена, то происходит ожидание до следующей загрузки, иначе происходит загрузка следующего байта информации.

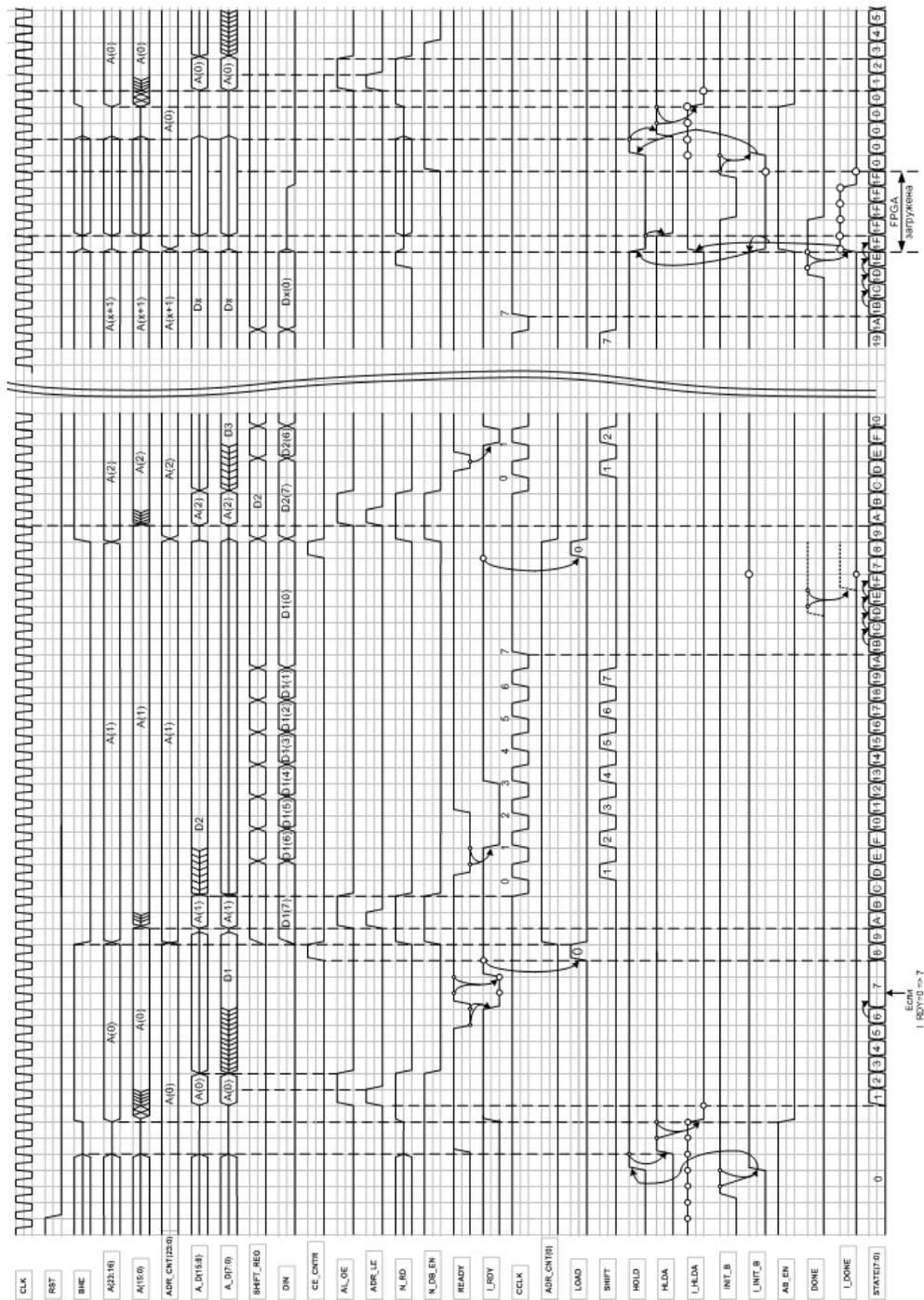


Рисунок 4 – Временная диаграмма работы модуля

Таким образом, модуль с использованием ПЛИС FPGA занимает на «мезонине» минимальное место при обеспечении требуемых функций.

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

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СКРЫТОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ КОМПЬЮТЕРА ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ ПРЕСТУПЛЕНИЙ

Соловьев А.В.

Научный руководитель: к.т.н. Н.В. Медведев

кафедра «Информационная безопасность», МГТУ им.Н.Э.Баумана

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы проведения компьютерно-технической экспертизы и методы извлечения зашифрованной информацией.

При проведении компьютерно-технической экспертизы при проведении расследований часто приходится сталкиваться с зашифрованной информацией. Для извлечения информации эксперту приходится работать с различными типами файлов. Иногда файлы имеют прописанное в названии расширение и, соответственно, однозначно относятся к какой-либо программе. Но часто бывает, что нужный файл в названии не имеет конкретного расширения и эксперту предстоит отнести его к какой-либо программе, чтобы просмотреть его. Для демонстрации процесса взят файл формата OpenOffice.

Эксперт может столкнуться с шифрованием файлов при исследовании системы. Тогда ему необходимо определить дальнейший алгоритм действий по извлечению информации из файла: каким образом файл был зашифрован, поиск возможных вариантов дешифрования.

При поиске улик, всего единственный файл может содержать нужную для следствия информацию. Для извлечения данных из него, сначала необходимо определить его тип. Эксперту сначала предстоит разобраться, с каким форматом файла он имеет дело.

В общем случае не существует универсального метода определения типа файла, но некоторые методы позволяют с достаточной долей вероятности приблизиться к его нахождению. Тут возможны различные варианты действий.

Самое простое – если есть расширение файла, тогда оно однозначно идентифицирует программу, которая к нему относится. Стоит попробовать открыть файл в этой программе. Вполне возможно, что расширение было изменено пользователем вручную, тогда файл не откроется. В этом случае стоит попробовать открыть файл в возможных программах, которые могли бы для этого использоваться на исследуемом компьютере.

Для осуществления попытки открытия файла в потенциально возможной программе, необходимо сначала составить список таких программ. Сюда должны входить как популярные программные продукты, так и специальные, которые эксперту предстоит найти на исследуемом компьютере.

Для начала необходимо проанализировать список доступного программного обеспечения на исследуемой машине. Наиболее вероятно, что файл был использован на данном компьютере какой-либо установленной на нем программой. И в каждой программе из этого списка стоит попытаться открыть исходный файл. Если установленное программное обеспечение не дает ответ на вопрос о типе файла, то либо она уже удалена с компьютера, либо файл изменен: зашифрован или испорчен.

В большинстве случаев эксперт не станет открывать файл с расширением, например, «.exe» в текстовом редакторе для просмотра содержимого. Подобные проблемы можно обойти как с помощью бесплатного программного обеспечения, так и с помощью проприетарного.

Если файл не поддается опознанию, его всегда можно рассмотреть «под ножом» hex-редактора и сравнить заголовок со стандартными заголовками программ.

Может быть такое, что эксперт наткнется на файл, который имеет нестандартный заголовок, не имеющийся в доступных базах сигнатур. Тогда стоит проследить, какие заголовки создают программы, находящиеся на данном компьютере. На этом шаге создается база сигнатур, создаваемых программным обеспечением исследуемой машины, которая может быть сопоставлена с заголовками файлов при их наличии. Если заголовок у файла

есть, то стоит необходимо считать его первые 8-16 байт и сравнить с тем, какие программы создают аналогичный заголовок. При совпадении существует вероятность, что файл был создан в программе, соответствующей найденному заголовку.

В данной работе разрабатывается метод определения типа файла по содержимому, а для реализации взят файл OpenOffice.

Файл формата OpenOffice определяет стандарт ISO/IEC 26300.

В целом, это «заипованный» xml-файл. Для работы с данными такого файла его надо интерпретировать именно так. Для извлечения параметров из него, следует вначале его разархивировать. Но перед этим предстоит решить задачу по идентификации zip-файла.

Если для документа, который использует пакеты, существует тип MIME, то пакет должен содержать поток, названный "mimetype". Этот поток должен быть первым потоком zip-файла пакета, он не должен быть сжат и не должен использовать 'дополнительную область в своем заголовке.

Цель состоит в том, чтобы позволить упакованным файлам быть идентифицированными через механизм «магических чисел», похожего на Unix-утилиту file/magic. Если zip-файл в начале содержит поток, который распакован, и не имеет никаких дополнительных данных в заголовке, то название потока и его содержимое можно найти в фиксированных позициях:

- строка 'PK' в нулевой позиции всех zip-файлов;
- строка 'mimetype' в 30-ой позиции всех таких файлов пакета;
- тип MIME непосредственно в 38-й позиции такого пакета.

После того, как однозначно можно сказать, что исследуемый файл является именно архивом, можно его разархивировать, и работать с *содержимым* распакованного файла.

Zip-файл начинается с последовательности файлов, каждый из которых может быть сжат или сохранен в необработанном формате. Каждый файл, непосредственно перед своими данными, имеет локальный заголовок, который содержит наибольшее количество информации о файле, включая временные метки, метод сжатия и имя файла. Содержание сжатого файла следует непосредственно далее и заканчивается необязательным дескриптором данных. Дескриптор данных содержит циклический избыточный код и размер сжатого файла, которые часто не доступны, при записи локального заголовка файла. Дескриптор данных может быть пропущен, если эти детали уже были включены в заголовок.

В приведенном формате каждый файл в архиве располагается последовательно и сопровождается центральным каталогом в конце zip-архива. Центральный каталог — это непрерывное множество элементов каталога, каждый из которых содержит всю информацию в локальном заголовке файла, плюс дополнения, типа комментариев и атрибутов файла. Центральный каталог содержит указатели на позицию каждого файла в архиве.

В структуре формата OpenDocument имеются несколько разделов. Нас будут интересовать:

- Корни документа.
- Метаданные документа.

Процесс шифрования состоит из нескольких стадий:

1. Создание 20-байтового SHA1 результирующего дайджеста пароля, введенного пользователем и его передача компоненту пакета.
2. Компонент пакета инициализирует генератор случайных чисел с текущим временем.
3. Генератор случайных чисел используется, чтобы генерировать случайный 8-байтовый вектор инициализации и 16-байтовый шум для каждого файла.
4. Шум используется вместе с 20-байтовым SHA1 результирующим дайджестом пароля для получения уникального для каждого файла 128-битного ключа. Алгоритм получения ключа является алгоритм PBKDF2, использующий HMAC-SHA-1 с количеством итераций равным 1024.

5. Полученный ключ используется вместе с вектором инициализации для шифрации файла, используя алгоритм Blowfish в режиме cipher-feedback.

Каждый зашифрованный файл сжимается перед шифрованием. Для разрешения проверки содержимого файла пакета, необходимо, чтобы зашифрованные файлы были помечены как 'STORED' а не 'DEFLATED'. Так как элементы, помеченные как 'STORED', должны иметь размер равный сжатому размеру, их несжатый размер хранится в декларации. Сжатый размер сохраняется как в локальном заголовке файла, так и в записи центрального каталога zip-файла.

Элемент `<manifest:encryption-data>` содержит полную информацию необходимую для расшифровки файла. Элемент `<encryption-data>` содержит в себе следующие элементы:

- Алгоритм.
- Источник ключа.

Атрибут `manifest:checksum-type` определяет название алгоритма формирования дайджеста и может быть использован для проверки пароля. На текущий момент поддерживается только SHA1 алгоритм формирования дайджеста.

Атрибут `manifest:checksum` определяет base64-кодированный дайджест, который может использоваться, чтобы проверить правильность пароля способом описанным в атрибуте `manifest:checksum-type`. Элемент `<manifest:algorithm>` содержит информацию об алгоритме который используется для шифрования данных.

С `<manifest:algorithm>` связаны следующие атрибуты:

- Название алгоритма.
- Вектор инициализации.

Атрибут `manifest:algorithm-name` определяет название алгоритма, который используется для шифрования файла, он также определяет каким способом используется данный алгоритм. На текущий момент поддерживается только алгоритм Blowfish в режиме обратной связи шифра CFB. Вектор инициализации

Атрибут `manifest:initialisation-vector` определяет 8 байт использующихся как вектор инициализации для шифра потока. Вектор инициализации — это 8-байтовая двоичная последовательность, закодированная в тип base64 в момент записи в файл декларации. Элемент `<manifest:key-derivation>` содержит информацию, которая была использована для формирования ключа шифра файла из пароля заданного пользователем. С элементом `<manifest:key-derivation>` связаны следующие атрибуты:

- Название источника ключа.
- Шум.
- Количество итераций.

Атрибут `manifest:key-derivation-name` определяет название алгоритма, который был использован для получения источника ключа. В настоящее время пакеты поддерживают использование только PBKDF2 метода получения ключа.

Атрибут `manifest:salt` определяет 16-байтовую последовательность которая используется как «шум» (salt) алгоритмом получения ключа.

Шум — это 16-байтовая двоичная последовательность, кодированная в base64 до записи в файл декларации.

Атрибут `manifest:iteration-count` определяет количество итераций использующихся алгоритмом получения ключа. Для того, чтобы получить ключ, нам надо знать все параметры шифрования. Их можно извлечь из файла вышеописанным способом. Из математических значений мы можем извлечь:

- Вектор инициализации, 8 байт (`manifest:initialisation-vector`).
- Шум (salt), 16 байт (`manifest:salt`).
- Хэш пароля, 20 байт (`manifest:checksum`).

Если первое и второе необходимо для просмотра файла после ввода пароля, то для его определения нам достаточно хэша пароля. Алгоритм создания хэша пароля нам известен — SHA1.

Таким образом, мы можем задавать пароль и вычислять с него хэш-сумму по обозначенному алгоритму. Когда перебор паролей наткнется на искомый, хэш-суммы совпадут. На этом процесс дешифрования можно считать законченным – далее его уже можно вводить в программе OpenOffice для открытия файла.

Для ускорения процесса перебора предлагается использовать распределенную сеть компьютеров, что позволяет обрабатывать большой массив зашифрованных файлов.

Литература

1. Шнайер Б. Прикладная криптография. – М.: «Издательство ТРИУМФ», 2002, 2003.
2. Keith J., Richard B., Curtis W. Real Digital Forensics. New York: Addison-Wesley, 2005.
3. RFC 2048. Multipurpose Internet Mail Extensions (MIME) Part Four: Registration Procedures.
4. INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 26300 Information technology Open Document Format for Office Applications (OpenDocument) v1.0

АНАЛИЗ ПОВТОРЯЕМОСТИ И ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ СЛОЯ ДВУОКСИ КРЕМНИЯ

Гладких А.А.

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

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

к.ф.-м.н. Амирханов А.В.,

Россия, Москва, НИИСИ РАН

RECURRENCE ANALYSIS OF CMP SILICON DIOXIDE OPERATION AND ACCURACY OF ITS SIMULATION

Gladkikh A.A.

The supervisors of studies: cand.tech.sci., reader Makarchuk V.V.

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

cand. of phys.-math. sci. Amirkhanov A.V.

Russia, Moscow, SRISA RAS

e-mail: GladkikhAlexei@gmail.com

Аннотация

Изложены результаты статистического анализа данных операции химико-механической планаризации (ХМП) двуокиси кремния по пластине и между различными пластинами. Приведены результаты моделирования операции ХМП по существующим различным ее моделям и проведена оценка их точности.

Abstract

The statistical analysis of results of the operation of chemical-mechanical planarization of silicon dioxide on the wafer and between different wafers have been presented. The analysis of modeling the operation with various models have been done in the work. A comparison of the accuracy of models the operation of chemical-mechanical planarization have been presented in the work.

Введение

К настоящему времени разработано несколько различных моделей операции химико-механической планаризации (далее ХМП), как для субтрактивного процесса формирования межслойного диэлектрика (далее МСД), где сама операции проводится по МСД, так и для, так называемого, «дамасского процесса», в котором материалом для создания межсоединений является медь и проводится планаризации слоя меди. В качестве МСД может использоваться либо двуокись кремния SiO_2 , либо *low-k* материал.

Для описания таких процессов хорошо известны модели, разработанные в Массачусетском Технологическом Институте (далее МТИ) (г. Бостон, США) в работах, проводимых под руководством Д. Бонинга [1, 2, 3]. Описание и анализ этих моделей, на примере полирующей подушки «FX-9» производства фирмы «Freudenberg» (США), приведен в работах [4, 5], в которых одновременно рассмотрены и их недостатки.

С целью устранения этих недостатков была предложена полиномиальная модель операции ХМП. При ее разработке имевшиеся на тот момент данные измерений не позволяли провести статистический анализ результатов планаризации. По этой причине не была показана закономерность полученных полиномиальных зависимостей при экспериментах с одинаковыми режимами выполнения операции ХМП.

В предлагаемой статье приведены результаты экспериментальной работы, выполнявшейся с целью определения разброса толщины МСД после операции ХМП и возможности ее статистической обработки. С этой целью была проведена многократная планаризации рельефа слоя изолирующего диэлектрика из двуокиси кремния полирующей подушкой «IC1000/SubaIV» производства фирмы «Rodel Co.» (США) при постоянном режиме выполнения этой операции. Конечная цель всей работы заключалась в подтверждении полиномиальных закономерностей операции ХМП для заданных режимов

обработки рельефных пластин и построение модели операции ХМП для полирующей подушки «IC1000/SubaIV».

Полиномиальная модель операции ХМП

В данном разделе статьи кратко изложены теоретические основы разработанной полиномиальной модели операции ХМП.

Как было показано в [1, 2, 3] операция ХМП в наибольшей степени чувствительна к плотности заполнения топологического слоя. Перед расчетом локальной плотности его заполнения ширина всех проводников в слое металлизации увеличивается на значение kB , где B – максимальное увеличение ширины проводника, возникающее при нанесении МСД (рисунок 1), а k – корректирующий коэффициент.

Локальную плотность заполнения определим по следующему алгоритму. Разобьем весь слой на квадраты со стороной a , имеющие равные площади $S_{кв} = a^2$. Вычислив суммарную площадь топологических элементов $S_{эл}$, лежащих внутри каждого из квадратов, определим локальную плотность заполнения слоя каждого квадрата как $d_{ij} = S_{ij\ эл}/S_{кв}$.

Модель операции ХМП представляет собой описание скорости планаризации материала (далее СПМ) при операции ХМП с помощью полиномиальных зависимостей, а также двумерной свертки. Предполагается, что распределение толщины МСД после планаризации является функцией времени и эффективной плотности заполнения. При этом остальные параметры операции определяются матрицей коэффициентов и вычисляются эмпирическим путем с помощью специального набора тестовых структур (далее ТС). Тогда общий вид полиномиальной модели операции ХМП можно представить следующим образом:

$$z(t, \varphi_{ij}) = z_0 - z_1 \left(1 - \sum_{r=1}^{M_s} a_{0,r} \varphi_{ij}^r \right) + \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{r=1}^{M_s} a_{k,r} \varphi_{ij}^r \right] \cdot t^k$$

где $a_{k,r}$ – коэффициенты полинома, φ_{ij} – эффективная плотность заполнения квадрата, z – толщина двуокиси кремния, отсчитываемая от некоторой базовой точки (рисунок 1).

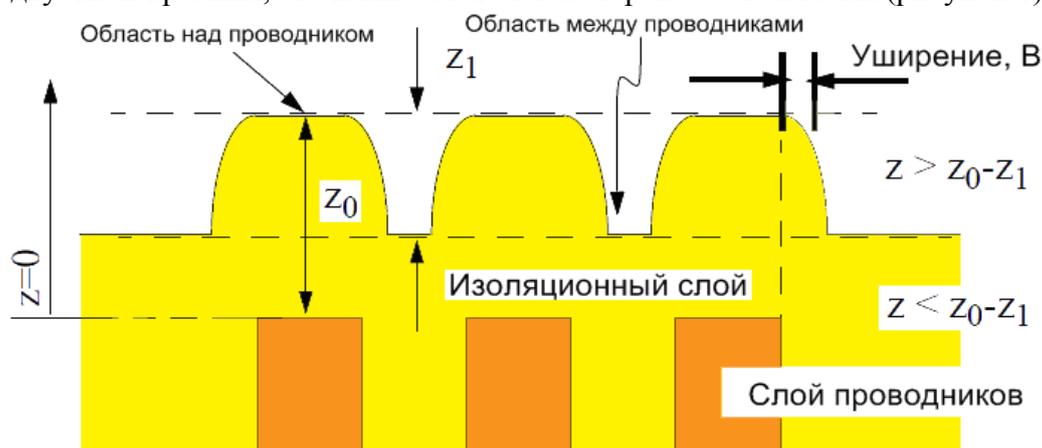


Рисунок 1 – Расчет остаточной толщины двуокиси кремния после проведения операции ХМП

Для расчета матрицы эффективной плотности заполнения Φ использовалась свертка D матрицы ядра W , расчет которой осуществляется с помощью выражения из теории упругости [6], определяющего величину прогиба эластичного материала подушки установки ХМП в зависимости от приложенной нагрузки.

Каждый из элементов матрицы эффективной плотности заполнения зависит от значений локальной плотности заполнения, которые лежат на расстоянии, не превышающем максимального радиуса r_{max} ядра свертки. Причем на некотором расстоянии меньшем PL , называемым длиной планаризации (*planarization length*) проявляется максимальное влияние близлежащих топологических элементов друг на друга.

Для получения рабочей модели, которая может адекватно предсказывать распределение толщины двуокиси кремния после операции ХМП, необходим подбор матрицы коэффициентов, а также параметров полирующей подушки: длины планаризации и максимального расчетного радиуса.

Определение приведенных в предыдущем разделе параметров назовем калибровкой модели. Она проводится с использованием некоторого выбранного алгоритма оптимизации, обеспечивающего наилучшую сходимость при поиске параметров. В качестве критерия оптимизации необходимо выбрать некую величину, которая однозначно бы характеризовала точность модели. В данной работе в качестве таковой была выбрана среднеквадратичная ошибка отклонения результатов моделирования от данных измерений (*Root Mean Square Error*, далее *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_k^N (z_k^{(M)} - z_k^{(H)})^2}{N}}$$

где $z_k^{(M)}$ – определенная моделированием толщина двуокиси кремния, а $z_k^{(H)}$ – значения толщины, полученные в результате измерений, N – общее число точек измерений.

План и подготовка эксперимента

Для экспериментальной работы (рисунок 2) было отобрано 15 пластин с нанесенным слоем металлизации толщиной 6000 \AA . Первая часть эксперимента состояла в подготовке всех пластин путем выполнения следующей последовательности технологических операций:

1. Формирования защитной маски резиста по тестовому фотошаблону (далее ФШ).
2. Травления металла по полученной маске резиста.
3. Нанесения МСД, толщиной 16000 \AA .

Для получения экспериментальных данных использовался аналогичный разработанному в МТИ тестовый ФШ, размером $20 \times 20 \text{ мм}$. В этом ФШ были размещены 25 блоков ТС, позволяющих определить параметры моделей. Каждый из блоков ТС представлял собой набор линий различной ширины с изменяющимся между ними расстоянием.

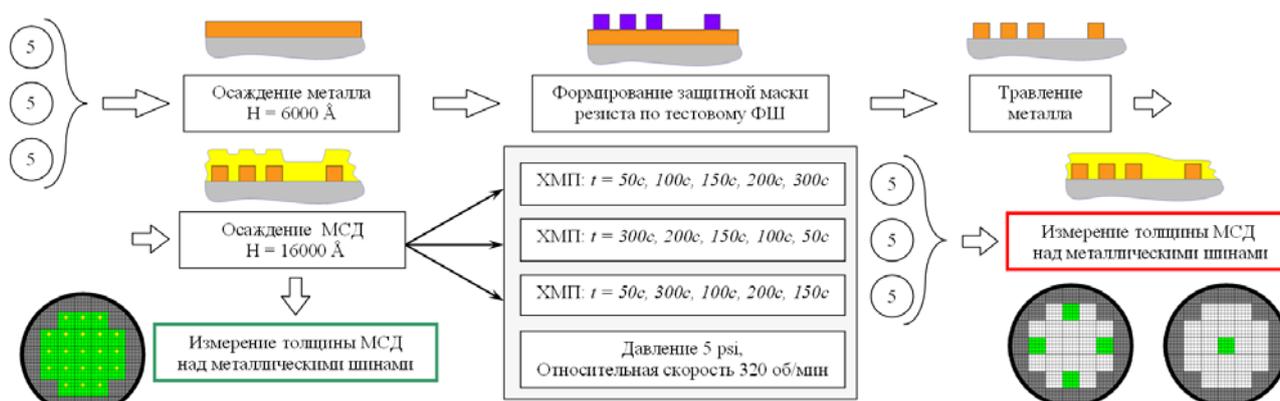


Рисунок 2 – Схема проведения эксперимента для характеристики операции ХМП

Используемые блоки ТС условно можно разделить на три группы (рисунок 3). Первая группа состоит из 5 блоков с резко изменяющейся плотностью заполнения. Вторая группа содержит 10 блоков с плавно изменяющейся плотностью заполнения в диапазоне, характерном для топологий рабочих микросхем. Третья группа из 10 блоков содержит ТС с 50% плотностью заполнения. Блоки отличаются расстояниями между линиями. Причем они заданы таким образом, что при нанесении двуокиси кремния возможно смыкание профиля осажденного слоя. Это изменяет плотность заполнения и позволяет калибровать значение коэффициента уширения k .

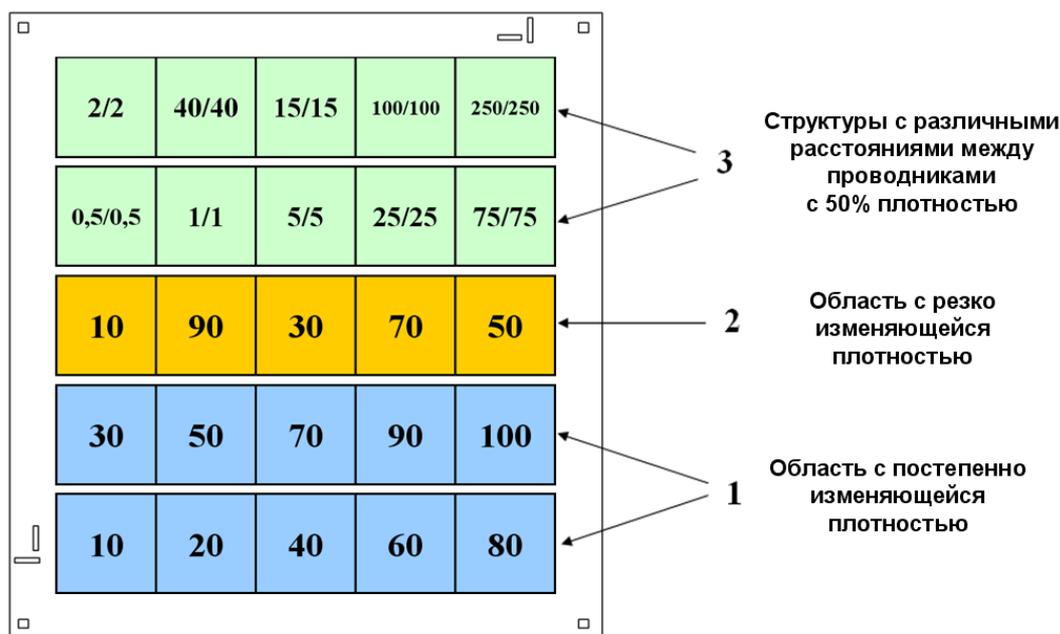


Рисунок 3 – Общий вид тестового ФШ с указанием его параметров

С целью получения данных измерений в тестовом ФШ были предусмотрены измерительные площадки, размер которых позволил обеспечить возможность проведения измерений над ними толщины слоя осажденного диэлектрика.

Во второй части эксперимента была проведена химико-механическая планаризация подготовленных пластин. Для их обработки использовалась установка планаризации «AvantGaard-676» фирмы «IPEC-SpeedFam» (США) и полирующая подушка «IC1000/SubaIV». Длительность операции планаризации варьировалась и составляла 50 с, 100 с, 150 с, 200 с и 300 с. В течение каждого из этих времен обрабатывалась по 3 пластины.

Конечная цель эксперимента состояла, во-первых, в получении возможности статистической обработки данных, а во-вторых, в анализе зависимости характеристик планаризации от последовательности обработки пластин. Так первые пять пластин последовательно обрабатывались при увеличении времени планаризации с 50 до 300 с. Второй такой же набор пластин был обработан в том же диапазоне времен в порядке его уменьшения, а в третьем наборе время обработки каждой следующей пластины резко отличалось и проводилось в следующем порядке: 50 с, 300 с, 100 с, 200 с и 150 с.

Измерения толщины слоя до и после планаризации МСД проводились на установке «APECS 3020» фирмы «Leica Microsystems Wetzlar GmbH» (Германия) по трем специально разработанным программам. С помощью первой программы (рисунок 4а) измерения толщины слоя МСД проводились до операции планаризации по всей пластине в одной точке кристалла. С помощью двух остальных программ проводились измерения толщины слоя МСД после операции планаризации.

Вторая программа (рисунок 4б) позволяла проводить измерения над *всеми* измерительными площадками центрального кристалла всех пластин с общим числом измерительных точек, равным 1650. Цель применения данной измерительной программы состояла в получении данных для калибровки и верификации номинальных параметров модели операции ХМП.

Последняя из трех программ (рисунок 4в) позволяла измерять на центральных измерительных площадках четырех крайних кристаллов тестовых блоков с общим числом измерительных точек, равным 1500. Эта программа была необходима для анализа разброса толщины слоя двуокиси кремния после операции ХМП по всей пластине, что одновременно давало возможность судить об адекватности модели операции ХМП не только для центрального кристалла, но и для всей обрабатываемой пластины в целом.

