

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения информационных технологий и вычислительных систем Российской Академии наук

Издается с 1999 г.

Главный редактор Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В. Асеев А. Л. Гапонов С. В. Каляев И. А. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Лифшиц В. Г. Мокеров В. Г. Никитов С. А. Чаплыгин Ю. А. Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И. Антонов Б. И. Астахов М. В. Быков В. А Волчихин В. И. Гоев А. И. Горнев Е. С Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Журавлев П. В. Захаревич В. Г. Кальнов В. А. Карякин А. А Квардаков В. В. Кузин А. Ю. Мокров Е. А. Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н. Сауров А. Н. Сигов А. С. Сухопаров А. И. Телец В. А. Тодуа П. А. Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю. Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Сейсян Р. П. ЭУФ-нанолитография как средство производства СБИС Бутывская М. В. Создание структур "кремний-на-изоляторе"

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Ковалевский А. А., Долбик А. В., Цыбульский В. В. Исследование процесса анизотропного плазмо-химического травления пленок диоксида кремния. . Непочатенко В. А., Кудзин А. Ю. Уравнения 90-градусных доменных стенок в системе координат тетрагональной фазы BaTiO₃ Обухов И. А. О температурной зависимости сопротивления металлических

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Рогаткин Ю. Б. Вопросы разработки и методология проектирования Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Температурные характеристики биполярных N-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой Потягалова А. С., Солтан И. Е., Ткачев Д. Ф., Хапаев М. М. Опыт применения редукции паразитных элементов с использованием методов подпространств Крылова.

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

Яшин К. Д., Лацапнев Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике.......

*	
СТРАНИЧКА РФФИ	
НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	
ИНФОРМАЦИЯ	
Contents	

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: http://www.microsystems.ru.

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493); •
 - по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2006.

ФГАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК

Р. П. Сейсян,

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С. Петербург, E-mail: rseis@ffm.ioffe.ru

ЭУФ НАНОЛИТОГРАФИЯ КАК СРЕДСТВО ПРОИЗВОДСТВА СБИС И ИНСТРУМЕНТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Представлен аналитический обзор идей и современного состояния экстремально ультрафиолетовой (ЭУФ) нанолитографии, а также литографии в глубоком ультрафиолете, — с элементами оригинального исследования. Рассматриваются основные факторы, влияющие на разрешающую способность фотолитографического процесса, в том числе зависимость разрешения от длины волны и числовой апертуры оптической системы, и возможности уменьшения "технологического" коэффициента в выражении для минимально разрешаемой полосы. Приводятся данные разрабатываемой отечественной модели экспериментального нанолитографа, нацеленного на реализацию максимально высокого разрешения. Оценивается максимальное разрешение ЭУФ-литографического метода, а также пути дальнейшего выхода на уровень разрешения, соответствующим первым единицам нанометров, необходимый для реализации произвольных наноструктур.

Введение

Решающим фактором, обеспечивающим в течение последних 40 лет беспрецедентные темпы развития микроэлектроники, являлась возможность непрерывного уменьшения минимального характеристического размера элементов интегральных схем a_{\min} . До последнего времени прогресс здесь обеспечивался некоторыми усовершенствованиями фотолитографии, использовавшей часть видимого, ультрафиолетовый и ближний вакуумноультрафиолетовый диапазоны электромагнитного излучения. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикрометровое разрешение, характеризуемое $a_{\min} \leq 0,1$ мкм.

Важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования микрорисунка является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов, обеспечиваемая волновым характером оптических процессов. Именно это предопределило высокую технико-экономическую эффективность метода планарной технологии и создало возможность достижения уровня интеграции, характеризуемого цифрами порядка $10^7 - 10^8$ элементов (транзисторов) на кристалл.

Анализ тенденций дальнейшего уменьшения минимального характеристического размера элементов ИС показывает неизбежность выхода в ближайшие 5—10 лет в нанометровый диапазон с размерами $a_{\min} = 10...60$ нм. На рис. 1 приводится





2000 г. — Pentium IV, 4,42 · 10⁶, 0,18 мкм стандарт; Pentium IV Northwood, 5,5 · 10⁷, 0,18 мкм стандарт; 2003 г. — Pentium IV Prescott, 1,2 · 10⁸, SRAM, 3,3 · 10⁸, 0,09 мкм стандарт; 2006 г. прогноз Альберта Ю, Intel, 3,5 · 10⁸. Ломаными линиями (с и d) изображен известный прогноз Мейндла (1980-е годы, Стэнфордский университет), предполагавший переход к электронолитографии с предельным разрешением $a_{\min} = 0,25...0,5$ мкм зависимость a_{\min} от текущего момента времени, построенная с использованием целой серии различных источников. Очевиден непрерывный прогресс, характеризуемый экспоненциальным уменьшением этой величины в течение всего времени развития микроэлектроники, с одним и тем же показателем степени, соответствующим уменьшению a_{\min} приблизительно на 13 % ежегодно. В мировой литературе в последние годы стала обсуждаться перспектива скорее более крутого изменения этой величины ("ускорения"), чем замедления.

Однако возможности оптических систем ограничены дифракционным пределом и разрешаемая полоса не может быть существенно меньше длины волны света. Согласно критерию Релея, эта величина в проекционных оптических системах прямо пропорциональна длине волны света λ :

$$a_{\min} = k\lambda / NA, \tag{1}$$

где *k* — коэффициент пропорциональности; *NA* — числовая апертура объектива.

Дальнейшее уменьшение длины волны наталкивается на проблемы, связанные с углублением в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) и мягкий рентгеновский диапазоны. Они связаны, в частности, с отсутствием в природе оптически прозрачных материалов, пригодных для построения оптических систем и подложек для фотошаблонов, а также с трудностью создания эффективных источников излучения в этой области длин волн. Все это делает чрезвычайно актуальным поиск новых технических решений, обеспечивающих необходимый прогресс микролитографии. Возникает физико-техническая проблема перехода по длинам волн через барьер 100 нм, ниже которого не существует материалов, не поглощающих сильно электромагнитное излучение — вплоть до "жесткого" рентгена. В силу ряда причин, к которым мы еще вернемся, наиболее привлекательной областью длин волн, в которой может быть осуществлено создание суперлитографа, способного обеспечить дальнейший прогресс микроэлектроники, оказывается так называемый "экстремальный" ультрафиолет (ЭУФ) — коротковолновый край ВУФ-диапазона, примыкающий к "мягкому" рентгену.

ЭУФ-нанолитография

Технологии, которые лежат в основе создания ЭУФ-нанолитографа, приспособленного для изготовления микропроцессорных СБИС на уровне интеграции в $10^8...10^{10}$ элементов в кристалле, естественно, находятся в фокусе интересов крупнейших мировых фирм и научно-исследовательских институтов. Идея такого литографа сводится к крупно-фрагментарному параллельному формированию топологического рисунка ИС с помощью

проекционной отражательной оптической системы, построенной на многослойных брэгговских покрытиях. Это принципиально новый, не имеющий аналога в традиционной микротехнике, формирователь изображения топологического рисунка ИС. Он является "степпером", т. е., как и традиционные современные литографы, основан на системе пошагового экспонирования чипов (отдельных ИС), но использование ЭУФ создает ряд принципиальных отличий. В связи с существенным поглощением ЭУФ-радиации любыми газами рабочий объем литографа приходится вакуумировать. Источником ЭУФ обычно является высокотемпературная плазма, генерируемая, например, импульсным излучением мощного частотного лазера, сфокусированным на некоторую мишень, или же мощным электрическим разрядом. Оптическая система и шаблон создаются по принципам отражательной рентгеновской оптики нормального падения с многослойными брэгговскими покрытиями, наносимыми на атомарно-гладкие поверхности: плоские (ЭУФ-шаблон), или расчетной кривизны (объектив и конденсор). При этом увеличенный в *M* раз (*M*-кратность объектива) рисунок ИС гравируется в поглощающем слое на поверхности шаблона традиционными методами субмикрометровой фотолитографии или электронолитографии остросфокусированным пучком. (В этом случае. в связи с многократным применением шаблона, длительность его формирования не столь критична). Для экспонирования на поверхность полупроводниковой подложки, на которой формируется поэтапно каждый слои рисунка ИС, наносят специальное покрытие, способное играть роль ЭУФ-резиста. Схематически структура нанолитографа изображена на рис. 2. (здесь изображен литограф с лазерно-плазменным источником ЭУФ-



Рис. 2. Обобщенная схема ЭУФ-нанолитографа с "лазер-плазменным" источником излучения

радиации, который и применялся во всех известных проектах).

В настоящее время передовые страны выполняют три крупномасштабных национальных проекта (США, Евросоюз и Япония), направленные на создание промышленного ЭУФ-нанолитографа. Проекты преследуют цель создания устройств, обеспечивающих увеличение разрешающей способности в микроэлектронике вплоть до уровня, соответствующего первым десяткам нанометров. Предполагается, что использование именно такого устройства позволит на один-два порядка увеличить уровень интеграции микропроцессоров с одновременным увеличением производительности и быстродействия компьютеров.

Наибольшие успехи в деле реализации ЭУФ-нанолитографа были достигнуты за истекшие годы американской и европейской программами. Здесь были пройдены этапы экспериментального образца (α -tool) и промышленного прототипа (β -tool). Промышленные прототипы предполагалось испытать в опытных линиях производства микропроцессоров на фабриках Intel. При этом к числу самых существенных результатов американской программы следовало бы отнести демонстрацию наиболее убедительных принципиальных решений основных узлов литографа, а также и технологий их реализации. Большая часть этих решений вошла во все последовавшие, и иногда более удачные, модели ЭУФ-литографа, разрабатывавшиеся в рамках других программ. Наиболее подробно в литературе описана конструкция американской опытной установки под названием "Инженерный испытательный стенд" (Engineering Test Stand, ETS, рис. 3 [1]).



Рис. 3. Схема устройства ETS [1]

Полученное разрешение (минимальная ширина линии в ИС) оказалось 70 нм (уверенно) и вплоть до 50 нм — при увеличенном допуске на размытие линии [2]. Но промышленного применения ни один ЭУФ-нанолитограф тем не менее пока не получил, прежде всего, вследствие существенных техникоэкономических проблем. Причем, наибольшее число нерешенных, или же решенных на недостаточно удовлетворительном уровне задач считаются сосредоточенными в узле источника ЭУФ-радиации.

Источник ЭУФ-излучения для нанолитографии

Синхротронное излучение, использовавшееся в ранних работах американских и японских авторов, безусловно является одним из наиболее эффективных источников ЭУФ. Оно представляет большой интерес для проведения всесторонних научных исследований. Но для практических применений в полупроводниковом производстве существенную громоздкость и дороговизну синхротронных накопительных колец можно рассматривать как большой недостаток и препятствие к широкому промышленному применению. Авторы американского проекта считают, что применение синхротронов ведет к монополизации полупроводникового производства, чего следует избегать [3]. По их мнению, нанолитограф должен помещаться в объем не более $4 \times 4 \times 4$ м³, и быть доступным по стоимости любой средней фирме (не более 10 млн \$), с чем трудно не согласиться. Поэтому большинство начальных работ было сосредоточено, главным образом, на таком альтернативном источнике ЭУФ, как лазерная плазма. Лазерная плазма, возбуждаемая импульсной радиацией первичного лазерного источника при ее взаимодействии с различными твердыми, жидкими или газообразными объектами, является эффективным источником ЭУФ и мягкого рентгена.

