На правах рукописи

УДК 004.942

Гладких Алексей Алексеевич

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБИС С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель	член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор Шахнов Вадим Анатольевич					
Официальные оппоненты:	Назаров Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой Рыжиков Илья Анатольевич, канлилат технических наук, доцент.					
	ФГБУН Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, заведующий лабораторией					
Ведущая организация	Федеральное государственное унитарное					

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Пульсар»

Защита диссертации состоится 20 июня 2013 г. 11 часов 00 минут на В Д.002.078.01 диссертационного совета при Федеральном заседании Институте государственном бюджетном учреждении науки проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН) Российская г. Москва, Зеленоград, по адресу: 124365. Федерация, Советская ул., д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИППМ РАН, с авторефератом – на сайте ИППМ РАН www.ippm.ru.

Автореферат разослан 16 мая 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

М.М. Жаров

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) являются основой современной электронной аппаратуры. По мере их развития происходит постоянное усложнение, которое приводит к значительному увеличению числа транзисторов на кристалле (степени интеграции). Кроме снижения критических линейных размеров степень интеграции повышается за счет использования различных дополнительных технологий: мелкощелевой изоляции транзисторов (Shallow Trench Isolation, STI). многоуровневой металлизации И ДŊ. Последовательность операций одного из вариантов STI-процесса и процесса многоуровневой металлизации приведена рисунке 1. STI-процесс на между применяется формирования изоляции транзисторами, для a многоуровневая металлизация позволяет соединить транзисторы и логические элементы. В каждой из этих технологий используется процесс химикомеханической планаризации (ХМП) для удаления рельефа, возникающего из-за применения операций селективного травления и осаждения.

Отметим, что ХМП не позволяет полностью удалить рельеф (остается некоторый разброс толщины диоксида кремния по кристаллу СБИС). Остаточный рельеф поверхности приводит к локальным расфокусировкам в процессе проекционной оптической литографии, следовательно, вероятным выходам размеров элементов за границы допуска, а для STI-процесса может привести к полной неработоспособности схемы.



Рисунок 1 – Рассматриваемые в работе технологические процессы, в которых используется XMП

STI-процесс формирования межтранзисторной изоляции, как и процесс формирования многоуровневой металлизации, может быть реализован с помощью различных вариантов. Для СБИС с нанометровыми размерами элементов (минимальный критический размер которых менее 100 нм)

используется STI-процесс с защитным слоем нитрида кремния и аддитивный процесс формирования многоуровневой медной металлизации. Современные коммерческие системы автоматизированного проектирования (САПР). например, фирмы Mentor Graphics или Cadence Design System, позволяют проводить моделирование таких процессов и выполнять при проектировании СБИС на этапе подготовки к производству (Design For Manufacturing, DFM) модификацию топологических слоев с целью снижения остаточного рельефа поверхности. Данные САПР нацелены на проектирование СБИС ЛЛЯ нанометровыми технологий, и в них отсутствуют модели оценки остаточного рельефа для микросхем с субмикронными размерами элементов. Кроме того возможны различные варианты реализации STI-процесса (например, без использования защитного слоя нитрида кремния, рисунок 1а). В этих САПР не предусмотрена возможность изменения расчетных выражений для оценки остаточного рельефа поверхности после ХМП и, следовательно, алгоритмов модификации топологических слоев с целью снижения остаточного рельефа.

В настоящее время технологиями, позволяющими изготавливать СБИС с нанометровыми размерами элементов, обладают небольшое число полупроводниковых фабрик, а около 40% СБИС производятся по проектным нормам 0,18 – 0,35 мкм [Defense Industrial Base Assessment: U.S. Integrated *Circuit Design and Fabrication Capability* // U.S. Department of Commerce Bureau of Industry and Security Office of Technology Evaluation, 2009; Is 28nm really *here? Now? When?* // Published by Cadence Design Systems. Электронный ресурс. Режим доступа: http://eda360insider.wordpress.com/2011/05/23/is-28nm-reallyhere-now-when. Проверено 16.04.13]. Именно этот диапазон используется для тех случаев, когда требуется получить повышенную надежность интегральных микросхем, например, в случае СБИС, используемых в жестких условиях применения: космические исследования, авиация и т.п. В частности, в НИИ Исследований Российской Академии Наук (НИИСИ РАН) Системных функционирует технологический комплекс ПО производству СБИС С 0,25 – 0,35 мкм, котором минимальными проектными нормами В многоуровневая металлизация формируется на основе алюминия с помощью субтрактивного процесса (рисунок 1б), а межтранзисторная изоляция – с использованием безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске (рисунок 1а).

Таким образом, из сказанного выше следует, что алгоритмическая и программная реализация подходов к проектированию топологических слоев субмикронных СБИС и их интеграция с коммерческими САПР с целью снижения остаточного рельефа поверхности кристалла путем учета результатов процесса ХМП для различных вариантов технологий является важной и актуальной задачей.

Состояние проблемы. Современные коммерческие САПР не позволяют модифицировать топологические слои с целью снижения остаточного рельефа поверхности после ХМП на основе моделирования в безнитридном STI-процессе с травлением по обратной маске и субтрактивном процессе формирования многоуровневой алюминиевой металлизации. Это связано с отсутствием в существующих в настоящее время коммерческих САПР точных моделей ХМП для расчета рельефа диоксида кремния по площади всего кристалла и алгоритмов модификации топологических слоев на основе моделирования для указанных процессов.

Базовые подходы к моделированию ХМП диоксида кремния по площади всего кристалла СБИС были изложены в научных работах и статьях, проведенных в Массачусетском Технологическом Институте (МТИ), Д.О. Оума (D.O. Ouma), Б. Стина (В. Stine), Д. Бонинга (D. Boning), продолжение работ по данной тематике представлено Т.Х. Смитом (Т.Н. Smith), Б. Ли (В. Lee). В настоящее время данные работы продолжили свое развитие в области расчета характеристик остаточного рельефа после ХМП для аддитивного процесса многоуровневой медной металлизации.