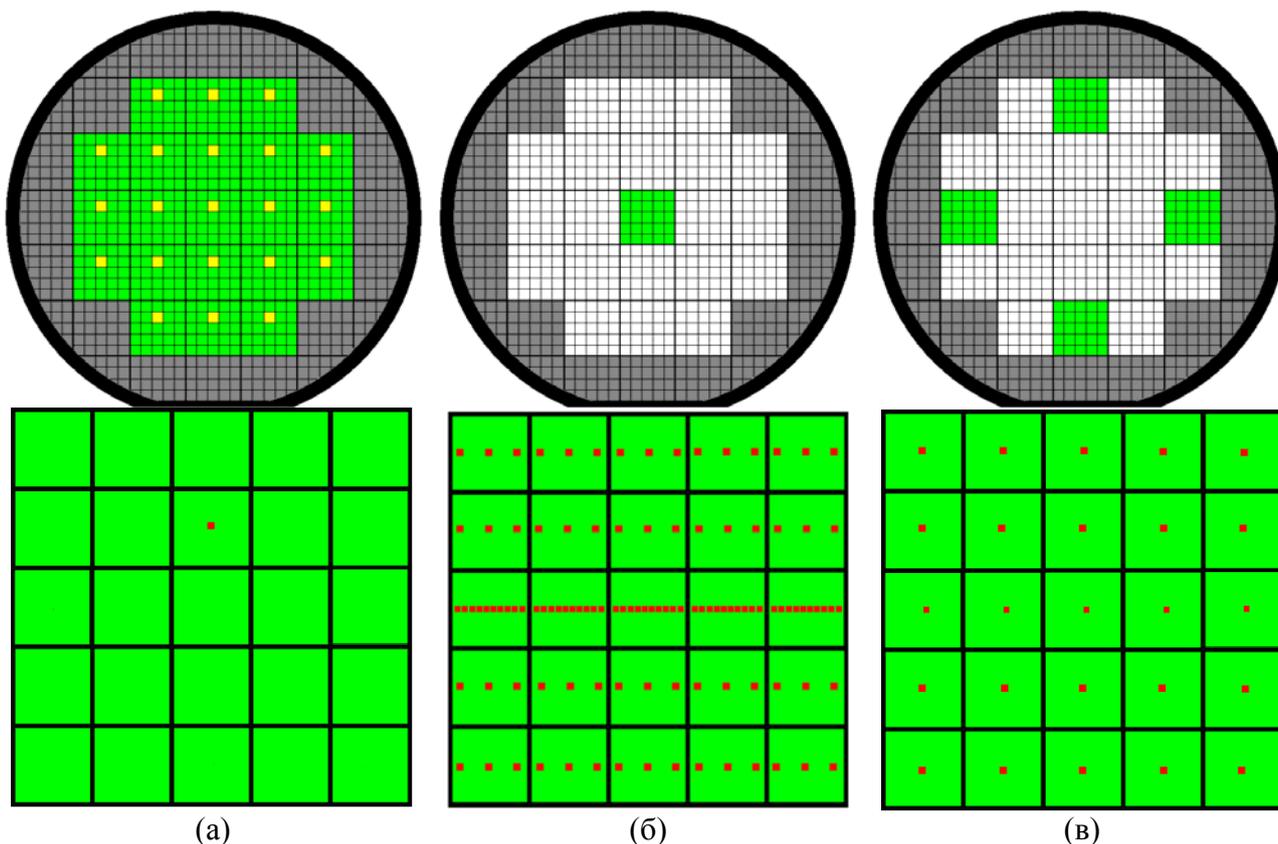


Рисунок 4 – Схема измерений толщины МСД перед операцией ХМП (а) и после нее для центрального кристалла (б) и по рельефной пластине (в)

Кроме пластин, имеющих рельеф, в эксперименте участвовали и четыре пластины кремния не имевшие рельефа. Поверхность каждой из этих пластин имела слой двуоксида кремния, причем его толщина на каждой из пластин была разной. Они были необходимы для экспериментального определения СПМ, а также для измерения ее распределения по поверхности пластины.

Для этих пластин совместно с пластинами, имевшими рельеф поверхности, также была выполнена операция ХМП в течение времени равного 60 с. Затем был проведен статистический анализ полученных результатов измерений и проведена калибровка и верификация модели операции ХМП, разработанной в работе [1] и предлагаемой полиномиальной модели.

Анализ результатов экспериментальной работы

Для начала рассмотрим результаты измерений, полученные во время подготовки рельефных пластин, после нанесения слоя двуоксида кремния с помощью операции осаждения из газовой фазы (*Chemical-Vapor Deposition, CVD*).

После проведения измерений толщины слоя МСД до планаризации на всех пластинах были построены карты ее распределения. Построенные распределения толщины МСД для трех из них эти карты показаны на рисунке 5. Из приведенного рисунка видно, что для *всех* пластин характерно наличие МСД большей толщины на части поверхности пластины.

Однако из приведенных в таблице 1 статистических показателей толщины осажденного МСД видно, что среднеквадратичное отклонение (*СКО*) этого параметра не превышает 1%. Это позволяет в дальнейшем при калибровке модели операции ХМП считать, что начальное значение толщины планаризируемого МСД – двуоксида кремния, на всей поверхности пластины постоянно. Кроме того из таблицы видно, что *СКО* по всем пластинам также не превышает 1%. Таким образом, в дальнейшем при моделировании операции ХМП в качестве

значения начальной толщины МСД можно использовать его среднее значение, вычисленное по всем пластинам.

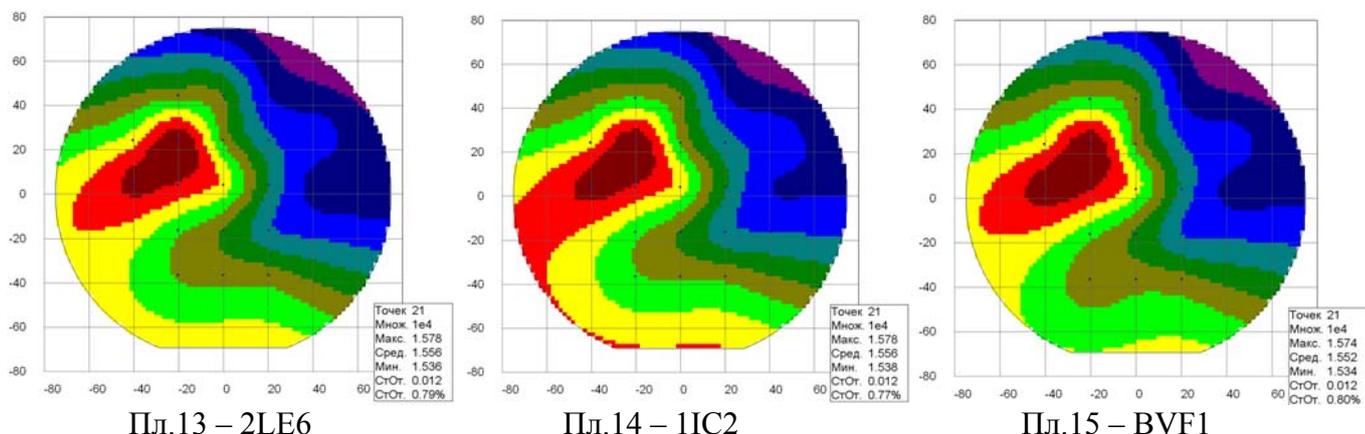


Рисунок 5 – Измеренное распределение толщины МСД на рельефных пластинах до операции ХМП

Таблица 1 – Статистические показатели осаждения МСД на рельефную пластину

№ n/n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	По всем пластинам
Пластина	0QD2	25C5	RRE0	1DE6	REE6	4FA0	3FC4	3KD2	0OF4	BXD7	TFB4	U9E5	2LE6	1IC2	BVF1	
Сред. А	1573 9	1567 2	1551 1	1560 3	1560 3	1554 0	1565 6	1553 1	1556 7	1551 3	1555 4	1554 9	1555 6	1556 3	1552 1	1557 8
СКО А	126	147	131	121	121	122	128	117	124	125	130	126	123	120	124	138
СК О %	0,80	0,94	0,84	0,77	0,77	0,79	0,82	0,75	0,80	0,81	0,83	0,81	0,79	0,77	0,80	0,89

Теперь рассмотрим результаты, полученные после операции ХМП для пластин, не имевших рельефа. Карты распределения скорости планаризации по пластине, полученные по результатам измерений для этого случая показаны на рисунке 6, а в таблице 2 приведены результаты расчетов статистических характеристик скорости планаризации МСД на таких пластинах, причем точки, лежащие вблизи базового среза пластины, в расчетах не участвовали.

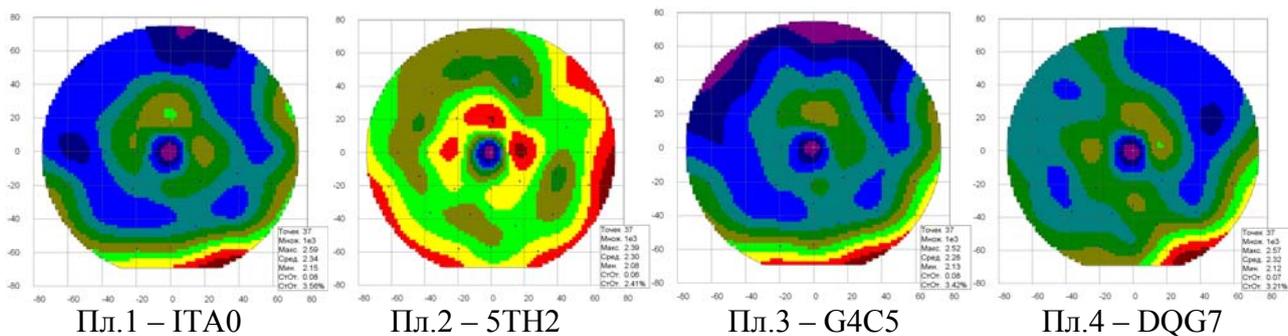


Рисунок 6 – Карты распределения СПМ для гладких пластин

Это было сделано для того, чтобы отделить при расчете статистических показателей ту часть пластины, в которой содержится большинство кристаллов СБИС, от той ее части, в которой статистические показатели заведомо завышены вследствие искажений геометрической формы пластины. Поскольку вблизи базового среза другие технологические операции изготовления СБИС также имеют повышенный разброс, это делает данную область менее важной с точки зрения предсказания результатов обработки измерений в ней после операции ХМП.

Для получения полной карты распределения СПМ по пластине при обработке результатов измерений были использованы средства интерполяции MATLAB по неравномерной сетке исходных данных. Результат интерполяции показан на рисунках 7а и 7б. Для получения полной карты распределения СПМ в качестве исходных данных использовались усредненные по четырем пластинам скорости планаризации материала. Кроме того на рисунке 7а приведена схема расположения измерительных точек, которые были использованы для получения непосредственно значения СПМ, а на рисунке 7б представлены измерительные точки для рельефных пластин.

Таблица 2 – Статистические показатели СПМ по гладким пластинам за время 60 с

Параметр \ Пластина	ITA0	5TH2	G4C5	DQG7	По всем пластинам
Среднее значение, Å/мин	2338	2300	2264	2311	2301
СКО, Å/мин	70	57	61	63	67
СКО, %	3.01	2.48	2.68	2.74	2.89
Максимальное значение, Å/мин	2461	2387	2396	2415	2461
Минимальное значение, Å/мин	2147	2083	2129	2120	2083
Разброс, Å/мин	314	305	267	295	378

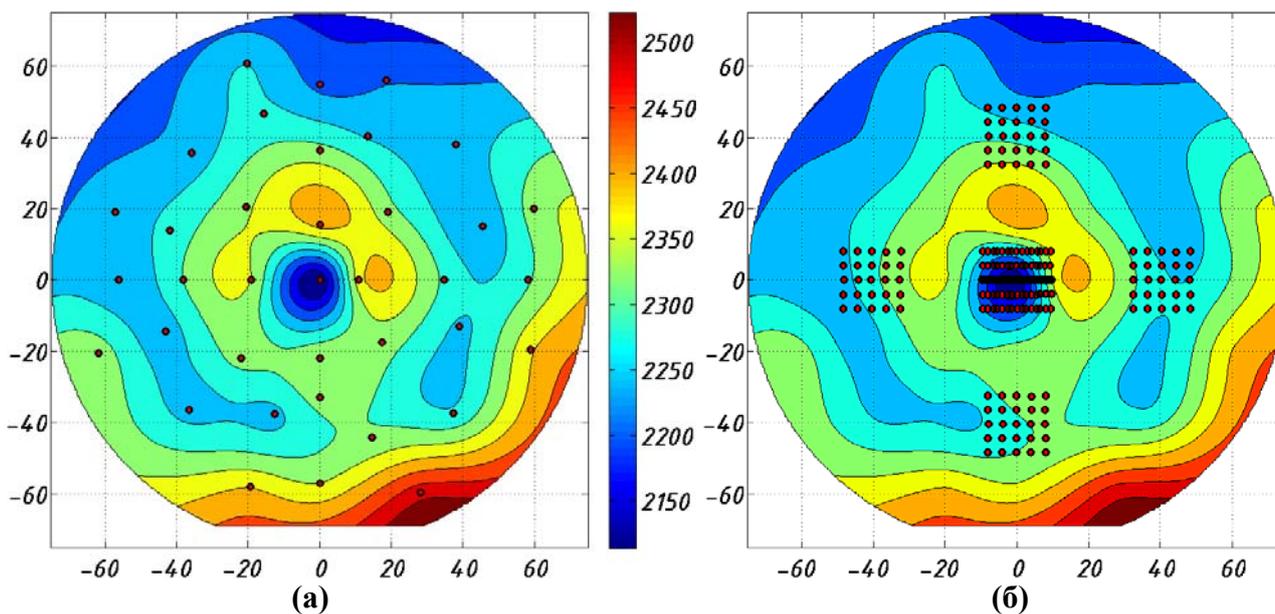


Рисунок 7 – Карта распределения усредненной по четырем пластинам СПМ.
 (а) – Схема измерения для расчета СПМ (б) – Схема измерений рельефных пластин

Первоначально стоит отметить увеличение СПМ по сравнению с экспериментальными результатами, приведенными в работах [4, 5]. Для режима операции ХМП, при котором приложенное к пластине давление было равно 3 psi^1 , значение СПМ, как было показано по расчетам с использованием результатов эксперимента, составляла порядка 1500 (Å/мин) . В то время как при используемом в данной работе значении параметра давления 5 psi ,

¹ psi – pound-force per square inch $\approx 6894,75729 \text{ Па}$

экспериментальное значение СПМ стало равно примерно 2300 \AA/мин . Это является закономерным и соответствует закону Престона [7], описывающему процесс полировки гладкого стеклообразного материала.

Как видно из таблицы 2 разность между максимальной и минимальной СПМ составляет величину порядка 300 \AA/мин . Однако, как будет показано далее, такое различие в скорости планаризации материала на гладкой пластине не приводит к существенному разбросу толщины на рельефной пластине. В этих целях в данной работе будут приведены результаты калибровки модели центрального кристалла, а также сравнение результатов, полученных после моделирования и измерений периферийных кристаллов на рельефной пластине.

На заключительном этапе экспериментальной работы были проведены измерения рельефных пластин в точках, показанных на рисунке 7б. На рисунке 8 показано распределение толщины МСД для центрального кристалла блоков ТС с резкоизменяющейся плотностью заполнения по все группам пластин, а также среднее значение для каждого времени планаризации.

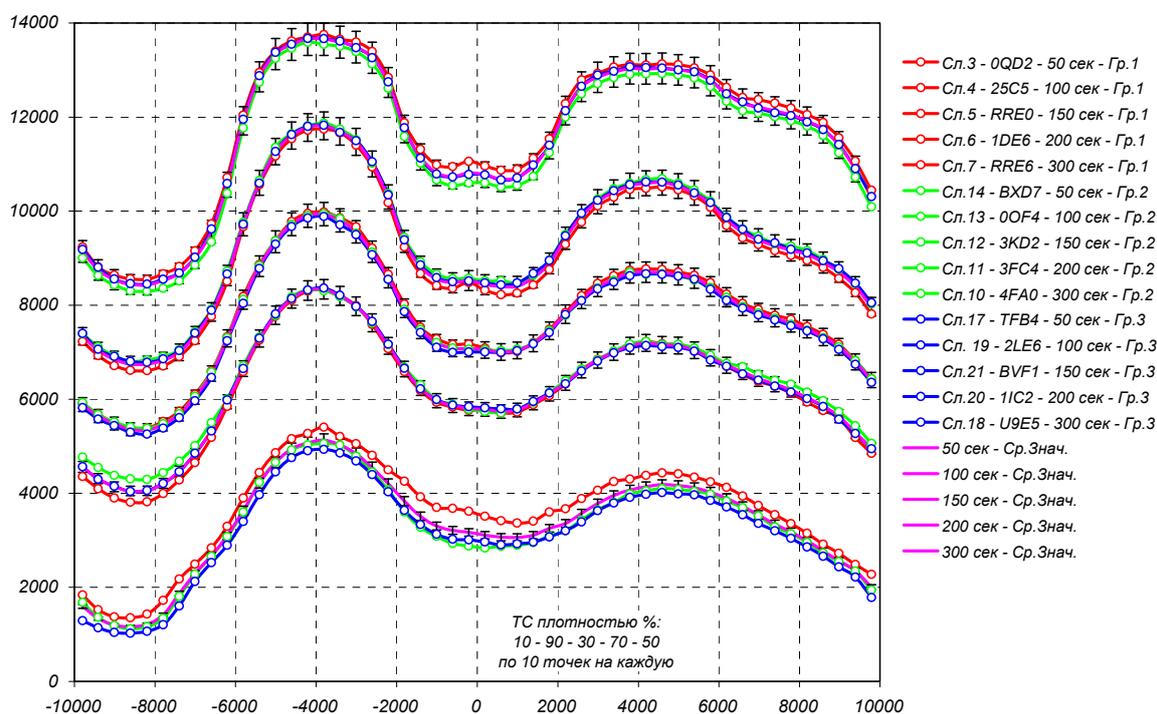


Рисунок 8 – Распределение толщины МСД в центральном кристалле блоков ТС с резкоизменяющейся плотностью заполнения

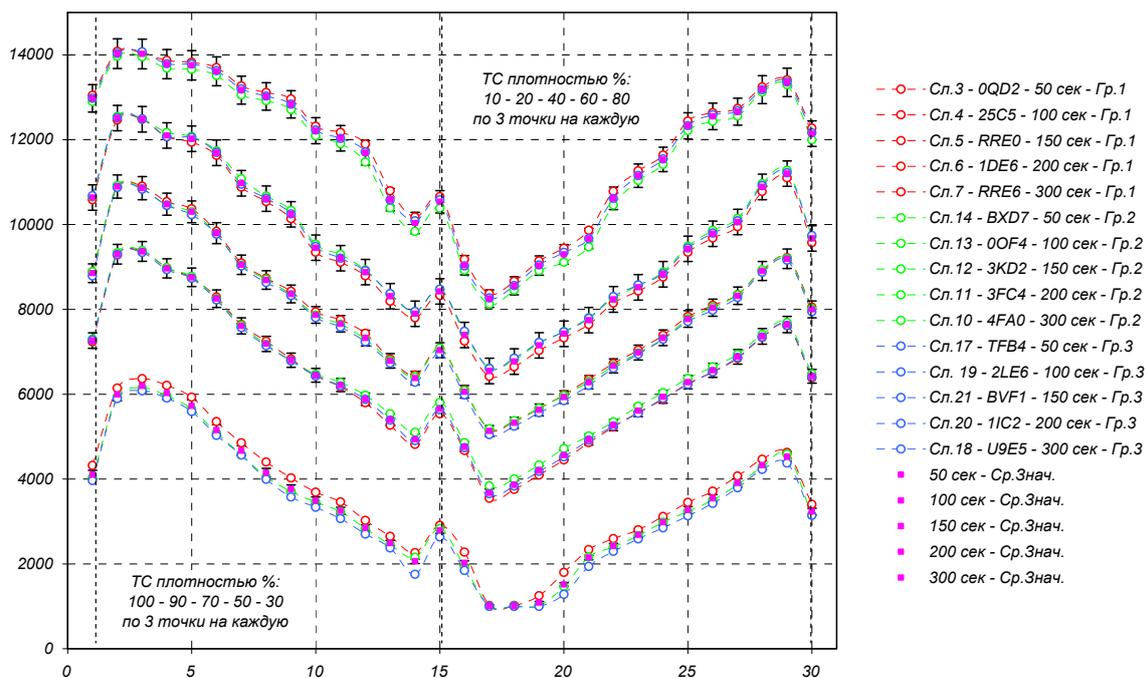


Рисунок 9 – Распределение толщины МСД в центральном кристалле блоков ТС с изменяющейся плавно плотностью заполнения

На рисунке 8 распределение толщины МСД показано в диапазоне $\pm 5\%$ от среднего значения. Как видно из представленной на нем информации, для времени планаризации в диапазоне от 50 до 200 с для 90% точек кристалла разброс не превышает 5%. Однако при его увеличении до 300 с разброс толщины МСД возрастает до величины порядка 10% – 15%.

Экспериментальные результаты, полученные для блоков ТС с изменяющейся плавно и постоянной плотностью заполнения, показаны на рисунках 9 и 10, соответственно. Разброс для этих результатов измерений, также составляет $\pm 5\%$.

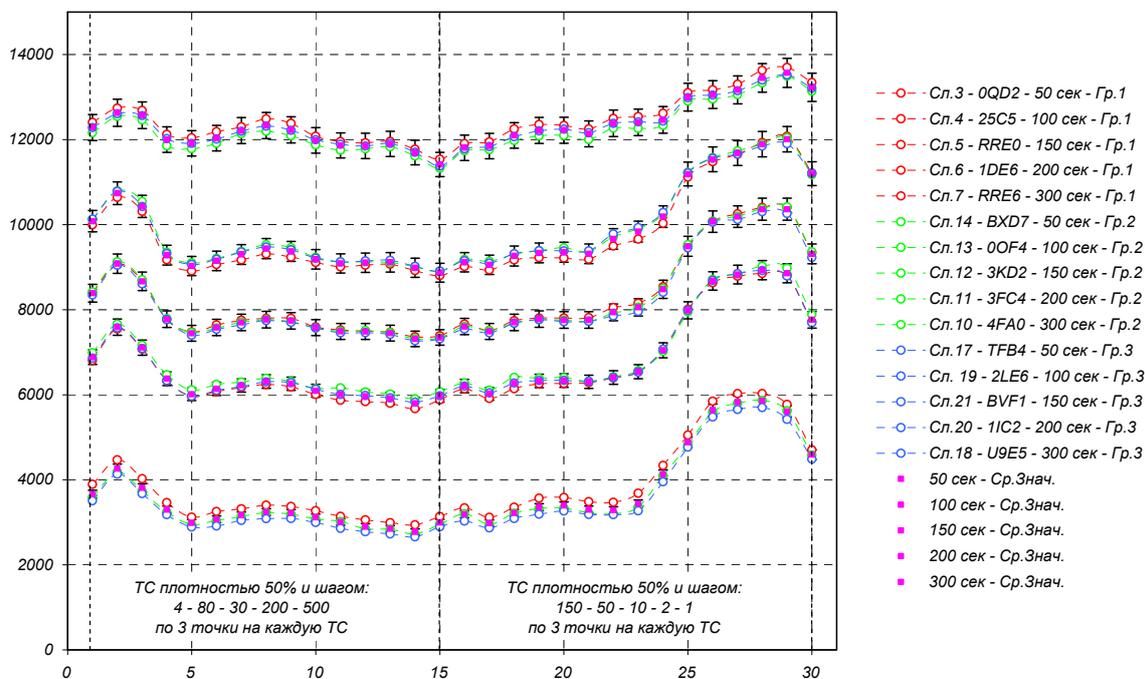


Рисунок 10 – Распределение толщины МСД для центрального кристалла блоков ТС с плотностью заполнения 50% и изменяющимся шагом

Из приведенных зависимостей видно, что при увеличении времени планаризации разброс толщины МСД «от пластины к пластине» увеличивается. Это обстоятельство дополнительно подтверждается графиком рисунка 11а. На нем изображена зависимость среднего по измеренным точкам разброса толщины МСД от времени планаризации (разницы между максимальным и минимальным значением, измеренным на разных пластинах, но в одинаковых точках). Из графика хорошо видно, что при малом времени планаризации разброс толщины МСД после ХМП также велик, а наилучшая воспроизводимость толщины МСД получалась в том случае, когда время планаризации составляло 150 с.

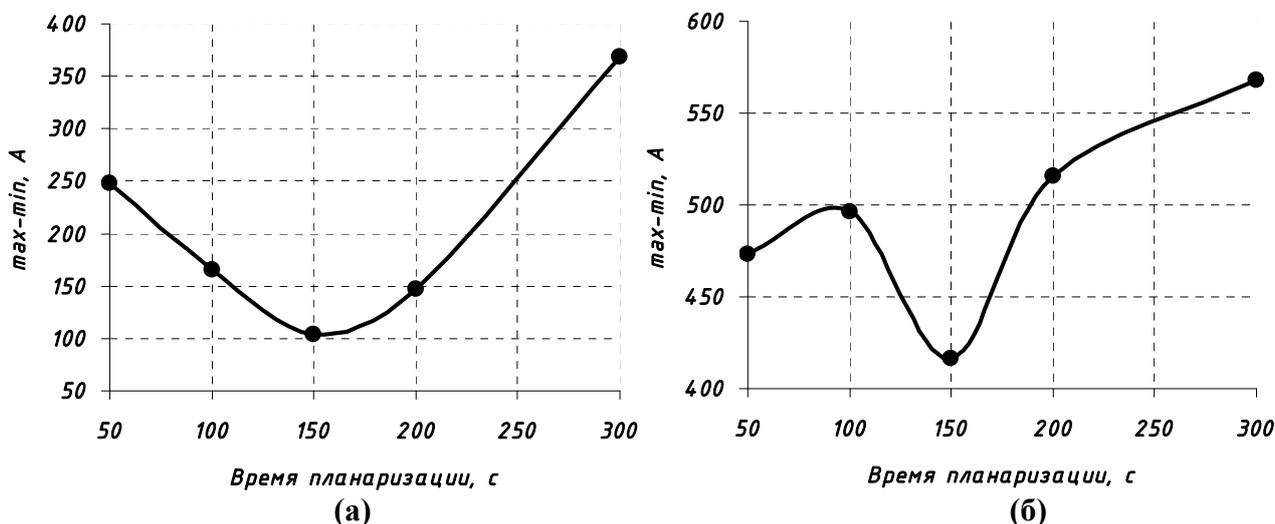


Рисунок 11 – Разброс толщины МСД в зависимости от времени планаризации (а) – по пластинам, (б) – по кристаллам и пластинам

Разброс толщины МСД показан на рисунке 11б. Он вычислялся как разность между максимальным и минимальным значениями толщины в определенной точке тестового кристалла по 3-м измеряемым пластинам. Схема измерений показана на рисунке 4в.

Из приведенного графика видно, что минимальное значение разброса толщины МСД после операции планаризации, как по всей пластине, так и от пластины к пластине, имеет место быть при времени планаризации 150 с. При уменьшении этого времени, также как и при его увеличении, воспроизводимость толщины МСД при одинаковых режимах планаризации снижается, то есть увеличивается разброс.

Ниже приведены результаты калибровки и верификации модели операции ХМП, разработанной в работе [1] (далее называемой «*linear*») и полиномиальной модели (далее называемой «*polynom*»). Кроме того, проведен сравнительный анализ данных по разбросу толщины МСД, полученных путем измерений на пластинах, с результатами моделирования.

Калибровка модели операции ХМП для полирующей подушки «IC1000/SubaIV»

Для получения параметров модели *polynom*, то есть коэффициентов ее полинома, необходима предварительная калибровка параметров модели *linear*: коэффициента уширения топологии – параметра, характеризующего *CVD*-операцию, и параметров эластичности полирующей подушки: длины планаризации и максимального радиуса ядра свертки.

Для модели *linear* основными параметрами калибровки являлись: длина планаризации PL , максимальный радиус r_{max} и СПМ гладкой пластины BR . В качестве критерия оценки точности калибровки и верификации модели была использована среднеквадратичная ошибка отклонения результатов моделирования.

В процессе калибровки подбор коэффициента уширения k осуществлялся путем расширения рисунка тестового ФШ на различную величину. Для каждой такой топологии

рассчитывалась матрица локальных плотностей заполнения, для которой проводилась калибровка по 2-й группе ТС и верификация модели по ТС 1-й и 3-й групп.