При промышленном применении нанолитографа встает трудно выполнимая задача обеспечения высокой производительности. В качестве стандарта можно ориентироваться на производительность, достигнутую, например, на современном сканерстеппере производства ASML TWINSCAN АТ:1200В, имеющем предельное разрешение 0,08 мкм. Эта производительность составляет 103 топологических слоя кремниевых пластин диаметром 300 мм в час при 109 экспозициях по чипам площадью в 26×33 мм² [4]. Необходимый для этого современный уровень мощности источника оказывается почти недостижимым для лазер-плазменного источника ЭУФ, что стимулировало поиск новых решений, в том числе и возврат к исследованию известных разрядных методов генерации плотной высокотемпературной плазмы. Такие процессы уже исследовались ранее с целью создания управляемой термоядерной реакции, но оказались неперспективными для реализации сверхвысоких температур. Среди них Z-пинч, Θ -пинч разряды, "плазменный фокус", капиллярный разряд, вакуумная дуга и различные их комбинации, в том числе и с лазерной плазмой. Кроме того, внимание привлекает перспектива создания собственно "рентгеновского лазера", непосредственно генерирующего ЭУФ-излучение на длине волны 13,4 нм. Такой лазер ввиду узкой направленности излучения мог бы обеспечить решение многих проблем ЭУФ-источника для нанолитографа. Однако достижение необходимого для освещения маски уровня мощности излучения здесь еще более проблематично.

Лазерная плазма была и остается одним из наиболее удобных и эффективных методов генерации ЭУФ. Поэтому рассмотрим более подробно проблемы источника, использующего лазерную плазму и применявшегося практически во всех известных проектах. На ее примере становятся ясными наиболее общие проблемы источника. Собственно источником здесь является облачко вещества мишени размером ~50...100 мкм, быстро (со скоростью ~10⁶ см/с) расширяющееся, ионизированное до 20 крат, в плазменном состоянии при температуре $0,12 \cdot 10^6 \dots 1,2 \cdot 10^6 \, ^\circ \text{C}$, соответствующей 10...100 эВ. Такой квазиточечный источник излучения весьма удобен для разработки и оптимизации всей оптической системы. Первоначально исследовались "тяжелые" металлы, обеспечивающие достаточно высокую эффективность преобразования (порядка 1 % на 2π стерадиан в необходимой для работы нанолитографа полосе — 2 % от рабочей длины волны 13,4 нм). Исследовалась, главным образом, непрерывная часть спектров излучения. Однако здесь трудно преодолимым препятствием оказалось образование, наряду с излучением, большого числа микроосколков, загрязняющих оптическую систему и быстро выводящих ее из строя. Особенно опасным является их попадание на шаблон, что приводит к воспроизводству бракованных структур в ИС. Изобретение и использование многочисленных специальных приемов защиты оптического тракта не привело к радикальному решению проблемы. Это вынудило в дальнейшем сосредоточиться на сверхзвуковых газовых струях тяжелого инертного газа — ксенона. Именно на лазерной плазме ксенона построены источники излучения в опытных версиях (американских и европейской) ЭУФ нанолитографов. Применение в качестве мишени инертного газа, в общем, решает проблему загрязнений. Наиболее опасное положение в источнике занимает коллекторное зеркало, находящееся в максимальной близости от мишени конвертора. Только на нем в слу-

чае газовой струи ксенона еще регистрируется некоторая коррозия, вызванная бомбардировкой высокоэнергетичными ионами и атомами инертного газа, ограничивающая срок службы. Существеннее, однако, тот факт, что во имя борьбы с загрязнениями приходится жертвовать коэффициентом конверсии η, который падает до десятых долей процента и трудно становится поднять его до приемлемых значений. Предельно достижимым значением для газообразного Хе принято считать $\eta = 0.7 \%$ (при максимальном достигнутом коэффициенте $\eta \approx 0.55 \%$ [5]). Это связано с относительно низкой плотностью вещества в газообразной мишени. В погоне за увеличением коэффициента конверсии приходится направлять луч лазера в область, близко примыкающую к соплу, через которое газ выходит, где плотность максимальна. Но это приводит к повышению вероятности разрушения сопла и появлению загрязнений, являющихся частицами материала сопла. Выходом из положения могло бы стать образование кластеров Хе, или же применение жидкого, либо твердого ксенона. Такие работы стали проводиться в последнее время и показали потенциальную возможность получения довольно высоких значений коэффициента конверсии вплоть до $\eta = 1,5$ %.

Выполненные спектроскопические и теоретические исследования позволили установить одно чрезвычайно важное обстоятельство. Основным источником ЭУФ-фотонов в интересующей нас области спектра оказывается десятикратно ионизированный ксенон Хе¹⁰⁺ и эмиссия здесь обязана дискретным линиям поглощения в серии оптических переходов с участием четвертой и пятой атомных оболочек Xe: $4p^{6}4d^{8} - 4p^{5}4d^{9} + 4d^{7}(4f + 5p)$. Однако доля излучения, приходящаяся на нужную длину волны 13,4 нм, отвечает только относительно слабым переходам $4p^{6}4d^{8} \rightarrow 5p4d^{7}$ и многократно меньше излучения, приходящегося на 11 нм и отвечающего остальным переходам, осуществляемым внутри четвертой оболочки $n = 4 \rightarrow n^* = 4$ [6] (рис. 4). Причем увеличение интенсивности возбуждения приводит не столько к увеличению эмиссии, сколько к сдвигу максимума в сторону более коротких волн. Расчеты показывают, что подходящие для генерации 13,4 нм интенсивности возбуждения от первичного лазера не должны выходить за пределы 10¹⁰...10¹² Вт/см², а максимальная электронная температура не должна превысить 55 *э*B [6].

Более того, существенно повысить конверсию можно, лишь разделив во времени функцию генерации плазмы с ее разогревом до необходимой температуры. Это может быть сделано последовательностью из двух коротких импульсов возбужде-



ния, сдвинутых друг относительно друга интервалом в несколько наносекунд [7].

Таким образом, Хе оказывается не самым удачным выбором для работы с зеркальной оптикой, имеющей максимальный коэффициент отражения, т. е. на 13,4 нм. Расчеты показывают, что для эффективной конверсии на 13,4 нм выгоднее вещество с атомным номером 50 (Sn); с увеличением атомного числа (Sb, I) длина волны излучения сдвигается в коротковолновую сторону, и, наоборот (In, Cd) (рис. 5). Кроме того, выясняется, что определенный интерес для эмиссии 13.4 нм представляют Li, F и Sc, а также O, имеющие подходящие линии дискретного спектра в сильно ионизованном состоянии. Наиболее пристальное внимание в настоящее время уделяется олову в качестве среды формирования плазмы, генерирующей ЭУФ излучение. Первые же опыты оказались обнадеживающими. Достигнут коэффициент конверсии не менее 2 %, по оценкам предвидится 3 % и более. Используя Z-пинч разряд и его модификации, уда-



Рис. 5. Спектры излучения многократно ионизированных Xe, In, Sn, I, Li [6]

ется получить на олове оптическую мощность порядка 40 Вт в так называемом "промежуточном фокусе" осветительной системы, эта мощность пригодна для освещения маски [5, 8]. Преимущество разрядного источника состоит еще и в отсутствии мощного первичного лазерного источника возбуждения плазмы. Однако мы вновь здесь сталкиваемся с проблемой загрязнения оптического тракта, решать которую в этом случае сложно, но необходимо.

Решение проблемы первичного источника в большинстве современных работ свелось к использованию твердотельных лазеров с диодной накачкой. Такой лазер имеет ряд преимуществ: стабильность, долговечность, высокое качество оптического пучка при высоком общем коэффициенте полезного действия. Применение полупроводниковых лазерных линеек для накачки позволяет реализовать высокие выходные оптические мощности — вплоть до 5...20 кВт при импульсной работе на частотах 0,5...0,15 кГц. Большая длина волны излучения (1,06 мкм) может рассматриваться скорее как некоторое преимущество, так как способствует минимизации оптимальной плотности плазмы и уменьшению загрязнений [5, 6]. Альтернативой могли бы служить мошные эксимерные лазеры, преимущественно на KrF и KrCl с длиной волны 248 и 308 нм, в которых легче достигаются высокие значения энергии в импульсе. Однако здесь труднее рассчитывать на работу при высоких средних мощностях в квазистационарном режиме. Во всех случаях первичный источник представляет собой весьма сложное и ответственное сооружение, выполняемое на пределе технических возможностей и задающее в конечном итоге производительность всего нанолитографа.

Относительно новой идеей является использование в качестве первичного лазера накачки еще более длинноволнового (10,6 мкм) газового СО2-лазера. Возможность разработки мультикиловаттного СО₂-лазера для технологических целей была недавно продемонстрирована в работе [9]. Лазер основан на применении эффективного щелевого СО₂-усилителя с непрерывной RF-накачкой и усилением $G \sim 50$ (в расчете на один каскад усиления). Лазер работает на частотах до 100 кГц и имеет высокий КПД и качество пучка, обеспечивающее фокусировку в пятно почти дифракционного размера (порядка 20 мкм). Как было показано теоретически [10], столь значительная длина волны возбуждения и нагрева плазмы еще не приводит к отрицательным последствиям для работы конвертора. Более того, имеется возможность использования принципов многощелевой фазированной системы СО2-усилителей, позволяющая решить задачу масштабирования ЭУФ-литографического комплекса.



Рис. 6. Энергетические потери в ЭУФ-нанолитографе [24]

Отметим, что CO_2 -лазер, переоборудованный из разработанного ранее эксимерного лазера, успешно используется в настоящее время для конверсии ЭУФ-излучения разработчиками фирмы *КОМАТSU*, участвующими в Японском проекте ЭУФ-литографии *EUVA* [11].

На рис. 6 приводится обобщенная схема энергетических потерь нанолитографа. Мы видим, что, помимо обсуждавшегося выше низкого значения коэффициента конверсии, система содержит большое число других источников существенных энергетических потерь (табл. 1 и 2). Особенно значимы потери на многократное отражение, достигающие 300 раз в случае перспективного 8-зеркального объектива. При этом фильтр спектральной очистки, использование которого оказывается необходимым, имеет пропускание не более 50 %. Для стан-

дартной чувствительности фоторезиста в 5 мДж/см² в зависимости от числа зеркал в изображающем объективе, по нашим расчетам, от источника требуется 10...130 Вт спектрально-чистого ЭУФ-излучения в "промежуточном фокусе" (на маске) для соответствия современным требованиям по производительности, оцениваемым по параметрам упоминавшейся выше установки TWINSCAN АТ:1200В. Помимо потерь в оптической системе и чувствительности фоторезиста, эта цифра сильно зависит от потерь времени на сканирование и переход от чипа к чипу. Разработчики литографов уделяют много внимания уменьшению этих непроизводительных потерь, однако коэффициент потерь времени, принятый для расчетов нами, скорее всего только занижен. Требование 115...130 Вт в промежуточном фокусе, сформулированное пред-

Таблица 1

Коэффи- циент конвер- сии, %, η	Отношение угла сбора коллектора к 2π α	Пропуска- ние системы подавления осколков β	Отраже- ние кол- лекторно- го зеркала <i>R_c</i>	Отраже- ние ос- тальных зеркал <i>R_{cd}</i>	Пропус- кание ос- таточных газов t _a	Пропуска- ние спек- трального фильтра t_f	Отраже- ние маски <i>R</i> _м	Пропускан ного об	ние зеркаль- бъектива T ₀
0,55 0,70 1,5	0.2.0.2	1,0	0,5	0,65—0,86	0,9	0.5	0.65	2 4	0,4225 0,1785
0,7 2,2 3,0	- 0,2-0,3	0,9	Потери на пропускание конденсора 0,7		1,0	0,5	0,65	6 8	0,0754 0,03186
* Обозначения см. на рис. 6.									