Вопросы моделирования XMП для небольшой области кристалла были представлены работах П. Бурке (P. Burke), Дж. Варнока (J. Warnok). Кроме этого моделирование скорости планаризации в зависимости от технологических параметров XMП было проведено в работах Р.В. Гольдштейна, Н.М. Осипенко (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН) и др.

Подходы к минимизации разброса толщины межслойного диэлектрика на основе плотности заполнения были освещены в работах А. Канга (A. Kahng), Р. Бона (R. Boone), Р. Тиана (R. Tian).

Цель работы заключается В разработке моделей процесса химикомеханической планаризации и алгоритмов модификации топологических слоёв субмикронных СБИС, а также их реализации в виде программного комплекса, скорректировать тем позволяющего топологию И самым уменьшить остаточный рельеф поверхности кристалла.

#### Решаемые задачи:

1. Разработка полиномиальной модели процесса ХМП диоксида кремния, алгоритма калибровки её параметров и разработка модели процесса ХМП для технологии формирования межтранзисторной изоляции с помощью безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске.

2. Калибровка и верификация разработанных моделей ХМП по экспериментальным данным технологического процесса НИИСИ РАН. Проведение сравнительного анализа результатов калибровки полиномиальной модели с ранее существовавшими моделями.

3. Разработка алгоритмов снижения остаточного рельефа для субтрактивного процесса многоуровневой металлизации и безнитридного STI-процесса, которые при проектировании СБИС путем модификации слоев металлизации и обратной маски с учетом особенностей технологического процесса ХМП на основе предложенных моделей позволяют повысить планарность поверхности кристалла.

4. Разработка алгоритма обработки топологической информации, представленной в формате GDSII, позволяющего использовать предложенные модели ХМП для оценки качества процесса планаризации при формировании многоуровневой металлизации и безнитридного STI-процесса в алгоритмах снижения остаточного рельефа поверхности кристалла СБИС.

5. Разработка программного комплекса моделирования процесса ХМП, в котором реализованы полиномиальная модель, модель безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске и алгоритмы модификации размещения структур заполнения и размеров элементов на обратной маске, а также интеграция программного комплекса с коммерческой САПР DFM, такой как Mentor Graphics Calibre.

6. Проведение модельных исследований с помощью разработанного программного комплекса для подтверждения эффективности предложенных

алгоритмов путем оценки изменения остаточного рельефа поверхности кристалла СБИС после модификации топологических слоев.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач были использованы: теория оптимизации, математический аппарат теории вероятностей, математической статистики, алгоритмы вычислительной геометрии, методы структурного и объектно-ориентированного программирования.

### Научная новизна работы:

1. Разработана модель ХМП субтрактивного процесса многоуровневой металлизации для ее применения при проектировании СБИС с учетом технологического процесса, отличающаяся особенностей OT ранее существовавших расчетных тем. что В ee выражениях используются для определения полиномиальные зависимости, а параметров модели калибровки. Это позволяет повысить разработан алгоритм точность моделирования остаточного рельефа поверхности.

2. Разработана модель XMП для STI-процесса, отличающаяся тем, что в процессе моделирования учитывается двойная ступенька в рельефе перед планаризацией, что позволяет использовать эту модель при расчете остаточного рельефа после XMП в безнитридном STI-процессе с травлением по обратной маске. Это дает возможность при проектировании СБИС модифицировать топологический слой обратной маски на основе моделирования таким образом, чтобы снизить остаточный рельеф поверхности кристалла СБИС.

3. Предложено использовать рекурсивную декомпозицию топологического слоя СБИС в алгоритме расчета локальной плотности заполнения, в результате чего становится возможным применять предложенные модели процесса ХМП для безнитридного STI-процесса и для субтрактивного процесса формирования многоуровневой металлизации при проектировании СБИС с учетом особенностей технологического процесса.

4. Разработаны алгоритмы снижения остаточного рельефа поверхности после ХМП за счет оптимизации числа структур заполнения в квадрате моделирования и путем модификации размеров элементов на обратной маске. Алгоритмы отличаются тем, что количество структур заполнения и изменение размеров элементов на обратной маске определяются на основе предложенных моделей ХМП и, при этом, с помощью САПР DFM учитываются ограничения на локальную плотность заполнения для операции плазмо-химического травления.

**Достоверность** полученных научных результатов, выводов И рекомендаций квалификационной работы подтверждена результатами исследований проведенных полупроводниковом экспериментальных на производстве НИИСИ PAH. результатами применения разработанной математической модели процесса ХМП, реализованной с помощью пакета прикладных программ «MATLAB» фирмы «MathWorks» и модельными исследованиями метода оптимизации топологических слоев СБИС, алгоритмы которого реализованы на языке C++ для OC с ядром Linux.

#### На защиту выносятся следующие положения:

1. Преобразование эффективной плотности заполнения в распределение толщины диоксида кремния после ХМП в субтрактивном процессе формирования многоуровневой металлизации проводится по разработанной в рамках работы полиномиальной модели, а калибровка её параметров выполняется согласно разработанному алгоритму. Это позволяет снизить ошибку моделирования и проводить при проектировании СБИС модификацию топологических слоев

металлизации структурами заполнения на основе моделирования ХМП.

2. Расчет толщины диоксида кремния после ХМП для безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске проводится по предложенной в работе модели, что позволяет вычислять остаточный рельеф поверхности и проводить при проектировании СБИС модификацию размеров элементов топологического слоя обратной маски на основе моделирования ХМП.

локальной плотности осуществляется 3. Расчет заполнения c помошью слоя СБИС. рекурсивной декомпозиции топологического ЧТО позволяет ХМП с использованием реализовать возможность моделирования процесса отличных от встроенных в быстродействующие коммерческие САПР DFM моделей ХМП и интегрировать предложенные модели в алгоритмы модификации топологических слоев.

4. Внедрение разработанных алгоритмов модификации топологического слоя СБИС на основе моделирования позволяет уменьшить остаточный рельеф поверхности после ХМП для процесса многоуровневой металлизации в среднем на 30 %, а для безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске на 70 %.