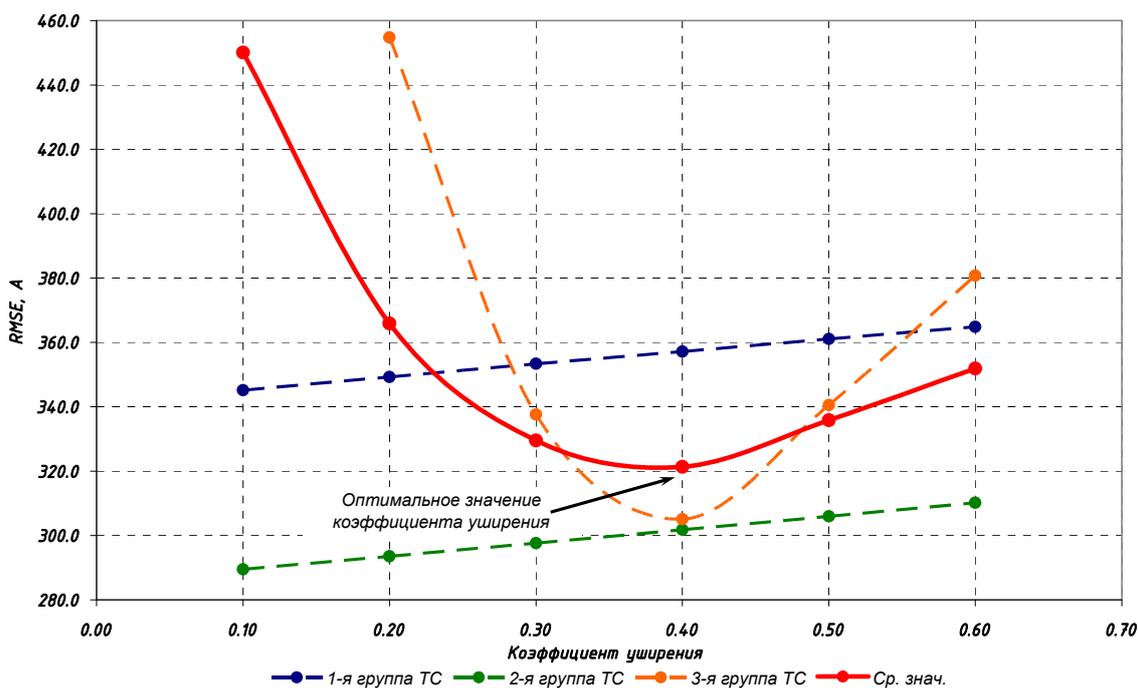
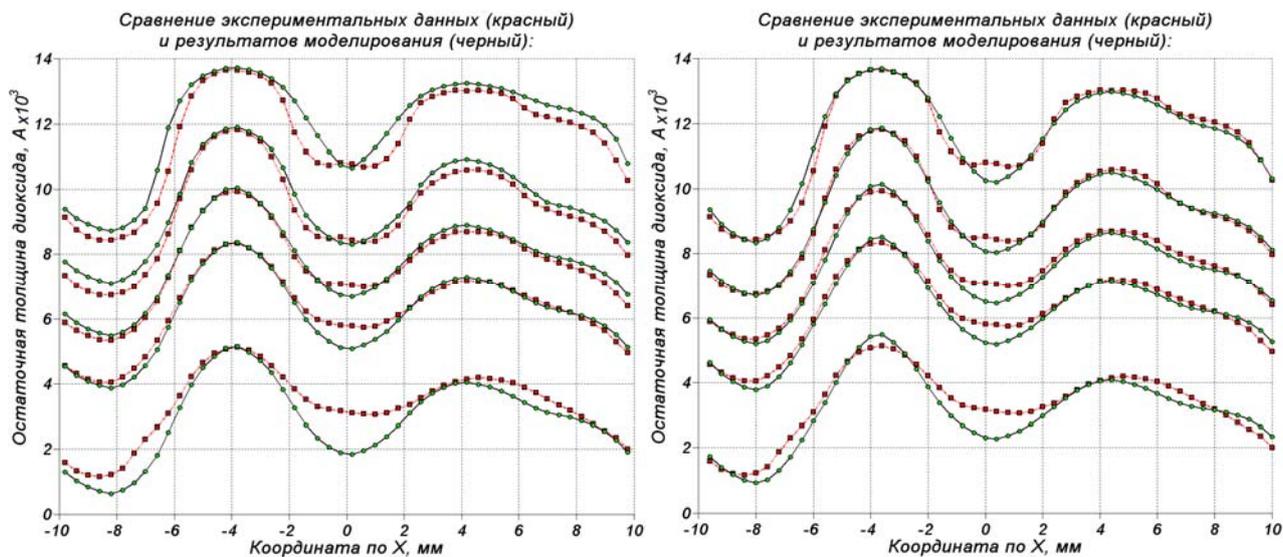


Рисунок 12 – Калибровочный график коэффициента уширения для моделирования операции *CVD*

Во время процедуры построения модели операции ХМП были проведена калибровка и верификация порядка 30 различных вариантов ее базовых параметров (PL , $Rmax$, BR). После анализа всех полученных вариантов была отобрана модель с минимальной ошибкой $RMSE$, для которой коэффициент уширения проводников составил $0,4$ (см. рисунок 12). Ошибка $RMSE$ для этой модели по 1-й группе составила 357 \AA , по 2-й группе - 289 \AA и по 3-й группе - 305 \AA . Анализ такого большого числа вариантов моделей был необходим для того, чтобы снизить возможность влияния ошибки на значения коэффициентов полинома.

Для определения матрицы коэффициентов полинома дополнительно был проведен анализ нескольких вариантов параметров моделей, в результате чего получена полиномиальная модель, ошибка которой по 1-й группе блоков составила 234 \AA , по 2-й группе - 130 \AA и по 3-й группе - 241 \AA .

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных по 1-й группе блоков для лучшей модели *linear* и модели *polynom* показано на рисунках 13а и 13б, соответственно.

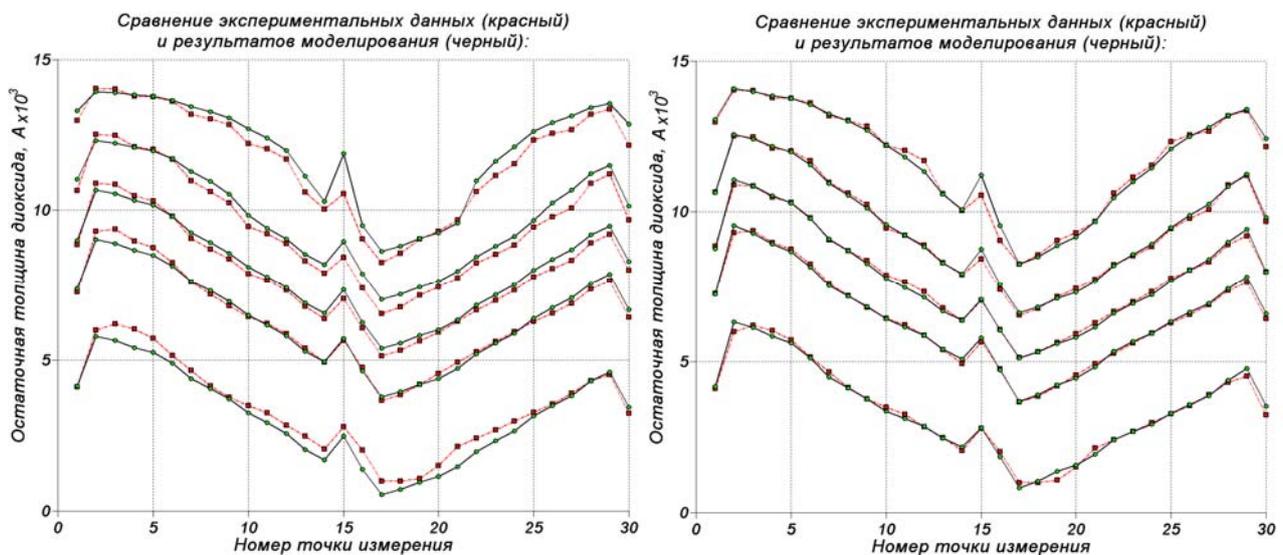


(а) – $RMSE = 357 \text{ \AA}$

(б) – $RMSE = 234 \text{ \AA}$

Рисунок 13 – Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования по 1-й группе ТС: (а) – модель *linear* (б) – модель *polynom*

Экспериментальные данные и результаты моделирования по 2-й группе блоков для лучшей модели *linear* и модели *polynom* представлены на рисунках 14а и 14б соответственно, а на рисунках 15а и 15б показано сравнение результатов моделирования с данными измерений для 3-й группы блоков ТС.



(а) – $RMSE = 289 \text{ \AA}$

(б) – $RMSE = 130 \text{ \AA}$

Рисунок 14 – Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования по 2-й группе ТС: (а) – модель *linear* (б) – модель *polynom*

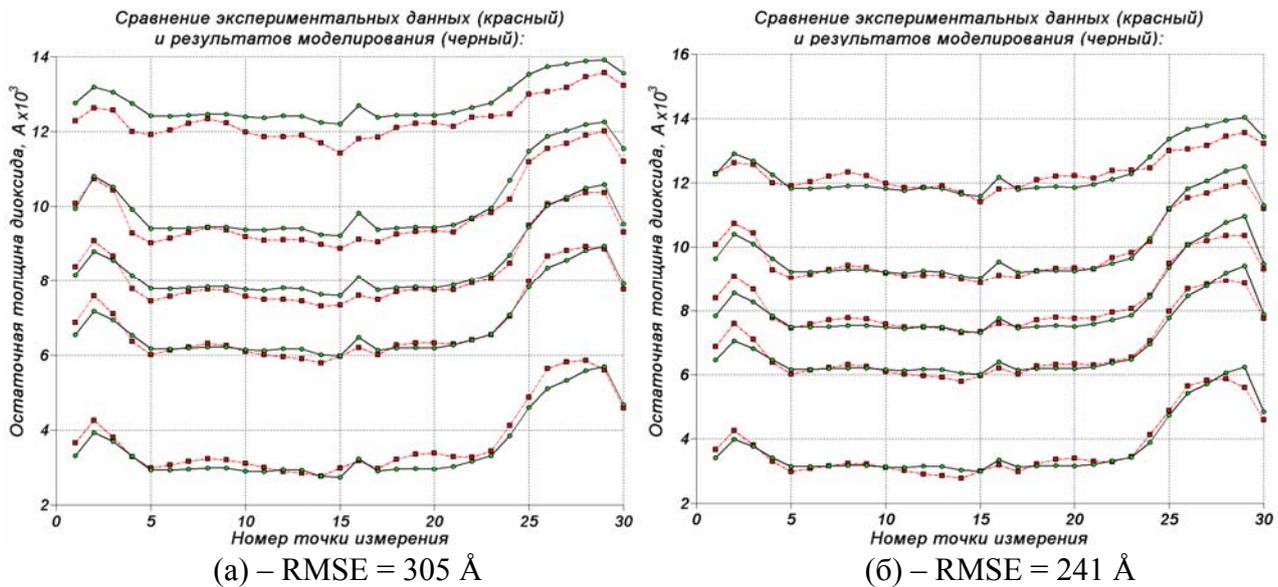
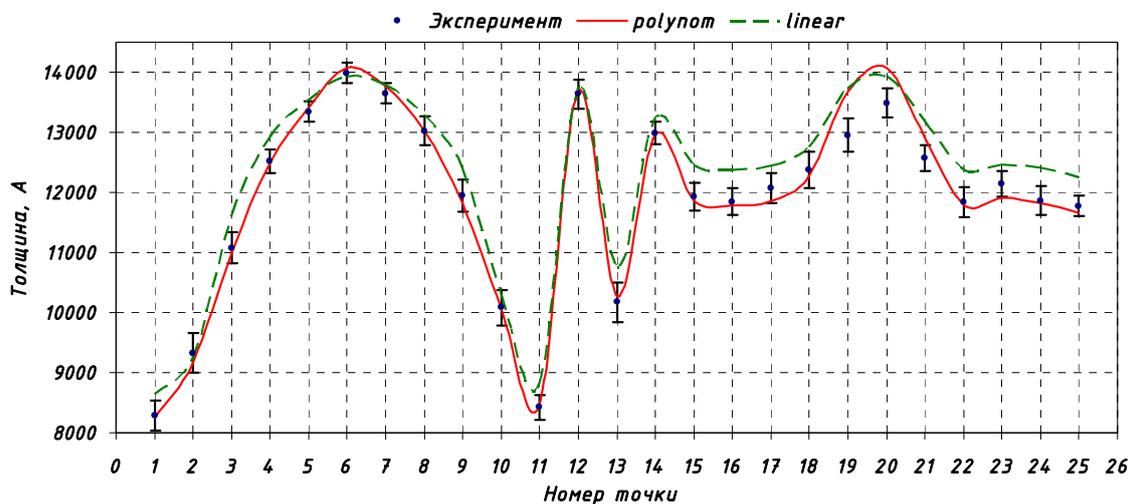


Рисунок 15 – Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования по 3-й группе ТС: (а) – модель *linear* (б) – модель *polynom*

Как видно из приведенных рисунков и значений полученных ошибок $RMSE$, модель *polynom* для *всех групп ТС* предсказывает результаты измерений с большей точностью.

На рисунке 16 представлено сравнение результатов моделирования с использованием моделей *linear* и *polynom* с данными эксперимента. Основной целью этой работы был анализ ухода каждой из моделей за пределы значений разброса, измеренного на всех пластинах и периферийных кристаллах. На представленных рисунках для различных времен планаризации показан также максимальный разброс толщины МСД, полученный в результате измерений в этой точке на всех кристаллах и пластинах.



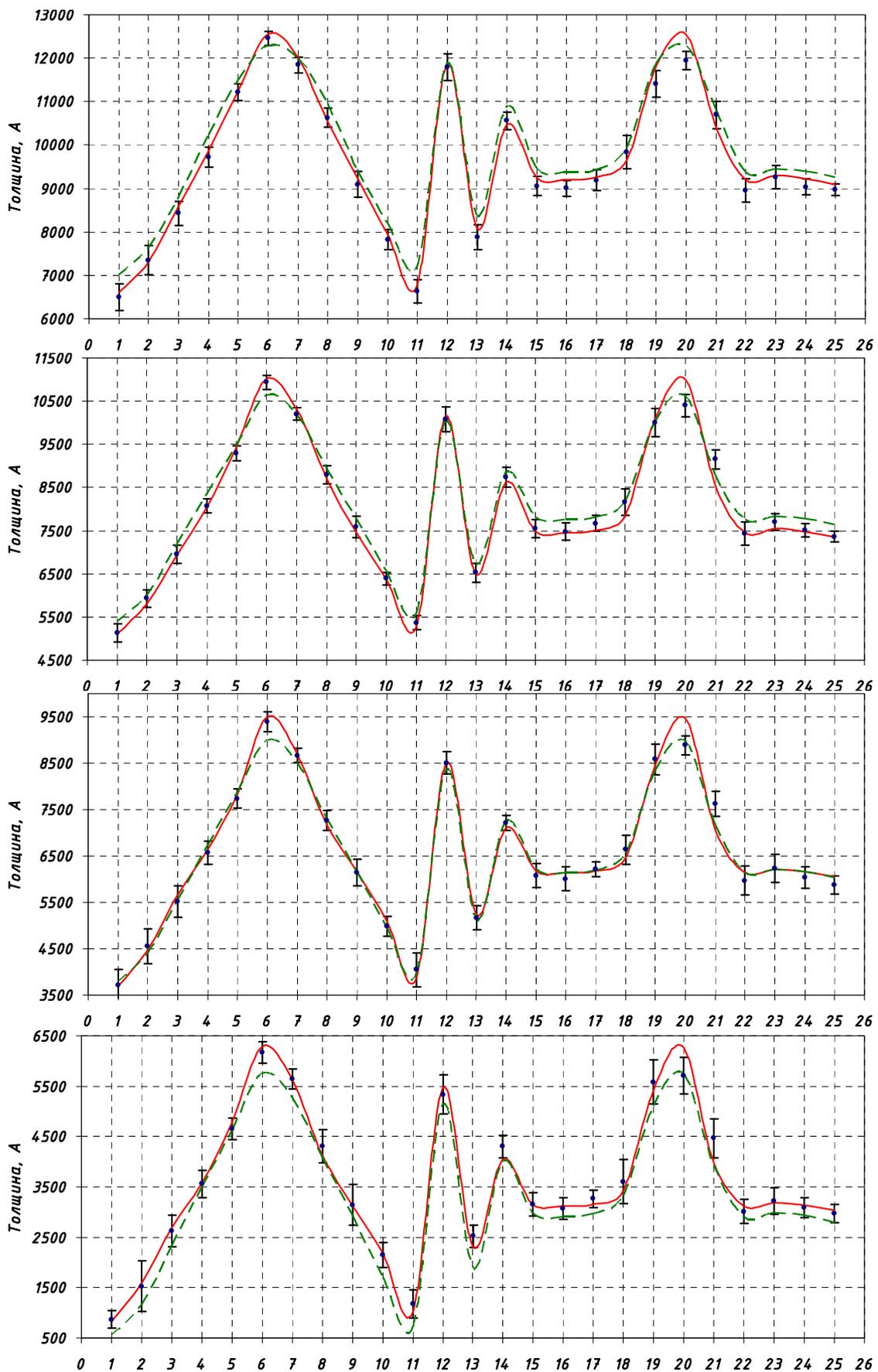


Рисунок 16 – Сравнение результатов моделирования полученных для разных моделей операции ХМП с данными измерений для периферийных кристаллов для времени планаризации 50 с, 100 с, 150 с, 200 с и 300 с

На представленных графиках хорошо видно, что модель *polynom* попадает в интервал разброса толщины МСД для существенно большего числа точек при всех временах планаризации. Процентное соотношение числа точек, в которых для указанных моделей расчетные результаты находятся в интервале разброса данных измерений приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Процентное соотношение числа точек, в которых модель попадает в интервал данных измерений

Время планаризации Модель	50 с	100 с	150 с	200 с	300 с	Общее
<i>linear</i>	24%	28%	48%	88%	56%	49%
<i>polynom</i>	84%	88%	88%	92%	88%	88%

Из приведенной таблицы видно, что модель *linear*, разработанная в работе [1], в среднем только в половине случаев попадает в интервал данных измерений. Тогда как предложенная в настоящей работе полиномиальная модель – *polynom* в 90% случаев попадает в указанный интервал, позволяя тем самым повысить точность прогнозирования результатов операции ХМП.

Выводы

Среди всех известных моделей операции ХМП предложенная полиномиальная модель позволяет наиболее точно предсказать величину остаточного рельефа поверхности пластины, что подтверждено как большим объемом результатов измерений, так и статистическим анализом данных по воспроизводимости параметров операции ХМП.

Литература

1. D. Ouma, R. Divecha, D. Boning, J. Chung. A closed-form analytic model for ILD thickness variation in CMP processes – Proc. CMP-MIC, Santa Clara, Feb. 1997.
2. T. H. Smith, Simon J. Fang, Duane S. Boning. A CMP model combining density and time dependencies – Proc. CMP-MIC, Santa Clara, Feb. 1999.
3. D. O. Ouma. Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Dielectric Planarization. Dis. PhD in Electrical Engineering and Computer Science / Dennis Okumu Ouma; Massachusetts Institute of Technology – Massachusetts, 1998. – 228p.
4. А.А. Гладких. Моделирование процесса химико-механической планаризации диоксида кремния при формировании межслойной изоляции. Информатика и системы управления в XXI веке: Сборник трудов №7 молодых ученых, аспирантов и студентов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – стр. 54-70. ISBN 978-5-7038-3427-5
5. А.А. Гладких. Временная оптимизация модели ХМП с учетом распределения скорости планаризации по кремниевой пластине. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 12-я Молодежная международная научно-техническая конференция «Научные технологии и интеллектуальные системы 2010», 2010. – стр. 214-223
6. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd Int.Ed. – McGraw-Hill Book Company, Chap. 12, 1970.
7. F.W. Preston, J. Soc. Glass Tech. – vol.11, 1927. – 214 p.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

ГИБРИДНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ - ГЕНЕРАТОРА И СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Костюченко С. В.

Научный руководитель: Долинский Валерий Сергеевич, педагог
МОУ ДОД «Центр детского творчества», г. Надым, Россия

THE HYBRID POWER PLANT BASED ON DIESEL - GENERATOR AND SOLAR BATTERIES

Sergey V. Kostyuchenko

Scientific supervisor: Valery S. Dolinsky, teacher further education
«Center of Children's Creativity», Nadym, Russia

Аннотация

В данной работе автором предпринята попытка разработать гибридную электростанцию на базе солнечной батареи и дизель-генератора, которая позволит уменьшить расход топлива на дизельных электростанциях. Основная суть разработки заключается в добавлении к дизель-генератору блока, состоящего из солнечной батареи и устройства автоматического управления. Электростанция для выработки электроэнергии автоматически включает и выключает дизель-генератор или солнечную батарею, в зависимости от ее освещенности. При этом батарея автоматически ориентируется на Солнце для наиболее эффективного ее использования. Полученная таким образом электроэнергия, будет намного дешевле по сравнению с энергией, вырабатываемой самим дизель-генератором. Настройка и управление всей системой осуществляется при помощи нескольких кнопок и LCD дисплея, что значительно упрощает работу оператора электростанции.

Abstract (Die Inhaltsangabe)

Currently, diesel power is very relevant, especially in the Russian context. This is due to the specific features of the terrain and climate of our country. Laying of power lines in the vast Russian expanse of very complex and expensive. That's why all the small industrial complexes and distant objects electrified by diesel power. Particularly widespread are the diesel generators in the block-containers "North". The advantages of container version is the ability of protection equipment installed in it from adverse environmental factors. Having carefully considered the unit of data of diesel generators, the author decided that you can further without changing the design of power plants, put on her rooftop solar panels, and to develop a system for automatic switching mode, so as a result should have an automatic hybrid power plant.

В настоящее время, дизельные электростанции очень актуальны, особенно в Российских условиях. Это связано со спецификой местности и особенностями климата нашей страны. Прокладка линий электропередач на обширных российских просторах очень сложна и дорогостояща. Именно поэтому все малые промышленные комплексы и удалённые объекты электрифицируются за счёт дизельных электростанций. Особо широкое распространение имеют дизель-генераторы в блок-контейнерах «Север». Преимущества контейнерного исполнения заключаются в возможности защиты, установленного в нем оборудования от неблагоприятных факторов окружающей среды. Внимательно изучив устройство данных дизель-генераторов, автор решил, что можно дополнительно, не изменяя конструкцию электростанции, разместить на ее крыше солнечную батарею и разработать систему для автоматического переключения режима работы, таким образом, в результате должна получиться автоматическая гибридная электростанция.

Исходя из этого была поставлена **цель** - сконструировать гибридную автоматическую электростанцию на базе дизель - генератора и солнечной батареи.

Исходя из цели, были поставлены следующие **задачи**:

- Изучить внутреннее устройство и конструкционные особенности дизельных электростанций в контейнерном исполнении.
- Изучить техническую литературу, позволяющую сконструировать данную систему.
- Разработать установку автоматической ориентации солнечной батареи на Солнце.

- Разработать и изготовить электронные схемы для автоматического управления гибридной электростанцией.
- Написать программу для микроконтроллера, позволяющую управлять всей системой автоматически.
- Управление должно быть простым и все текущие настройки должны отображаться на LCD дисплее.
- Изготовить действующую модель.

Источниками разработки являются:

- Схема управления системой [3-4, 9,12].
- Модульная солнечная батарея [13].
- Установка для поворота солнечной батареи [6, 8].
- Макет демонстрационной установки [1-9,12].

Объект исследований – комплексное решение на базе дизельной электростанции - (дизель-генераторная установка, электроагрегат, «дизель-генератор») — стационарная или подвижная энергетическая установка, оборудованная одним или несколькими электрическими генераторами с приводом от дизельного двигателя внутреннего сгорания [1].

Изучив техническую литературу [1-12], а так же изучив внутреннее строение дизельных электростанций, автор приступил к разработке данной электростанции, а именно начал разработку системы позволяющую добавить к дизельной электростанции солнечную батарею и электронную систему управления и получить в результате автоматическую гибридную электростанцию.

Вся электростанция представляет собой совокупность различных систем, после внедрения дополнительного оборудования (солнечной батареи и электронной системы управления) электростанция будет работать по принципу представленному на рисунке 1.

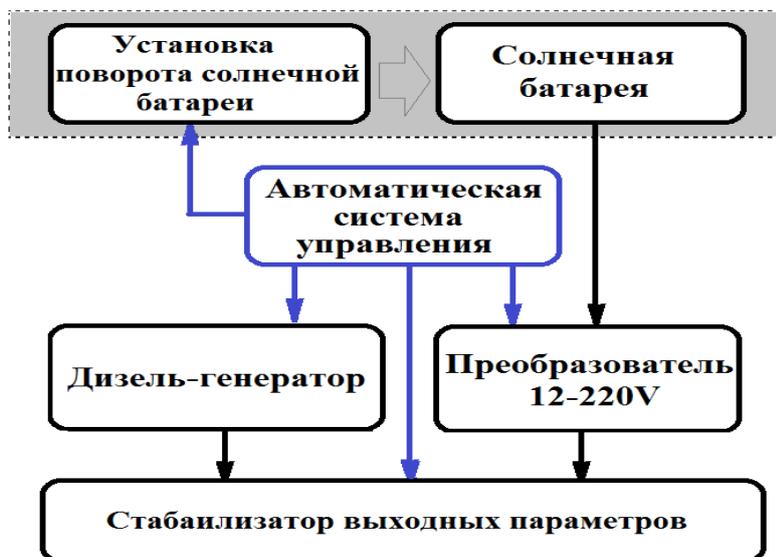


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления гибридной электростанцией

Далее были произведены расчёты солнечной батареи для основных типов электростанций в блок контейнерах «Север». Расчёты представлены в таблице [12, 14].

	<i>СЕВЕР КС-3</i> 3000x2400мм	<i>СЕВЕР КС-4</i> 4000x2400мм	<i>СЕВЕР КС-5</i> 5000x2400мм	<i>СЕВЕР КС-6</i> 6000x2400мм
Ip, А	110	132	154	176
Up, В	12	12	12	12
Wp, Вт	1850	2220	2590	2960
Количество модулей в 1-й панели	10	12	14	16
Масса, кг	80	216	252	288
Размеры панели, мм	4025x3150	4830x3150	5635x3150	6440x3150

Как видно результаты довольно хорошие, за минимальные модуль для составных солнечных батарей был взят модуль МСК-160 отечественного производства имеющий следующие характеристики [12].

Модель	Размер,мм	Un,В	Uкх,В	Iкз,А	Up,В	Ip,А	Wp,Вт	Вес, кг	Стекло	Цена,(руб)*
МСК-160	805*1575*47	12	21.8	11	17	8.8-11	160-185	18	закалённое	19500-22500
МСК-160	805*1575*47	24	43.6	5.5	34	4.4-5.3	160-185	18	закалённое	19500-22500

Так как панель солнечной батареи (для «Север» КС-6) может вырабатывать электроэнергию с максимальными параметрами $U=12В$ и $I=154А$, $W=2960Вт.$, а для использования в быту или для работы большинства агрегатов используется в основном 220В, то для преобразования 12В постоянного тока в переменный 220В, можно применить один из промышленных преобразователей.

Как было сказано ранее, вся система должна быть автоматической, а так же должна иметь возможность настройки и выбора режима работы. В электронную часть системы входит: микроконтроллер PIC16f877A, LCD дисплей, драйвер [4-6] для управления сервомоторами и два сервомотора (для обеспечения поворота солнечной батареи) и 4 фоторезистивных датчика для ориентации системы на солнце. Схема одновременно сочетает в себе цифровую и силовую часть. Цифровая часть отвечает за управление системой, а силовая часть коммутирует двигатели, отвечающие за вращение Гелиостата (устройства для автоматической ориентации за положением солнца). Для коммутации двигателей используется драйвер L293D [5-6]

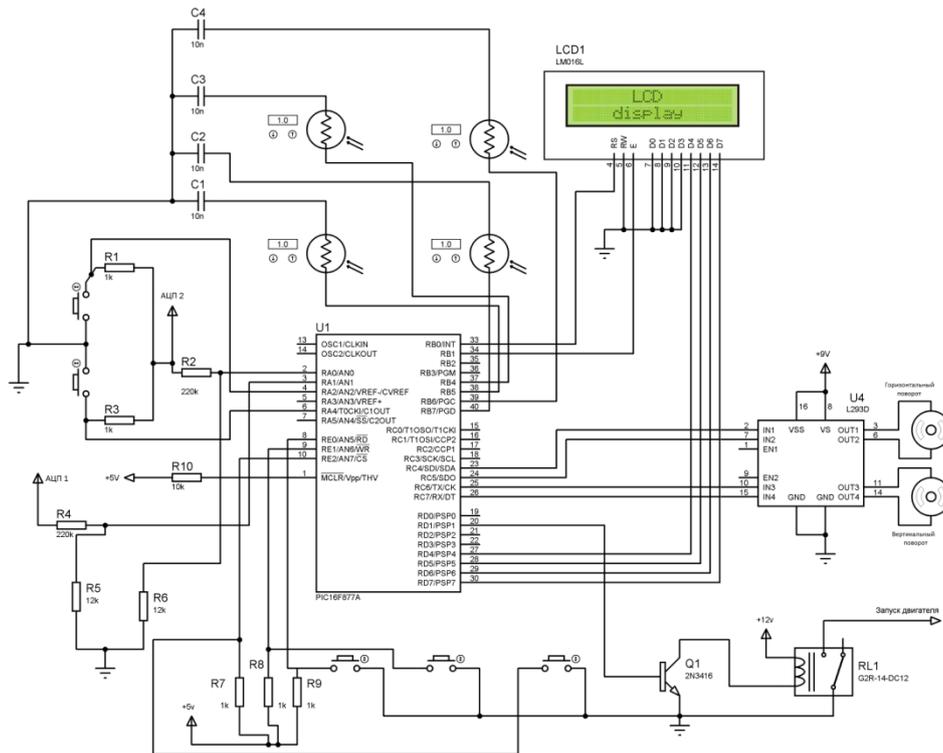


Рисунок 2 – Схема автоматической системы управления электростанцией

Внешний вид демонстрационной модели представлен на рисунке 3.