Коэффициенты энергетических потерь в ЭУФ нанолитографе*

Таблица 2

Чувствитель- ность фото- резиста, мДж/см ² S	Мощность, не- обходимая для экспонирования 100 подложек/ч (Ø300 мм), Вт Р	Полная мощность излучения на поверхности маски, Вт Р _м		Собранная мощность излучения от источни- ка EUV, Вт P_{α}	Полная мощ- ность излуче- ния источни- ка EUV, Вт P _{2π}	Полная мощ- ность излуче- ния первич- ного источ- ника**, кВт P ₁₀	Полная электри- ческая мощ- ность***, кВт Р ₁	
5	2,68*	2M 4M 6M 8M	9,8 23 55 130	77 183 434 1027	310 734 1736 4110	15 37 87 205	150 370 870 2050	
* Потери в сканировании. ** Коэффи *** КПЛ па	ремени между эксп циент конверсии η изера n = 10 %	озициями — 50 = 2 %.	%, все значения	и мощностей уве	личиваются в 10) раз из-за потер	ь времени при	

Уровни электрических и оптических мощностей в различных узлах ЭУФ нанолитографа при производительности, соответствующей современному сканеру-степперу ASML (TWINSCAN AT : 1200B)

ставителями производителей оборудования для современного микроэлектронного производства, с течением времени только растет, и в 2005 г. для шестизеркального объектива составило уже 180 Вт [12].

По оптимистическим оценкам, соответствующим нашим расчетам, на входе такая система будет потреблять не менее 2,0 МВт электрической мощности, что ведет, в свою очередь, к необходимости интенсивного теплоотвода от блоков источника.

Оптическая система ЭУФ-нанолитографа

Оптическая система ЭУФ-нанолитографа имеет несколько принципиальных особенностей, происходящих как от особенностей зеркальной системы вообще, так и от особенностей "брэгговских" отражательных покрытий (рис. 7).

 Зеркальная оптическая система не содержит диспергирующих элементов, вследствие чего ход лучей не зависит от длины волны и может поверяться светом любого диапазона электро-



Рис. 7. Конструкция рентгеновского зеркала с "брэгговским" покрытием Мо-Si и типичный спектр отражения

магнитных волн, имеющим существенный коэффициент отражения от поверхностей зеркал.

- Зеркальная оптическая система не может иметь числовую апертуру, близкую к единице, так как предпоследнее зеркало должно для этого находиться в фокусе последнего зеркала, формирующего изображение, т. е. в поле изображения. Достижение максимально возможных числовых апертур возможно при условии минимального поля изображения.
- "Брэгговские" покрытия являются интерференционным фильтром на длину волны λ. Для всей оптической системы покрытия должны совпадать по длине волны максимума отражения таким образом, чтобы не выходить за пределы дифракционной зоны Δλ. При этом приемлемыми могут считаться потери, если полоса разброса δλ_{max} существенно меньше Δλ, таким образом, что δλ_{max}/λ ≤ 2 %.
- "Брэгговские" покрытия рассчитываются из условий нормального падения. Существует максимальный угол допустимого отклонения ΔΘ_{max} от π/2 для углов падения и отражения, если многослойное покрытие однородно по периоду в пределах всего зеркала. Это обстоятельство дополнительно ограничивает предельно достижимую числовую апертуру изображающего ЭУФ-объектива.

Конденсор является отдельным оптическим блоком нанолитографа. Именно он находится в непосредственном контакте с конвертором, и это создает определенную специфику — необходима изоляция от остальных частей, снабжение средствами интенсивной откачки и удаления материальных продуктов конверсии. Таким образом, конструкция конденсора находится в сильной зависимости от выбора метода конверсии. Вместе с тем, оптическая система конденсора в случае лазерплазменного конвертора должна быть построена на таких же "брэгговских" зеркалах, что и остальная система (требуется весьма строгое совпадение центров полос отражения по длине волны), и является неотъемлемой частью всей оптической схемы, включающей изображающий объектив и маску. Поэтому оптимизации подлежит вся система в целом — конденсор, маска и объектив. Как отмечалось выше, применение системы многослойных "брэгговских" зеркал ограничивает полосу, внутри которой должны находиться максимумы отражения всех зеркал системы, шириной в $\delta \lambda_{max} / \lambda \approx 2 \%$, т. е. 0,27 нм при $\lambda = 13,4$ нм (это не ширина спектральной полосы на половине максимума, используется только та часть полосы, в которой не происходит существенного падения коэффициента отражения). Наиболее ответственным узлом здесь является первое, коллекторное зеркало, находящееся в непосредственной близости от точки конверсии, и, таким образом, наиболее сильно деградирующее в процессе работы. Задачей является доведение срока службы этого зеркала до 10 тыс. часов непрерывной работы при снижении отражательной способности не более, чем на 10 % [5] (В этой связи зеркало конденсора считалось при расчете таблицы 2 имеющим относительно низкий коэффициент отражения R = 0,5). Вместе с тем, чем ближе расположено коллекторное зеркало к конвертору и чем оно больше по радиусу, тем больше пространственный угол сбора ЭУФ-излучения и эффективность источника. Типичным пространственным углом сбора излучения является угол в 1,8 ср, соответствующий 28,6 % от излучения, распространяющегося во все стороны (в угол 2π) от точки конверсии [13]. Иные конструкции конденсора, использующие, в частности, зеркала скользящего падения, требуются в случае создания разрядного источника. Принципиально новое решение конденсора может быть связано с возможным созданием рентгеновского лазера для соответствующих длин волн.

Так как потери на неполное отражение ЭУФ "брэгговских" зеркал весьма существенны, естественно обходиться минимальным количеством зеркал, как в конденсоре, так и в изображающем объективе. Двух зеркальный объектив, состоящий из большого вогнутого зеркала с центральным отверстием и малого выпуклого, известен под названием "шварцшильдовского", и нашел применение в рентгеновской астрономии. Такой объектив первоначально применялся в Американском проекте нанолитографии и имел числовую апертуру NA = 0,06...0,09 [14]. Столь низкое значение NAоказалось необходимой платой за относительно большое поле изображения. При этом реальное изображение представляло собой узкую дугу окружности шириной менее миллиметра. Чтобы проэкспонировать весь топологический слой кристалла СБИС, необходимо сканировать в пределах чипа по поверхности полупроводниковой пластины. Так что такой нанолитограф должен будет представлять собой "степпер-сканер". Этот принцип сохранился во всех последующих более совершенных моделях.

Очевидно, что схема "шварцшильдовского" объектива на двух зеркалах (рис. 8, *a*) не могла удовлетворить требованиям по разрешающей способности (см. критерий Релея) и (или) качеству изображения. Собственно оптическая разрешающая способность по Релею не могла здесь превысить $a_{\min} = 90...100$ нм. Следует напомнить, однако, что выполнение критерия Релея, точно характеризующего свойства светового поля изображения, не является достаточным условием для высококачественного проявления рисунка. Если не применяются меры по улучшению качества изображения, на



Рис. 8. Оптические схемы "брэгтовских" зеркальных объективов: *а* — низкоапертурный двухзеркальный "шварцшильдовский" [14]; *б* — двухзеркальный высокоапертурный [15, 16, 17]; *в* четырехзеркальный низкоапертурный промышленного типа [16]; *г* — четырехзеркальный высокоапертурный, но с малым полем изображения [17]

пример, фазосдвигающие маски, и (или) фоторезисты с высоким контрастом передачи изображения, можно надеяться на уверенное воспроизведение полос, равных 2—3 "длинам" Релея *a*_{min}. В случае возможности пренебрежения размером поля изображения числовая апертура может быть существенно увеличена при использовании модифицированной схемы "шварцшильдовского" объектива. Так, изготовлены двухзеркальные объективы с NA = 0,3 (ASET, Zeiss [15, 16]), разработан и находится в изготовлении объектив с NA = 0.36 [17] (рис. 8, б). Однако поле изображения здесь не превышает 1 мм². Четырехзеркальные системы (рис. 8, в), в принципе, улучшают ситуацию, удается несколько увеличить NA, сохраняя — в режиме сканера-степпера — значительное поле изображения. Но для промышленных применений достигаемая числовая апертура не превышает NA = = 0, 1...0, 14 [1, 16]. В то же время, жертвуя размером поля (вплоть до 0.5×0.5 мм), удается разработать уникальный четырехзеркальный объектив с $NA \ge 0,485$ [17] (рис. 8, *г*). Такой объектив уже позволяет реализовать $a_{\min} = 10$ нм только за счет светового поля, без специальных шаблона и резиста. Достаточно высокое качество на большой площади, соответствующей приблизительно одной десятой части современного микропроцессорного чипа, достигается шестизеркальной схемой, а восьмизеркальная схема, согласно оценкам специалистов K. Zeiss, уже смогла бы обеспечить $NA \approx$ $\approx 0,4$, на уровне промышленного сканера-степпера (рис. 9). Таким образом, предполагаемое разрешение промышленного нанолитографа сможет достичь 20-30 нм в результате разработки 8-зеркального объектива, запланированной на 2014 год [18]. Но здесь уже становятся критическими потери восьмикратного отражения при коэффициенте отражения R < 1.

Это вынуждает внимательно отнестись к возможности применения различных методов коррекции изображения. Развитие этих методов позволя-







Рис. 10. Профилограмма реализованной "атомарно-гладкой" поверхности со средней квадратической шероховатостью 0,1 нм [17]

ет искать компромисс на пути использования более простых оптических схем, но снабженных, например, системой голографической коррекции. Качество зеркал, в частности, максимальный коэффициент отражения, полученный на многослойной "брэгговской" системе, находится в прямой зависимости от шероховатости поверхности заготовки, на которую наносятся слои. На рис. 10 приведены результаты измерений шероховатости простых пробных зеркал, изготовленных на ситалле. Близкие результаты получены на кварцевом стекле и монокристалле кремния. Они демонстрируют наличие технологии, обеспечивающей 0,1...0,33 нм среднеквадратической шероховатости [17]. Последнее значение свидетельствует о возможности создания действительно атомарногладких поверхностей! При этом необходимо с высочайшей точностью следовать расчетной кривизне профиля зеркальной поверхности, существенно отклоняющейся от сферы (так называемая асферика) — для подавления аберраций. Согласно критерию Марешаля точность должна соблюдаться на уровне < 0,05 λ (при λ = 13,4 нм). Такую точность асферических поверхностей изображающих зеркал удается осуществить на практике, однако технологический контроль изготовления изображающего объектива потребовал разработки и изготовления измерительного интерферометра нового типа интерферометра с "дифракционной точкой" [19]. Этот интерферометр обеспечивает контроль на уровне лучшем, чем $\lambda/100$ для $\lambda = 630$ нм.

ЭУФ-ШАБЛОН

В принципе, ЭУФ-шаблон устроен так же, как и любое другое брэгговское зеркало оптической системы, с той лишь разницей, что, как правило, он плоский и на его поверхность дополнительно наносится слой сильно поглощающего ЭУФ вещества. Например, это могут быть W, Ta, TAN, Cr и др. материалы [20]. Дополнительный слой гравируется в соответствии с увеличенным в M раз изображением слоя микрорисунка СБИС одним из известных методов. Как отмечалось, это может быть традиционная фотолитография субмикрометрового разрешения, или же электронолитография остросфокусированным пучком. Изготовление ЭУФ-шаблонов с развитием нанолитографии превращается в самостоятельную задачу, и можно предположить организацию в будущем специализированных заводов по их производству. Имеется сообщение о том, что Intel разворачивает производственную ЭУФ-линейку по производству масок с разрешением 30 нм для будущих ЭУФ-литографов [21]. Наиболее вероятная подложка пластины монокристаллического кремния, применяемого в производстве ИС. Однако не исключено, что более удобными, с позиций получения, атомарно-гладкой поверхности и близкого к нулю коэффициента термического расширения (КТР) окажутся кварц или ситалл. Высокий уровень освещенности маски, необходимый для достижения достаточной производительности литографа, ставит новую задачу разработки специального материала маски с нулевым КТР. Его необходимость станет очевидной при переходе к технологическим стандартам ИС, меньшим 30...40 нм [21].