**Практическая значимость.** Разработанные в работе алгоритмы и модели процесса ХМП, а также программный комплекс моделирования процесса ХМП «CMPETools» и программные модули «Matlab» внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э.Баумана и на производстве НИИСИ РАН. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что:

1. Разработанная полиномиальная модель процесса ХМП диоксида кремния и алгоритм калибровки её параметров позволяют снизить ошибку моделирования процесса ХМП для технологии многоуровневой металлизации по различным тестовым структурам в пределах от 20% до 55%.

2. Разработанная модель XMП для STI-процесса позволяет проводить моделирование нестандартного STI-процесса, в котором не используется нитрид кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и при этом применяется травление по обратной маске.

3. Реализована возможность моделирования процесса ХМП путем использования алгоритма рекурсивной декомпозиции в алгоритмах модификации топологических слоев при проектировании СБИС, что позволяет применить разработанные в работе модели ХМП в способе снижения остаточного рельефа поверхности в случае субтрактивного процесса многоуровневой металлизации и безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске.

4. Разработанный алгоритм модификации топологического слоя при проектировании СБИС структурами технологии заполнения ДЛЯ многоуровневой металлизации и алгоритм модификации обратной маски для безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске за счет изменения плотности заполнения топологического рисунка слоев металлизации И обратной маске позволяют снизить остаточный рельеф поверхности диоксида кремния в среднем на 30 % и 70 %, соответственно.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XII и XIII молодежной международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2010, 2011) и опубликованы в сборнике докладов конференций (XII, XIII и XIV), в сборнике научных работ факультета ИУ №7, в сборнике статей «Наноинженерия-2010», «Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты» (Москва, 2009, 2011), «Вестник МГТУ» (Москва, 2012, серия: «Приборостроение»), электронном научно-техническом издании: Наука

и образование (2012), «Итоги диссертационных исследований» (М.:РАН, 2012).

Работа отмечена дипломами 1 степени молодежных научно-технических конференций «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2010 и 2011), дипломом по итогам «Всероссийского конкурса НИР студентов ВУЗов в области нанотехнологий и наноматериалов» (2010), стипендиями Президента РФ и Клуба Императорского Технического Училища (2011). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615167 CMPEtools (от 1-го июля 2011).

Публикации. По материалам и основному содержанию работы опубликованы 12 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них 2 научные работы опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 178 страниц машинописного текста, содержащего 87 рисунков и список литературы из 73 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** рассматриваются актуальность, научная новизна работы, определяются цели и задачи исследования.

Указаны некоторые обстоятельства требующие снижения проектных норм и увеличение плотности размещения элементов на кристалле СБИС. Из-за того, что размеры кристаллов современных СБИС не могут постоянно увеличиваться, чему препятствуют следующие: ограничения экономической эффективности (процент неиспользуемой площади пластины), неравномерность обработки для различных операций и снижение выхода годных (большей площади возможно большее число случайных дефектов приводящих к неработоспособности СБИС).

Таким образом, необходимо уменьшение размеров элементов, то есть минимальной проектной нормы. С этой целью необходимо увеличение числовой апертуры и снижение длины волны экспонирующего излучения, что в свою очередь приводит к снижению глубины фокусировки оптической системы. Меньшая глубина фокусировки означает, не возможность получения минимального критического размера с заданным допуском для некоторого диапазона фокусных расстояний. Следовательно, необходима минимизация остаточного рельефа, на котором формируется литографическое изображение.

Отмечены основные причины возникновения рельефа поверхности при изготовлении СБИС. Так как технология СБИС основана на формировании заданных топологических областей, что добиваются путем применения селективного травления. В результате чего на поверхности кристалла СБИС после этой операции возникает рельеф. При последующей операции осаждения межслойного диэлектрика данный рельеф будет сохранен.

Анализ непосредственно технологических процессов, в которых используется ХМП, ее моделей и методов снижения остаточного рельефа представлены в первой главе диссертации.

**В первой главе** изложены существующие способы снижения разброса толщины диоксида кремния после процесса ХМП. Показано, что в случае формирования многоуровневой металлизации для снижения остаточного

рельефа диоксида кремния используются структуры заполнения (далее C3), которыми по выбранному алгоритму заполняются пустые области топологических слоев с целью изменения их плотности заполнения.

Рассмотрено применение способа автоматизированного размещения СЗ на основе правил (*Rule-Based Dummy Fill*). Данный способ применяется в большинстве коммерческих САПР при выравнивании плотности заполнения в технологии многоуровневой металлизации с использованием алюминия. Показано, что применение способа заполнения топологического слоя на основе моделирования ХМП (*Model-Based Dummy Fill*) более эффективно, однако требует разработки точных и стабильных моделей расчета толщины диоксида кремния.

Приведено общее описание способа снижения остаточного рельефа диоксида кремния после ХМП в случае STI-процесса, в котором применяется модификация элементов обратной маске с целью снижения разброса толщины диоксида кремния. Показано, что такой метод может быть применен только к STI-процессу, в котором используется травление по обратной маске, что даёт дополнительную (к C3) возможность существенного снижения остаточного рельефа диоксида кремния.

Рассмотрен этап формирования межтранзисторной изоляции полупроводниковых структур. Основное внимание было уделено STI-процессу, и в частности тому его варианту, в котором нитрид кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в качестве защитного слоя не используется, но при этом выполняется травление по обратной маске (рисунок 1а). Показано, что по его окончанию непосредственно перед ХМП возникает структура с двойной ступенькой. Подробный анализ этого варианта обусловлен его применением в технологической линии, на базе которой выполняялось данное исследование.

Рассмотрен субтрактивный процесс формирования многоуровневой алюминиевой металлизации (рисунок 1б). Показано, что хотя субтрактивный процесс и применяется в большинстве случаев для проектных норм больших 0,18 мкм, в работе исследование процесса ХМП было проведено для субтрактивного процесса, что связано с его использованием в исследуемом производстве СБИС. Отмечено, что в настоящее время около 40% всех выпускаемых СБИС производится именно по таким технологическим нормам.

Поскольку операция осаждения диоксида кремния изменяет рельеф поверхности, проведен анализ основных её особенностей. Показано, что при моделировании осаждения диоксида кремния изменение плотности заполнения топологического слоя может быть учтено путем увеличения ширины всех проводников с каждой стороны на величину равную *k*·*B*, где *k* – некий постоянный корректирующий коэффициент, меньший 1. Модель разработана в предположении, что слой диоксида имеет прямоугольный профиль. Это позволяет считать, что во время выполнения процесса XMП, плотность заполнения топологического слоя диоксидом кремния постоянна.