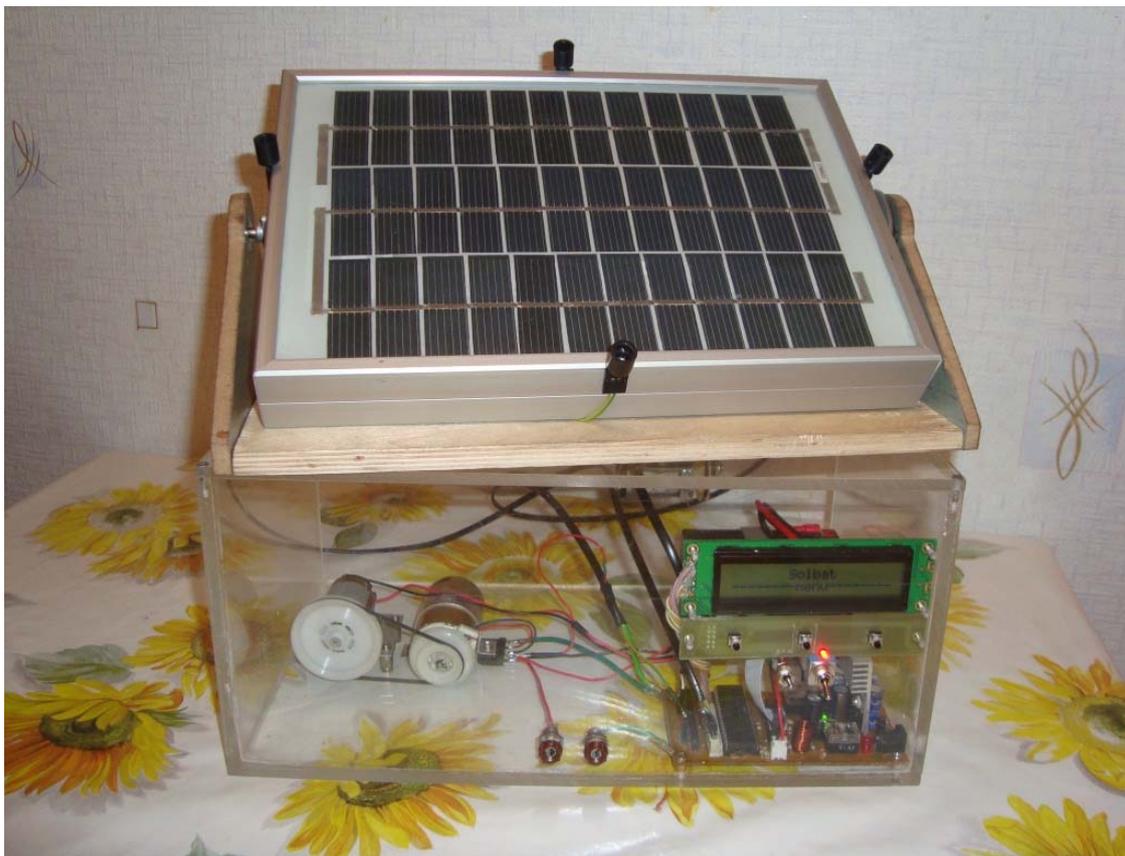


Рисунок 3 – Внешний вид демонстрационной модели

Чтобы убедиться, что вся система будет работать нормально и выполнять поставленные задачи, было решено собрать демонстрационную модель всей установки в **масштабе 1:10**.

В модели использована реальная **5W** солнечная батарея, в жёстком каркасе с защитным стеклом изготовленная на заказ, размером **30x18** см из **арсенид галлия**, обеспечивающие **КПД** фотопреобразования - **до 28 %**. Корпус контейнера в установке для наглядности выполнен из оргстекла, благодаря этому с внутренним устройством станции можно ознакомиться визуально.

Выводы

В данной работе, как уже было сказано ранее, рассмотрена проблема, которой серьезно никто не занимался ранее и подобного типа гибридных генераторов электроэнергии никто в мире промышленно не выпускает. Поэтому разработанная мною система не имеет аналогов в мире и очень актуальна для России.

В результате исследования, сконструированная и изготовленная демонстрационная модель соответствует, поставленным целям и задачам.

Для более понятного принципа действия системы был сделан видеоролик, на котором демонстрируется работа всей системы в смоделированных условиях тундры.

Модернизация всех дизельных электростанций в стране поможет заметно сэкономить углеводородные ресурсы страны, а так же улучшить экологическую обстановку. Так же данную систему можно адаптировать практически к любым объектам военной и гражданской обороны, отдельным жилым и промышленным строениям.

Строения пригодные для адаптации разработанной системой:

- Объекты здравоохранения (больницы, медицинские центры) требующие резервные источники питания.
- Военные сооружения в отдалённых районах без постоянной электрификации.
- Временные жилые сооружения в отдалённых районах.

Литература

1. Акимов Е.Г.- Электростанции (подборка промышленных каталогов в формате PDF), 2009.
2. Дунаев П.Ф. - Конструирование узлов и деталей машин, 2003.
3. Ковалев Н.А. - Прикладная механика, 1982.
4. Майкл Предко - Справочник по PIC-микроконтроллерам, 2002.
5. Майкл Предко - Устройства управления роботами схмотехника и программирование, 2004.
6. Москаленко В.В. - Электрический привод, 2007.
7. Олссон Г., Пиани Д. - Цифровые системы автоматизации и управления, 2001.
8. Орлов П.И. - Основы конструирования, кн.1-2, 1988.
9. Патрик Гелль - Электронные устройства с программируемыми компонентами, 2001.
10. Турута Е.Ф. - SMD-компоненты: Маркировка, характеристики, замена, 2006.
11. Фаренбрух А.- Солнечные элементы: Теория и эксперимент, 1982.
12. Хелибайк Чак - Программирование PIC-контроллеров на Pic Basic, 2008.
13. <http://solbat.ru/> - Изготовление солнечных батарей.
14. http://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_панель - Материал из Википедии

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПЕРВОГО УРОВНЯ

Опекунова Т.А.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Гриднев В.Н.
Кафедра ИУ4, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

SYSTEM OF AN ESTIMATION OF ADAPTABILITY TO MANUFACTURE OF ELECTRONIC MODULES OF THE FIRST LEVEL

Opekunova T.A.

Cand.Tech.Sci., Docent Gridnev V.N.
Moscow State Technical University n.a.Bauman, Moscow, Russia

Аннотация.

Целью доклада является демонстрация нового метода оценки технологичности электронных модулей первого уровня, который позволит оценить конструкторско-технологические параметры электронных модулей, спланировать технологический процесс и принять решение о запуске изделия в производство под заданным объемом выпуска.

Abstract.

The report purpose is demonstration of a new method of an estimation of adaptability to manufacture of electronic modules of the first level, which will allow to estimate konstruktorsko-technological parameters of electronic modules, to plan technological process and to make the decision on product start in manufacture under the set volume of release.

Современные электронные модули (ЭМ) могут быть выполнены как с участием технологии монтажа в отверстия, так и по технологии поверхностного монтажа. Существующая ранее методика расчета конструктивно-технологических параметров ЭМ учитывает, только технологию монтажа в отверстия. В разрабатываемой методике расчета будут учитываться как технология монтажа в отверстия, так и технология поверхностного монтажа.

Разрабатываемая методика оценки технологичности монтажа ЭМ 1 уровня основывается на расчете комплексного коэффициента K_K по формуле:

$$K_K = \frac{\sum K_i \cdot \varphi_i}{\sum \varphi_i}, \text{ где} \quad (1)$$

K_i – i -ый коэффициент технологичности ЭМ,

φ_i - весовая значимость этого коэффициента.

Ниже в таблице 1 приведен список базовых показателей ЭМ 1 уровня современных конструкций.

Таблица 1 - Перечень базовых показателей ЭМ 1 уровня современных конструкций

№ п/п	Наименование базового показателя	Обозначение	Основные признаки и качественные уровни показателя
1	Коэффициент конструктивно - технологической компоновки	$K_{КТК}$	Характер размещения навесных компонентов на ПП: односторонний или двухсторонний монтаж, поверхностный монтаж, монтаж в отверстия или смешанный монтаж
2	Коэффициент состава навесных компонентов	$K_{СНК}$	Оценка ЭМ по составу монтируемых НК: КМО, КМП.
3	Коэффициент механизации и автоматизации монтажа	$K_{АМ}$	Оценивает возможность автоматизации монтажа (установка и пайка) НК.

4	Коэффициент механизации и автоматизации контроля	K_{AK}	Оценивает возможность автоматизации операций контроля (контроль правильности установки НК, контроль пайки и функциональный контроль)
5	Коэффициент плотности монтажа навесных компонентов	$K_{ПМ}$	Оценивается плотность монтажа на TOP и BOT – сторонах ПП.

Первый коэффициент: коэффициент конструкторско-технологической компоновки. В современных конструкциях ЭМ можно выделить 9 уровней их конструкторско-технологической компоновки, основанных на переборе всех возможных вариантов компоновки ЭМ. Этот коэффициент характеризует размещение навесных компонентов на печатной плате: односторонний или двусторонний монтаж, поверхностный монтаж, монтаж в отверстия или смешанный монтаж.

Вторым важным фактором, оказывающим влияние на технологичность ЭМ и трудоемкость ТП, является состав навесных компонентов $N_{нк}$, характеризующийся коэффициентом состава навесных компонентов:

$$N_{нк} = N_{кмп} + N_{кмо}, \text{ где}$$

$N_{кмп}$ – количество компонентов поверхностного монтажа

$N_{кмо}$ – количество компонентов монтируемых в отверстия

Коэффициент $K_{снк}$ учитывает количество КМП и КМО определенного уровня технологичности относительно общего количества навесных компонентов на ПП. Учитывается технологичность компонентов по уровням, а также учитывается количество типоразмеров компонентов. При увеличении высоко технологичных компонентов и уменьшении низко технологичных компонентов коэффициент $K_{снк}$ увеличивается, и, наоборот.

Одним из важных конструкторско-технологических параметров современных ЭМ является плотность монтажа.

В зависимости от конструкторско-технологической компоновки можно выделить следующие типы плотности монтажа навесных компонентов:

1. Средняя плотность монтажа навесных компонентов на ПП – оценивается плотность компонентов на всей ПП.
2. Максимальная плотность монтажа навесных компонентов на ПП – оценивается плотность компонентов на участке ПП с максимальным количеством компонентов.
3. Минимальная плотность монтажа навесных компонентов на ПП - оценивается плотность компонентов на участке ПП с минимальным количеством компонентов.

В зависимости от типа монтажа можно выделить:

1. Плотность поверхностного монтажа – в расчете плотности монтажа участвуют только КМП
2. Плотность монтажа в отверстия – в расчете плотности монтажа участвуют только КМО. Плотность монтажа в отверстия чаще всего значительно меньше плотности поверхностного монтаж.
3. Плотность смешанного монтажа – в расчете плотности монтажа участвуют только КМП и КМО.

Введем коэффициент относительной плотности $K_{оп}$ для оценки плотности монтажа компонентов.

$$K_{оп} = \frac{N_{НК}}{S_{ПП}}, \text{ где} \quad (2. 1)$$

$$N_{НК} = N_{КМП} + N_{КМО} \quad (2. 2)$$

$N_{НК}$ - количество навесных компонентов с одной стороны ПП

$N_{КМО}$ - количество КМО с одной стороны ПП

$N_{КМП}$ - количество КМП с одной стороны ПП

$S_{ПП}$ - площадь печатной платы (в дм^2 , квадратный дециметр)

Приведенная формула 2.1 позволяет рассчитать плотность навесных компонентов только для одностороннего монтажа. В случае двухстороннего монтажа необходимо оценивать плотность монтажа и на второй стороне ПП. На технологичность ЭМ будут влиять плотности монтажа на обеих сторонах ПП. Таким образом, для двухстороннего монтажа плотность на обеих сторонах рассчитываем по формуле 2.1, для одностороннего монтажа - на стороне ПП, где монтаж присутствует, плотность считаем по формуле 2.1, на второй стороне, где монтаж отсутствует, принимаем плотность равной нулю.

Таким образом, получаем следующую формулу для расчета плотности монтажа ЭМ первого уровня:

$$K_{оп} = \begin{cases} \frac{N_{НК}^1}{S_{ПП}}, & \text{для 1 стороны ПП} \\ \frac{N_{НК}^2}{S_{ПП}}, & \text{для 2 стороны ПП} \\ 0, & \text{если монтаж отсутствует} \end{cases} \quad (2.3)$$

Далее рассмотрим механизацию и автоматизацию монтажа. Следует отметить, что монтаж в отверстия, появившийся в 1960-х, не предусматривал автоматизацию и сегодня он является наиболее трудоемким и трудно автоматизируемым. Как правило, операции монтажа в отверстия производят ручным способом. Поверхностный монтаж, напротив, легко автоматизируется и механизуется. Операции поверхностного монтажа трудоемко выполнять ручным способом из-за маленьких размеров КМП.

Основные операции техпроцесса поверхностного монтажа представляют собой:

1. Комплектацию КМП
2. Нанесение паяльной пасты;
3. Установка КМП;
4. Пайку КМП;

Современное оборудование позволяет автоматизировать и механизировать все основные операции техпроцесса ПМ. Рассмотрим варианты автоматизации основных операций техпроцесса ПМ и современное сборочно-монтажное производство.

Предложим два варианта расчета коэффициента автоматизации и механизации монтажа ЭМ.

1. Вариант: Традиционный.

$$K_{AM} = \frac{N_{AMC}}{N_C}, \text{ где} \quad (3)$$

N_{AMC} - количество соединений полученных автоматизированным способом

N_C - общее количество соединений.

В условиях поверхностного монтажа, когда количество выводов компонентов может достигать значений от 2 (чип-компоненты) до 1000 (BGA микросхемы), коэффициент теряет смысл, так как весь акцент будет смещен на много выводные компоненты. Компоненты с меньшим количеством выводов, но менее технологичные (нестандартные) будут не учтены.

2. Вариант:

$$K_{AM} = \frac{N_{AM.НК}}{N_{НК}}, \text{ где} \quad (4)$$

$N_{AM.НК}$ - количество навесных компонентов монтируемых автоматически.

$N_{НК}$ - общее количество навесных компонентов.

И, наконец, рассмотрим автоматизацию и механизацию операция контроля и настройки техпроцесса монтажа ЭМ.

Наличие контрольных операций позволяет уменьшить процент бракованных изделий. Автоматизация контрольных операций позволяет существенно уменьшить временные и финансовые затраты.

Рассмотрим основные виды операций контроля для поверхностного монтажа и монтажа компонентов в отверстия.

Классификация контрольных операций по технологическому признаку:

1. Контроль правильности установки компонентов (Mount Control).
2. Контроль качества пайки компонентов (Reflow Control).
3. Функциональный контроль (Func. Control).

В приведенной выше классификации операций контроля показаны варианты контроля по технологическому процессу в последовательности их проведения. То есть сначала проводится контроль правильности установки компонентов, затем контроль качества пайки, а после функциональный контроль.

Приведем формулу для расчета коэффициента автоматизации и механизации операций контроля:

$$K_{AK} = \frac{N_{AOK}}{N_{OK}}, \text{ где} \quad (5)$$

N_{AOK} - количество автоматизируемых и механизуемых операций контроля.

N_{OK} - общее количество возможных операций контроля (Mount Control, Reflow Control, Func. Control). $N_{OK} = 3$.

Коэффициент оценивает возможность автоматизации и механизации операций контроля. Операция контроля считается автоматизированной, если производится с помощью специального оборудования, без участия человека.

Заключение

Следует отметить тенденции развития технологий сборки ЭМ. Мы стали свидетелями, как за несколько лет поверхностный монтаж практически вытеснил монтаж компонентов в отверстия. Основные причины этого - автоматизация и миниатюризация поверхностного монтажа.

На протяжении следующих пяти лет сборочные линии будут вынуждены иметь дело с большим количеством различных видов компонентов, процессов и технологических применений. Монтажные автоматы будут базироваться на единой концепции, где всего лишь одна единица оборудования решает как можно более широкий круг задач. Главным направлением при производстве электронных модулей остается снижение себестоимости сборки при поддержании стабильно высокого уровня качества.

Литература

1. Радиоэлектронные узлы с монтажом на поверхность: Конструирование и технология // В.Н. Леухин, Йошкар-Ола, 2006 г.
2. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры// под ред. В.Н. Шахнова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 г.
3. Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в электронике// Ч.-Г. Мэнгин, С. Макклелланд, Москва, 1990 г.
4. Компоновка и расчеты конструктивных параметров блоков ЭВА // А. Н. Чеканов, В. В. Съедугин, В. В. Маркелов

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММИРУЕМОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Захаров Е.В.

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

DESIGNING CIRCUIT OF PROGRAMMING FREQUENCY DEVIDER FOR PLL

Zaharov E.V.

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

Аннотация

В статье изложены результаты работ по созданию программируемого делителя частоты для системы фазовой автоподстройки (ФАПЧ), имеющей опорный сигнал частотой 12,5 МГц, который позволяет на выходе системы получить сетку частот в диапазоне 350-450 МГц с шагом 50МГц.

Abstract

Development of programming frequency divider for PLL system results was presented in this article. Reference frequency is 12,5 MGz. Frequency divider provided ability to get output frequency in range:350-450 MGz with interval 50MGz.

Программируемый делитель частоты, как следует из его названия, используется для уменьшения высокой частоты генератора, управляемого напряжением (сокращенно ГУН), Уменьшенная частота после делителя далее поступает на фазовый детектор, где происходит ее сравнение с опорной частотой [1]. Схема делителя может быть реализована как в цифровом виде, так и в аналоговом. В рассматриваемом случае для реализации схемы программируемого делителя частоты выбрана цифровая схема. Данный выбор обусловлен в первую очередь простотой его интеграции со схемой фазового детектора. Выражения для определения коэффициента деления N приводится в формуле (1).

$$N = \frac{f_{vco}}{f_{ref}} \quad (1)$$

,где f_{vco} – выходная частота ГУН, f_{ref} – частота опорного сигнала

Необходимый для решения поставленной задачи делитель частоты реализован на основе схемы синхронного двоичного счетчика [2], имеющего управляющие входы, на которые для выбора значения коэффициента деления подаются соответствующие двоичные сигналы. Если частота опорного сигнала составляет 12,5 МГц, а на выходе системы ФАПЧ необходимо получить сетку частот в диапазоне от 350МГц до 450МГц, с шагом 50МГц, то получается, что разрабатываемый делитель частоты должен иметь возможность изменять значения коэффициента деления в диапазоне от 28 до 36.

Для уменьшения размеров делителя воспользуемся предварительной схемой деления на 2 (рисунок 1), построенной на динамическом D-триггере (рисунок 2).

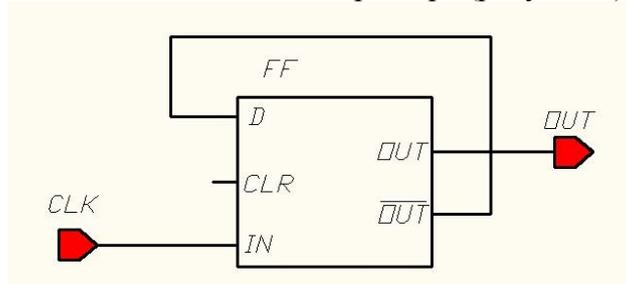


Рисунок 1 – Схема деления на 2, построенная на динамическом D-триггере FF

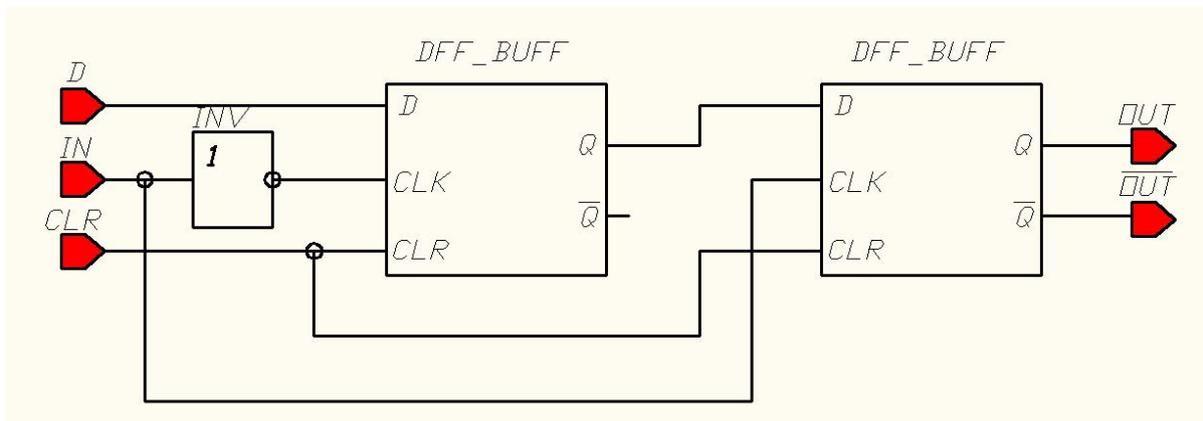


Рисунок 2 – Динамический D триггер

На рисунке 2 динамический D-триггер построен на основе триггера *dff_buff*, схема которого [3] показана на рисунке 3.

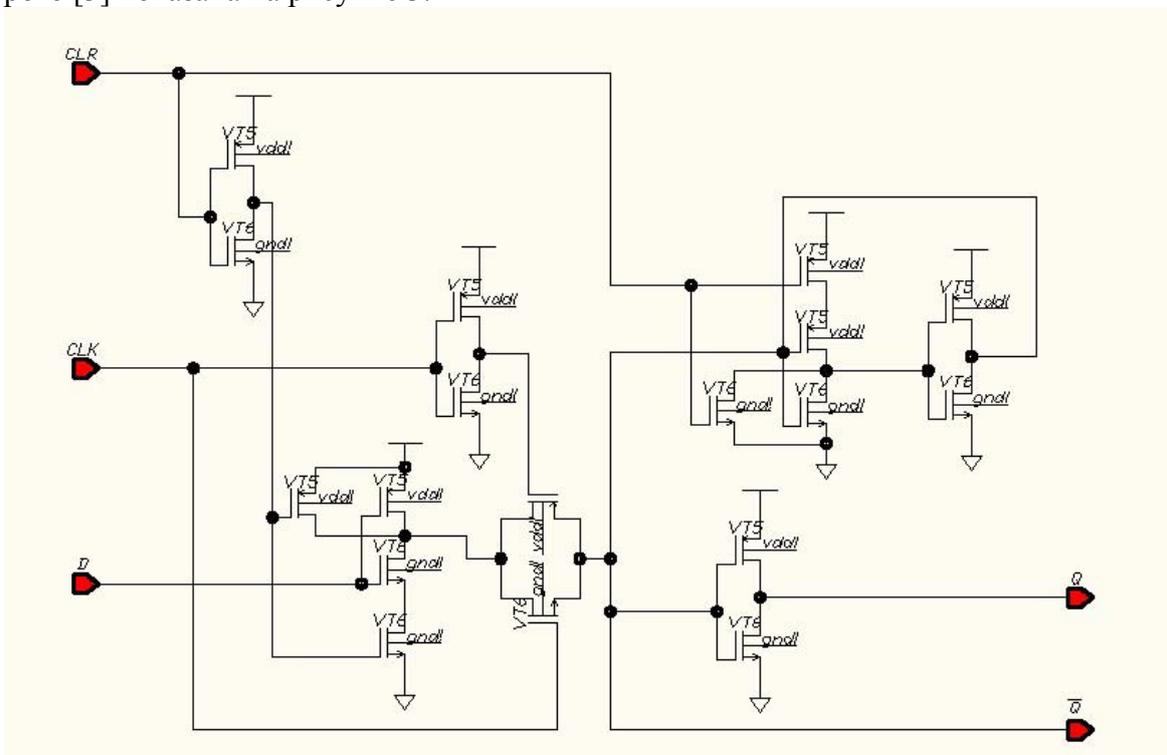


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема D-триггера, построенного на КМОП-транзисторах

Таким образом, частоту с выхода делителя на 2 необходимо теперь уменьшить на 14, 16 и 18, чтобы получить соответственно коэффициенты деления, равные 28, 32 и 36. Ниже, на рисунке 4, показана реализация программируемого делителя частоты, с коэффициентами деления 14, 16 и 18.

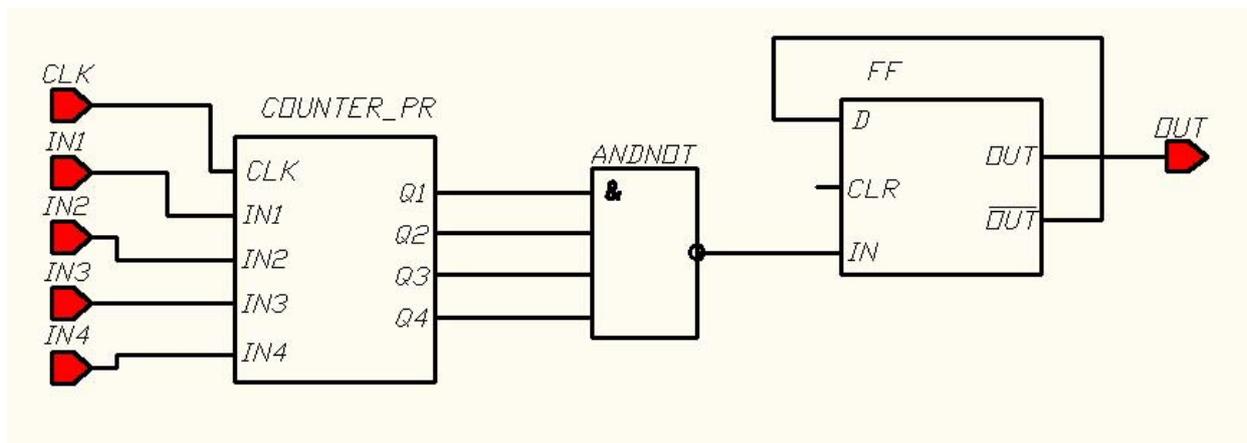


Рисунок 4 – Принципиальная схема программируемого делителя частоты с коэффициентами 14, 16 и 18

Принципиальная схема программируемого счетчика *counter_pr* показана ниже на рисунке 5

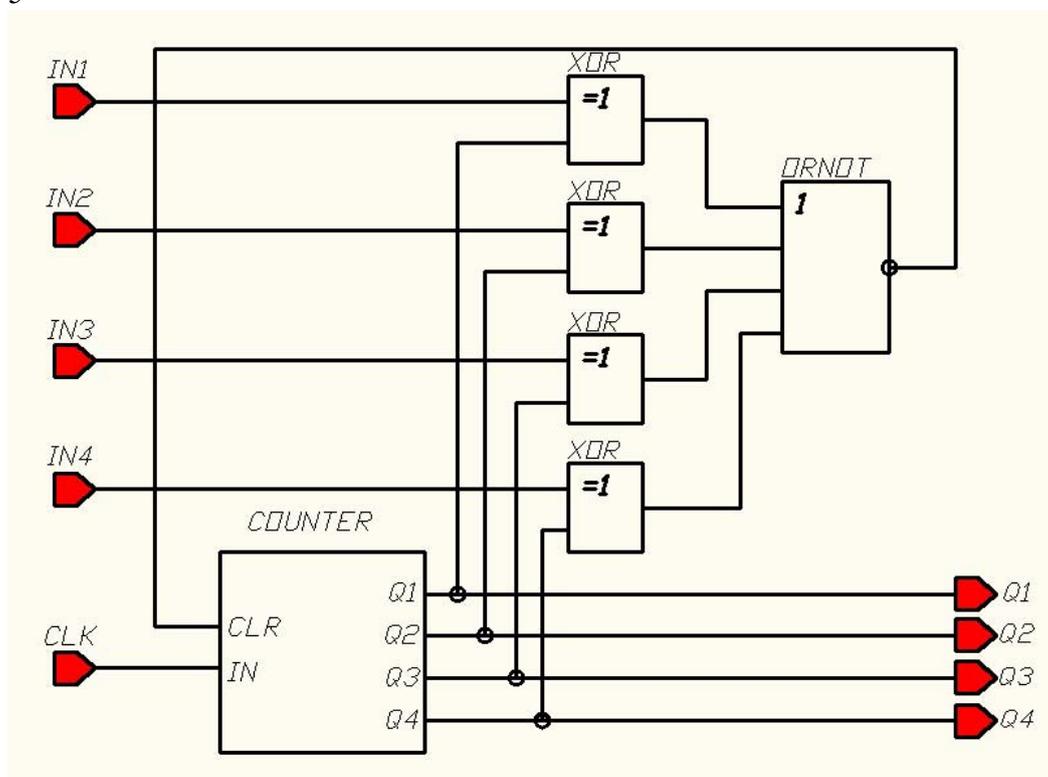


Рисунок 5 – Принципиальная схема программируемого счетчика

На рисунке 5, блок *Counter* – это синхронный 4-битный счетчик, схема которого показана на рисунке 6.

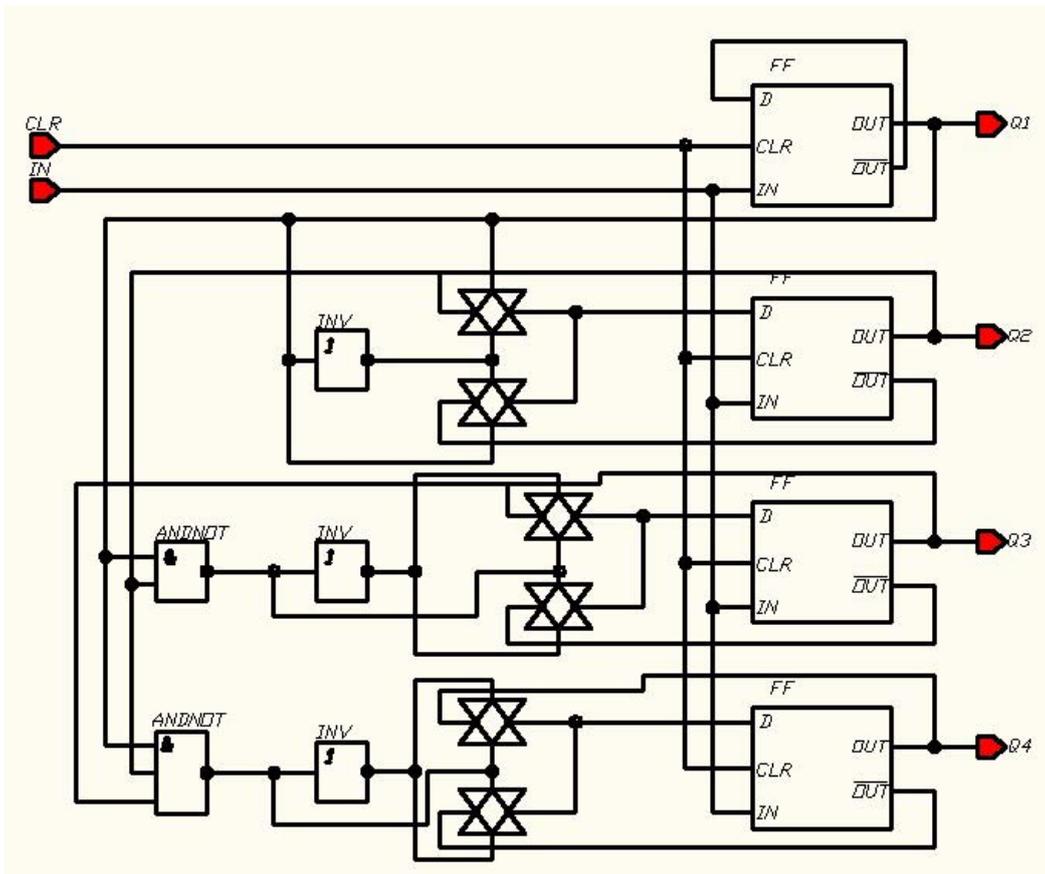


Рисунок 6 – Синхронный 4х-разрядный двоичный счетчик

Ниже приводится описание работы схемы, представленной на рисунке 5.