Разрешающая способность фотолитографического процесса

ЭУФ-нанолитография основывается на принципах волновой оптики, и, таким образом ей присущи все преимущества и недостатки волновых процессов. Принципиальным преимуществом волновых методов является одновременный и параллельный перенос изображения, состоящего из множества элементов. Главным образом, это, повидимому, и предопределило на весь период развития микроэлектроники полное преимущество фотолитографии над электронолитографией остро-сфокусированным пучком, несмотря на постоянное лидерство последней по разрешающей способности. С другой стороны, предельные возможности фотолитографии всегда ограничивались дифракционным пределом, который можно охарактеризовать критерием Релея.

Формула критерия Релея демонстрирует основные пути увеличения разрешающей способности фотолитографических систем. И первый — это уменьшение длины волны электромагнитного излучения λ. Этим путем фотолитография развивалась на протяжении всего времени существования микроэлектроники, достигнув на сегодняшний день 193 нм — длины волны излучения ArF эксимерного лазера. Существовала еще потенциальная возможность построения литографических систем на длине волны 157 нм — эксимерного лазера на F₂, однако эти разработки в настоящий момент остановлены из-за нерентабельности. В еще большей степени это могло бы относиться к еще более коротковолновым эксимерным лазерам, использующим, например, молекулу аргона (126 нм), или водорода (116 нм). Здесь уже практически невозможно найти подходящую пару прозрачных материалов с заметно отличающимися коэффициентами преломления. Это вынуждает рассматривать включение в оптическую систему объектива зеркальных элементов. Дальнейшему уменьшению длины волны уже препятствует полное отсутствие в природе оптически прозрачных материалов для λ, меньших, чем 100 нм, т. е. диэлектриков с шириной запрещенного зазора $E_g > 12,4$ эВ. Построение оптических систем на таких длинах волн требует уже принципиально иного подхода, а именно, построения полностью зеркальной оптики. Зеркальная оптика нормального падения с многослойными "брэгговскими" покрытиями зеркал и реализуется в ЭУФ-литографии.

Как уже отмечалось, критерий Релея описывает свойства только светового поля. Что же касается реализации микрорисунка, то она зависит от технологического процесса, проявляющего и закрепляющего рисунок. На практике, в самом общем случае, значения k = 0.61 оказывается недостаточно для надежного воспроизведения элементов рисунка на дифракционном пределе, и необходимо более двух длин Релея с $a_R = 0.61 \lambda / NA$, т. е. для получения изображения высокого качества необходим коэффициент $k \ge 1$. Это и значит, что обычно разрешаемы элементы с размерами порядка или больше длины волны λ. Опыт генерации микроизображений открывает несколько методов уменьшения этого коэффициента на практике. Для реализованного изображения правильно было бы переписать выражение (1), соответствующее критерию Релея, вводя в него другой коэффициент, k_1 , являющийся уже переменной величиной, зависящей от деталей организации процесса воспроизведения микрорисунка:

$$a_{\min} = k_1 \lambda / NA. \tag{2}$$

На рис. 11 приведены минимальные значения k_1 , которые удавалось реализовать в течение двух последних десятков лет в процессе развития микроэлектроники. Очевидна тенденция постоянного снижения k_1 одновременно с постоянным ростом числовой апертуры оптических систем NA. На сегодняшний день передовыми чиповыми фабриками ведется производство по стандартам 90 нм. Это значит, что минимальным размером материально воспроизводимого элемента интегральной схемы является 90 нм, размер, составляющий менее половины длины волны 193 нм эксимерного лазера ArF, используемого как источник света в современных литографических машинах. Значение k₁ в этом случае (для лучших объективов с NA = 0.85) составляет всего 0,4, и имеет тенденцию к дальнейшему снижению.



Рис. 11. Тенденции увеличения числовой апертуры NA трансмиссионных объективов и снижения коэффициента k_1 в формуле для минимальной разрешаемой полосы a_{\min} по годам, начиная с 1982 г. В левой части (до 2004 г.) — "традиционная" фотолитография [23], в правой части рисунка пятиугольниками отмечены прогнозы по [22], связанные с применением иммерсионных жидкостей. Длина волны используемого актиничного излучения отмечена около кривых: *I-line* и *G-line* — линии излучения ртутной лампы 436 нм и 365 нм, соответственно; линии излучения эксимерных лазеров KrF, ArF, и F₂ — 248, 193 и 157 нм (в случае F₂ с 157 нм — это неосуществленный прогноз). Штриховыми линиями ограничен период освоения иммерсии

Естественно, возникает вопрос: есть ли предел ее уменьшению и как сказывается это уменьшение на качестве изображения? Этот вопрос является в настоящее время предметом многочисленных исследований, которые можно было бы отнести к разряду поисков метода искусственного снижения дифракционного предела. Существуют по крайней мере, три вида технических приемов, приводящих к уменьшению k_1 . Первый — это создание масок, создающих более высокий контраст в оптическом поле изображения за счет искусственного фазового сдвига на границах элемента рисунка. Этот метод весьма эффективен и делает возможным заметное уменьшение k_1 . Отметим, что одновременно с этим происходит существенное усложнение маски, и несмотря на увеличенный в число раз, равное коэффициенту редукции, размер элемента, она начинает выравниваться по размерам деталей и точности дополняющих фрагментов с изображением на полупроводниковой пластине. Другой метод сводится к такой обработке фоторезиста после образования в результате экспонирования так называемого "скрытого изображения", которое делает дальнейшее ионно-плазменное проявление микрорисунка квазивертикальным. (Фоторезистом называют используемую в фотолитографии светочувствительную эмульсию, обладающую помимо способности к фотопреобразованию, обеспечивающему химическое проявление рельефа изображения, еще и повышенной стойкостью к различным химически активным реактивам, применяемым в технологическом процессе. Фоторезист является

переносчиком изображения в материал и обычно удаляется и наносится вновь после каждой операции фотолитографии). Одна из технологий, значительно повышающих качество изображения при проявлении, это так называемое силицирование, сводящееся к обработке поверхности фоторезиста кремнием или кремнийсодержащими реактивами. Такой слой оказывается более стойким при "сухом" ионно-плазменном проявлении, что позволяет вытравлять линии с очень резким краем. Наконец, третий метод сводится к повышению "контрастности" самого фоторезиста, что также приводит к увеличению крутизны края линии и способствует улучшению разрешающей способности. Этот метод связан с фотохимическими процессами в материале резиста и ведет к образованию более крутой зависимости рельефа полосы от поперечной координаты, чем соответствующая зависимость в световом поле (рис. 12). Можно считать, что все три приема в той или иной мере причастны к прогрессу разрешающей

способности современной микроэлектроники. Их развитие и использование, по некоторым сообщениям, приводит к реализации на длине волны 193 нм технологического стандарта 0,065 мкм, т. е. 65 нм, что соответствует значению k_1 , меньшему, чем 0,3! Следует заметить, однако, что уменьшение k_1 отрицательно влияет на качество микрорисунка, и во избежание этого становится необходимой специальная коррекция рисунка на фотошаблоне. Поэтому предпочтительно избегать слишком большого уменьшения этой величины.

Наконец, последний путь увеличения разрешающей способности фотолитографического процесса — это увеличение числовой апертуры объектива NA. На воздухе максимально возможное значение *NA* равно единице. Чем выше *NA* объектива, тем сложнее изготовить его соответствующим по степени совершенства требованиям фотолитографии ИС. Современные литографические объективы с NA = 0,75...0,85 это уникальные сооружения, состоящие из десятков линз с диаметром, достигающим 300 мм и с длиной оптического пути порядка одного метра. Для подавления аберраций необходим, по крайней мере, еще один оптически прозрачный материал с отличающимся от основного — ультрачистого плавленого кварца — коэффициентом преломления. Для λ = 193 нм подходящим является оптический CaF₂, и этого материала на один объектив уходят килограммы.

Одной из главных причин, стимулирующих прогресс в микроэлектронике, в последние годы оказалась открывшаяся сравнительно недавно (2002 г.) и интенсивно разрабатываемая возможность использования иммерсии при работе обычного современного сканер-степпера с ArF эксимерным лазером на 193 нм [22]. Как обнаружилось, вода, имеющая на рабочей длине волны коэффициент преломления 1,43, может быть впрыснута в промежуток между изображающим объективом и полупроводниковой пластиной практически безо всяких отрицательных последствий для качества воспроизводимого рисунка. Это приводит к тому, что рабочая длина волны сокращается до $\lambda/n =$ = 135 нм и в *n* раз увеличивается числовая апертура объектива, что открывает возможность работы при значениях NA, превышающих единицу, уже на тех объективах, которые существуют, и у которых на воздухе NA < 1. Иммерсия существенно расширяет возможности традиционной техники фотолитографии, которая, таким образом, глубоко вторгается в область, где ЭУФ-литография до сих пор представлялась не имеющей конкуренции. В настоящее время трудно определить действительную границу возможностей этого метода, отделив рекламные сообщения, публикуемые в конкурентной борьбе ведущих мировых производителей фотолитографического оборудования, от реальности. Вместе с



Рис. 12. К методам уменьшения технологического коэффициента k_1 : сплошные кривые — реализация светового поля для различных воспроизводимых зазоров в длинах Релея:

1 — фазосдвигающая канавка в фотошаблоне; 2 — коррекция светового поля при фазовом сдвиге; горизонтальная линия порог чувствительности нелинейного резиста; пунктир — реализация светлой линии в нелинейном резисте; 3 — слой резиста, насыщенный кремнием, или кремнийсодержащими радикалами; 4 — профиль ионноплазменного травления резиста после силилирования тем, стало известно, что именно иммерсионным методом, по-видимому, и будет обеспечено отмеченное выше намерение выхода в 2006 г. на технологический стандарт 0,065 мкм фабриками *Intel*. Осуществление такой технологии экономически гораздо более привлекательно, чем создание новых, чрезвычайно сложных и дорогих ЭУФ-литографических систем. Возможным является применение на 193 нм других прозрачных иммерсионных жидкостей с несколько большим коэффициентом преломления, чем вода. Прогнозируемые значения числовой апертуры *NA* и k_1 для традиционных фотолитографических систем мы включили в правую часть рис. 11, продолжая данные, приводимые в работе [23].

По оптимистическим оценкам применение иммерсии даст возможность выйти в конечном итоге к 2014 г. на разрешение полос размером менее 35 нм, не меняя существенно конструкцию уже существующих литографических установок. Таким образом, усовершенствование фотолитографических установок с ArF эксимерным лазером лишает смысла разработку не только аналогичных установок с F₂ лазером, работающим на 157 нм, но и ЭУФ-литографических средств на 30 ÷ 65-нанометровые стандарты. Открытие и интенсивная разработка иммерсионной литографии на эксимерных лазерах оставляет ЭУФ нанолитографии в принципе лишь "экстремальную" нишу сверхразрешения с $a_{\min} < 20$ нм. Достижение разрешения полос < 20 нм уже вряд ли возможно с помощью иммерсии без существенного сокращения длины волны актиничного излучения. Требуется переход на длины волн много меньше 193 или 157 нм, но здесь уже отсутствуют в природе прозрачные иммерсионные жидкости.

Зависимость разрешения фотолитографии от длины волны

Анализируя потенциальные возможности ЭУФлитографических средств, применительно к нанотехнике, рассмотрим причину ограничений по уменьшению длины волны, а также причину повсеместного выбора одной и той же $\lambda \approx 13,4$ нм.