Приведены результаты исследований, ранее проведенных в Массачусетском Технологическом Институте, которые показали, что основным параметром, от которого зависит распределение толщины диоксида кремния после ХМП, является плотность заполнения нижележащего топологического слоя. Представлены тестовые фотошаблоны (ФШ), которые использовались в исследовании, и полученные с их помощью результаты. Кроме этого представлен обобщенный алгоритм моделирования ХМП (рисунок 2).



Рисунок 2 – Обобщенный алгоритм моделирования ХМП

Изложен алгоритм расчета распределения диоксида кремния после ХМП, включающий в себя моделирование операции осаждения диоксида кремния на рельеф нижележащего слоя, вычисление локальной плотности заполнения топологии в виде матрицы коэффициентов D, и расчет матрицы эффективной плотности заполнения Ф. с помощью которой моделируется распределения давления полирующей подушки на пластину. На заключительном этапе реализации матрицу эффективной алгоритма, используя плотности заполнения И экспериментальным процесса откалиброванную ПО данным модель  $XM\Pi$ , вычисляется толщина остаточного диоксида кремния и тем самым остаточный рельеф поверхности.

Описан алгоритм расчета элементов матрицы эффективной плотности заполнения D, в котором весь топологический слой СБИС сначала разбивается на квадраты со стороной a, площадь которых равна  $S_{\kappa B} = a^2$ , а затем вычисляется суммарная площадь топологических элементов  $S_{3\pi}$  с учетом величины  $k \cdot B$ . Тогда элементы матрицы локальной плотности заполнения определяются как:  $d_{ij} = S_{ij} \cdot \pi/S_{\kappa B}$ .

Показано, что вследствие деформации полирующей подушки каждый из элементов матрицы эффективной плотности  $d_{ij}$  зависит от значений локальных плотностей в квадратах, которые лежат на расстоянии, не превышающем *максимального радиуса*  $r_{max}$  ядра свертки. Причем на некотором расстоянии, меньшем *PL*, называемым *длиной планаризации*, максимально проявляется взаимное влияние близлежащих топологических элементов.

В заключительном параграфе главы непосредственно рассмотрены существующие модели процесса XMП базирующиеся на понятии эффективной плотности заполнения.

Первая такая модель процесса XMП была предложена Д.Оума (линейная модель). При наличии рельефа на пластине данная модель считает, что скорость планаризации материала (СПМ) зависит от эффективной плотности заполнения  $\Phi$  следующим образом:

$$C\Pi M = \frac{dh}{dt} = -\frac{BR}{\varphi_{ij}(h)} \tag{1}$$

где h – толщина диоксида кремния, отсчитываемая от некоторой базовой точки, BR – скорость удаления материала при 100% заполнении слоя, то есть при отсутствии рельефа на поверхности пластины. Зависимость конечной толщины диоксида кремния от времени планаризации была получена путем интегрирования уравнения (1):

$$h_0 - h_{ij} = \frac{BR \cdot t}{\varphi_{ij}} npu \ BR \cdot t \le \varphi_{ij} h_1 \quad u \quad h_1 + BR \cdot t - \varphi_{ij} h_1 \ npu \ BR \cdot t > \varphi_{ij} h_1$$
(2)

Следующим этапом развития модели процесса ХМП, в которой также было использовано понятие эффективной плотности заполнения топологического слоя СБИС, была модель, предложенная Т. Смитом (модель с временной зависимостью). Основное отличие этой модели от предыдущей состояло в учете нелинейности скорости планаризации локальной ступеньки. Начальные скорости планаризации для обеих моделей совпадают. Но после удаления локальной ступеньки, вместо ступенчатого изменения СПМ, в модели с временной зависимостью предложено экспоненциальное изменение СПМ. Таким образом, данная модель позволяет повысить точность моделирование ХМП за счет учета изменения СПМ во времени.

Помимо моделей для расчета распределения толщины диоксида кремния применительно к процессу многоуровневой металлизации рассмотрены модели для STI-процесса. Проведен сравнительный анализ данных моделей, который показал, что:

Во-первых, модели были сформулированы только для STI-процесса, в котором нитрид кремния. Как следствие, результатом расчета используется c использованием данных моделей является распределение эрозии нитрида и величина впадин диоксида кремния между активными областями. Отмечено, что расчет этих параметров не имеет смысла для безнитридного STI-процесса, так как взаимодействие полирующей подушки с защитным слоем не происходит. Вместо этого, как и в случае процесса формирования многоуровневой металлизации, распределения толщины необходимо вычисление диоксида кремния нал функциональным слоем.

Во-вторых, модели не учитывают шага травления по обратной маске. Таким образом, из-за наличия двойной ступеньки диоксида кремния перед ХМП, возникает скачкообразное изменение СПМ во время планаризации, что также не учитывается в данных моделях.

Таким образом, из проведенного литературного обзора показано, что в настоящее время не существует САПР, позволяющих проводить модификацию топологических слоев СБИС на основе моделирования ХМП с целью снижения остаточного рельефа для безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске и субтрактивного процесса формирования многоуровневой металлизации.

Для оценки точности проанализированных моделей ХМП при формировании многоуровневой металлизации требуется проведение калибровки по экспериментальным данным. Кроме этого, отмечено, что в настоящее время не существует моделей, позволяющих проводить моделирование остаточного рельефа поверхности для безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске.

Представленные же в настоящее время алгоритмы снижения остаточного рельефа поверхности также не могут быть использованы в силу ряда причин: вопервых, отсутствует их реализация в коммерческих САПР, во-вторых, данные алгоритмы не учитывают требований всех шагов технологического процесса. Так данные алгоритмы изменяют локальную плотность заполнения произвольно, никак не учитывая требования операции плазмо-химического травления. Кроме этого, выбор числа структур заполнения осуществляется только на основе распределения плотности заполнения.