Данные с выхода схемы *counter* (значения сигналов на разрядах программируемого счетчика) поступают на 4-х входный элемент «ИЛИ-НЕ», значение на выходе которого будет равно 1 только в том случае, когда все четыре входных сигнала, показанных на рисунке (in1-in4) совпадают со значениями уровней сигналов на выходах счетчика *counter* (Q1-Q4). В том случае, когда происходит совпадение всех бит, сигнал с выхода 4-х входного элемента «ИЛИ-НЕ» поступит на вход *clr* динамического триггера FF, который, благодаря схеме включения, меняет свое текущее значение на противоположное. Таким образом реализуется деление на 2. Поэтому счетчику достаточно реализовывать счет до 7, 8 и 9, чтобы получить суммарный коэффициент деления 28, 32 и 36, соответственно (учитывая предварительное деление частоты на 2, показанное на рисунке 1)

Общий вид схемы делителя, вместе со схемой предварительного деления частоты, представлен ниже на рисунке 7.

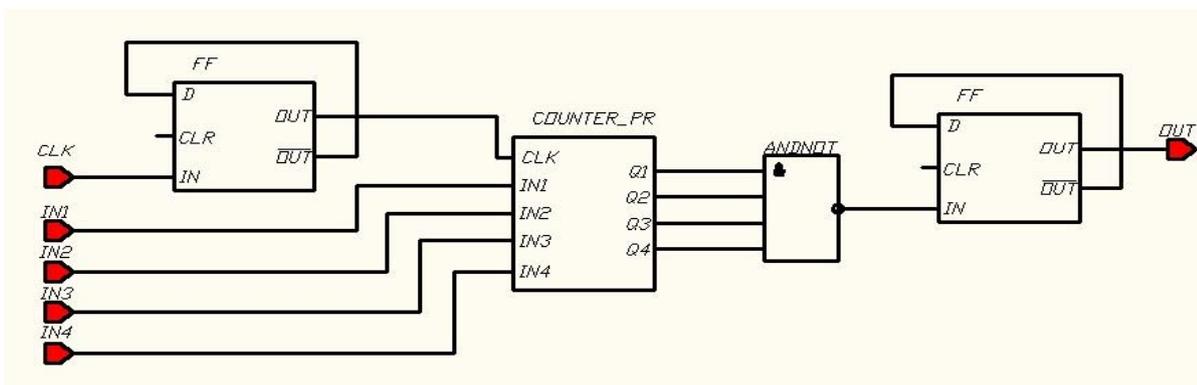


Рисунок 7 – Общая схема делителя частоты

Результаты моделирования работы счетчика и схемы делителя частоты представлены ниже на рисунках 8 и 9, соответственно.

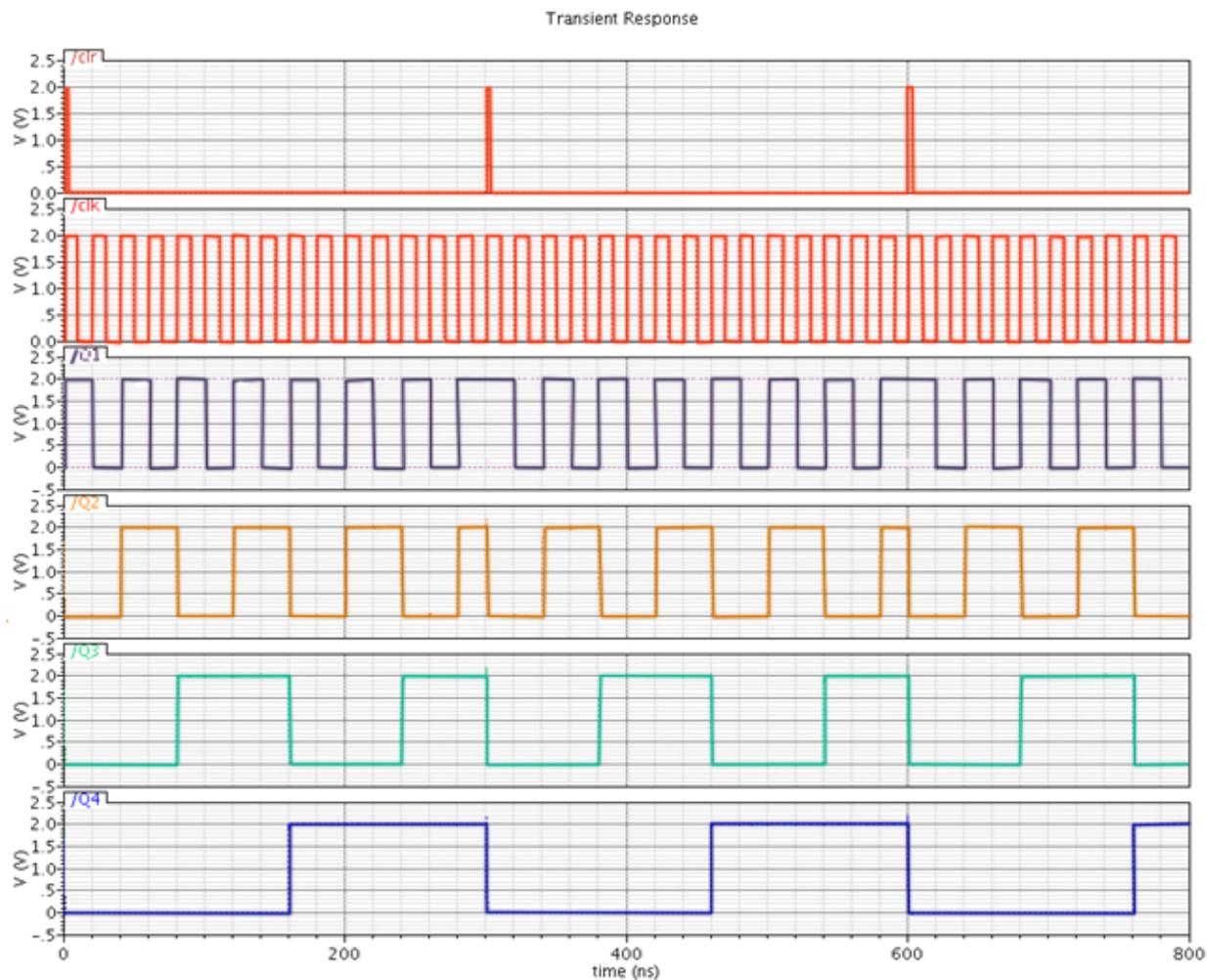


Рисунок 8 – Результаты моделирования работы схемы счетчика

На рисунке 8 сигнал *clr* представляет собой сигнал очистки счетчика, *clk* – тактовый сигнал, а сигналы *Q1*, *Q2*, *Q3* и *Q4* – сигналы на соответствующих выходах его разрядов. Причем сигнал *Q4* соответствует старшему разряду счетчика, а сигнал *Q1* – младшему.

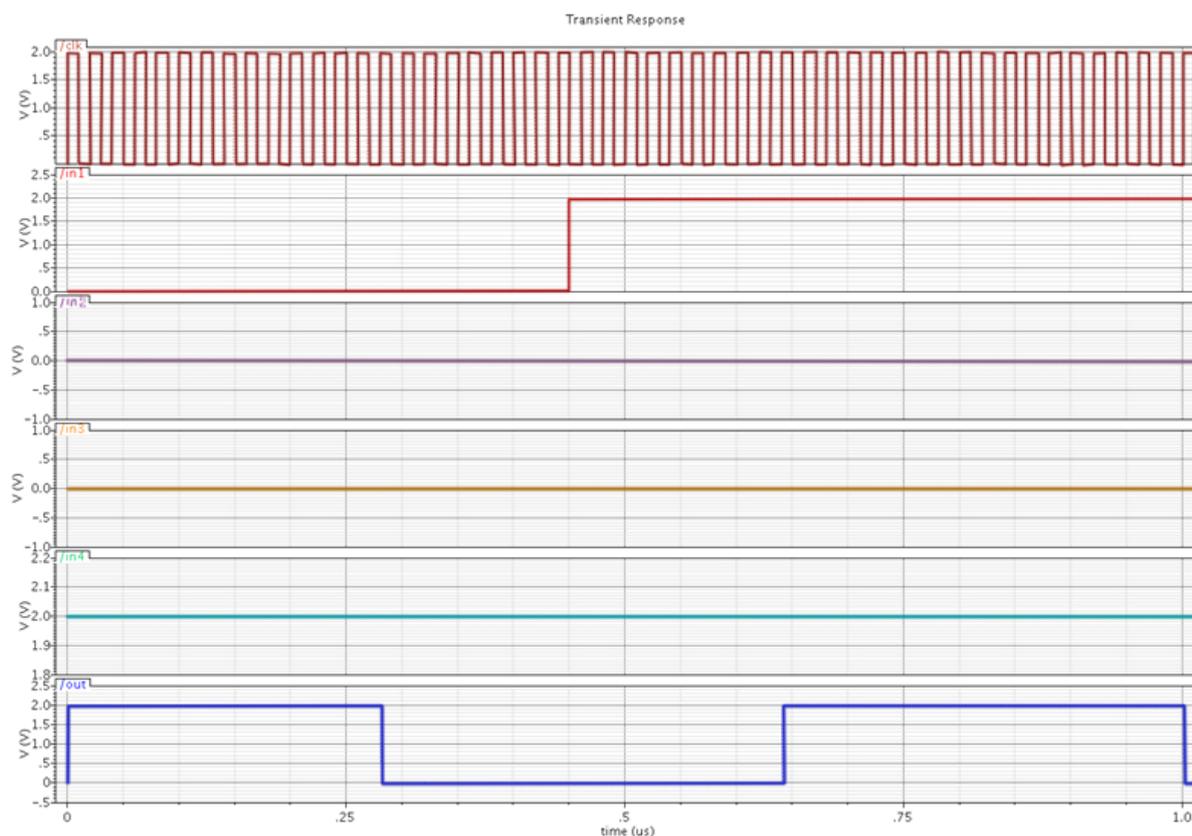


Рисунок 9 – Результаты моделирования работы схемы делителя, представленной на рисунке 7

На рисунке 9 сигналы $in1$, $in2$, $in3$, $in4$ – данные бит, поступающие на программируемый счетчик $counter_pr$, показанный на рисунке 6. Сигнал out – значение с выхода делителя, а сигнал clk – это тактовый сигнал, поступающий с выхода ГУН.

Так при значении $in1=0V$, $in2=0V$, $in3=0V$, $in4=2V$, внутренний счетчик схемы деления будет выполнять счет до того момента, пока на выходе схемы счетчика не будет число $1000_2=8_{10}$. Поэтому общий коэффициент деления фильтра будет равным 32. В момент времени $0.45\ \mu s$ значение на входе $in1$ становится равным 1, меняя таким образом входные данные для схемы сравнения. В данном случае выходные значения счетчика будут сравниваться с числом $1001_2=9_{10}$, реализуя суммарный коэффициент деления 36.

Ниже, на рисунке 10, показана временная зависимость изменения частоты генератора по результатам моделирования всей системы ФАПЧ. Моделирование выполнялось с помощью программы *Cadence Analog Environment*. Временная зависимость изменения частоты генератора была получена при помощи встроенной функции *FREQ* указанной программы. В качестве входных данных для ее использования была взята последовательность прямоугольных импульсов, полученных преобразованием выходных сигналов генератора в прямоугольные импульсы. Поэтому полученная временная зависимость выходной частоты имеет «зубцы».

Также следует отметить, что в начальный момент времени, управляющее напряжение на входе генератора равнялось 0. Схема этого генератора построена таким образом, что при нулевом управляющем напряжении его выходная частота будет иметь минимально возможное значение, которое в рассматриваемом случае составляет $318\ \text{МГц}$.

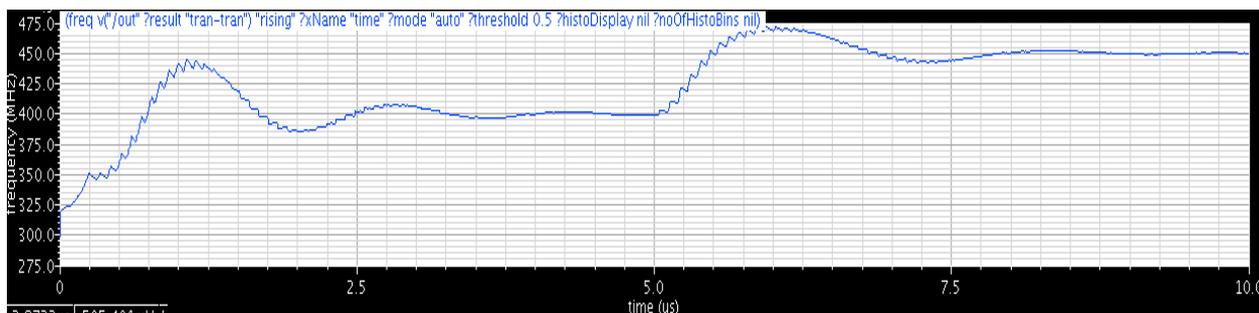


Рисунок 10 – Временная зависимость изменения частоты на выходе системы ФАПЧ.

На рисунке 10, до момента времени $t=5\mu\text{s}$, коэффициент деления фильтра был равным 32, а после стал равным 36. Поэтому, учитывая, что опорная частота равна 12,5 МГц, можно рассчитать по формуле (1) частоту, на которую будет перестраиваться система ФАПЧ. Таким образом получаем, что на выходе системы ФАПЧ, до момента времени $t=5\mu\text{s}$, выходная частота должна перестраиваться на частоту 400 МГц, а после - на частоту 450 МГц. Данные значения полностью совпадают с результатами моделирования системы ФАПЧ, представленными на рисунке 10.

Выводы

Разработан программируемый делитель частоты. Приведены его схемы и временные диаграммы результатов моделирования работы внутреннего счетчика и схемы делителя. Кроме того, приведены результаты моделирования работы системы ФАПЧ, в которой применен разработанный делитель частоты, показавшие, что созданная схема полностью выполняет возложенные на нее функции.

Литература

1. *Dean Banerjee*. PLL Performance, Simulation and Design 4th edition, 2006, -340p.
2. *Dennis Fischette*, First Time, Every Time – Practical Tips for Phase-Locked Loop Design, 2007
3. *Vojin G. Oklobdzija*, Digital Design and Fabrication (Computer Engineering Handbook), 656 p, 1997

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ СЕТКИ ДЛЯ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

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

GRID GENERATION METHOD FOR SOI MOSFET 3D-SIMULATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS

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

Настоящая работа посвящена новому способу построения трехмерной сетки конечных элементов для моделирования электрических характеристик субмикронных КНИ МОП-транзисторов. Способ основан на использовании стандартных средств генерации сетки системы TCAD и разработанного дополнительного модуля расширения функциональности.

Abstract

The present work is devoted to a construction technique of final element three-dimensional grid generation for submicron SOI MOSFET simulation of electrical characteristics. The technique of grid construction is based on using of standard TCAD modules and additional module developed for functionality expansion.

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. Их разработка практически невозможна без решения уравнений математической физики, представляющих собой, как правило, дифференциальные уравнения в частных производных.

Нахождение точного аналитического решения этих уравнений, к сожалению, возможно лишь для крайне ограниченного круга одномерных задач при использовании целого ряда допущений, негативно отражающихся на адекватности полученных результатов. Для решения задач математической физики в случае нескольких измерений необходимо использовать численные методы, требующие преобразования указанных дифференциальных уравнений в нелинейные системы алгебраических уравнений, для решения которых используют различные итерационные методы. При этом одной из наиболее сложных проблем является обеспечение сходимости итерационного процесса, в значительной мере влияющего на время вычислений. Точность решения определяется шагом сетки моделирования, количеством итераций и разрядностью компьютера [1].

Система конструктивно-технологического моделирования TCAD (Technology Computer Aided Design) предоставляет несколько различных инструментов для построения координатной сетки. В случае двухмерного моделирования можно использовать любой из них с максимально возможным разбиением по всей структуре. Однако при трехмерном моделировании остро встает вопрос о числе узлов сетки, так как оно ограничено параметрами используемого вычислительного комплекса. Дополнительные трудности в этом случае создает неравномерное распределение узлов сетки по структуре, в результате чего ухудшается сходимость итерационного процесса решения, что приводит к увеличению затрат времени на моделирование.

В результате двумерного моделирования параметров МОП-структур было установлено, что наибольшее влияние на точность расчета электрических параметров оказывает шаг сетки в приповерхностной области канала и прилегающих LDD-областях (рисунок 1). Рекомендуемый размер элемента сетки по оси Z для этих областей составляет величину порядка 1 \AA , поскольку такой размер позволяет корректно учесть эффект «прижимающего» электрического поля. Однако в случае трехмерного моделирования провести расчеты с таким шагом сетки на имеющемся вычислительном комплексе не представляется возможным, вследствие большого числа узлов в ней и требующихся огромных вычислительных затрат. В итоге был выбран подход, заключавшийся в использовании сетки с шагом 1 нм , который постепенно увеличивается при движении от поверхности канала в глубь кармана. Рассчитанные электрические характеристики в этом случае корректируются на основе результатов двумерного моделирования [2].

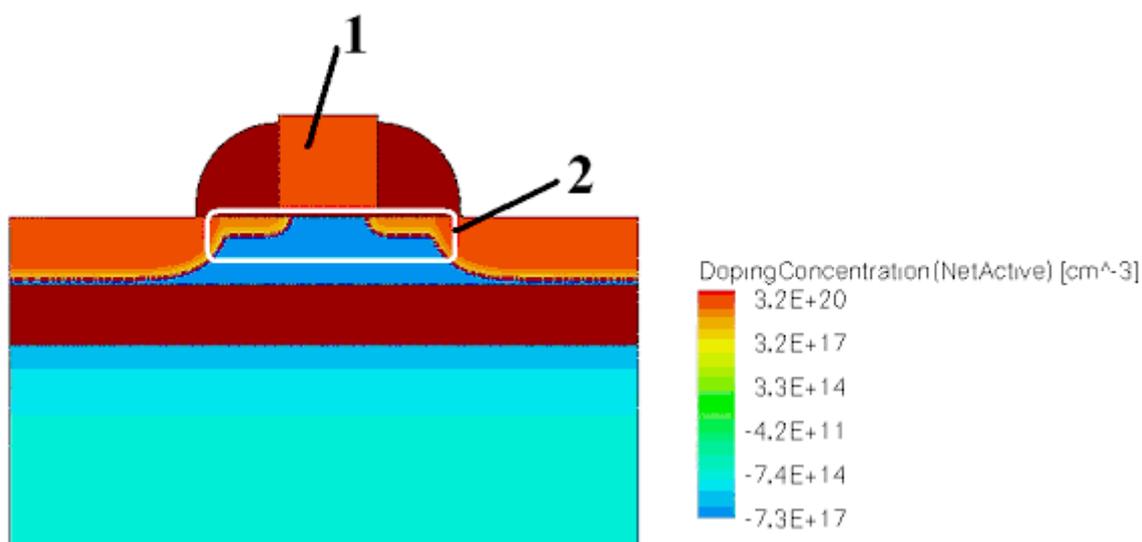


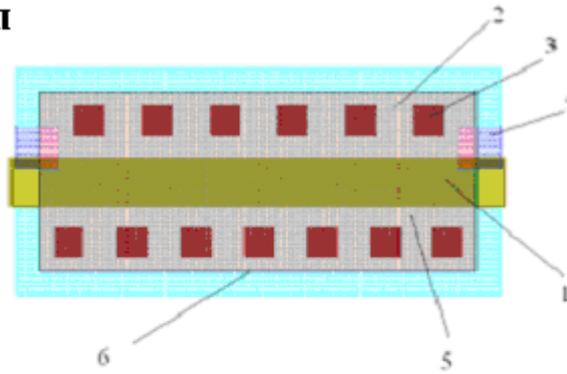
Рисунок 1 – Двухмерная структура КНИ МОП-транзистора:
1 – поликремниевый затвор, 2 – область канала и прилегающие LDD-области

Стандартные инструменты генерации сетки позволяют использовать ранее созданные регионы структуры для выделения области канала. Однако при таком формировании структуры многократно дублируются одни и те же точки, находящиеся на границе регионов, что ухудшает сходимость итерационного процесса. Альтернативным вариантом является выделение многогранниками регионов наиболее мелкого разбиения сетки, но в этом случае в качестве входных параметров необходимо описывать координаты вершин каждого геометрического элемента, используемого для ее построения.

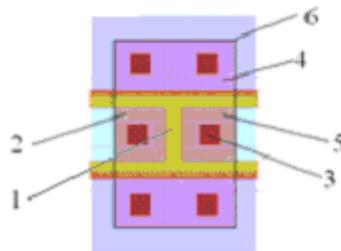
При проектировании радиационно-стойких СБИС используются КНИ МОП-транзисторы различных конструкций, отличающихся как формой затвора, так и расположением областей контакта к карману транзистора. К таким транзисторам относятся транзисторы А-типа, Н-типа и О-типа, топологии которых показаны на рисунке 2.

Наибольшую трудность для расчета электрических характеристик в системе TCAD представляет транзистор О-типа, поскольку он имеет затвор сложной формы. Это подразумевает большое количество вершин в моделируемой структуре и необходимость построения в области канала и прилегающей к ней LDD-области сетки конечных элементов сложной конфигурации (рисунок 3).

А-тип



Н-тип



О-тип

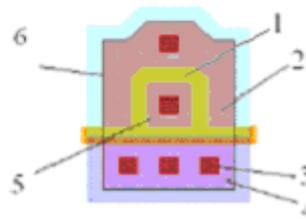


Рисунок 2 – Топологии КНИ МОП-транзисторов различных конструкций
1 – затвор, 2– исток, 3 – контакт к активной области, 4 – контакт к карману, 5 – сток,
6 – активная область транзистора.

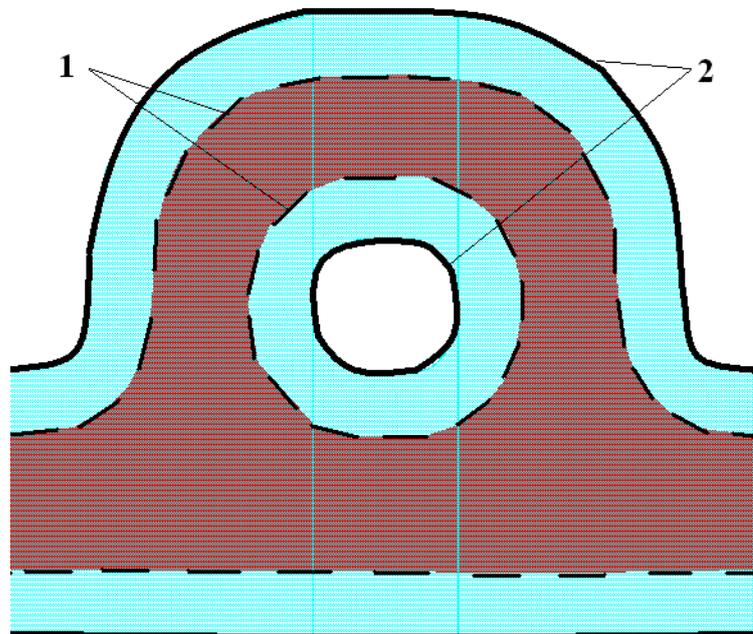


Рисунок 3 – Топологические маски, используемые при моделировании
КНИ МОП-транзистора О-типа:

1 – маска поликремниевого затвора, 2 – маска для выделения области разбиения

На рисунке 4 показано распределение легирующих примесей в транзисторе О-типа, служащее исходными данными для построения сетки и последующего расчета электрических характеристик этого транзистора.

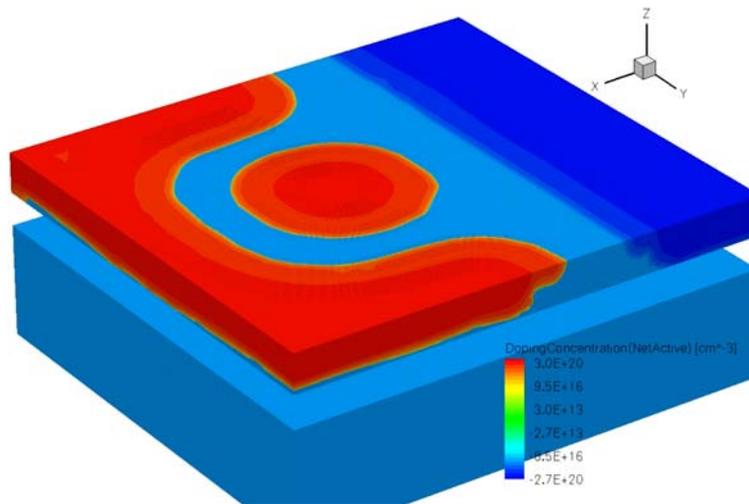


Рисунок 4 – Распределение легирующих примесей в транзисторе О-типа, полученное в результате моделирования технологического процесса

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

- равномерностью расположения узлов сетки в области канала;
- числом узлов сетки;
- возможностью приповерхностного разбиения области канала.

Первый способ генерации сетки для моделирования одномерных, двумерных и трехмерных структур основывается на использовании следующих входных данных:

- положения областей разбиения;
- максимальных и минимальных размеров элементов сетки в этих областях;
- распределения в них легирующей примеси

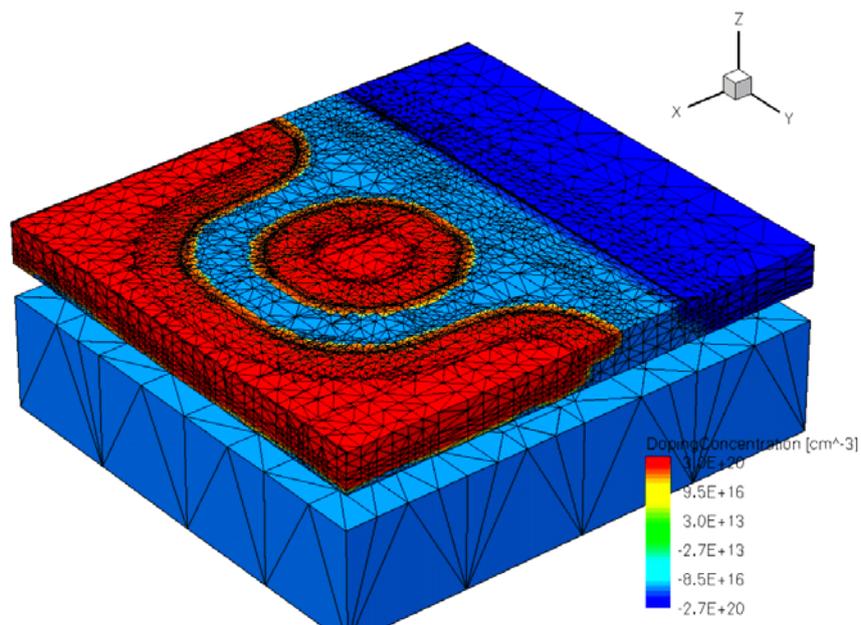


Рисунок 5 – Результат применения первого способа генерации сетки 3-х мерной структуры

Участки разбиения задаются посредством описания координат многогранников, что затрудняет выделение криволинейной области. Поэтому для расчета электрических характеристик транзистора О-типа область канала задана 4-мя параллелепипедами. В

остальной части структуры сетка построена с параметрами, используемыми по умолчанию. Результат построения показан на рисунке 5.

Как видно из рисунка, распределение узлов сетки в области канала МОП-транзистора в этом случае 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 1), 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 характеристика (рисунок 6).

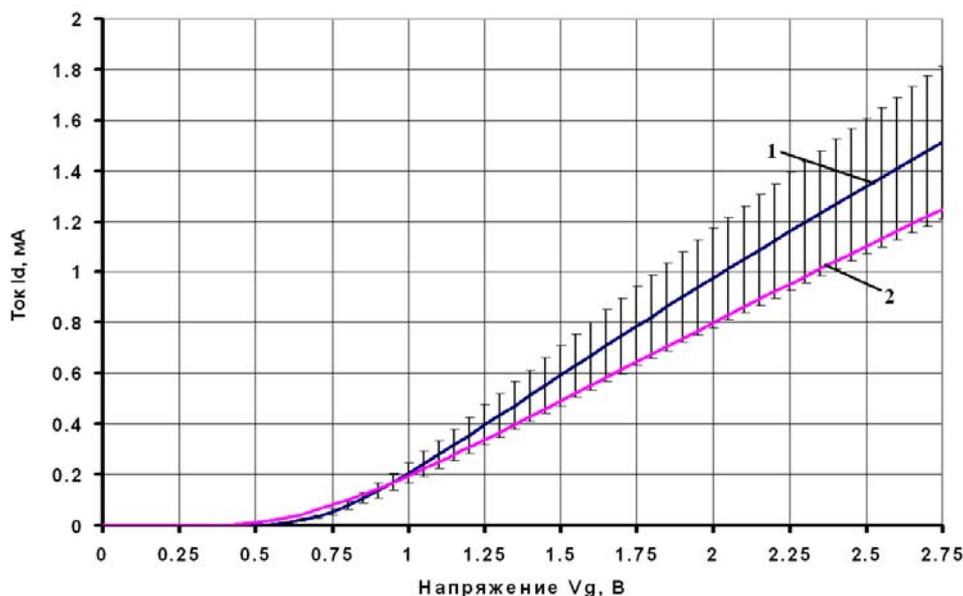


Рисунок 6 – Измеренная (1) и расчетная (2) пороговые характеристики транзистора О-типа, сетка которого построена первым способом генерации

Как видно из рисунка, расхождение между расчетными и экспериментальными характеристиками не превышает 20%.