Прежде всего, учтем главный ограничивающий фактор — рассеяние фотоэлектронов, возникающих в материале фоторезиста при поглощении высокоэнергетического излучения. Радиус их рассеяния быстро растет с увеличением энергии кванта — как $E^{1,75}$, и уменьшается обратно пропорционально плотности материала резиста. На рис. 13 мы приводим эту зависимость наряду с зависимостью разрешающей способности от энергии кванта для проекционной и контактной (теневой) печати. Для контактной печати с заданным зазором, которая широко применялась в производстве ИС, харак-



Рис. 13. Оценочная зависимость предельной теоретической величины a_{\min} от энергии фотона или длины волны актиничного излучения:

терна корневая зависимость от длины волны λ и δ — зазора "маска—образец": $a_{\min} = (2\lambda\delta)^{1/2}$, для проекционной печати воспользуемся критерием Релея (1) принимая k = 0.61. Очевидно, что контактная печать, вследствие более пологой зависимости от энергии, при продвижении в коротковолновую сторону быстро сталкивается с ограничением рассеянными фотоэлектронами, и ее потенциальные возможности задаются значением, несущественно меньшим, чем 100 нм. В случае проекционной печати это ограничение возникает уже при значениях a_{min} около 10 нм, и наиболее благоприятная область энергий фотона находится — в зависимости от плотности резиста и числовой апертуры объектива — при длинах волн около 10 ± 5 нм (hv = 83...250 эВ). Таким образом, предпочтительны часть области ЭУФ, примыкающая к мягкому рентгену, и наиболее длинноволновая часть мягкого рентгена [24].

Рассматриваемый спектральный диапазон оказывается существенно коротковолновее фундаментальной полосы поглощения, формируемой переходами из валентной зоны в зону проводимости, и всецело принадлежит переходам из внутренних атомных оболочек. Это значит, что спектральное поведение оптического поглощения (отражения) никак не зависит от кристаллической структуры вещества, и полностью определяется (для многоатомного вещества) стехиометрией и соответствующей суммой парциальных коэффициен-

тов поглощения, что резко ограничивает возможности построения оптических элементов. Кроме того, отметим, что в этой области спектра полностью отсутствуют прозрачные материалы. Относительно низкий коэффициент поглощения может быть получен в области скачка поглощения, соответствующего переходу к поглощению следующей электронной орбитой. Тем не менее, здесь удается получить относительно высокий коэффициент нормального отражения в многослойной "брэгговской" системе. Брэгговское интерференционное зеркало образуется распределенным отражением от чередующихся четвертьволновых слоев двух материалов (см. рис. 7). В зеркалах такого типа малая часть падающего света отражается от каждой пары, а толщина слоев подобрана так, чтобы отраженные волны при интерференции складывались. В настоящее время используют покрытие зеркал, состоящее из нескольких десятков пар слоев, большее число слоев могло бы слегка повысить коэффициент отражения, но увеличение возвращаемой энергии падает с каждой новой парой. Для рассматриваемого диапазона длин волн существует весьма ограниченный выбор пар материалов, имеющих относительно низкий коэффициент поглощения и достаточный контраст коэффициентов преломления. С помощью многослойного покрытия такого типа в системе "Mo-Si" был получен максимальный коэффициент отражения зеркала 70 %, и он приходится на длину волны 13,4 нм. Расчетные значения коэффициента отражения для "брэгговских" зеркал из различных пар материалов [25], приведены на рис. 14, из которого следует, что абсолютный максимум оптимизированного коэффициента отражения для практически всех возможных "брэгговских" пар приходится именно на эту длину волны. Выбор еще более ограничен тем обстоятельством, что материалы не должны взаимодействовать химически, во избежание размытия интерфейсов. Все другие стабильные пары (кроме "Mo-Si" и "Nb-Si") дают заметно меньший теоретический максимум, и это существенно в выборе рабочей длины волны, так как число "брэгговских" зеркал в оптической системе достигает тринадцати (для наиболее широкоапертурного восьмизеркального объектива). Таким образом, энергия источника излучения, достигающая образца, будет определяться коэффициентом отражения в степени 13, что заставляет бережно относиться к каждой единице процента отраженной энергии. Это обстоятельство, наряду с практической изученностью и доступностью системы "Мо-Si", и предопределило выбор рабочей длины волны 13,4 нм.

^{1 —} контактная литография, зазор 10 мкм; 1' — зазор 1 мкм; 2 — проекционная литография, NA = 0,6; 2' — NA = 1,0; 3 — ограничение, связанное с рождением фотоэлектронов; 3' — то же при увеличении плотности фоторезиста [24]. Диапазоны длин волн: І — инфракрасный; II — ультрафиолетовый; III — вакуумно-ультрафиолетовый; IV — дальний и экстремальный ультрафиолет; V — мяткий рентген



Рис. 14. Зависимость максимального оптимизированного коэффициента отражения многослойного "брэгговского" покрытия для различных пар материалов от длины волны [25]

Можно ли считать выбор 13.4 нм окончательным? Учтем, что эти выводы базируются на известных табличных данных по комплексному показателю преломления различных материалов в рентгеновской и ЭУФ-областях спектра электромагнитного излучения, частично подтвержденных экспериментом. Эти данные вполне могут оказаться не вполне точными, что привело бы к некоторой коррекции рис. 14. Конечно, более надежными могли бы оказаться экспериментальные данные. но и здесь необходимо быть убежденным в достижении оптимального результата в многофакторном эксперименте. Если найдутся достаточно эффективные зеркала в более коротковолновой области спектра, то не исключено, что усилия разработчиков сместятся в область мягкого рентгена: выигрыш в длине волны актиничного излучения создает явное преимущество в теоретически достижимой разрешающей способности литографической системы перед ЭУФ-литографами. Выбор несколько более длинноволновых систем мог бы быть простимулирован успехами в создании ЭУФ лазеров, но помимо соответствующих увеличению λ потерь разрешения он будет сопровождаться еще и существенными дополнительными энергетическими потерями, и поэтому представляется весьма маловероятным.

Возможности уменьшения коэффициента k_1 в ЭУФ-диапазоне длин волн

Как отмечалось, в фотолитографии известны три разновидности приемов, приводящих к сниже-

нию k_1 : 1) применение масок с фазовым сдвигом; 2) обработка фоторезиста после образования "скрытого" изображения; 3) применение фоторезистов с повышенным контрастом передачи изображения. Все три метода практически не изучены применительно к ЭУФ-диапазону, хотя и возможны теоретически. Мы не будем останавливаться на методах 1 и 2, заметив лишь, что метод 1 достоин специального изучения, а метод 2 сильно зависит от вида используемого резиста.

Остановимся на фоторезисте в ЭУФ-диапазоне спектра. Здесь, так же как и ранее для видимого и ультрафиолетового диапазонов, обычно применяют композиции на основе органических соединений. Основная проблема, возникающая при поиске фоторезиста для ЭУФ-литографии, обычно состоит в очень высоком поглощении ЭУФ излучения всеми природными органическими материалами. Глубина поглощения для этого диапазона у стандартных органических фоторезистов не превышает 100 нм. Наиболее вероятным сценарием работы ЭУФ-резиста представляется формирование требуемого изображения в тонком приповерхностном слое. В настоящее время активно исследуются однослойные силилированные резисты, а также двух- и трехслойные резисты. Фоторезист. применимый для крупносерийного производства, должен обладать как высоким контрастом передачи изображения, так и чувствительностью, обеспечивающей приемлемые темпы производства. Чувствительность на уровне 5...10 мДж/см² считается наиболее адекватно отвечающей поставленным задачам, поскольку это значение является компромиссным между требованиями высоких темпов производства и минимизацией флуктуации вследствие фотонного дробового шума [26].

Помимо оптических свойств, фоторезист должен иметь приемлемые химические свойства. В связи с уменьшением размеров элементов на фоторезисте становится актуальной проблема размытия края изображения (line-edge roughness, LER) вне зависимости от типа литографии. ЭУФ-фоторезист должен быть в состоянии решить и эту проблему. Классически при моделировании реальных резистных профилей неравномерность распределения интенсивности засветки и взаимодействие резиста с проявителем учитываются как dy/dx = $= (\partial y/\partial E)(\partial E/\partial x)$, где E — поглощенная резистом энергия. В случае резиста с невысоким коэффициентом поглощения и слабоотражающей подложки первый сомножитель зависит от свойств пары резист-проявитель и механизма проявления, а второй — только от свойств оптической системы. Сомножитель, отвечающий за физико-химические свойства резиста и проявителя, в этом случае прямо пропорционален контрасту у и обратно пропорционален экспозиции, достаточной для проявления резиста: $\partial y/\partial E \propto \gamma/E_0$. Учитывая далее, что контраст определяется обратной оптической плотностью материала резиста: $\gamma \propto (\beta + \alpha d)^{-1}$, где β постоянная, а — коэффициент поглощения, d толщина резиста, получим профиль резиста, который в первом приближении определяется параметрами оптической системы и резиста. Использование высококонтрастных резистов с низкой оптической плотностью α*d* позволяет достичь более резкого профиля рисунка после проявления. Обеспечивать уменьшение оптической плотности путем сокращения толщины слоя фоторезиста представляется возможным только до некоторого предела, определяемого технологическими возможностями создания слоя резиста без дефектов и флуктуации толщины и состава, а также достаточной стойкостью незасвеченных участков к проявителю. Поэтому на первый план выходит проблема поиска фоторезистных материалов с приемлемой чувствительностью, но низким коэффициентом поглощения [27].

В рассматриваемом диапазоне длин волн (13,4 нм, 92,5 эВ) сечение фотопоглощения определяется, в основном, внутренними оболочками атомов, т. е. поглощение материала резиста определяется лишь его стехиометрическим составом и практически не зависит от структуры химических связей.

Введением в состав полимеров боковых групп, чувствительных к излучению и способствующих увеличению радиационного выхода реакций деструкции полимера при экспонировании, удается



Рис. 15. Вид интерференционной структуры, полученной с использованием синхротронного излучения 13,4 нм и дифракционных решеток с шагом < 100 нм, на пленке неорганического резиста толщиной 100 нм [31]

достичь чувствительности на уровне единиц миллиджоулей на сантиметр в квадрате, однако контраст полученных резистов падает почти до единицы. При этом существует обратная зависимость между чувствительностью и контрастом резистов [28]. Одной из важных особенностей органических фоторезистов ЭУФ-диапазона является их линейность, и таким образом независимость экспозиции от интенсивности экспонирующего излучения. Здесь выполняется закон взаимозаместимости интенсивности и длительности экспонирования, и важна только интегральная доза, полученная фоторезистом. Это обстоятельство позволяет, работая при минимальных импульсных интенсивностях, набирать дозу за счет большого числа импульсов, что делает предпочтительной работу на относительно высоких частотах.

Эксперименты, выполненные с рядом тонких неорганических пленок, позволили обнаружить эффект очень высокого контраста передачи изображения, проявляющийся на некоторых материалах при определенных режимах облучения [29]. Эффект может быть феноменологически описан с применением трех уравнений, аналогичных известным уравнениям Дилла, но учитывающих нелинейный характер фотохимического взаимодействия и результирующее изменение оптических констант на фронте актиничного излучения [30]. Важным моментом является включение в рассмотрение некоторой феноменологической функции, характеризующей нелинейные процессы фотохимического взаимодействия. Наилучшее качество изображения, как следует из анализа, может быть получено при выполнении определенного условия, связывающего параметры материала резиста с параметрами экспозиции. Профиль формы края проявляемого (реализованного) изображения, и при соблюдении этих условий, оказывается существенно более резким, чем световое поле. Отсюда и следует эффект усиления контраста реализованного изображения относительно резкости светового поля.

Одновременно с высоким контрастом экспериментальное исследование показывает возможность получения весьма высокой чувствительности, достигаемой при приемлемой пороговой интенсивности. Однако такой фоторезист, являясь нелинейным, теряет свойство взаимозаместимости интенсивности и времени экспонирования: необходимо превысить в каждом импульсе некоторую пороговую энергию. Моделирование показывает, что в случае AsSe эта пороговая энергия составляет 0,34 мДж/см² (при длительности импульса 20 нс). Существуют и другие потенциальные ЭУФ-резисты. От источника потребуется не только и не столько выходная средняя мощность, сколько импульсная мощность, достаточная для преодоления порога в 10...20 кВт/см². Необходимая для проявления доза может быть набрана в результате многократного экспонирования ЭУФ импульсами при условии превышения порога. Экспериментальное исследование показывает практическую возможность разрешения полос шириной 30...40 нм при использовании некоторых неорганических резистов при чувствительности порядка 5 мДж/см², притом минимальное значение задавалось использованным методом формирования изображения, а не материалом резиста (рис. 15) [31]. Более того, форма линий и размытие их края показывает наличие существенного запаса возможностей.