Во второй главе изложены результаты экспериментальной работы проведенной с целью исследования ХМП и получения калибровочных и верификационных данных. Для чего был разработан тестовый ФШ, размером 20×20 мм, аналогичный шаблону, использованному в Массачусетском Технологическом Институте (МТИ), в котором были размещены 25 блоков с тестовыми структурами (далее TC), позволяющими определить параметры указанных моделей ХМП. Каждый из блоков TC представлял собой набор линий различного размера с изменяющимися расстояниями между ними.

Изложены результаты калибровки и верификации моделей ХМП для случая использования подушки «FX9». Для этого была проведена планаризация пяти пластин (на пластинах предварительно была сформирована рельефных топология тестовых ФШ) при различных временах ХМП: 70, 140, 210, 280 и 350 эксперимент проводился полирующей секунд. Также с подушкой «IC1000/SubaIV», при этом использовались следующие времена планаризации: 50, 100, 150, 200 и 300 секунд. Каждым из этих времен обрабатывалась по 3 пластины, целью этого было: во-первых, статистическая обработка данных, вовторых, анализ зависимости характеристик планаризации от последовательности обработки пластин. Полученные экспериментальные данные были разделены на калибровочный, далее набора: использовавшийся для два определения параметров модели, и верификационный, отличавшийся от калибровочного, и использовавшийся для её проверки.

Во время калибровки рассмотренных моделей использовались различные последовательности входных данных с целью получения наименьшей ошибки моделирования. По итогам выбраны лучшие по критерию Root Mean Square Error (RMSE) модели различных типов.



Рисунок 3 – Результат калибровки модели линейной модели (а) и модели с временной зависимостью (б) для «FX9»

Результат калибровки линейной модели с наименьшей ошибкой представлен на рисунке За. Получено, что модель с временной зависимостью более точная (рисунок 3б). Так ошибка при калибровке линейной модели составила 371 Å, при верификации по 2-й группе блоков – 290 Å и по 3-й группе – 417 Å, тогда

как для модели с временной зависимостью эти значения составили 303 Å, 262 Å и 407 Å соответственно.

В результате анализа калибровки и верификации моделей показано, что они не в состоянии описать поведение остаточной толщины межслойного диэлектрика (МСД) в областях с низкой плотностью заполнения в диапазоне времен планаризации. Для устранения этого недостатка была предложена полиномиальная модель. Выражение в общем виде для полиномиальной модели процесса ХМП диоксида кремния при формировании МСД имеет следующий вид:

$$H(t,\varphi_{ij}) = h_0 - h_1 \left( 1 - \sum_{r=1}^{M_s} a_{0,r} \varphi_{ij}^{r} \right) + \sum_{k=1}^{N_s} \left[ \sum_{r=1}^{M_s} a_{k,r} \varphi_{ij}^{r} \right] \cdot t^k$$
(3)

Предложенная качестве параметров использует: длину модель. В планаризации *PL*, максимальный радиус  $r_{max}$ , а также матрицу коэффициент *S* с модель была разработана элементами а<sub>іі</sub>. Полиномиальная на основе зависимости остаточной толщины диоксида кремния от плотности заполнения. Для имеющихся экспериментальных данных было построено скользящее среднее с целью фильтрации случайных выбросов. В результате чего стала видна нелинейность данной зависимости, что и было предложено описать с помощью полинома, который далее вошел в выражение самой модели (3).

Предложен алгоритм получения параметров полиномиальной модели. Вообще говоря, это не является тривиальной задачей, и она не может быть решена методом аналогичным для ранее предложенных моделей, что связано с большим числом коэффициентов, входящих в разработанную модель. Предложенный алгоритм представлен на рисунке 4 и состоит из двух основных этапов: определения параметров аналогичных линейной модели и определение коэффициентов полиномов.



Рисунок 4 – Алгоритм поиска коэффициентов полиномиальной модели

Первый этап необходим для построения зависимости остаточной толщины диоксида кремния от эффективной плотности заполнения и, далее, от времени планаризации для различных её значений. После этого, на втором этапе, вычисляются (путем регрессионного анализа) коэффициенты полиномов для аппроксимации остаточной толщины от времени планаризации при различных значениях эффективной плотности заполнения (назовем их временны́ми). Следующим шагом второго этапа является вычисление полиномов, которые аппроксимируют коэффициенты временных полиномов от плотности заполнения. Таким образом будет получена матрица с элементами  $a_{k,r}$ , которая может быть использована при вычислении выражения (3). С целью проверки устойчивости коэффициентов возможно применения дополнительного действия, в котором проводится оптимизация матрицы коэффициентов полиномов с начальным приближением, найденным на втором шаге.

С помощью разработанного алгоритма поиска коэффициентов полиномиальной модели была проведена её калибровка с использованием данных полученных для «FX9», после чего проведена верификация модели. Результаты калибровки и верификации полиномиальной модели представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Результат калибровки и верификации полиномиальной модели процесса XMП

Отмечено, что после калибровки и верификации *RMSE* составила 191 Å и 404 Å соответственно. По сравнению с линейной моделью, снижение ошибки при калибровке и верификации составило 49 % и 20 %, соответственно, а в сравнении с моделью с временной зависимостью – 37 % и 18 %.

Отмечено, что разработанная полиномиальная модель может быть применима для STI-процесса, в котором планаризация заканчивается до достижения защитного слоя, но при этом также и не используется травления по обратной маске. В случае травления по обратной маске и возникновения двойной ступеньки данная модель неприменима. Для моделирования STI-процесса без использования Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с травлением по обратной маске предложена следующая линейная модель:

$$H_{ij}(t) = \begin{cases} h_{ox} - BR \cdot t / \varphi_{1,ij} & BR \cdot t < \varphi_{1,ij} h_s \\ h_{ox} - h_s \left( 1 - \frac{\varphi_{1,ij}}{\varphi_{2,ij}} \right) - \frac{BR}{\rho_{2,ij}} t & (\varphi_{1,ij} h_s \le BR \cdot t) \land \\ h_{ox} - h_s - h_e + (\varphi_1 h_s + \varphi_2 h_e) - BR \cdot t & BR \cdot t \ge \varphi_{1,ij} h_s + \varphi_{2,ij} h_s \end{cases}$$
(4)

где  $h_{ox}$  – толщина осаждаемого диоксида кремния на пластину, имеющую рельеф поверхности,  $h_s$  – толщина активной области кремниевых структур,  $h_e$  – высота второй ступеньки,  $\varphi_1$  – эффективная плотность заполнения, образованная первой ступенькой,  $\varphi_2$  – эффективная плотность заполнения,

образованная второй ступенькой.