Для повышения точности результатов и увеличения скорости расчетов 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.

Второй вариант генерации сетки в отличие от уже рассмотренного имеет расширенный набор параметров, что позволяет гибко задавать условия изменения сетки. Данное обстоятельство должно позволить уменьшить число ее узлов, и, возможно, сократить расхождение между экспериментальными и расчетными данными.

С целью расчета электрических характеристик МОП-транзистора О-типа были заданы следующие параметры сетки:

- разбиение приповерхностного слоя кремния с начальным шагом сетки l нм и последовательным увеличением шага в 10 раз при движении от границы окисел-кремний в глубь кармана;
- области канала и LDD-области были выделены 4-мя параллелепипедами.

Результат построения сетки для этого случая представлен на рисунке 7.

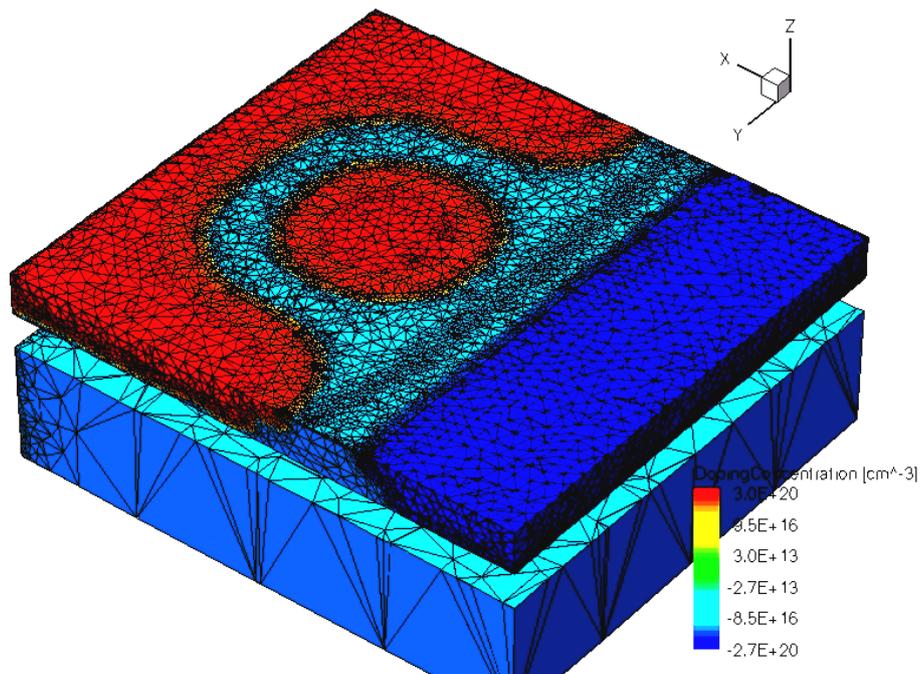


Рисунок 7 – Результат применения второго способа генерации сетки 3-х мерной структуры

Как видно из рисунка, 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 характеристика (рисунок 8).

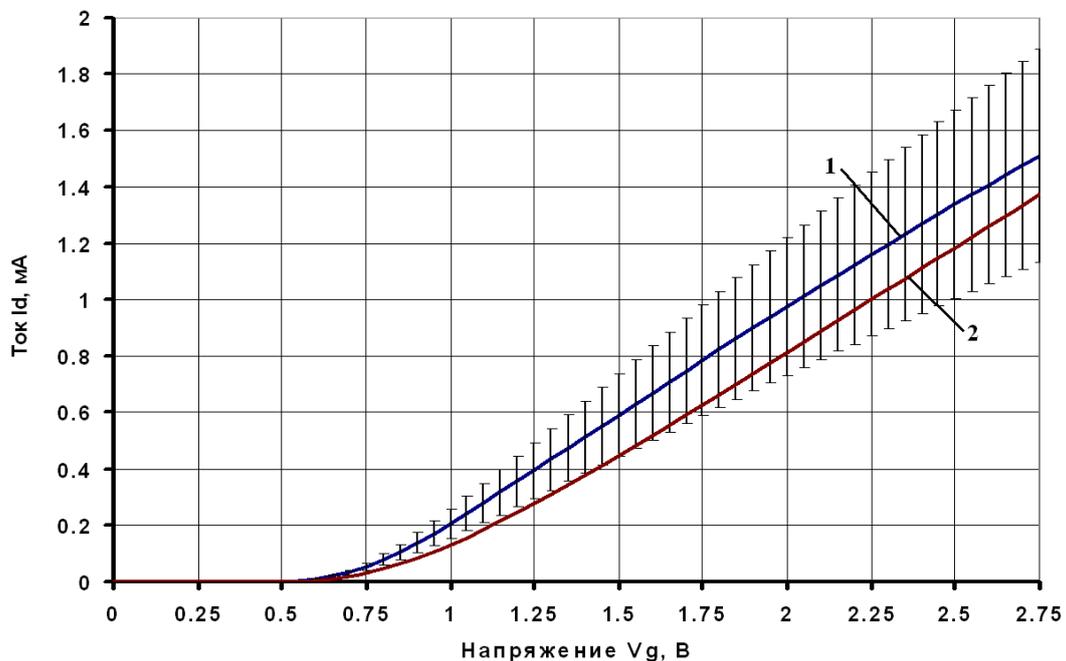


Рисунок 8 – Измеренная (1) и расчетная (2) пороговые характеристики транзистора О-типа, сетка которого построена вторым способом генерации

Как видно из рисунка, расхождение между экспериментальными и расчетными данными для этого случая не превышает 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.

С целью увеличения гибкости генерации сетки, а также расширения их функциональных возможностей был разработан новый модуль генерации параметров *Grid*, написанный на языке *C++* и встраиваемый в проект с помощью языка *Tcl* (Tool Command Language). В качестве входных данных модуль получает файл исходных параметров и файл масок и на их основе создает файл параметров для последующего создания сетки с использованием первого способа генерации. 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 КМОП-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.

С целью расчета электрических характеристик транзистора О-типа была задана область канала (маска 2 на рисунке 3) и выделена в нем приповерхностная область размером *1 нм*, с постепенным увеличением размера элемента сетки в глубину кармана транзистора. Результат построения такой сетки представлен на рисунке 9.

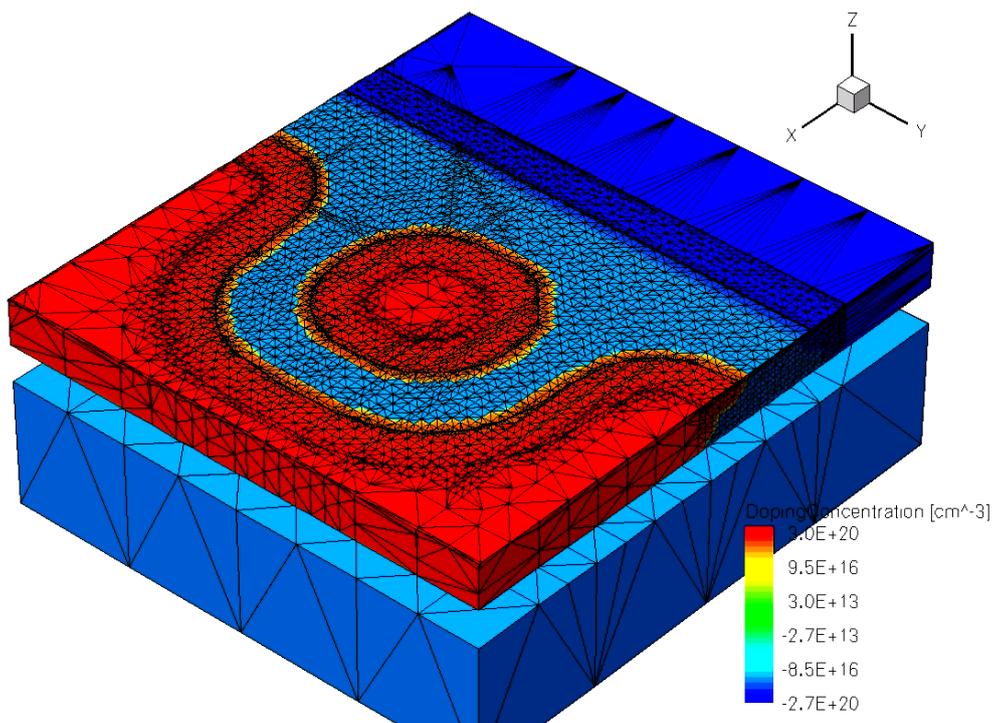


Рисунок 9 – Результат применения первого способа генерации сетки 3-х мерной структуры совместно с разработанным модулем расширения функциональности

Как видно из рисунка, распределение узлов сетки в канале МОП-транзистора равномерное. Кроме того, в нем выделен приповерхностный слой. Следует отметить, что предложенный подход позволил уменьшить число узлов сетки в областях стока и истока, поскольку ранее было установлено, что распределение узлов сетки в них практически не влияет на точность расчета моделируемых электрических характеристик МОП-транзистора.

Для сгенерированной сетки с помощью системы TCAD была рассчитана пороговая характеристика МОП-транзистора О-типа (рисунок 10).

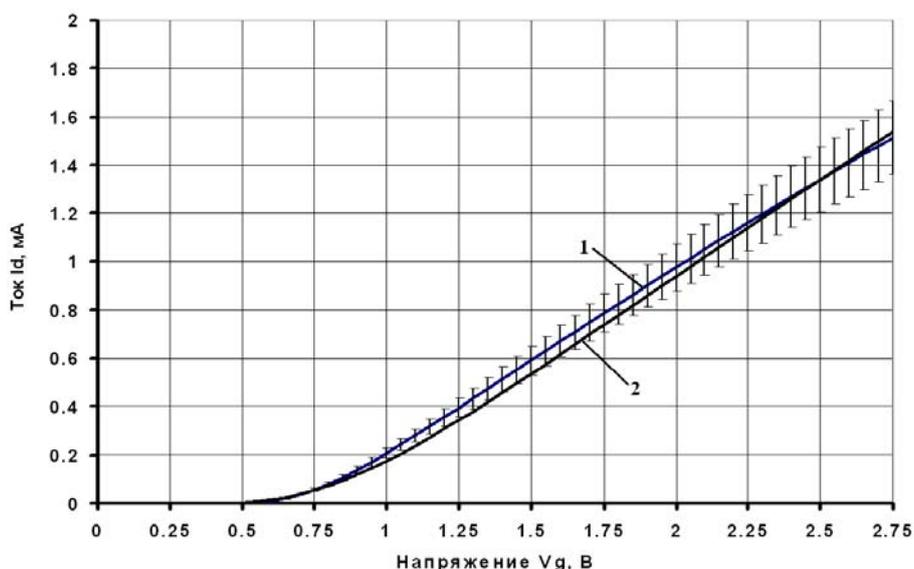


Рисунок 10 – Измеренная (1) и расчетная (2) пороговые характеристики КНИ МОП-транзистора О-типа, сетка которого построена первым способом генерации совместно с модулем расширения функциональности

Как видно из рисунка, расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превышает 10%, что подтверждает эффективность применения разработанного модуля.

Выводы

В результате применения разработанного модуля расширения функциональности удалось сократить расхождение между результатами измерений и моделирования с 20% до 10%.

Кроме того, применение дополнительного модуля позволило выделить приповерхностную область канала для определенной маски, а не для всей структуры целиком. 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, в то время как сама конфигурация масок может различаться. В итоге, задание параметров генерации сетки сводится к определению масок для выделения областей разбиения с помощью топологического редактора.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотруднику 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. TMA Medici, Two-Dimensional Device Simulation Program, User's Manual, Volume 1 – Technology Modeling Associates, Inc., 1997.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

ВЫБОР МЕТРИКИ ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

Е.В. Гобарева, М.Н. Чичварин

Научный руководитель: к.т.н., доцент Медведев Н.В.

Кафедра Информационная безопасность (ИУ-8) МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E.V.Gobareva M.N. Chichvarin

Supervisor: PhD docent Medvedev N.V.

Information security chair (Iu-8) BMSTU Moscow Russia.

Аннотация

В работе поставлена задача выбора метрик программ для автоматизированной оценки качества документирования программных продуктов. Наличие объективного критерия позволяет осуществлять анализ и сопоставление текстов программ и их спецификаций. В случае субъективного характера такого критерия, компоненты должны оцениваться экспертным путем. Показана возможность сочетания эвристического и детерминистского подходов при разработке средств автоматизированной оценки достоверности документирования.

Abstract

This article deals with the task of the choice of metrics for the programs applying automatised control of the quality of programs documentation. The existence of objective criterion allows to perform the analyzes and comparison of program texts and specifications. In the cases when criterion becomes personal, components are to be checked by an expert. It was shown that heuristic and deterministic approach can be combined in the process of the construction of systems of automotised checking of the reliability of the documentation.

1. Анализ известных мер и способов измерения программ

В процессе исследований проведен сопоставительный анализ следующих метрик:

- Количественные метрики
- Метрики сложности потока управления программы
- Метрики сложности потока управления данными
- Метрики сложности потока управления и данных программы
- Объектно-ориентированные метрики
- Метрики надежности
- Гибридные метрики

Рассмотренные метрики разработаны в основном, как инструмент для прогнозирования трудозатрат программистов при реализации и адаптации алгоритмов. Однако иногда их довольно успешно используют для оценки эффективности работы программы. Так, например, если при переносе на новую платформу программа содежит малое число строк кода или внесено малое число структурных изменений, это может означать, что либо дефект программы было очень сложно установить, либо он допущен сознательно, либо она недобросовестно документирована. Анализ показывает, что при наличии эталонных программных продуктов в конкретной предметной области для поставленной задачи применима метрика Схутса, Моханти, объединяющая энтропийные меры.

Проведенный анализ возможности использования для измерения текстов программ и текстов на языке «деловой прозы» [1] известных систем обработки текстовой информации показывает, что все компоненты экспертных систем, объединяемые понятием "лингвистические процессоры", предназначены для машинного представления текстовой информации и решения задач распознавания с целью выяснения смысла текстовых запросов, либо генерации текстовых сообщений и они не решают задач измерения текстов с целью сопоставления с текстом на алгоритмическом языке. модели и метрики, используемые для прогнозирования и констатации различных показателей сложности и надежности программ.

Сопоставительный анализ позволил предположить, что для достижения поставленной цели предпочтительнее использовать меры Холстеда. Однако такое предположение потребовало проведение экспериментальных исследований.

2. Планирование эксперимента

При постановке эксперимента на основе базы учитывались следующие соображения:

1) анализ литературы показывает, что рассмотренные меры Холстеда для сопоставительного анализа текстов программ и их спецификаций не применялись. Следовательно в настоящий момент нет экспериментального подтверждения возможности такого их использования;

2). В качестве экспериментального материала выбран Пакет Научных Подпрограмм Библиотека Исходных Модулей (ПНП-БИМ) для языка FORTRAN. Основания для выбора следующие:

1) значительный набор программных модулей (около 400 программ);

2) единый язык программирования. 3) реализация в данной библиотеке практически всех численных методов, а значит, имеется соответствие выбранной предметной области;

4) пакет совершенствовался на протяжении многих лет и поэтому его можно считать "идеальным" с точки зрения программирования;

5) наличие единообразной документации на каждый программный модуль, близкой к требованиям стандартов.

На основании анализа известных мер в качестве "объективных" мер выбраны: "объем", "потенциальный объем" и "интеллектуальное содержание", которые в дальнейшем будем обозначать \vec{L} .

Решение задачи распознавания применительно к обработке текстов документации с использованием мер Холстеда и положений, сделанных в [1,2] сводится к разделению слов текста на операторы и операнды, обеспечению возможности подсчета количества простых операторов и простых операндов.

Представляется возможным применить следующий критерий распознавания: слово считается распознанным, если для слова из текста и слова из словаря выполняется следующее условие:

$$\frac{n}{N} \geq k \quad (1)$$

где n - количество совпадающих подряд символов;

N - количество символов в более длинном слове;

k - значение критерия распознавания.

Правомерность применения описанного способа распознавания, а также значение k определены в процессе эксперимента исходя их минимума ошибок распознавания и максимума скорости обработки.

3. Результаты экспериментальных исследований

Анализ зависимости среднего объема текстов описания от значения частотной границы занесения слов в словарь показывает, что увеличение словаря за счет включения в него слов, встречающихся в текстах описаний пакета ПНП-БИМ менее 40 раз практически не сказывается на величине вычисленного объема текстов описания.

На рис 2 изображена зависимость среднего времени обработки текстов описаний и количества нераспознанных слов от значения критерия распознавания (1). Анализ приведенной зависимости показывает, что при значении критерия распознавания, равном 0.65, ошибки распознавания минимальны. Данное значение критерия принято за номинальное. Результаты эксперимента разделены на три группы - группа результатов

сопоставления текстов программ и текстов соответствующих описаний, группа результатов сопоставления текстов программ и описаний, полученных в процессе сознательного ухудшения текста описания и группа характеристик \vec{L} для кодов программ.

Для сопоставления объемов текстов программ и соответствующих описаний введена нормированная разность:

$$\Delta V_i = \frac{V_{Pi} - V_{Si}}{K_{Nv}} \quad (2)$$

где: V_{Pi} - объем i-й программы;

V_{Si} - объем i-й спецификации;

K_{Nv} - нормирующий коэффициент.

При этом: $K_{Nv} = \text{MAX}(|V_{Pi} - V_{Si}|), i = 1, n$ (3)

где n - число обрабатываемых программ.

Введена также нормированная разность "интеллектуального содержания" текстов программ и соответствующих описаний:

$$\Delta I_i = \frac{I_{Pi} - I_{Si}}{K_{NI}} \quad (4)$$

где:

I_{Pi} - "интеллектуальное содержание" i-й программы;

I_{Si} - "интеллектуальное содержание" i-й спецификации;

K_{NI} - нормирующий коэффициент.

При этом :

$$K_{NI} = \text{MAX}(|I_{Pi} - I_{Si}|), i = 1, r. \quad (5)$$

где n - число обрабатываемых программ.

В процессе экспериментов оценены значения ΔV и ΔI для всех исследуемых программ, полученные в результате сознательного ухудшения текста описаний.

Обобщая результаты экспериментальных исследований характеристик для текстов программ пакета ПНП-БИМ, можно сделать следующие выводы:

1. Между характеристиками \vec{L} , вычисленными для текстов программ и характеристиками \vec{L} , вычисленными для текстов описаний существует отношение порядка. Отношение порядка между указанными характеристиками подтверждено экспериментом, в результате которого производилось сознательное ухудшение текстов описаний;

2. Между характеристиками \vec{L} текстов программ и характеристиками \vec{L} текстов соответствующих описаний не удается установить функциональной зависимости или отношения четкого порядка, поэтому выбрать объективный критерий качества документирования не представляется возможным;

3. Меры Холстеда а именно потенциальный объем и интеллектуальное содержание программы позволяют оценить сложность алгоритма или текста программы.

4. Поскольку в результате эксперимента установлен факт существования нечетких соотношений между мерами программ и сопровождающей документации систем, использующих описанный подход к оценке качества документирования программных модулей может быть реализован с помощью субъективного критерия, построенного на автоматизированном отборе мнений экспертов, применяемом в экспертных системах.

5. При унификации стиля написания текстов документации с использованием специальных бланков долю экспертной компоненты в системе автоматизированной оценки качества документирования возможно свести к минимуму.

6. Проведенное исследование позволяет заключить, что сочетание эвристических и детерминистских компонент не исключает возможности привлечения и энтропийных мер.

Литература

1. Моль А., Фукс В., Касслер М. Искусство и ЭВМ./Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 253 с.
2. Холстед М.Х. Начала науки о программах. М.: Финансы и статистика. 1981. 128 с.
3. Чичварин Н.В. Экспертные компоненты САПР. - М.: Машиностроение. 1991. 240.: ил.
4. Экспертные системы. Принципы работы и примеры/Пер. с англ. /А. Брукинг, П. Джонс, Ф. Кокс и др.: под. Ред. Р. Форсайта, М.: Радио и связь, 1980. 192 с.
5. Запись в блоге компании СиПроВер: "Наши практические исследования в области расчета метрик". <http://www.viva64.com/blog/ru/2009/06/09/166/>
6. Новичков А., "Метрики кода и их практическая реализация в IBM Rational ClearCase" <http://www.viva64.com/go.php?url=241>
7. Понятие метрики. Направления применения метрик. Метрические шкалы. Метрики сложности. Метрики стилистики. <http://www.viva64.com/go.php?url=243>
8. Т.Дж. McCabe, "A complexity measure," IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-2, no. 4, pp. 308-320, December, 1976.
9. Богданов Д.В., "Стандартизация жизненного цикла программных средств", СПб - 2000, 210 с.
10. Г.Н. Калянов. Консалтинг при автоматизации предприятий: Научно-практическое издание. Серия "Информатизация России на пороге XXI века". — М.: СИНТЕГ, 1997. — 320 с.
11. Черноножкин С.К., "Методы и инструменты метрической поддержки разработки качественных программ", автореферат, Новосибирск - 1998

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ КНИ КМОП СБИС

Глушко А.А.

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

к. т. н., доцент Макаrchук В.В.

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

THE FEATURES OF FINAL ELEMENT THREE-DIMENSIONAL GRID GENERATION FOR SUBMICRON SOI VLSI PROCESS FLOW SIMULATION

Glushko A.A.

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

Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.

IU4, BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Настоящая работа посвящена методике построения трехмерной сетки конечных элементов, необходимой для моделирования технологических процессов изготовления элементов субмикронных КНИ КМОП СБИС, ориентированной на сопряжение САПР конструктивно-технологического и литографического моделирования.

Abstract

The present work is devoted to a construction technique of final element three-dimensional grid generation for technological process simulation of manufacturing submicron CMOS SOI VLSI. The technique of grid construction is focused on constructive - technological and lithographic simulation CAD interface.

Увеличение сложности проектируемых интегральных микросхем, а также требование уменьшения энергопотребления и повышения их быстродействия, заставляют разработчиков КМОП СБИС переходить на все более жесткие субмикронные проектные нормы и осваивать новые КНИ КМОП-технологии. Это, в свою очередь, предъявляет все более высокие требования к конструкции транзисторов, а также к разработке технологических процессов изготовления СБИС [1].

Переход к меньшим проектным нормам связан с вполне определенными трудностями реализации топологических размеров. Однако заметные трудности существуют и при формировании вертикальной структуры элементов КМОП КНИ СБИС.

Во-первых, необходимо спроектировать сам технологический процесс производства СБИС и определить технологические режимы получения заданных параметров всех ее элементов. Во-вторых, требуется обеспечить заданные электрические характеристики этих элементов.

С уменьшением размеров элементов расчет таких характеристик становится очень трудоемким, поскольку для описания короткоканальных эффектов требуются все более точные, а, следовательно, и более сложные математические модели КНИ МОП-транзисторов. Следует отметить, что характерной особенностью КНИ МОП-транзисторов является их сугубая трехмерность, выражающаяся в наличии внешнего контакта к карману транзистора [2]. Поэтому особую важность представляет именно трехмерное технологическое моделирование (3D-моделирование) указанных структур.

В системе TCAD (Technology Computer Aided Design) для моделирования технологического процесса в трехмерном измерении необходимо, помимо составления перечня основных операций и подготовки топологии структуры, провести разделение всего технологического процесса на две группы операций: операции формирования структуры (осаждение и травление) и операции формирования примесного (концентрационного) профиля (ионного легирования и диффузии). Поскольку для трехмерного моделирования

разработчиками системы TCAD рассматриваются только наиболее простые транзисторные структуры, методика моделирования в указанной системе не является универсальной по следующим причинам.

Во-первых, сетка должна удовлетворять следующим противоречивым требованиям: с одной стороны, она должна быть достаточно мелкой, чтобы обеспечить высокую точность и сходимость процесса моделирования физических процессов, а с другой стороны, слишком мелкая сетка может привести к неоправданно большим расходам вычислительных ресурсов на выполнение проекта (или к нехватке этих ресурсов). Время, затраченное на моделирование, может возрасти примерно на порядок даже при двукратном увеличении числа вершин трехмерной сетки.

Во-вторых, система TCAD не интегрируется с САПР литографического моделирования. Количество точек, получаемых при литографическом моделировании, влияет на количество вершин сетки конечных элементов при моделировании в TCAD. Используемые мощные вычислительные серверы не позволяют обработать такое количество точек. Предлагаемый разработчиками системы TCAD метод получения трехмерного профиля путем «вытягивания» трехмерной структуры из двумерной непригоден для моделирования таких сложных структур, как, например, КНИ МОП-транзистор О-типа – транзистор с замкнутым затвором, топология которого показана на рисунке 1. На рисунке цифрами обозначены: 1 – затвор транзистора, 2 – исток, 3 – сток, 4 – средняя линия канала, 5 – граница слоя поликремния, 6 – область контакта к карману. Длина средней линии канала еще называется конструктивной шириной канала транзистора О-типа.

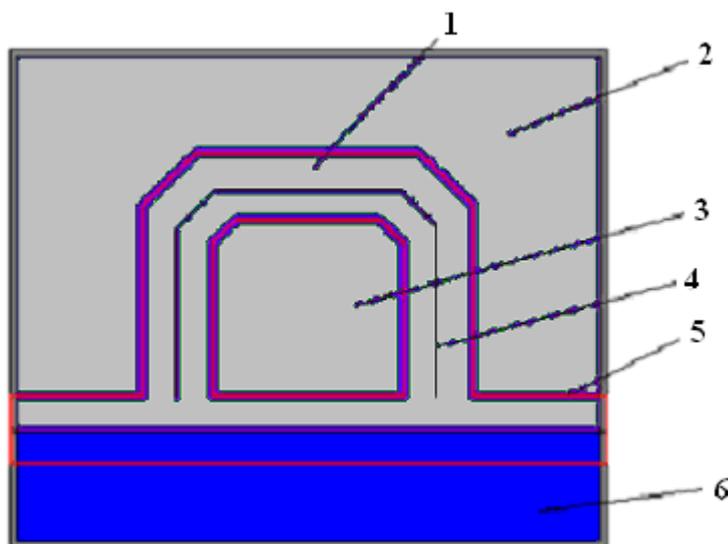


Рисунок 1 – Топология КНИ МОП-транзистора О-типа

Вывод, который вытекает из сказанного, состоит в том, что система TCAD в базовом варианте непригодна для моделирования КНИ-структур. Необходима модификация этой САПР, позволяющая эффективно определять шаг сетки конечных элементов при моделировании 3D-структур с учетом вычислительных ресурсов современных компьютеров. Одновременно эта модификация должна быть направлена и на интеграцию с САПР литографического моделирования.

В настоящей статье изложен новый принцип формирования сетки конечных элементов, положенный в основу методики моделирования технологического процесса формирования КНИ-структур, как наиболее перспективных элементов современных СБИС, который одновременно обеспечивает и интеграцию с САПР литографического моделирования.

Особенности генерации сетки разбиения для моделирования операций легирования

В двумерном концентрационном профиле транзистора необходимо исследование одного горизонтального сечения и трех характерных вертикальных сечений. Горизонтальное сечение выбирается в приповерхностной области кремния – в области формирования канала (рисунок 2, сечение Г).

Выбор вертикальных сечений должен осуществляться следующим образом: одно сечение должно проходить в области глубокого легирования истока/стока (рисунок 2, сечение А), другое – в области слабого легирования истока/стока (рисунок 2, сечение Б). И, наконец, третье вертикальное сечение должно быть выполнено в области подзатворного легирования транзистора (рисунок 2, сечение В).

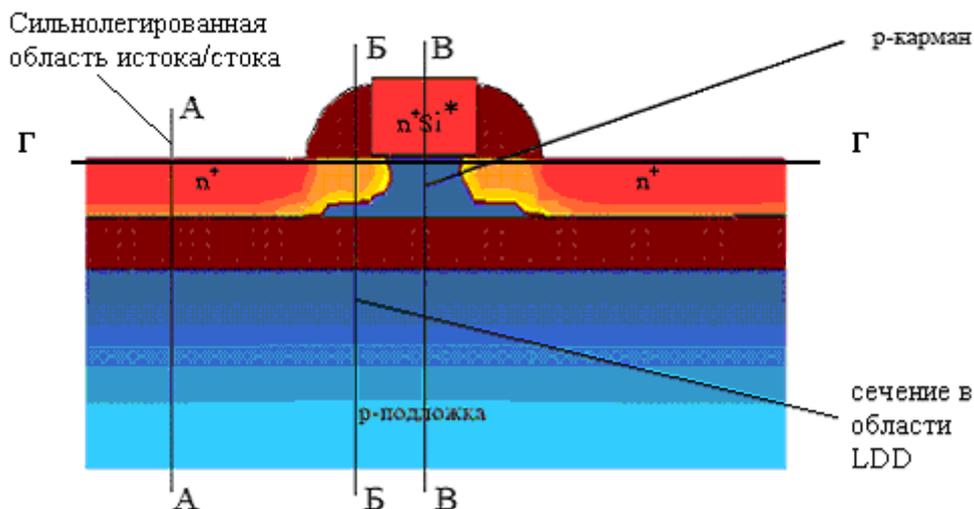


Рисунок 2 – К анализу результатов двумерного моделирования технологического маршрута

Горизонтальный профиль позволяет получить информацию об областях вблизи поверхности кремниевой пластины, имеющих наибольший градиент концентрации, и оценить величину максимального шага сетки в плоскостях, параллельных ее поверхности. Шаг сетки должен устанавливаться для каждой области, в которой существует градиент концентрации примеси. В области с постоянным уровнем легирования максимальный шаг сетки выбирается равным ее размеру.