Экспериментальный ЭУФ-нанолитограф для сверхразрешения

Построение экспериментального ЭУФ-нанолитографа, позволявшее рассмотреть и оценить основные проблемы ЭУФ-нанолитографии в комплексной взаимосвязи. было одной из главных задач, поставленных при выполнении проекта МНТЦ № 0991 в 2002-2006 гг. [32]. Причем авторы проекта уделили основное внимание созданию условий достижения предельного разрешения. Такое разрешение могло быть получено как путем разработки относительно широкоапертурных схем изображающих объективов, так и изысканием нелинейных сред, эффективных в качестве фоторезистов с высоким контрастом передачи изображения. Наличие пороговой энергии экспонирования таких резистов требовало решений, опирающихся на оптическую систему с минимальным числом зеркал, а также лазеры, в первую очередь, обладающие максимальным значением энергии излучения в импульсе, а не максимальной мощностью, достигаемой повышением частоты, при пренебрежении импульсной энергией. Так возник экспериментальный нанолитограф (ЭН), внешний вид, структурная и оптическая схема которого изображены на рис. 16, 17 и 18.

В качестве первичного источника, генерирующего лазерную плазму, в нем применяется специально сконструированный эксимерный лазер KrF на 248 нм, излучающий 0,72 Дж в импульсе длительностью 20 нс на частоте следования до 300 Гц [33]. Применяемая оптическая схема позволяет достичь максимальной плотности мощности 8 ТВт/см² на мишени, располагающейся на расстоянии в 100 мм от выходного зрачка объектива.

ЭН состоит из двух блоков — осветительного блока (ОБ) и блока изображения (БИ), соединенных патрубком, по которому из блока в блок проходит EUV излучение. В ОБ находятся конвертор лазерного излучения, большое асферическое кол-



Рис. 16. Внешний вид ЭУФ-нанолитографа, изготовляемого по проекту 0991 [32]

лекторное и плоское поворотное интерференционные зеркала, в БИ — маска-фотошаблон, изображающий объектив, и образец, покрытый слоем фоторезиста. И маска, и образец установлены на прецизионных столах-позиционерах с точностью перемещения до 10 нм при максимальном перемещении 100 мм [34]. Блоки ЭН установлены на виброзащитном столе не только с пассивным, но и с активным виброгашением, демпфирующим инфранизкочастотные колебания [35].

Цилиндрические корпуса обоих блоков разборные, каждый из них состоит из пяти цилиндрических секций-обечаек с фторкаучуковыми вакуумными уплотнениями между их фланцами. Оба блока откачиваются независимо друг от друга турбомолекулярными насосами. Подблоки БИ разделены вакуумно-плотными перегородками с клапанамишиберами для прохода излучения, так что смена маски или образца может проводиться без разгерметизации остальной части объема БИ. Все зеркала оптической системы, кроме корректирующего, плоское отклоняющее зеркало, плоское зеркало маски и асферические коллекторное зеркало и зеркала объектива — являются многослойными Si/Mo интерференционными зеркалами квазинормального отражения с рабочей длиной волны $\lambda = 13,4$ нм, коэффициент отражения этих зеркал ~65 %.

Осветительная часть ЭУФ оптической системы состоит из источника света (лазерной искры), собирающего свет вогнутого асферического коллек-



Рис. 17. Структурная схема ЭУФ-нанолитографа, изготовляемого по проекту 0991 [32]



гис. 18. Оптическая схема ЭУФ-нанолитографа, изготовляемого по проекту 0991 [32]

торного зеркала и плоского отклоняющего зеркала. Источник помещается близко к фокусу коллекторного зеркала, образуя после него слабо сходящийся луч, который после поворота отклоняющим зеркалом направляется к маске. Суммарный ход луча от коллектора до маски превышает 2,5 м, что позволяет разнести в пространстве осветительную и изображающую части оптической системы и соблюсти при этом некоторые габаритные ограничения по высоте. Угол падения луча на маску, который должен быть близким к 90°, корректируется расположенным в БИ корректирующим зеркалом скользящего падения.

Изображающая часть оптической системы состоит из маски-фотошаблона, проекционного объектива и образца с фоторезистом, на котором формируется уменьшенное в 10 раз изображение маски.

В качестве объектива для ЭН выбран простой осесимметричный двухзеркальный шварцшильдовского типа объектив с квадратным полем изображения площадью около 0,7 мм². Расчеты показали, что с помощью такого объектива можно получить рекордное для зеркальных проекционных систем значение числовой апертуры NA = 0,36 при низком уровне аберраций. Моделирование показало, что разрешение, получаемое с помощью такого объектива, составляет $a_{\min} = 15...20$ нм при приемлемом контрасте.

Был выполнен расчет четырехзеркального изображающего объектива с увеличенной числовой апертурой и оптическим разрешением вплоть до 10 нм. Его основные характеристики: NA = 0,485; поле изображения — квадратное, $0,5 \times 0,5$ мм [36] (рис. 19).

Как следует из приведенного графика и из компьютерного моделирования, объектив имеет наивысшее разрешение — 10 нм и идеально скорректированные аберрации. Он легко размещается в демонстрационной установке экспериментального нанолитографа ЭН вместо двухзеркального прототипа. Недостатком объектива является малое поле изображения. Существенное его увеличение — до размеров, превышающих 2 × 2 мм², означало бы значительное расширение областей его применения, вплоть до промышленного. Специфика нового подхода в разработке схем ЭУФ-объектива с осевой симметрией состоит, в частности, в поиске приемов компенсации влияния центрального экранирования на разрешение при необходимости обеспечения высокой апертуры. Анализ выполненного дизайна дает основания надеяться на выполнимость этой задачи.

Результаты численного моделирования показали, что на современном уровне развития технологии одним из наиболее возможных применений голограммных структур в ЭУФ спектральном диапазоне является замена оптических элементов со сложным асферическим профилем элементами с более простой формой, на поверхность которых нанесена синтезированная дифракционная решетка с более простой структурой и высокой дифракционной эффективностью — киноформ. Таким образом, альтернативным подходом к решению проблемы получения дифракционного качества изображения является создание оптического зеркального элемента с неидеальным оптическим качеством и использование системы коррекции, которая позволит избавиться от искажений, как возникших в момент изготовления элемента, так и наведенных в результате неидеальных условий для его работы [37]. Были выполнены также предварительные исследования способа улучшения оптического качества зеркала и результирующего волнового фронта объектива в плоскости изображения с помощью принудительной термодеформации его рабочей поверхности. Они показали, что крупно-масштабные квазистатические осесимметричные искажения эффективно корректируются предложенным



Рис. 19. Ход лучей, частотно-контрастная характеристика и результаты численного моделирования тестовой структуры четырехзеркального объектива, разработанного для ЭУФ-нанолитографа (по проекту 0991, [36])

методом [38]. Таким образом, результаты проведенных исследований по коррекции искажений качества изображения в ЭУФ-объективах дают основание надеяться на реальную перспективу снижения требований к качеству формы и на уменьшение стоимости "малозеркальных" *EUV* изображающих оптических систем при сохранении требований к дифракционному качеству изображений.

Заключение

Создание промышленного нанолитографа, помимо отмеченных физико-технических проблем, требует решения ряда задач точной механики. В их числе конструкция узла образца, (в некоторой степени — и узла маски), требующие создания прецизионного стола с нанометровой точностью и воспроизводимостью перемещений при общем перемещении порядка 300...450 мм. Кроме того, требуется нанометровая точность фокусировки и совмещения всей последовательности слоев на образце. Проблемой более рутинной, но весьма емкой, является создание общей конструкции, корпуса и механики установки нанолитографа в целом. Не тривиальна проблема общей оптической юстировки прибора в ЭУФ диапазоне. Отличительными особенностями установки являются необходимость вибро- и пылезащиты, а также дифференцированная откачная система — при обеспечении возможности сверхпрецизионной юстировки всей оптической системы в целом. Мы не будем останавливаться на этих проблемах, заметив лишь, что в результате их решения будет создан один из самых прецизионных приборов современности, требующий для своего изготовления использования самых передовых достижений науки и техники.

Рассматривавшиеся выше энергетические проблемы источника излучения служат существенной помехой созданию промышленного нанолитографа. Но обстоятельством, заметно отодвигающим его реализацию во времени, по-видимому, стало, в первую очередь, использование иммерсии при работе обычного современного сканер-степпера с ArF эксимерным лазером на 193 нм. В результате этого сушественного расширения возможностей тралиционной техники фотолитографии в настоящее время граница ее возможного применения по различным оценкам находится в диапазоне 30...50 нм. Как отмечалось выше, по оптимистическим оценкам традиционная фотолитография имеет возможность выйти в конечном итоге приблизительно в 2014 г. на разрешение 22...35 нм, не меняя существенно конструкцию уже существующих литографических установок. Однако по оценкам Intel, рубеж 45 нм будет достигнут существенно раньше и дальнейшее увеличение разрешения окажется медленным и затрудненным. Передовыми чиповыми фабриками *Intel* планируется применение ЭУФ-литографии по нормам 32 нм уже в 2009 г. [22].

Таким образом, усовершенствование фотолитографических установок с ArF эксимерным лазером лишает смысла разработку не только аналогичных установок с F₂ лазером на 157 нм, но и ЭУФ литографических средств на стандарты 35...65 нм. Диапазон 22...35 нм теоретически доступен обеим техникам, и конкретные решения будут определяться "по очкам" при тщательном взвешивании достигаемых технико-экономических параметров. В то же время ЭУФ нанолитографии определенно остается "экстремальная" ниша сверхразрешения на уровне 5...20 нм. Достижение этого уровня уже вряд ли возможно без существенного сокращения длины волны актиничного излучения относительно 193 нм, и таким образом, применения ЭУФ с 13,4 нм. Но и оно представляется маловероятным без некоторой модернизации и развития ЭУФ нанолитографических процессов. Эти обстоятельства приводят к тому, что наряду с разработкой экспериментальных прототипов промышленных ЭУФлитографов с шести зеркальными объективами, но с уменьшенной производительностью (8-10 пластин в час — по сравнению с требуемым выпуском 100 пластин в час), изготовляются литографы для исключительно академических целей с двухзеркальными объективами. О намерении изготовить шестизеркальные промышленные прототипы в 2006 г. объявили ASML с участием Zeiss (EUV MicroExposure Tool, MET) [22] и Nikon с участием Ushio и Extreme [39]. В MET предполагается достичь разрешение на уровне 32 нм. В качестве источника ЭУФ-радиации в обеих установках будет использована разрядная плазма. В проекте Nikon достигается 10 Вт в промежуточном фокусе. Что же касается нанолитографов для академических целей, (разрабатываются и изготовляются ASML и Canon в 2006 г. для установки и использования в научноисследовательских центрах США и Японии, соответственно), они выполняются по двухзеркальной оптической схеме без регламентированной производительности. В японском проекте применяется источник на лазерной плазме жидкого ксенона со средней мощностью 0,5 Вт в "промежуточном" фокусе. Рабочее поле установки Сапоп составляет $0.2 \times 0.6 \text{ мм}^2$ при числовой апертуре изображающего объектива 0,3 [40].