<u>В третьей главе</u> проведена разработка алгоритмов необходимых для реализации способа заполнения топологического слоя СБИС на основе моделирования. В заключительном разделе главы приведено описание разработанного программного обеспечения для модификации топологических слоев СБИС с целью снижения остаточного рельефа диоксида кремния.

проведения многократного моделирования алгоритмах пелью В модификации топологических слоев СБИС при снижении остаточного рельефа диоксида кремния после ХМП и возможности использования предложенных моделей процесса ХМП в этих алгоритмах в главе был предложен алгоритм расчета локальной плотности заполнения топологического слоя (рисунок 6). В алгоритма использована рекурсивная декомпозиции элементов основе топологического слоя СБИС.



Рисунок 6 – Рекурсивный алгоритм расчета локальной плотности заполнения

Представлена задача расчета локальной плотности, которая заключается в пересечении К квадратов моделирования с N элементами топологического слоя СБИС. Установлено, что если топологический слой содержит Ν многоугольников, то вычислительная сложность алгоритма в операциях пересечения равна  $R = O(N \times K)$ . Для топологии СБИС 10×10 *мм* с минимальной проектной нормы 0,35 мкм, и размером квадрата 80×80 мкм это составляет 78×10<sup>9</sup> операций пересечения. Для современных компьютерных систем выполнение такого числа операций пересечения за приемлемое время затруднительно. Показано, что использование такого алгоритма рекурсивной декомпозиции топологического слоя позволяет снизить вычислительную сложность до расчета локальной плотности заполнения до значения R = O(N). В работе приведено обоснование выбора количества областей декомпозиции (равного 4-м) для каждого шага рекурсивного разбиения.

Показано, что при расчете локальной плотности заполнения большое число операций пересечения вызвано пересечением *ij*-квадрат со всеми полигонами в топологии. Хотя является очевидным, что ни один квадрат из левого нижнего угла не может пересечься с полигонами верхнего правого угла. Для того, чтобы сократить вычислительные затраты было предложено использовать рекурсивную декомпозицию топологического слоя. Алгоритм имеет схожесть с «быстрой сортировкой». В таком случае алгоритм заключается в следующем: топология последовательно делится на равные части на основе того. что полигон лежит полностью или нет в заданной области, или же пересекает её. Далее каждая из областей вновь разделяется на четыре части, до тех пор, пока не будет достигнут заданный размер квадрата моделирования. Только после этого выполняется пересечение квадрата и элементов топологии. Это выполняется по алгоритму Сазерленда-Ходгмена, позволяющего вычислить пересечение выпуклого и произвольного полигона. С целью увеличения быстродействия в работе предложено определять возможность пересечения элемента топологии с заданной областью С помошью минимальной прямоугольной «оболочки» полигона.

Разработан алгоритм модификации топологического слоя СБИС СЗ на основе моделирования ХМП при формировании многоуровневой металлизации (рисунок 7). Алгоритм позволяет найти *квазиоптимальное* число СЗ для каждого из квадратов, которое минимизирует значение остаточного рельефа диоксида кремния. Расчет числа СЗ, добавляемых в топологию для каждой итерации, осуществляется с использованием следующего выражения:  $N_{ij} = [G \cdot (h_{cp} - h_{ij})]$ , где G – «скорость заполнения»,  $h_{cp}$  – среднее значение толщины диоксида кремния.



Рисунок 7 – Алгоритм заполнения топологического слоя на основе моделирования процесса XMП при формировании многоуровневой металлизации

Кроме того, на базе предложенного алгоритма заполнения разработан алгоритм, позволяющий снизить остаточный рельеф диоксида кремния после ХМП для STI-процесса. Однако в нём уже выполняется модификация топологии обратной маски. Также отличием алгоритма модификации обратной маски от приведенного на рисунке 7, является оптимизация значения коэффициента G. Отмечено, что это связано с большей чувствительность результатов модификации топологии (разброс толщины диоксида кремния после моделирования) к данному коэффициенту. Данный коэффициент можно определить путем выполнения 2-3 запусков всего алгоритма заполнения коэффициента G выполняется более чем за 10 итераций всего алгоритма модификации обратной маски.

В заключительной части главы представлено описание программного комплекса моделирования ХМП, в который включены разработанные в реферируемой главе модели планаризации, алгоритм расчета локальной плотности и алгоритмы снижения остаточного рельефа диоксида кремния. Приведено описание подходов, с помощью которых был реализован комплекс. Отображена структура, диаграмма компонентов программного комплекса, а также представлено их описание.

Помимо общего описания программных компонентов комплекса приведена диаграмма, показывающая взаимосвязь между разработанными модулями программы, которая представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Диаграмма, показывающая взаимосвязь между модуля, разработанного на C++ комплекса и разработанными модулями Matlab моделирования XMП

Данная диаграмма показывает основные функции, каждого из модулей, а также основные потоки информации, передаваемой между разработанными и сторонними модулями. В завершении раздела согласно диаграмме приведена методика использования разработанных модулей, применяемая при построении модели процесса ХМП и для модификации топологических слоев СБИС.

**Четвертая** глава посвящена практическому применению разработанных моделей и алгоритмов. Представлены результаты калибровки полиномиальной и других моделей по экспериментальным данным для полирующей подушки «IC1000/SubaIV». Проведено сравнение точности моделей, результаты которого представлены в таблице 1. Точность моделей в данном случае оценивалась следующим образом: представлено число точек, в которых результаты моделирования находятся в интервале разброса данных измерений.