Оценку шага сетки и погрешности децимации сетки теоретически возможно проводить с помощью теоремы Котельникова. Однако, поскольку эта теорема предполагает равномерную дискретизацию сетки конечных элементов, она неприменима для моделирования в TCAD, так как ее применение порождает избыточное число узлов сетки. Например, анализ горизонтального профиля в приповерхностной области кремния позволяет выделить части структуры, охватывающие области слабого легирования истока/стока – так называемые LDD-области (рисунок 3).

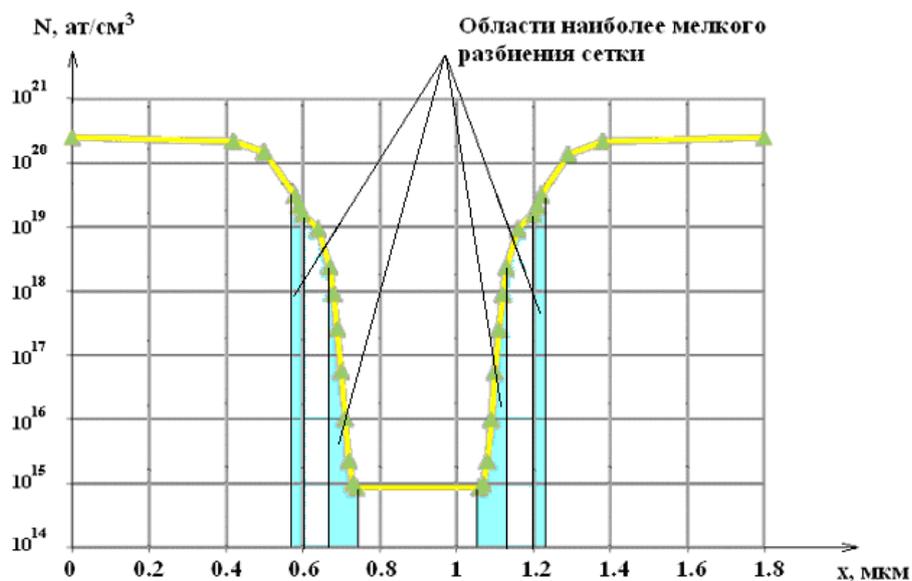


Рисунок 3 – Определение величины шага сетки на основе концентрационного профиля КНИ МОП-структуры

Величина каждой из областей и шаг разбиения зависят от задаваемой допустимой погрешности в алгоритме поиска с возвратом. В соответствии с этим алгоритмом каждая вершина поочередно проверяется на возможность удаления. Если при удалении этой точки топология изменяется таким образом, что расстояние от удаляемой точки до соединяющего соседние с ней точки отрезка не превосходит заданную величину, то рассматриваемую точку можно удалить из топологии. Величина допустимой погрешности моделирования определяется из условий физических ограничений используемых вычислительных средств. Иными словами, допустимая погрешность расчета определена объемами адресуемой оперативной памяти ЭВМ. График на рисунке 3 построен при максимальной допустимой относительной погрешности 10%.

Анализ двумерных профилей показал, что при допустимой погрешности в определении концентрации примеси 20% максимальная величина шага сетки в области изменения поверхностной концентрации должна быть не более 0,02 мкм. Установлено, что максимальная величина шага сетки по глубине в области LDD должна иметь значение порядка 0,01 – 0,02 мкм.

Существует несколько вариантов формирования сетки перед моделированием электрических характеристик КНИ МОП-структуры.

Первый вариант – стандартный – с помощью нескольких параллелепипедов (используется в системе TCAD). В этом случае пользователь сам выбирает шаг разбиения сетки по каждой из осей координат. В каждом из параллелепипедов следует определить направление протекания тока и измельчить шаг сетки вдоль оси координат, перпендикулярной направлению протекания тока. Этот метод разбиения рекомендуется применять для разбиения сетки в неискаженной топологии, в которой все границы топологических областей выполнены параллельными координатным осям (нет изломов под углами 135° и 45°). Недосток этого метода состоит в том, что средствами САПР его трудно алгоритмизировать – выбор направления предположительного протекания тока полностью предоставлен пользователю. Кроме того, определение координат вершин параллелепипеда в этом случае должно выполняться “вручную”, что сопряжено с возможными субъективными ошибками. В случае обработки непрямолинейной топологии возможно получение либо недостаточно мелкого разбиения сетки, либо избыточного числа ее вершин.

Второй вариант формирования сетки – выделение регионов разбиения сетки на основе преобразования топологии кремниевого затвора. Этот вариант полностью избавляет пользователя от необходимости определения координат вершин многогранников,

поверхность которых ограничивает выделенный регион. Способ легко поддается автоматизации, но обладает следующим недостатком: шаг как по оси x, так и по оси y следует выбирать одинаковым, что приводит к появлению избыточных узлов в структурах с протяженным затвором.

Третий способ построения сетки, предлагаемый и рассматриваемый в настоящей статье, вытекает из следующих соображений. Поскольку в структурах сложной геометрии точки с одинаковой концентрацией примеси лежат на линиях, параллельных границе затвора, можно считать, что наиболее подходящей для формирования сетки является криволинейная система координат, в которой ось параллельна границе затвора. Поскольку в системе TCAD нет возможности пользоваться криволинейной системой координат, ее можно создать искусственно, формируя в структуре модели тонкие «полоски» полупроводникового материала, толщина которых равна требуемому шагу сетки (рисунок 4). Такую структуру можно получить многократным осаждением полупроводникового материала на величину шага сетки и его последующим травлением. В этом случае «полоски» полупроводника формируются сразу с двух сторон. Формируемые «полоски» в вертикальном сечении имеют форму прямоугольника (рисунок 5).

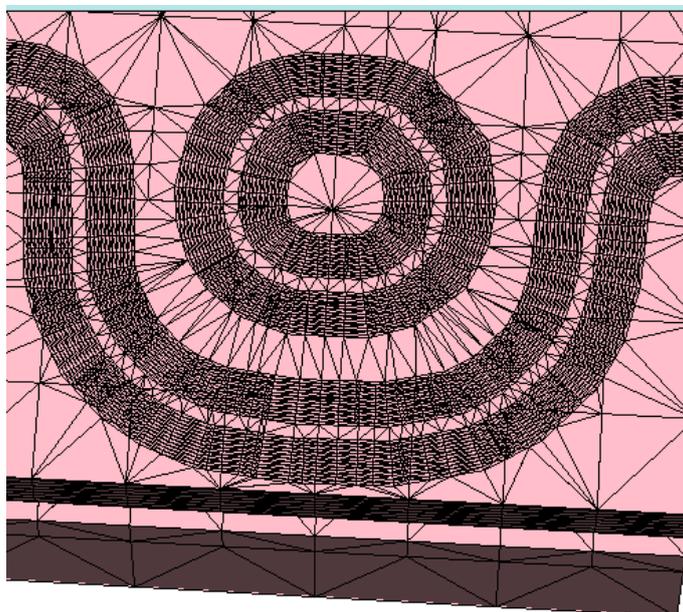


Рисунок 4 – Пример формирования криволинейной сетки

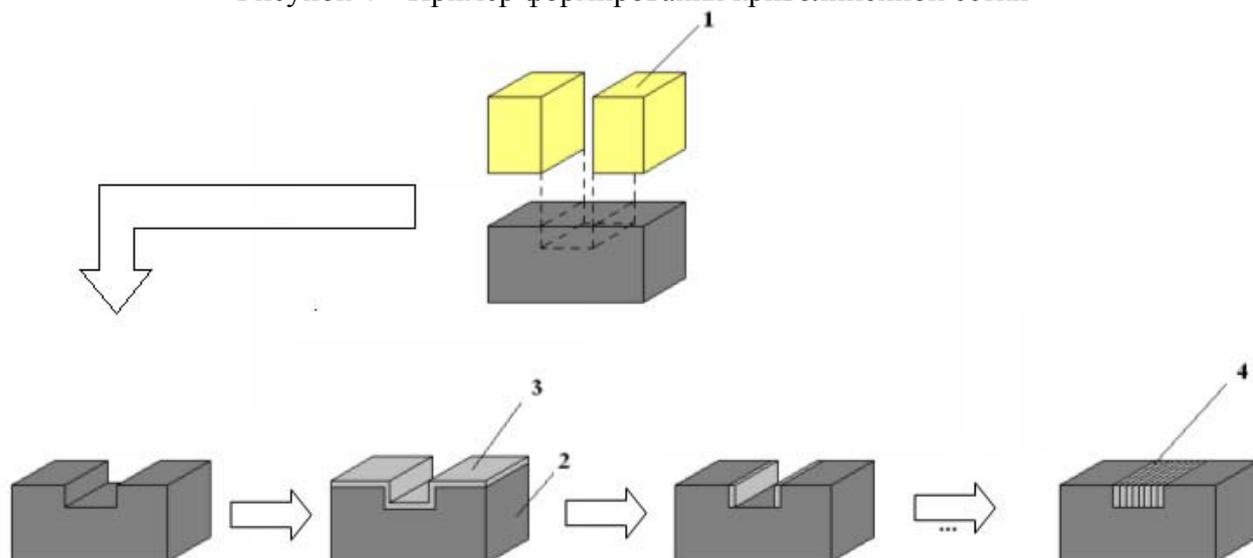


Рисунок 5 – К пояснению приема, используемого при формировании криволинейной сетки конечных элементов

На рисунке 5 цифрами обозначены: 1 – маска для травления области, предназначенной для мелкого разбиения сетки; 2 – фрагмент активной области МОП-структуры; 3 – осажденный кремний толщиной, равной размеру сетки; 4 – сформированная сеточная структура с шагом, равным толщине осажденного слоя. Необходимо отметить, что по умолчанию в системе при моделировании процесса осаждения не рассчитываются скругления осаждаемого материала на границах кремния, что позволяет упростить процедуру получения сетки.

В приповерхностных областях истока/стока, а также кармана КНИ МОП-структуры перепад концентраций легирующей примеси невелик (отличие между максимальным и минимальным значением концентраций не более, чем в 10 раз), поэтому величина допустимого шага сетки для этой области может быть больше: по глубине – порядка 0,05 мкм, а в направлениях, параллельных поверхности структуры, ограничения на величину шага сетки при моделировании операций легирования могут и не накладываться.

Необходимо отметить, что реализация криволинейной сетки не привязана к форме затвора КНИ МОП-транзистора, что делает предложенную методику построения сетки универсальной, позволяющей при конструктивно-технологическом моделировании учесть и литографические искажения его областей.

Предлагаемая методика формирования сетки конечных элементов была проверена на примере расчета в системе TCAD электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов О-типа. Сравнение полученных моделированием результатов с имеющимися данными измерений функциональных параметров указанных структур показало, что их расхождение не превышает 10%. Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика выбора криволинейной сетки конечных элементов является корректной, и может быть применена при моделировании параметров КНИ МОП-структур произвольной конфигурации.

Выводы

В результате анализа выполненных исследований по моделированию технологического маршрута и математическим моделям реальных субмикронных структур:

1. При моделировании сложных структур предложено, обосновано и практически реализовано криволинейное разбиение сетки конечных элементов, которое просто реализуется в модели и существенно экономит вычислительные ресурсы.
2. Предложена методика моделирования технологического процесса и структур, дающая рекомендации по выбору шага сетки в различных областях структуры на основе анализа результатов двумерного моделирования.

Литература

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с., ил.
2. Киреев В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008.– 428 с.; ил.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ МОДЕЛЕЙ 3D-ТРАНЗИСТОРНЫХ КНИ МОП-СТРУКТУР

Глушко А.А., Зотов С.К.

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

к. т. н., доцент Макаrchук В.В.

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

THE FEATURES OF MODEL CALIBRATION FOR 3D SOI MOSFET STRUCTURES

Glushko A.A., Zotov S.K.

Supervisors of studies: Doctor of technical science, RAS

Corresponding Member, Shakhnov V.A.,

Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.

IU4, BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

В работе описана методика калибровки моделей КНИ МОП-транзисторов в системе TCAD. Определена эквивалентная ширина канала в транзисторе А-типа. Приведены результаты моделирования в системе TCAD электрических характеристик указанного транзистора для случаев длинного и короткого каналов.

Abstract

The present work is devoted to SOI MOSFET model calibration. The equivalent width of the channel is determined. The electrical characteristics for long and short channel SOI MOSFETs are designed.

За относительно короткий промежуток времени наука обеспечила внедрение в производство интегральные микросхемы, полностью вытеснившие транзисторные модули и далее быстро развивает направление по разработке и созданию СБИС – сверхбольших интегральных схем с высокой плотностью расположения в них активных и пассивных элементов. Снижение проектных норм до нескольких сотен и даже десятков нанометров позволило существенно повысить их быстродействие и снизить энергопотребление. Однако движение в область наноразмеров – чрезвычайно сложная проблема. Во-первых, технологический процесс производства наноструктур насчитывает несколько сотен технологических операций, каждая из которых требует точного дозирования исходных материалов и соблюдения определенных внешних условий: давления, температуры, влажности, уровня чистоты воздуха или среды, в которой осуществляется эта операция, уровня электрических и магнитных полей. Во-вторых, технологический процесс должен обеспечить получение наноструктур, имеющих характеристики, находящиеся в пределах требуемых допусков.

При снижении проектных норм даже до уровня $0,35 - 0,25$ мкм, аналитический метод не обеспечивает требуемой точности, а сложность расчетов при этом существенно возрастает. Дело в том, что сближение структур и уменьшение расстояний между отдельными элементами внутри самой структуры, приводит к появлению нежелательных (паразитных) связей как на высоких частотах, так и в статическом режиме. Учесть эти паразитные связи с помощью аналитических зависимостей не представляется возможным.

Критерием правильности организации технологического процесса являются результаты исследования опытных образцов полученных структур. Поскольку аналитический метод не обеспечивает в полном объеме прогнозирование характеристик создаваемых наноструктур, часто прибегают к экспериментальному исследованию, которое сочетает в себе имеющийся опыт проектирования и частично аналитические зависимости. Прогноз ожидаемых характеристик в этом случае оказывается весьма приблизительным. Поэтому такой подход получил название метода «проб и ошибок». Он требует значительных финансовых затрат и длительности реализации, поскольку предполагает получение ряда опытных структур с коррекцией технологического процесса для каждого последующего образца.

Перспективным методом, существенно сокращающим время проектирования технологического процесса производства наноструктур, является моделирование. Оно основывается на решении фундаментальных уравнений физики, описывающих процессы, протекающие в металле, окисле и полупроводнике: уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок при заданных начальных и граничных условиях. Решение этих уравнений реализуется численными методами на ЭВМ. На сегодняшний день САПР, используемые для моделирования характеристик элементов СБИС, создаваемых по различным технологическим процессам, получили реализацию в виде целой серии программных продуктов под общей аббревиатурой TCAD (Technology Computer Aided Design). Конструктивно-технологическое моделирование элементов СБИС с помощью таких программ требует относительно небольших затрат машинного времени - от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Исследование полупроводниковых приборов в системах конструктивно-технологического моделирования может проводиться как на качественном, так и на количественном уровне. В первом случае важны не точные значения конструктивных и технологических параметров структуры, а степень их влияния на электрические характеристики структуры и исследование причин этого влияния.

В ряде случаев важно определить значения технологических параметров, при которых электрические характеристики структур удовлетворяют заданным требованиям. В связи с этим актуальным становится исследование характеристик структур на количественном уровне. Такое исследование предполагает предварительное уточнение (калибровку) моделей, заложенных в САПР конструктивно-технологического моделирования.

Трехмерное моделирование транзисторных структур является трудоемким процессом, так как включает в себя этапы подготовки самой трехмерной структуры и генерации подходящей для таких расчетов сетки. При правильном выборе шага сетки расчет одной электрической характеристики транзистора, как правило, требует нескольких часов машинного времени.

Следует отметить, что рекомендуемый разработчиками системы TCAD шаг сетки в 0.0001 мкм годен лишь для моделирования 2D-структур, поскольку в случае 3D-структур подобный шаг сетки становится пренебрежимо малым по отношению к шагу сетки в двух других направлениях, что при формировании уравнений конечных элементов, расположенных на границе раздела кремний-окисел приводит к риску деления на величину, близкую к нулю. Как показала практика, использование такой сетки существенно ухудшает процесс сходимости численных методов.

Поэтому расчет электрических характеристик транзистора предполагает не только в чистом виде моделирование 3D-структуры, но и ее двумерный анализ в одном из ее сечений с последующей корректировкой результатов 3D-моделирования на основе 2D-модели.

Предлагаемый способ позволяет комбинировать достоинства как трехмерного, так и двумерного моделирования: трехмерное моделирование позволяет выполнить полный анализ структуры, а более высокие вычислительные возможности двумерного анализа позволяют уточнить результаты трехмерного моделирования.

Определение эквивалентной ширины канала МОП-транзистора

В соответствии с полуэмпирическими SPICE-моделями (BSIM, BSIMSOI) [1], описывающими функционирование МОП-транзистора, величина тока, протекающего через транзистор, пропорциональна ширине канала. Это означает, что определить эквивалентную ширину канала и плотность протекающего через него тока можно, построив линейную аппроксимацию зависимости их значений от конструктивной ширины канала для транзисторов различной геометрии с фиксированной конструктивной длиной канала.

Необходимо отметить, что калибровку моделей следует проводить на «больших» транзисторах, т.е. таких, у которых размеры областей составляют не менее 1 мкм. Можно

считать, что эти структуры практически не подвержены эффектам малых размеров. В этом случае пороговое напряжение определяется, в основном, двумя факторами: толщиной подзатворного окисла и уровнем легирования приповерхностной области карманов КНИ МОП-транзистора. Помимо этого токи, протекающие через транзистор, зависят от эквивалентной ширины канала и подвижности протекающих в нем носителей.

Ключевой особенностью конструкции КНИ МОП-транзисторов является наличие в них контактов к карману, которые необходимы для подавления паразитных эффектов, связанных с электрической изоляцией транзисторных элементов от общей подложки. Наибольшее распространение в современных СБИС получил транзистор А-типа, топология которого представлена на рисунке 1. Функциональные параметры такого транзистора малочувствительны к литографическим искажениям геометрии затвора. Далее для определенности будут рассмотрены топология и конструкция *n*-канального МОП-транзистора.

Контакты к карману МОП-транзистора А-типа расположены по границам проводящего канала и представляют собой сильнолегированные области (концентрация легирующей примеси $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) того же типа проводимости, что и карман транзистора. Обычно за конструктивную ширину канала такого транзистора принимается расстояние между границами контактов к карману.

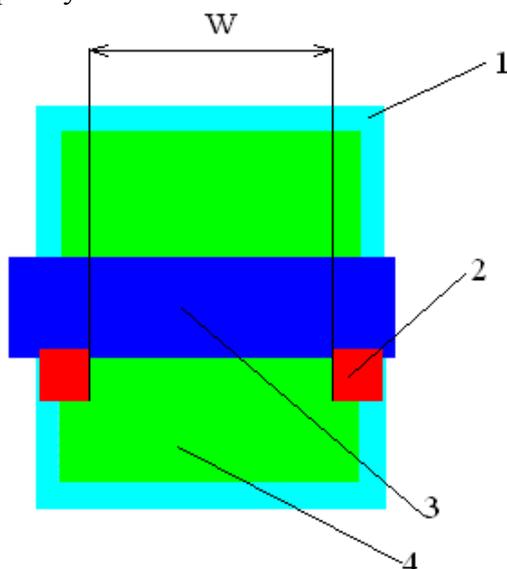


Рисунок 1 – Топология КНИ *n*-канального МОП-транзистора А-типа:

1 – маска для легирования области истока/стока, 2 – маска легирования области контакта к карману, 3 – поликремниевый затвор, 4 – активная область транзистора

Величиной W на рисунке обозначена конструктивная ширина канала. Для определения эквивалентной ширины канала транзистора с заданной конструктивной длиной были спроектированы ряды транзисторных МОП-структур с одинаковой конструктивной длиной и отличающиеся друг от друга конструктивной шириной канала. Для каждого из таких транзисторов была измерена его пороговая характеристика и при фиксированном напряжении на затворе и стоке определены токи, протекающие через транзисторы с разными конструктивными ширинами канала. На основе полученных результатов была построена линейная аппроксимация зависимости протекающих через канал транзистора токов. На рисунке 2 приведена зависимость тока насыщения КНИ МОП-транзистора *n*-канального транзистора А-типа от конструктивной ширины канала.

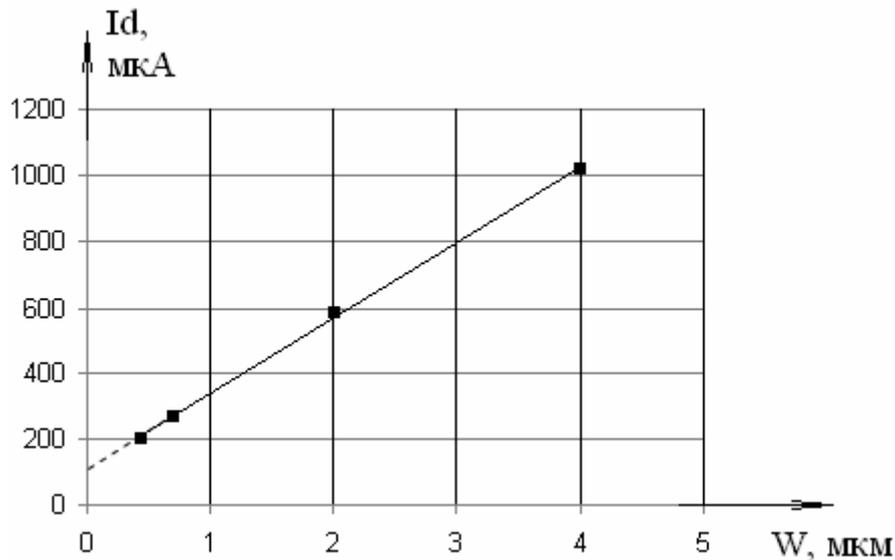


Рисунок 2 – Зависимость приведенного тока насыщения n -канальных МОП-транзисторов А-типа с конструктивной длиной канала L мкм от их конструктивной ширины W .

Как видно из рисунка, она имеет линейную зависимость. Отметим, что аппроксимирующая прямая пересекает вертикальную ось в точке с положительной ординатой. Поэтому зависимость тока стока I_d от конструктивной ширины канала W можно записать в следующем виде:

$$I_d = W \cdot J_d + \Delta I_d,$$

где J_d – приведенный ток стока, ΔI_d – слагаемое, учитывающее аддитивный сдвиг линейной зависимости относительно начала координат.

В последнем выражении приведенный ток стока можно вынести за скобки:

$$I_d = W \cdot J_d + \Delta I_d = J_d \cdot \left(W + \frac{\Delta I_d}{J_d} \right) = J_d \cdot W_{eff}$$

Иными словами, ток стока прямо пропорционален величине $W_{eff} = W + \frac{\Delta I_d}{J_d}$, которую и можно считать эквивалентной шириной канала.

Таким образом, имея экспериментальную зависимость тока стока от конструктивной ширины канала, можно оценить как эквивалентную ширину канала, так и приведенный ток стока и разность между эквивалентной и конструктивной ширинами канала. Для исследуемого транзистора с $L=1$ мкм и $W=4$ мкм получаем $W_{eff}=4,4$ мкм.

Точно также оценить эквивалентную ширину канала можно и на основе результатов трехмерного моделирования, выполненного для транзисторов с различной конструктивной шириной канала. Это моделирование показало, что ширина канала транзистора А-типа составляет $4,3$ мкм. При этом значение приведенного тока стока, полученное по результатам моделирования, оказалось приблизительно на 30% большим данных измерений.

Определенная моделированием эквивалентная ширина канала p -канального КНИ МДП-транзистора оказалась равной $4,4$ мкм, что совпало с результатами измерений. Убедившись, что моделирование и данные измерений для эквивалентной ширины канала практически не отличаются друг от друга, целесообразно с целью экономии времени и вычислительных ресурсов калибровку характеристик TCAD по определению приведенного тока стока выполнять в двумерном варианте.

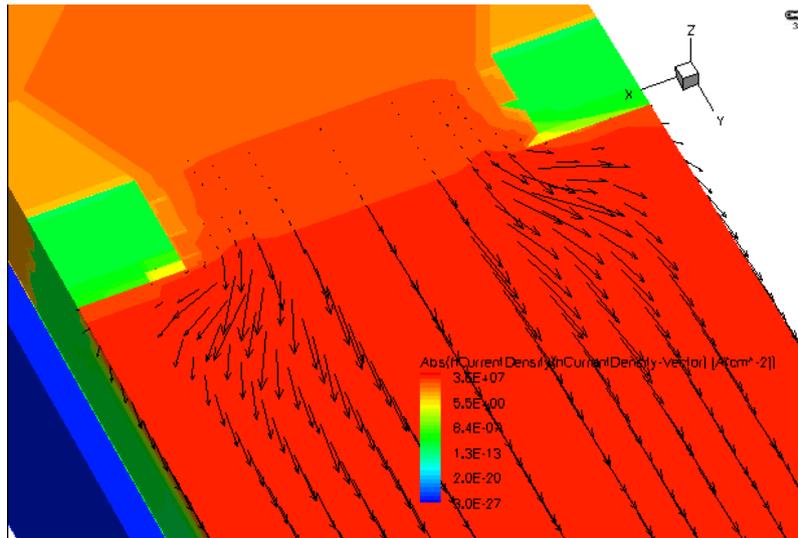


Рисунок 3 – Растекание тока в МОП-транзисторе А-типа

Увеличение эквивалентной ширины канала по отношению к конструктивной в этом случае вызвано растеканием тока по всей ширине транзистора так, как показано на рисунке 3, и не ограничивается пространством между контактами к карману.

Калибровка начального участка пороговой характеристики.

При малых токах, протекающих через МОП-транзистор эффектами уменьшения подвижности носителей на границе кремний-окисел, а также эффектами саморазогрева в КНИ-структурах можно пренебречь. Поэтому сравнительный анализ начального участка расчетной и измеренной характеристики транзистора позволяет судить о точности расчета толщины подзатворного окисла и уровня легирования в кармане МОП-транзистора. При расчете подвижности носителей заряда использовалась модель, учитывающая уменьшение подвижности носителей на колебаниях атомов кристаллической решетки и на ионах примеси, а также эффект уменьшения подвижности носителей в сильных электрических полях.

Все пороговые характеристики транзисторов были построены при напряжении сток-исток равном $2,5\text{ В}$ (напряжении питания структур с проектными нормами $0,25\text{ мкм}$). На рисунке 4 представлены расчетная и измеренная пороговые характеристики n -канального КНИ МОП-транзистора с $L=1\text{ мкм}$ и $W=4\text{ мкм}$.

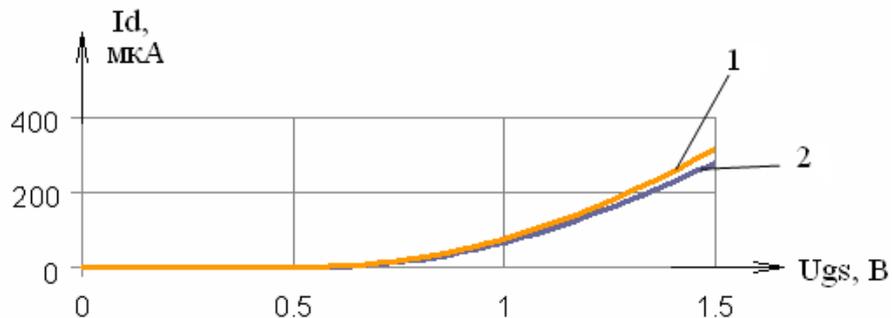


Рисунок 4 – Начальный участок полученной моделированием (1) и измеренной (2) пороговой характеристики МОП-транзистора

Из рисунка видно, что подъем пороговой характеристики и в том и в другом случае начинается при напряжении приблизительно равным $0,7 В$. Совпадение начальных участков кривых говорит о том, что такие важнейшие параметры структуры, как толщина подзатворного окисла и приповерхностная концентрация легирующей примеси в канале КНИ МОП-транзистора на основе результатов технологического моделирования были определены верно. Аналогичным путем были получены расчетная и измеренная пороговые характеристики p -канального КНИ МОП-транзистора при малых напряжениях затвор-исток.

Учет эффекта «прижимающего» электрического поля и саморазогрева в КНИ МОП-структурах

Расхождение между полученной моделированием и измеренной характеристиками как у p -канального, так и у n -канального транзисторов при больших напряжениях на затворе объясняется следующими двумя эффектами, которые не были учтены при моделировании, а именно эффект уменьшения подвижности за счет «прижимающего» поля и эффект саморазогрева КНИ-структуры.

Эффект уменьшения подвижности носителей заряда в канале за счет «прижимающего» поля становится доминирующим в надпороговом режиме. Дело в том, что реальная граница раздела кремния с окислом имеет несовершенства, которые обуславливают случайный характер рассеивания носителей [2]. Установлено, что рассеивание носителей на шероховатостях границы раздела возрастает с увеличением напряженности «прижимающего» электрического поля в канале.

Анализ моделей, заложенных в САПР конструктивно-технологического моделирования, показал, что наиболее близкие к экспериментальным данным результаты моделирования дает эмпирическая модель процесса рассеивания носителей заряда, предложенная Болонским университетом, подробное описание которой изложено в [3].