Выполненный анализ и полученные экспериментальные данные создают определенные надежды на возможность достижения в ЭУФ-нанолитографах для академических целей разрешающей способности, лучшей, чем 20 нм. Действительно, двухзеркальный объектив, разрабатываемый для применения в ЭН, обладает числовой апертурой

0,36, а проект четырехзеркального объектива — 0,485. Получение больших апертур связано прежде всего с достигнутым технологическим уровнем и возможностями метрологии. Приемы, найденные и опробованные при разработке ЭН, могут быть развиты и усовершенствованы, что позволяет предположить, что $NA \ge 0.5$ вполне реализуемы в ближайшем будущем. Таким образом, оптическое разрешение полос шириной 15 нм двухзеркальным объективом и 10 нм — четырехзеркальным объективом, демонстрируемое числовым моделированием, может служить надежной отправной точкой для дальнейших оценок. Возможно ли для ЭУФдиапазона эффективное управление "технологическим" коэффициентом k₁? Выполненные предварительные расчеты и эксперименты позволяют положительно ответить и на этот вопрос. Это справедливо для масок с фазовым сдвигом, корректирующих оптическое поле на краю линии, так же как и для процессов постэкспозиционной обработки и повышения контраста передачи изображения фоторезиста. Более того, возможность усиления контраста передачи изображения, по крайней мере, в неорганических резистах типа халькогенидных полупроводниковых стекол экспериментально показана. Таким образом, можно вполне рассчитывать на улучшение, как минимум, вдвое получаемой оптической разрешающей способности системы в процессе проявления и закрепления изображения, т. е. на 7,5 и 5 нм для двух- и четырехзеркальных объективов, соответственно. Дальнейшее продвижение в сторону одного нанометра является уделом кропотливых и последовательных разработок. При необходимости можно будет перейти, пренебрегая потерями, на более короткие длины волн, вплоть до 3-7 нм, с использованием других "брэгговских" систем, которые сегодня уже исследуются. Применение двух- и четырехзеркальных объективов и прогресс в области новых источников излучения для ЭУФ и мягкого рентгена делают некоторое смещение по длинам волн в коротковолнового сторону вполне приемлемым и реальным. Это, по-видимому, и является путем выхода на уровень разрешения, соответствующий первым единицам нанометров.

Каковы пути реализации нанолитографии с разрешением в области 1...20 нм? Какие объекты могут оказаться предметом исследований на таком нанолитографе? Диапазон 10...20 нм, по-видимому, окажется критическим для полевого транзистора с изолированным затвором [21]. На рис. 20 приведен некоторый набор объектов исследования "первой очереди" в меру скромного воображения. Это квантово-точечный кристалл, интерференционные мезотранзисторы и логические элементы, одноэлектронный транзистор, фотонные кристаллы.



Рис. 20. Наноструктуры, являющиеся возможными объектами исследований на изготовляемом ЭУФ-нанолитографе:

1 — квантово-точечный квазикристалл; 2 — интерференционный мезоскопический транзистор; 3 — одноэлектронный транзистор; 4 — фотонный кристалл; 5 — полупроводниковый лазер с регулярным ансамблем квантовых точек; 6 — полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью и нерегулярной дифракционной структурой

Кроме того, нанолитография способна вдохнуть новую жизнь в такие "старые" приборы, как лазер на квантовых точках, лазер с распределенной обратной связью, акустоэлектронные и акустооптические приборы. Здесь появляется возможность строгой организации излучающих диполей, или же заданной прецизионной нерегулярности полос дифракционной решетки, либо акустических рефлекторов, придающих системам новые свойства организации (например, фокусировки) оптических или акустических волн. Однако все это может показаться потугами слабого и зашоренного воображения на фоне возможности использования нанолитографических структур в качестве "печатной наноплаты" с организованной и взаимосвязанной системой затравок для наноструктур, получаемых самоорганизацией.

Автор считает своим приятным долгом высказать благодарность Наталии Алексеевне Калитеевской за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания.

Список литературы

1. Diefendorff K. Microprocessor Report. 2000.

2. http://www_sandia.gov/news-center/publications/sandiatechnology/2003/st2003v5no3.pdf

3. Stulen R., Freeman R., Jewell T. Американская программа EUV-нанолитографии. Международный семинар в

ФТИ им А. Ф. Иоффе. 19 декабря 1994 г.

4. http://www.asml.com

5. **The** Proceedings of EUVL Source Workshop. Dallas. October 14, 2002.

6. **O'Sullivan G., Dunne P.** The Proceedings of EUVL Source Workshop. Dallas. October 14, 2002.

7. Andreev A., Limpouch J., Isakov A. B. // Phys. Rew. E, 65, (2002). P. 025403-1-9.

8. Борисов В. М., Виноходов А. Ю., Кирюхин Ю. Б. и др. Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, 23—26 февраля 2003 г. С. 124—130.

9. **Danilov O. B.** Presentation at 991 ISTC Project International Workshop. St.-Petersburg; Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

10. Andreev A. A., Nikolaev V. G., Platonov K. Yu., Chizhov S. A., Koulik A. V., Sabirov R. L., Sall E. G. Presentation at 991 ISTC Project International Workshop. St.-Petersburg: Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

11. **The** Proceedings for the 31st ISTC Japan Workshop on Advanced EUV Technologies in Russia. October 01, 2004.

12. **Ogawa.** EUVA Executive Director, Private Commun. during Japan-Russia ISTC Workshop. Tokyo. Oct. 30–Nov. 09, 2005.

13. **The** Proceedings of 2nd Int. Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Symposium, Antwerp, 2003; EUVL Source Workshop. Santa Clara. Feb. 22, 2004.

14. Tichenor D. A., Cubiak G. D., Malinovski M. E., Stulen R. H. et al. Development of a Laboratory Extreme-Ultraviolet Lithography Tool. // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2194. P. 95–105.

15. **Ногіїке Ү.** Доклад о новой Японской программе работ по EUVL. // Международный симпозиум по нанотехнологиям, ФТИ, СПб. 27—29 мая 2002 г.

16. Dinger U., Eisert F., Lasser H. et al. // SPIE PRO. 2000, V. 4.0.

17. Seisyan R., Zhevlakov A. 1st Annual Report of the 0991 ISTC Project., Ioffe Inst.-ISTC, 2003.

18. Ulrich W., Beiersdorfer S., Mann H.-J. // SPIE UC. 2000, V. 4.1.

19. Seisyan R., Zhevlakov A., Voznesensky N. 2nd Annual Report of the 0991 ISTC Project. Ioffe Inst.-ISTC, 2004; N. Voznesensky, the Proceedings for the 31st ISTC Japan Workshop on Advanced EUV Technologies in Russia, October 01, 2004.

20. Okazaki Sh., Nishiyama I. Presentations at the 991 ISTC Project International Workshop, St.-Petersburg; Ioffe Institute, July 22–23, 2005.

21. http://www.intel.com.

22. http://www.ixbt.com.

23. Dao G., Yen A., Trybula W. // Future Fab. Int. 2.02.2002. V. 12.

24. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (Обзор) // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 1–13.

25. Kim D., Cha D., Lee S. // Jap. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 2728.

26. **Bjorkholm J. E.** // Intel Technology Journal Q3'98. EUV-lithography – the successor of optical lithography. P. 1–8.

27. N. Matsuzawa, S. Irie, E. Yano, S. Okazaki, A. Ishitani. Theoretical Calculations of Photoabsorption of Polymers in the EUV (Extreme Ultraviolet) Region // SPIE Proc. 2001. Vol. 4343. P. 278–284.

28. Булгакова С. А., Лопатин А. Я., Лучин В. И., Мазанова Л. М., Салащенко Н. Н. Исследование характеристик рентгенорезистов на основе полиметакрилатов с помощью лазерно-плазменного источника в области 13 нм // Материалы Всероссийского совещания. Нижний Новгород, 23—26 февраля 1998 г. С. 124—130.

29. Бараш Е. Г., Кабин А. Ю., Любин В. М., Сейсян Р. П. Воздействие импульсного вакуумного ультрафиолета на пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников AsSe и As_2S_3 // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 3. С. 106—113.

30. Калитеевская Н. А., Сейсян Р. П. Моделирование фотохимических превращений и фотопотемнения пленок фоторезистов под действием импульсного вакуумного ультрафиолетового излучения // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 7. С. 587—860.

31. Калитеевская Н. А. Нестеров С. И., Сейсян Р. П. // Тезисы докладов на Международной конференции ICME-2005, Москва, 3—7 октября 2005 г. 32. Seisyan R. 2nd Annual Report of the 0991 ISTC Project. Ioffe Inst.-ISTC, 2004.

33. **Babushkin S., Tikhon S., Demidov V.** Presentation at the 991 ISTC Project International Workshop, St.-Petersburg, Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

34. Seisyan R., Yukish V. Presentation at the 991 ISTC Project International Workshop. St.-Petersburg, Ioffe Institute, July 22–23, 2005.

35. **Korotkov E., Moroz A.** Presentation at the 991 ISTC Project International Workshop, St.-Petersburg, Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

36. Seisyan R., Zhevlakov A., Gavrilov E. Presentations at the 991 ISTC Project International Workshop, St.-Petersburg, Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

37. **Venediktov V.** Diffraction optical elements in EUV lithography: some opportunities. Presentation at the 991 ISTC Project International Workshops. St.-Petersburg, Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

38. **Dimakov S., Kislitsyn B., Klimentiev S., Zhevlakov A., Zhuk D.** Termo-correction of quasi-static optical distortions for EUV lithography. Presentation at the 991 ISTC Project International Workshop. St.-Petersburg, Ioffe Institute. July 22–23, 2005.

39. Ichikhara Y. Vice President of Nikon, Private Commun. during Japan-Russia ISTC Workshop. Tokyo, Oct. 30—Nov. 09, 2005.

40.**Horiike Y.** Presentation at 2005 EUVL Symposium, San Diego, CA, U. S. A; Private Commun., Ioffe Inst. Nov. 22–23, 2005.

УДК 621.382.002

М. В. Бутывская, ОАО "НИИМЭ и Микрон"

СОЗДАНИЕ СТРУКТУР "КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПЛАНТАЦИИ ВОДОРОДА

Описана технология создания структур "кремнийна-изоляторе" (КНИ) методом Smart Cut. Представлен новый метод оптимизации данной технологии в части достижения высокой эффективности условий скалывания и снижения суммарной дозы имплантации водорода.

"Кремний-на-изоляторе" (КНИ) представляет собой многослойный материал, в котором монокристаллический приборный слой кремния электрически изолирован от несущей кремниевой пластины диэлектриком.

Методы изготовления структур КНИ заключаются в отделении части подложки с помощью имплантации кислорода (SIMOX), соединении и обратном травлении структуры КНИ (BESOI), а наиболее современный метод — в соединении двух пластин с последующим скалыванием одной из них вдоль области среднего проецированного пробега имплантированных ионов водорода (Smart Cut) [1—3].

Особенностью этих способов [1—3] является создание радиационных дефектов, вызванных имплантацией ионов газов в донорную пластину, внутренних напряжений, которые вызывают появление стесненной деформации, разделяющей пластину на две части.

Наиболее перспективна технология изготовления тонких пленок полупроводникового материала (приборного слоя) на диэлектрике [4], включающая:

- имплантацию поверхности полупроводниковой донорной пластины через слой диэлектрика ионами водорода;
- соединение донорной пластины с пластиной из объемного кремния (несущей пластиной);
- термообработку при температуре, обеспечивающей сращивание пластин;
- термообработку при температуре, обеспечивающей расслоение донорной пластины.

Никакая другая технология, кроме КНИ, не может решить противоречия между низкой мощностью и высоким быстродействием логических приборов. Помимо выигрыша в быстродействии в схемах общего назначения незначительные токи утечки и низкая потребляемая мощность кристаллов могут значительно улучшить характеристики компьютерных приборов. Хотя структуры КНИ, полученные с использованием имплантации водорода, стоят дороже, чем пластины из объемного кремния, они могут потенциально уменьшить стоимость кристаллов за счет сокращения операций технологического маршрута. Не изменяя минимальных топологических размеров транзистора, структуры КНИ позволяют получить более высокую плотность упаковки транзисторов за счет уменьшения областей изоляции по сравнению с приборами на объемном кремнии, создавать кристаллы меньших размеров без прямого масштабирования транзисторов и увеличить процент выхода годных.