Таблица 1 – Процентное соотношение числа точек, в которых модель попадает в интервал разброса данных измерений

Модоль			Среднее			
Мосель	50	100	150	200	300	значение, %
Линейная модель	28	40	52	82	84	58
Модель с временной зависимостью	80	52	32	80	92	67
Полиномиальная модель	88	88	92	88	96	90

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что разработанная полиномиальная модель имеет более высокую точность расчета толщины межслойного диоксида кремния, чем ранее существовавшие модели.

Представлены результаты калибровки разработанной модели XMП STIпроцесса без  $Si_3N_4$  с травлением по обратной маске. Установлено, что результат моделирования лежит в пределах технологического разброса толщины для 75 % тестовых кристаллов.

Приведены результаты сравнения времени расчета локальной плотности заполнения по разработанному алгоритму и алгоритмам, реализованным в следующих САПР: Klayout, Cadence Design System (CDS) Assura, Mentor Graphics (MG) Calibre. Сравнение проводилось для *однопроцессорного* варианта алгоритма на двух различных конфигурациях: GNU GCC, OC Debian Linux x86, Intel Core 2 Duo P8400@2.26 GHz и Sun Studio C++ Compiler, OC CentOS 4.8 x64, AMD Opteron 2.80 GHz. Полученные результаты времени расчета представлены в таблице 2. Для всех тестов использовался одинаковый размер квадрата моделирования, равный 20×20 мкм.

Таблица 2 – Сравнение времени (в секундах) расчета локальной плотности заполнения с использованием разработанного алгоритма и алгоритмов используемых в различных САПР

	Общее			Конфигу	рация 1	Конфигурация 2		
N⁰	количество	$K_X$	$K_{Y}$	Разработанный	MG	CDS	Разработанный	Klavout
	элементов			алгоритм	Calibre	Assura	алгоритм	Nayout
1	2 794 663	393	394	22	21	65	29	324
2	5 510 985	465	525	32	65	223	32	521
3	3 969 315	569	569	46	46	173	51	604
4	3 738 221	565	565	41	28	148	49	623
5	2 954 181	511	511	23	14	80	26	459
6	3 738 457	565	565	41	51	133	50	621
7	964 753	475	498	9	8	21	11	320
8	2 939 824	615	615	48	46	136	58	748
9	29 278 267	633	510	450	615	_	_	_

где K<sub>x</sub> и K<sub>y</sub> – число квадратов моделирования по горизонтали и вертикали соответственно.

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что разработанный алгоритм позволяет выполнять расчет локальной плотности заполнения с быстродействием на порядок выше системы с открытым исходным кодом. Кроме этого, для некоторых топологий требуется меньшее время для расчета локальной плотности заполнения с использованием разработанного алгоритма, чем с помощью алгоритма MG Calibre. Следует отметить, что приведенные результаты были получены для однопроцессорного варианта алгоритма И лля неиерархического представления топологии. Основной же задачей данного расчета алгоритма является не повышение скорости В сравнении С коммерческими САПР, а возможность использования предложенных моделей процесса ХМП в алгоритмах модификации топологических слоев СБИС с целью остаточного рельефа. Как приведенной снижения видно ИЗ таблицы быстродействие алгоритма выше системы с открытым исходным кодом Klayout и системы CDS Assura, таким образом, его целесообразно применять в алгоритмах снижения остаточного рельефа поверхности, что в свою очередь позволяет использовать разработанные модели ХМП.

Таблица 3 – Результаты оптимизации числа СЗ на основе моделирования XMП в процессе формирования многоуровневой металлизации

No	Тип топологии	Рельеф, Å		Ср. знач., Å		Макс. СЗ на		Снижение	
/₩≌	кристалла	До	После	До	После	квадрат		рельефа, %	
1	Микропроцессор	1577	1006	6864	6563	8.2	36.1	36.2	75.5
2	Тестовый кристалл	890	306	6384	5496	9.3		65.6	
3	Микропроцессор	910	550	6867	6668	2.5	13.4	39.6	67.3
4	Тестовый кристалл	1082	514	5862	5490	4.6		52.5	
5	СОЗУ	1300	1300	7496	7406	0.2		(	)
6	Микропроцессор	1530	1279	6823	6696	3.0		3.0 16.4	
7	Микропроцессор	1215	631	6960	6642	7.4		48.0	
8	Микропроцессор	1696	1192	6479	6767	1.9		29.7	
9	Тестовый кристалл	1454	684	6131	5685	9.5		53	.0
10	Микропроцессор	1208	611	6960	6540	7.4 30.1		49.4	69.9

Таблица 4 – Результаты оптимизации обратной маски на основе моделирования на основе моделирования ХМП в STI-процессе

No	Тип топологии	Рель	еф, Ă	Ср. з	нач., Å	$G \times 10^{3}$	Снижение
/₩≌	кристалла	До	После	До	После	9 2 10	рельефа, %
1	Микропроцессор	239	80	1447	1602	19,4	66.5
2	Микропроцессор	457	132	1668	1954	9,1	71.1
3	Микропроцессор	618	279	1070	1497	9,2	54.8
4	Микропроцессор	263	66	1662	1839	19,8	74.9
5	СОЗУ	340	340	1100	1105	15,4	0
6	Тестовый кристалл	565	122	1198	1699	7,0	78.4
7	Тестовый кристалл	180	49	1733	1885	14,3	72.7
8	Микропроцессор	667	167	1558	1993	7,7	74.9

С помощью предложенных моделей и алгоритмов проведена оптимизация числа СЗ для 20 кристаллов СБИС (результаты для 10 из них представлены в 3). Результаты использование таблице моделирования показали, что представленного алгоритма позволяет снизить остаточный рельеф поверхности межслойного диоксида кремния в среднем на 30 %. Установлено, что величина снижения остаточного рельефа зависит от типа топологии кристалла.

Кроме того, установлено, что снижение размера СЗ до минимального разрешенного проектными нормами приводит к дополнительному снижению остаточного рельефа межслойного диоксида кремния (таблица 3, 1-й, 3-й и 10-й кристалл).

Из приведенного на рисунке 9 распределения толщины диоксида кремния после XMП для процесса формирования многоуровневой металлизации можно увидеть существенное снижение остаточного рельефа поверхности диоксида кремния после оптимизации числа СЗ в квадрате моделирования.