Эффект саморазогрева КНИ МОП-структуры заключается в следующем. Скрытый окисный слой очень сильно затрудняет отвод выделяющегося тепла в подложку. В результате КНИ-структуры обладают большими тепловыми постоянными времени, и для них характерно повышение рабочей температуры из-за омического тепловыделения при больших токах, что также приводит к снижению подвижности носителей. Характерным признаком такого саморазогрева является наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления на выходной характеристике МОП-транзистора.

Следует отметить, что уменьшение подвижности носителей за счет «прижимающего» поля возможно учесть лишь в двумерной модели, поскольку при трехмерном моделировании шаг сетки, требуемый для корректного расчета напряженности «прижимающего» электрического поля, приводит к глобальной расходимости итерационного процесса. Эффект саморазогрева желательно учитывать в две итерации, первая из которых связана с решением уравнения Пуассона и уравнений непрерывности без учета уравнения теплопроводности, а на второй - эти уравнения уже решаются совместно с уравнением теплопроводности, с использованием в качестве начального приближения решения, полученного на первой итерации. Подобный подход существенно улучшает сходимость численных методов и ускоряет сам процесс моделирования. Зная по результатам двумерного моделирования, во сколько раз нужно уменьшить подвижность при данном напряжении на затворе, можно внести в результаты трехмерного моделирования соответствующие поправки.

С использованием предложенных алгоритмов и моделей была выполнена калибровка n - и p -канальных КНИ МОП-транзисторов А-типа. На рисунке 5 представлены ее результаты для n -канального КНИ МДП-транзистора.

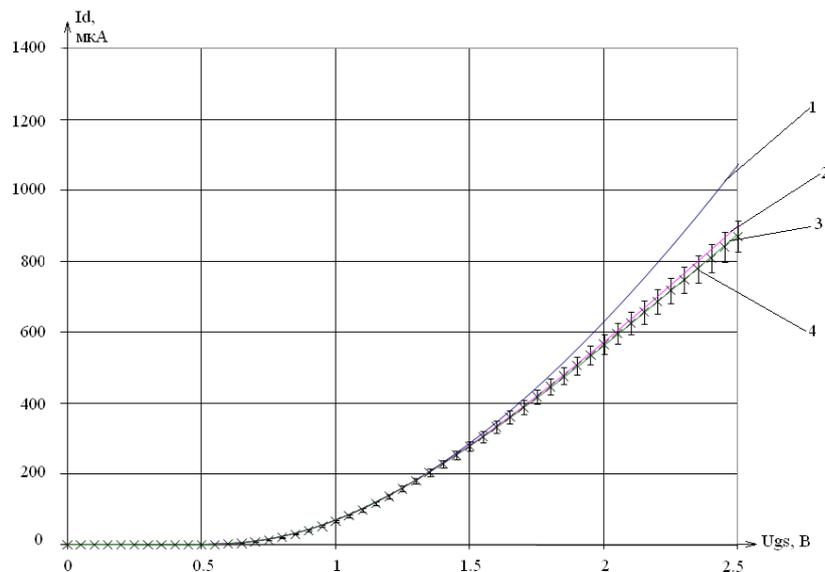


Рисунок 5 – Результат калибровки для n -канального КНИ МДП-транзистора

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – результат моделирования без учета эффектов снижения подвижности, 2 – результат моделирования с учетом эффекта снижения подвижности носителей из-за «прижимающего» поля, 3 – результат моделирования с учетом эффекта снижения подвижности носителей из-за «прижимающего» поля и эффекта саморазогрева, 4 – экспериментальные данные. Из рисунка видно, что учет эффектов саморазогрева и «прижимающего» поля позволяет приблизить результаты моделирования к экспериментальным данным с расхождением не более 2%.

Моделирование короткоканального транзистора

Верификацию модели целесообразно провести на короткоканальном транзисторе с шириной затвора $0,25 \text{ мкм}$. Для этого достаточно в тех же условиях провести моделирование пороговой и выходной характеристик транзисторов обоих типов. Короткоканальные эффекты при правильно построенной сетке в транзисторе должны адекватно воспроизводиться моделью.

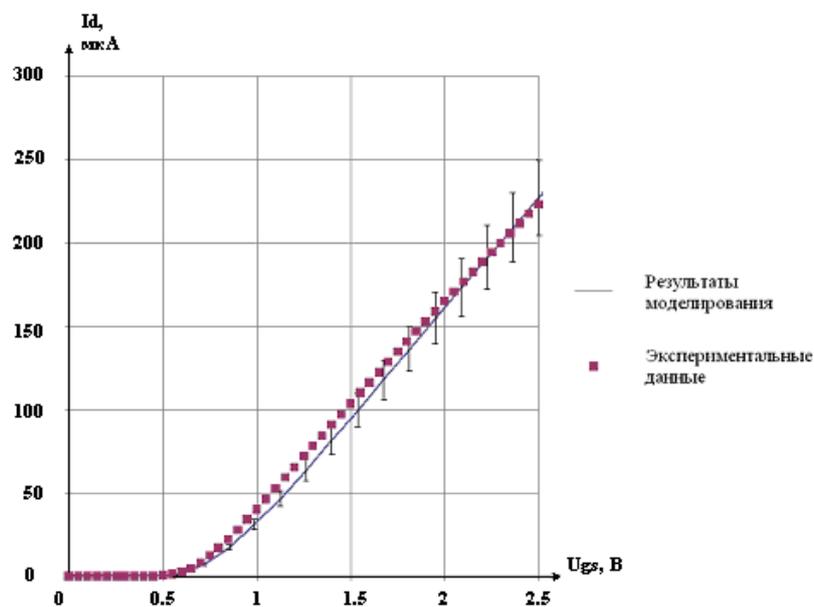


Рисунок 6 – Полученная в результате калибровки и измеренная пороговая характеристика n -канального КНИ МОП-транзистора с шириной затвора $0,25 \text{ мкм}$

На рисунке 6 представлены расчетная и экспериментальная пороговые характеристики n -канального КНИ МОП-транзистора А-типа. Как видно из рисунка расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования почти во всем диапазоне напряжений не превышает 10%. Это позволяет говорить о правильном выборе модели подвижности, шага дискретизации сетки конечных элементов и полноте учета большинства физических эффектов, присущих данной структуре.

Выводы

Анализ результатов моделирования и их сравнение с данными экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложена методика трехмерного моделирования электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов, отличающаяся тем, что первоначально выполняется приближенное трехмерное моделирование параметров структуры, которое далее уточняется уже на основе двумерного анализа.

2. Установлено, что в КНИ МОП-транзисторах А-типа эквивалентная ширина канала может отличаться от конструктивной на величину вставок-контактов к карману.

3. Установлено, что основной причиной расхождения между данными измерений и результатами моделирования является фактор уменьшения подвижности носителей на границе окисел-кремний при воздействии перпендикулярного потоку носителей электрического поля и эффект саморазогрева КНИ-транзистора в надпороговом режиме.

4. Полученные в результате моделирования электрические параметры p - и n -канальных КНИ МОП-транзисторов с шириной затвора 0,25 мкм в сравнении с данными измерений позволяют говорить о корректности настроенных моделей технологических процессов формирования КНИ МОП-структур и полноте учета протекающих в них физических явлений.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотруднику НИИСИ РАН А.С.Новоселову за предоставленные результаты измерений электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов.

Литература

1. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 408 с.

2. C. Lombardi, S. Manzini, A. Saporito, and M. Vanzi, "A Physically Based Mobility Model for Numerical Simulation of Nonplanar Devices," IEEE Transactions on CAD, vol. 7, no. 11, pp. 1164–1171, 1988.

3. G. Vaccarani, A Unified mobility model for Numerical Simulation, Parasitics Report, DEISUniversity of Bologna, Bologna, Italy, 1999.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Манукянц Э.В.

к.т.н, профессор, Мысловский Э.В.

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

ARCHITECTURE OF TURBOGENERATOR'S TECHNICAL CONDITION DIAGNOSTIC AUTOMATED SYSTEM

Manukyants E.V.

Ph.D, professor, Mislovskiy E.V.

Bauman's MSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В данной статье рассматривается вопрос построения архитектуры экспертной системы диагностики технического состояния турбогенераторов. Построена структурная схема архитектуры экспертной системы и описаны основные ее составляющие, также описаны основные режимы работы экспертной системы и персонал, необходимый для ее разработки.

Abstract

In this article the question of construction the architecture of turbogenerators technical condition diagnostic automated expert system is considered. The block diagram of architecture of expert system is constructed and its basic components are described, the basic operating modes of expert system and the personnel necessary for its working out also are described.

Архитектура экспертной системы диагностики технического состояния турбогенераторов вытекает из трех основных принципов.

1. Мощность экспертной системы обусловлена в первую очередь мощностью базы знаний и возможностью ее пополнения и только во вторую очередь - используемыми ею методами (процедурами).

2. Знания, позволяющие эксперту (или экспертной системе) получать качественные и эффективные диагностические решения задач, являются в основном эвристическими, экспериментальными, неопределенными. Причиной этого является неформализованность или слабая формализованность решаемых задач. Знания экспертов имеют индивидуальный характер, т.е. свойственны конкретному человеку.

3. Учитывая неформализованность решаемых диагностических задач и эвристический, личностный характер используемых знаний, пользователь (эксперт) должен иметь возможность непосредственного взаимодействия с экспертной системой в форме диалога.

Разрабатываемая экспертная система (рис. 1) состоит из следующих компонентов:

- рабочей памяти, называемой также базой данных, хранящей данные и играющей главенствующую роль в решении задач;

- базы знаний, хранящей множество продукций (в общем случае правил), которые задаются экспертами либо определяются на основании однозначных регламентирующих указаний;

- компонентов приобретения знаний, автоматизирующих процесс наполнения экспертной системы знаниями, осуществляемый пользователем-экспертом;

- объяснительного компонента, показывающего, как система получила решение задачи (или почему она не получила решения) и какие знания она при этом использовала, что облегчает эксперту тестирование системы и повышает доверие пользователя к полученному результату;

- диалогового интерфейса, осуществляющего диалоговое взаимодействие с пользователем (экспертом) на естественном для него языке (естественный язык, профессиональный язык, язык графики, тактильное воздействие и т.п.);

- лингвистического процессора, отвечающего за перевод параметров, поступающих от турбогенератора, в форму, удобную для работы экспертной системы.

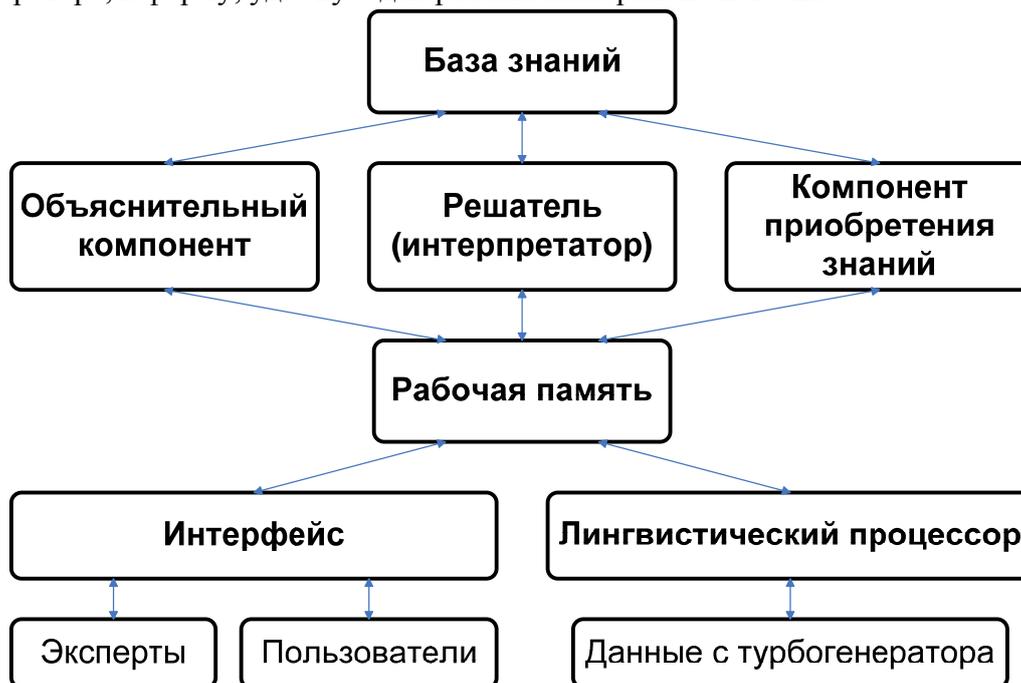


Рисунок 1 - Компонентная структура экспертной системы диагностики технического состояния турбогенераторов

Экспертная система диагностики технического состояния турбогенераторов работает в двух режимах:

- в режиме приобретения знаний (данных) о турбогенераторе;
- в режиме решения диагностических задач (в режиме консультации или использования).

В режиме приобретения знаний общение с экспертной системой может осуществляться двумя способами. При первом способе эксперт общается с системой через посредничество инженера по знаниям. Эксперт описывает турбогенератор и его техническое состояние в виде совокупности данных и правил. Данные определяют объекты, их характеристики и значения, существующие в области диагностики. Правила определяют способы манипулирования данными, характерные для турбогенератора. Эксперт, используя компонент приобретения знаний, наполняет систему знаниями, которые позволяют экспертной системе в режиме решения самостоятельно (без эксперта) решать задачи технической диагностики. При втором способе экспертная система получает данные из подсистемы сбора данных, которая строится на основе существующих штатных средств контроля и измерения оборудования, с учетом всех требований по сбору информации для диагностирования турбогенераторов [1, 2].

В режиме консультации общение с экспертной системой осуществляет конечный пользователь, которого интересует результат и/или способ получения решения. Пользователь может не быть специалистом в данной предметной области. В этом случае он обращается к экспертной системе за советом, не имея возможности получить ответ самостоятельно. Пользователь – специалист обращается к экспертной системе, чтобы ускорить процесс получения результата или же, чтобы возложить на экспертную систему рутинную работу.

Данные о задаче пользователя обрабатываются диалоговым компонентом, выполняющим следующие действия:

- распределение ролей участников диалога (пользователя и экспертной системы) и организация их взаимодействия в процессе кооперативного решения диагностической задачи;
- преобразование данных пользователя о задаче, представленных на привычном для пользователя языке, во внутренний язык системы;

- преобразование сообщений системы, представленных на внутреннем языке, в сообщения на языке, привычном для пользователя.

После обработки полученной информации, на основе результатов, общих данных о диагностировании турбогенераторов и правил из базы знаний решатель формирует решение. При этом происходит постоянный обмен знаниями и данными с соответствующими базами.

В разработке экспертной системы участвуют следующие специалисты:

- эксперт по электрической части электрических станций;
- инженер по знаниям - специалист по разработке системы;
- программист - специалист по разработке инструментальных средств

Эксперт определяет знания (данные и правила), характеризующие электрическую часть, обеспечивает полноту и правильность введенных в экспертную систему знаний. Инженер по знаниям помогает эксперту выявить и структурировать знания, необходимые для работы экспертной системы, осуществляет выбор наиболее подходящих для данной предметной области инструментальных средств. Он определяет также способ представления знаний [3, 4] в инструментальных средствах, выделяет и программирует (традиционными средствами) алгоритмы, выявляющие состояния, типичные для турбогенераторов [5, 6], которые будут использоваться при описании правил, вводимых экспертом.

Литература

1. Алексеев Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. - М.: Научно — учебный центр ЭНАС, 1997. -144 с.
2. Аношкин А. А., Глазов О. Н., Кислов Г. И. Экспертные модели диагностики неисправностей основного технологического оборудования электростанций / Расширение интеллектуальных возможностей АСУ. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - С. 8 -10.
3. Приобретение знаний: Пер. с япон. / Под ред. С. Осуги, Ю. Саэки. — М.: Мир,1990.-304с.
4. Степанов М. Ф. Основы проектирования экспертных систем технической диагностики: Учебное пособие. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000.-128 с.
5. Мозгалецкий А. В., Гаскаров Д. В. Техническая диагностика. - М.: Высшая школа, 1975. - 215 с.
- 6.Глебов И. А., Данилевич Я. Б. Диагностика турбогенераторов. - Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1989. - 118 с.

СТРАТЕГИИ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОПОЛОГИИ СБИС ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО ФОТОШАБЛОНА НА ОСНОВЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Тихомиров Д. В.

Научный руководитель : ассистент, Аверьянихин А. Е.

Научный консультант : д.т.н., проф. Зинченко Л.А.

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

STRATEGIES OF TRANSFORMATION OF VLSI TOPOLOGY FOR THE DOUBLE PATTERN TECHNOLOGY BASED ON HEURISTIC METHODS

D. Tikhomirov

Supervisor: Assistant, Averyaninin A. E.

Scientific adviser: Prof. Zinchenko, L.A.

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

Аннотация

В работе рассматривается задача исследования критических параметров для технологии двойного фотошаблона. При помощи средства платформы Calibre компании Mentor Graphics проводится моделирование фрагментов топологии с целью определения искомым параметров.

Abstract

In this work the scientific research of critical parameters for the double pattern technology in lithography is introduced. With the help of platform Calibre Mentor Graphics company a modeling of the topology of the fragments to determine the desired parameters is conducted.

Введение

На сегодняшнем этапе развития полупроводниковой промышленности имеется тенденция уменьшения топологических размеров производимых элементов, а также постепенно осваиваются новые технологические нормы изготовления элементов с критическими размерами 90,65,45 нм [2].

При уменьшении критических размеров топологии СБИС увеличивается вероятность появления технологических проблем, таких как :

- микроминиатюризации элементной базы
- возрастающая сложность изготовления элементов, соответствующих требованиям производства [2].

Главной проблемой является выбор метода фотолитографии, способного дать как можно меньшие топологические размеры СБИС.

Среди основных методов литографии можно выделить :

- Литография жестким ультрафиолетом (EUV) - Литография EUV относится к обычной оптической литографии. Ее отличительными особенностями являются использование излучения с длиной волны 11 - 14 нм и отражательных оптики и фотошаблонов. Однако сложная зеркальная оптика и прецизионная технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогостоящим [1].
- Рентгеновская литография(X-ray Lithography) - метод микроэлектронной технологии, заключающийся в формировании с субмикронным разрешением защитной маски заданного профиля на поверхности подложки; осуществляется при помощи рентгеновского излучения длиной волны $l \sim 0,4-5$ нм [1].
- Технологии двойного фотошаблона - основная идея технологии двойного фотошаблона заключается в последовательном применении двух фотошаблонов во время экспонирования фоторезиста для получения рисунка с

размерами элементов, не достижимыми с помощью традиционных методов оптической литографии [1].

1. Программное обеспечение для моделирования процесса литографии

Для решения поставленной в данной статье задачи был выбран метод двойного фотошаблона. При помощи платформы Calibre [3,4], компании Mentor Graphics, является возможным проводить моделирование литографического процесса в субмикронном диапазоне.



Рисунок 1 - Структура платформы “Calibre”

Платформа Calibre состоит из модулей физической верификации топологии, моделирования литографических процессов для цифровых и аналого-цифровых систем на кристалле, имеет возможность решать задачу верификации, как для отдельных блоков, так и для кристалла в целом [4].

Пакет Calibre используется основными полупроводниковыми фабриками (TSMC (www.tsmc.com/), UMC (www.umc.com/), Chartered (www.sias.org.sg/), IBM (www.ibm.com/), Jazz (www.jazzsemi.com/), AMS (www.americanmicrosemi.com/) и др.), обеспечивая связь проектирования и производства [3].

Платформа «Calibre» компании Mentor Graphics содержит в себе несколько основных модулей (рис. 1):

- DRC-контроль правил проектирования,
- LVS-соответствие топологии электрической схеме,
- xRC-моделирование паразитных эффектов в полупроводниковых структурах,
- OPC, PSM-моделирование литографических процессов,
- DFM-подготовка проекта к производству.

В данной работе используется модуль OPC, PSM для моделирования литографических процессов при работе с топологией СБИС.

2. Особенности построения графа противоречий в САПР трансформации топологии СБИС для технологии двойного фотошаблона

При проектировании топологии СБИС по технологии двойного фотошаблона необходимо разделить топологию на две части с целью последующего воспроизводства. Выполнение этой процедуры вручную является сложной задачей.

В работе [2] были предложены алгоритмические решения преодоления принципиальных ограничений оптической фотолитографии для разрешения противоречия между негативным влиянием эффекта взаимной дифракции и необходимостью уменьшения проектных норм технологии. Для построения графа противоречий необходимо определить параметры технологии двойного фотошаблона.

Для решения этой проблемы была предложена следующая методология.

1. На основе анализа различных топологий СБИС выделить набор различных фрагментов топологий.
2. Выполнять моделирование процесса литографии для выделенных фрагментов топологии итеративно, постоянно изменяя критические размеры и оценивая результат.
3. На основе результатов моделирования определить критические параметры технологии двойного фотошаблона.

3. Экспериментальные результаты

Для выполнения экспериментальных исследований была выбрана топология 8-битного мультиплексора (рис 2). Эвристически были выделены следующие характерные фрагменты топологии (рис. 3).

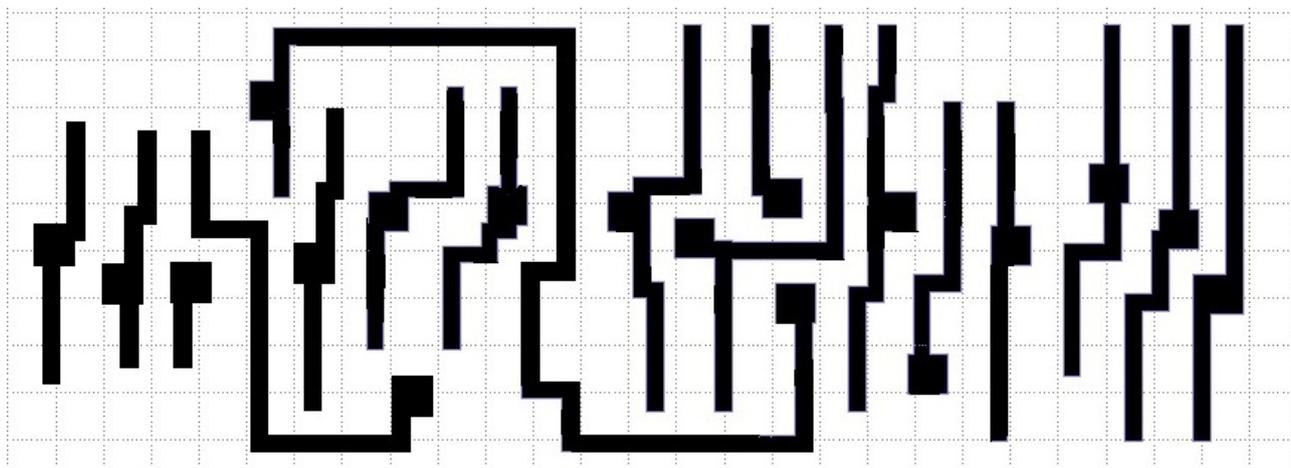


Рисунок 2 - Топология мультиплексора

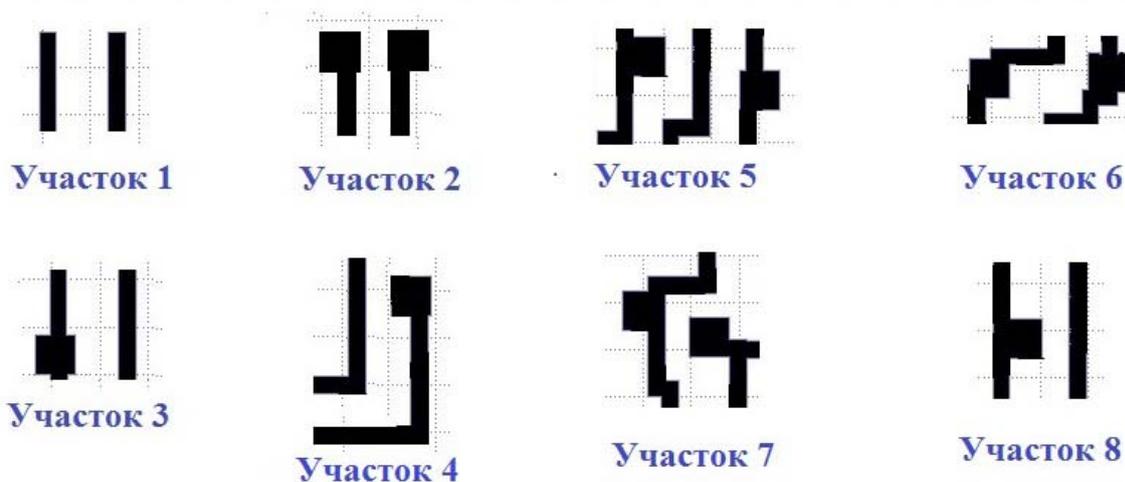


Рисунок 3 - Выделенные участки топологии

Для выбранных участков топологии СБИС было выполнено моделирование и получены значения параметров технологии двойного фотошаблона.

Выводы

В работе представлены результаты исследований, целью которых является моделирование различных участков топологии СБИС, проведение исследований параметров технологии двойного фотошаблона при помощи программного комплекса Calibre компании Mentor Graphics и определение эвристик с целью последующего использования в САПР СБИС для технологии двойного фотошаблона.

Полученные результаты могут быть также систематизированы в виде альбома участков топологии СБИС, содержащего значения критических параметров для каждого варианта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы» (ГК №П2292), а так же гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущей научной школы Российской Федерации НШ-3483.2010.9.

Литература

- 1 В. J. Thompson, K. Suzuki, B. W. Smith. Microlithography. Science and technology. CRC Press, 2007, 800
- 2 Зинченко Л. А., Резчикова Е.В., Аверьянихин А.Е. Алгоритмы трансформации топологии субмикронных СБИС // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011, №1
- 3 Лохов. А.Л. Главный калибр компании Mentor Graphics, Электроника: Наука, Технологии, Бизнес, 2006

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

АДАПТАЦИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ К ПРОИЗВОДСТВУ

Р. А. Уваров

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

Научный консультант: главный специалист Ужвий Г. А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Аннотация

В работе рассматриваются вопросы адаптации печатных плат к требованиям производства.

Для изготовления печатной платы на современном технологическом оборудовании необходима информация о всех параметрах печатной платы в электронном виде. Одним из этапов получения такой информации является работа с системами автоматизированного проектирования (*CAD – Computer-Aided Design*), в ходе которой осуществляется ввод принципиальной электрической схемы, определение габаритов печатной платы, размещение электронных компонентов на плате и трассировка (выполнение межсоединений).

Следующим этапом подготовки информации для технологического оборудования является обработка *CAD*-информации в системе автоматизированной подготовки производства (*CAM – Computer-Aided Manufacturing*). На этом этапе происходит извлечение из *CAD*-файлов посредством постпроцессора: набора так называемых файлов, несущих послышную информацию о печатной плате, включая слой проводящего рисунка, изображение паяльной маски, маркировки, контура платы, а также файла сверления, с координатами и перечнем диаметров отверстий.

Следующим этапом является импорт полученных файлов в *CAM*-систему, обработка информации на соответствие формальным технологическим требованиям, подготовка данных для технологического оборудования, экспорт данных в формате, поддерживаемом технологическим оборудованием.

В настоящее время среди производителей печатных плат, широкое применение получил программный продукт *CAM350* фирмы *DownStream Technologies*, являющийся простым и мощным средством для подготовки печатной платы к ее производству [1].

Актуальность применения этого программного продукта на производстве очевидна, так как конструктор, который трассирует печатную плату, зачастую не учитывает все нюансы и тонкости производства печатных плат. В итоге, если не выполнить адаптацию проекта к производству, печатную плату либо вообще не удастся изготовить, либо большая часть запущенной в производство партии окажется бракованной. *CAM350* применяется для устранения технологических ошибок в трассировке и упрощения задачи производства печатных плат на определенном оборудовании [2].

В рамках учебного процесса был разработан цикл лабораторных работ, включающий в себя все этапы адаптации печатной платы к производству.

- *Извлечение технологических файлов из P-CAD с последующим импортом в CAM350.* Эти файлы несут в себе информацию о слоях печатной платы, контуре, режимах сверления, а также включают в себя координаты и перечень диаметров отверстий.
- *Поиск и устранение ошибок на печатной плате.* *CAM350* выступает в роли проверочного инструмента для выявления наиболее заметных ошибок, к примеру, узких мест, возникающих между двумя проводниками, проводником и контактной площадкой, а также имеет место несоблюдение гарантийного пояса [3].
- *Мультипликация печатной платы в технологическую заготовку.* Данный этап актуален при массовом производстве печатных плат.

- *Создание программы сверления и обработки по контуру (фрезерование, скрайбирование). CAM350* выступает в роли инструмента, корректирующего режимы фрезерования, сверления и скрайбирования.
- *Этап маркировки групповой заготовки печатных плат.* На данном этапе рассматривается метод маркировки групповой заготовки при помощи сверления отверстий в технологической зоне.

В завершении следует отметить, что данный курс лабораторных по адаптации печатных плат к производству с помощью программного пакета *CAM350* был проведен автором статьи для студентов третьего курса кафедры *ИУ - 4 «Проектирование и технология производства электронно-вычислительных и телекоммуникационных систем»*.

Подробное мультимедийное сопровождение в комплексе с практическими занятиями позволило каждому из студентов вплотную столкнуться с вопросом конструирования печатных плат и адаптации их к массовому производству, а также закрепить знания, полученные ранее по курсу лекций *«Технология производства ЭВА»*.

Литература

1. Документация к программному пакету Downstream Technologies *CAM350* www.downstreamtech.com.
2. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005 – 560с.
3. Саврушев Э.Ц. P-CAD для Windows. Система проектирования печатных плат. Практическое пособие – М.: Издательство ЭКОМ, 2002. – 320с.