Рисунок 9 – Распределение толщины SiO<sub>2</sub> (в ангстремах) до (слева) и после (справа) оптимизации числа СЗ в квадратах для кристалла №10 (таблица 3)

Изложены результаты для STI-процесса работы алгоритма модификации обратной маски на основе моделирования XMП. Эти результаты сведены в таблицу 4, из которой видно, что использование предложенного алгоритма модификации обратной маски дает снижение остаточного рельефа диоксида кремния после XMП в среднем на 65 %. В качестве примера, иллюстрирующего работу алгоритма на рисунке 10, приведен результат моделирования до и после оптимизации размеров на обратной маске.



Рисунок 10 – Распределение толщины SiO<sub>2</sub> (в ангстремах) до (слева) и после (справа) оптимизации размеров на обратной маске для кристалла №6 (таблица 4)

В заключительной части главы показано, что отсутствие снижения остаточного рельефа поверхности диоксида кремния при оптимизации числа СЗ в топологии СБИС, содержащей блоки статической памяти (СОЗУ), а также небольшое снижение для некоторых других топологий, связано с малым

максимальным числом C3 на квадрат моделирования. Это также характерно и при оптимизации обратной маски, так как на обратной маске могут быть уменьшены только те элементы, которые после преобразования будут удовлетворять проектным нормам. Таким образом, для модификации, идеально подходят только относительно большие элементы, например C3.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана полиномиальная модель ХМП при формировании многоуровневой металлизации, для определения ее параметров разработан алгоритм калибровки. Показано, что применение полиномиальной модели ХМП позволяет снизить ошибку моделирования по различным типам тестовых структур до 55% по сравнению с ранее существовавшими моделями.

2. Разработана модель ХМП безнитридного STI-процесса с травлением по обратной маске. Показано, что для 75 % кристаллов СБИС, использованных для калибровки, ошибка моделирования лежит в пределах технологического разброса толщины диэлектрика.

3. Разработан алгоритм расчета локальной плотности заполнения на основе рекурсивной декомпозиции топологического слоя, который позволяет использовать предложенные модели процесса ХМП в алгоритмах модификации топологических слоев СБИС для уменьшения остаточного рельефа поверхности.

4. Предложен алгоритм размещения структур заполнения топологического слоя СБИС для процесса формирования многоуровневой металлизации, позволяющего поверхности снизить остаточный рельеф кристалла СБИС. Проведена обработка статистическая результатов заполнения топологических слоев кристаллов 20 СБИС различных типов с использованием предложенной полиномиальной модели, по результатам которой установлено, что предложенный алгоритм позволяет в среднем на 30 % уменьшить остаточный рельеф поверхности кристалла по сравнению с алгоритмом заполнения, реализованного в САПР DFM.

5. Проведена модификация топологических слоев кристаллов 3 СБИС с уменьшенными размерами структур заполнения с помощью предложенного алгоритма (п.4). Показано, что по сравнению с алгоритмом заполнения, реализованного в САПР DFM, подобное решение позволяет на 70 % снизить остаточный рельеф поверхности кристалла.

6. Предложен алгоритм выбора размеров элементов обратной маски на основе моделирования ХМП для STI-процесса без применения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с травлением по обратной маске. Проведен статистическая обработка результатов модификации рисунка обратной маски для STI-процесса без использования Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, который показал, что этот способ позволяет в 2,8 раза снизить остаточный рельеф поверхности кристалла.

# СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Гладких А.А., Столяров А.А. Повышение планарности распределения диоксида кремния в STI-технологии на основе моделирования операции химико-механической планаризации // Материала IV Всероссийского конкурса молодых ученых. Итоги диссертационных исследований. М.: РАН, 2012. Т. 2. С. 104-115.

2. Гладких А. А., Макарчук В. В., Курейчик В. М. *Методики оптимального размещения dummy-структур* // «Наука и образование». МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №5. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/368628.html</u> –

ISSN 1994-0408.

3. Гладких А.А., Столяров А.А. *Анализ технологических процессов формирования межтранзисторной изоляции* // 14-я Молодежная международная научнотехническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2012». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 251-259.

4. Амирханов А.В., Гладких А.А., Макарчук В.В., Пшенников А.Г., Шахнов В.А. Полиномиальная модель химико-механической планаризации в производстве субмикронных СБИС// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение". 2012. № 2. С. 20-36.

5. Амирханов А.В., Волков С.И., Гладких А.А., Демин С.В., Родионов И.А., Столяров А.А., Пшенников А.Г. Модификация топологии СБИС с учетом технологических ограничений операции химико-механической планаризации // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты. М.: НИИСИ РАН, 2011. Т. 1. №2. С. 4-10.

6. Глушко А.А., Гладких А.А., Зотов С.К. *Алгоритм оптимизации сложной топологии элементов СБИС* // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты. М.: НИИСИ РАН, 2011. Т. 1. №1. С. 4-6.

7. Гладких А.А. Анализ повторяемости и точности моделирования операции химико-механической планаризации слоя двуокиси кремния // 13-я Молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 324-338.

8. Гладких А.А. Алгоритм расчета локальной плотности заполнения топологии субмикронных СБИС для оптимального размещение dummy-структур // Сборник трудов Третьей Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия», 2010. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 256-267. ISBN 978-5-7038-3453-4.

9. Гладких А.А. Временная оптимизация модели ХМП с учетом распределения скорости планаризации по кремниевой пластине // 12-я Молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010». М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 214-223.

10. Гладких А.А. Моделирование процесса химико-механической планаризации диоксида кремния при формировании межслойной изоляции // Информатика и системы управления в XXI веке: Сб. тр. №7 молодых ученых, аспирантов и студентов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 54-70. ISBN 978-5-7038-3427-5.

11. Амирханов А.В., Волков С.И., Гладких А.А., Демин С.В., Родионов И.А., Столяров А.А. Оптимизация плотности заполнения топологии слоев СБИС, направленная на повышение стабильности технологического процесса химикомеханической планаризации // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты. М.: НИИСИ РАН, 2009. С. 50-55.

12. Гладких А.А. Использование методов коррекции оптического эффекта близости для оптимизации топологии ячейки памяти // Сб. тр. первой Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 220-225.