Использование имплантации водорода для получения КНИ-структур позволяет получать такие структуры, как SiC или GaAs на окисленном кремнии и Ge на стекле. Это особенно полезно, когда на пластине необходимо получить тонкий монокристаллический слой, что не всегда возможно с помощью эпитаксиального наращивания этого слоя.

Процесс создания КНИ-структур с использованием имплантации водорода имеет несколько преимуществ: с технической точки зрения — это возможность переноса тонкого приборного слоя однородного по толщине с высоким качеством кристаллической решетки материала, с экономической точки зрения — возможность многократного использования донорной пластины, что приводит к снижению стоимости.

На рис. 1 представлен разрез донорной пластины после имплантации ее поверхности через слой диэлектрика ионами водорода и образования в пластине слоя микропузырьков параллельно поверхности пластины.

На рис. 2 представлен разрез структуры после соединения донорной пластины с несущей пластиной и термообработки при температуре, обеспечивающей сращивание пластин.

На рис. 3 представлен разрез структуры после расслоения донорной пластины по плоскости залегания микропузырьков и переноса приборного слоя кремния на несущую пластину.

Основой технологии водородного расслоения является эффект формирования на глубине среднего проецированного пробега ионов водорода микротрещин размерами до 100 нм, в которых при последующей термообработке идет накопление газообразного водорода, что приводит к повышению давления в микротрещине, ее росту и к отделению приборного слоя кремния от донорной пластины [5]. В нарушенном ионами слое кремния после отжига при 400—600 °С образуются крупные микротрещины размером примерно 1 мкм. Характерной особенностью водорода является его активное взаимодействие с примесями и дефектами. В результате водород захватывается на растянутые и ослабленные связи кремний—кремний на краях микротре-







Рис. 2. Разрез структуры после соединения донорной пластины с несущей пластиной



Рис. 3. Разрез структуры после расслоения донорной пластины и переноса приборного слоя на несущую пластину

щин. Размеры трещин увеличиваются по мере накопления водорода, происходит полный разрыв связей и формирование "куполов" размерами 10— 50 мкм на поверхности.

Появление "куполов" наблюдается при отжиге имплантированной донорной пластины, начиная с некоторой дозы водорода. Подобный рельеф на поверхности может также образовываться при имплантации, если доза будет превышать критическое значение. Таким образом, существует некоторый интервал доз, внутри которого не происходит нарушения поверхности в процессе облучения и в то же время концентрация водорода уже достаточна для отслоения приборного слоя кремния при отжиге [5].

Если поверхность донорной пластины покрыть механически прочной пленкой или соединить с другой пластиной, то формирование высоких "ку-полов" будет подавлено, а трещины будут разви-

ваться преимущественно параллельно поверхности, приводя к полному отделению приборного слоя кремния от основной части донорной пластины [6]. Интервал доз, в котором "купола" не образуются, зависит от многих факторов (температуры облучения, энергии и интенсивности потока ионов, наличия дополнительных покрытий на поверхностях донорной и несущей пластин) и подбирается экспериментально [5].

Образование "куполов" нарушает сплошность перенесенного приборного слоя кремния.

Одним из способов повышения качества структуры приборного слоя кремния на диэлектрике является выбор режимов имплантации, устойчиво препятствующих образованию "куполов".

Для этого в разработанной технологии, включающей имплантацию поверхности донорной кремниевой пластины через слой диэлектрика ионами водорода, соединение донорной пластины с несущей пластиной, двухстадийную термообработку при температурах, обеспечивающих сращивание и расслоение облученной донорной пластины, облучение донорной пластины проводят в три этапа: на первом этапе облучение выполняется на глубину расслоения донорной пластины, а в двух других этапах проводится облучение с меньшей дозой на глубину, большую и меньшую глубины расслоения [7].

На рис. 4 представлено распределение ионов водорода в кремниевой донорной пластине после одноэтапной имплантации и обработки при температуре 500 °С. Показаны два диффузионных потока водорода: один внутрь на радиационные дефекты (с выделением газообразного водорода), другой наружу в сторону наименьших концентраций, снижающий концентрацию газообразного водорода и, в результате, обуславливающий увеличение дозы имплантации.



гис. 4. Распределение ионов водорода в донорнои пластине после одноэтапной имплантации (энергия 60 кэВ, доза $4,0 \cdot 10^{16}$ см⁻²) и отжига (температура 500 °C)

На рис. 5 представлен разрез структуры в соответствии с разработанным процессом после имплантации кремниевой донорной пластины в три этапа и обработки при температуре 500 °С. Показано три диффузионных потока водорода, два внутрь на радиационные дефекты из основного имплантационного профиля и из боковых (с выделением газообразного водорода), третий — наружу в стороны наименьших концентраций.

При таком концентрационном профиле легирования водородом достигается более высокая эффективность его использования для достижения необходимых условий скалывания. А это, в свою очередь, приводит к снижению суммарной дозы имплантации водорода.

Была проведена экспериментальная проверка разработанного процесса. Пластины кремния (КЭФ-4,5 (100), толщиной 460 мкм) подвергались стандартной обработке в буферном растворе HF:NH₄F:H₂O для удаления естественного оксида с поверхности кремния. На первой (донорной) пластине термическим окислением формировался диэлектрический слой толщиной 100 нм и проводилась имплантация ионами водорода с энергией 30, 60 и 90 кэВ с дозами 5,0 \cdot 10¹⁵ см⁻², 3,0 \cdot 10¹⁶ см⁻² и 5,0 \cdot 10¹⁵ см⁻² (см. рис. 5).

На второй (несущей) пластине толщина диэлектрического слоя составляла 300 нм. Контрольная пара пластин обрабатывалась аналогичным образом, отличие было только в режиме имплантации водорода: энергия — 60 кэВ, доза — $4,0 \cdot 10^{16}$ см⁻² (см. рис. 4).

Затем соединенные пластины подвергались термообработке при температуре 500 °С в течение 30 мин. На этой стадии происходило расслоение донорной пластины на приборный слой, соединенный с несущей пластиной, и основную часть



Рис. 5. Распределение ионов водорода после имплантации в донорной пластине в три этапа (энергии 30, 60 и 90 кэВ, дозы $5,0 \cdot 10^{15}$ см⁻², $3,0 \cdot 10^{16}$ см⁻² и $5,0 \cdot 10^{15}$ см⁻²) и отжига (температура 500 °C)

пластины. При этом было установлено, что число "куполов" в структуре, полученной в соответствии с разработанным процессом, на порядок ниже, чем в контрольной структуре.

На полученных структурах были изготовлены тестовые МОП *n*- и *p*-канальные транзисторы. Для сравнения полученных экспериментальных данных одновременно исследовались тестовые МОП-транзисторы с каналами *n*- и *p*-типа проводимости одинаковой топологии, изготовленные на основе объемного монокристаллического кремния *n*- и *p*-типа с концентрацией носителей, совпадающей с таковой для КНИ-структур.

Изменения тока утечки и порогового напряжения в полученных по разработанной технологии тестовых элементах гораздо слабее, чем в контрольных образцах объемного кремния:

 обратные токи перехода сток—подложка в полученных элементах меньше, чем в кремниевых элементах, в 3—10 раз в области комнатной температуры и в 300—400 раз в области температур 250—300 °C;

 по критерию допустимости двукратного уменьшения порогового напряжения МОП-транзистора предельная рабочая температура экспериментального МОП-транзистора превышает таковую для аналогов, выполненных на объемном кремнии на ΔT = 80 ÷ 100 °C.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР, № 1282757 А 1, 30.12.1983.

2. Патент РФ № 2164719. С. 1.

3. Тимошенков С. П., Прокофьев Е. П. и др. Получение структур КНИ методами химической сборки поверхности и газового скалывания // Электронная промышленность. 2002. № 1. С. 51.

4. Патент США № 5 374 564.

5. Попов В. П. и др. Свойства структур и приборов на кремний-на-изоляторе // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1075. 6. Bruel M. Electron. Lett. 1995. V. 31. P. 1201.

7. Патент РФ № 2260874. 6 с.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 533.9

А. А. Ковалевский, канд. техн. наук, **А. В. Долбик**, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, **В. В. Цыбульский**, "Белмикроанализ", г. Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АНИЗОТРОПНОГО ПЛАЗМО-ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Исследован процесс сухого анизотропного травления диоксида кремния в фторкислородсодержащей среде.

Показано, что основными факторами, влияющими на условия анизотропного плазмохимического травления являются: общее давление газовой смеси, парциальные давления каждого из компонентов и подводимая к подложке ВЧмощность. Вертикальность стенок контактных окон в диоксиде кремния при анизотропном плазмохимическом травлении обеспечивается при общем давлении газовой смеси октафторпропан (хладон-218)—кислород 4—8 Па и содержании кислорода по отношению к октафторпропану 2—4 об. %.

Введение

Плазмохимическое травление в условиях низкого давления (< 10 Па) в реакционной камере при интенсивной ионной бомбардировке поверхности является анизотропным процессом травления (АТ) [1—9], при котором боковое подтравливание или равно нулю или приближается к нему. Задача получения профиля со строго вертикальными стенками контактных окон в диоксиде кремния тесно связана с решением проблемы реализации анизотропного травления.

Целью работы является исследование кинетики и особенностей процесса анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния (SiO₂).

Методика эксперимента

Травление слоев SiO₂ проводилось на установке "Отелло-43". Для осуществления процесса AT использовался керамический реактор с ВЧ-индуктором, т. е. реактор на базе высокочастотной безэлектродной разрядной системы, позволяющей получать высокую концентрацию радикалов фтора, достаточную, в принципе, для получения скорости травления SiO₂ 0,06 мкм/мин и выше, в зависимости от покрытия нерабочей стороны обрабатываемой пластины.

Проводилось травление пленок термического SiO₂ толщиной 0,8-1,2 мкм с фоторезистивной маской на основе фоторезиста ФП-051 МК толшиной 1,5-2,0 мкм, сушку которого осуществляли при температуре 383 К, а также с маской из алюминия толщиной 0,54 мкм. Профиль и высоту канавок травления определяли в растровом электронном микроскопе Stereoscan-360, толщину пленок оценивали на лазерном элипсомерте ЛЭМ-2, плотность дефектов оценивалась в осветителе ИО-24 и в измерителе дефектности Surfscan-4500.

Эксперимент и обсуждение результатов

Изменение общего давления газовой смеси в реакционной камере составляло от 1,0 до 10 Па, парциальное давление октафтор-



Рис. 1. Зависимость скорости $V_{\rm AT}$ анизотропного травления диоксида кремния в плазме $C_3F_8 + O_2$ от общего рабочего давления $P_{\rm oбщ}$ газовой смеси (1, 2), от объема расхода Q хладона-218 (3, 4); $W_{\rm BY} - 300$ Вт (1, 3, 4), $W_{\rm BY} - 150$ Вт (2); $P(C_3F_8) - 0,7$ Па (1, 2), содержание кислорода в камере 2 об. % (1, 3), без кислорода (2, 4), $P_{\rm ofo} - 5$ Па (3, 4)

пропана (хладона-218) было постоянным — 0,7 Па.

При уменьшении размеров элементов интегральных микросхем (ИМС) до уровня ≤ 1,0 мкм появилась необходимость формирования в межуровневом диэлектрике контактных окон со строго вертикальными стенками [6—9].

Это предоставляется возможным в условиях максимального воздействия ионов на обрабатываемую поверхность в условиях низкого (≤ 10 Па) давления рабочих газов в реакционной камере.

В этих условиях процесс плазмохимического травления определяется ионной бомбардировкой поверхности пластины, которая зависит от ряда технологических факторов, таких например, как общее давление в реакционной камере, парциальное давление каждого из компонентов и подводимая ВЧ-мощность.

Проведенные исследования влияния давления газовой смеси в реакционной камере на скорость АТ диоксида кремния (SiO₂) (рис. 1, кривые *1, 2*) показали, что резкое колебание скорости травления свидетельствует о неполном использовании реакционных газов и о нестабильности процесса анизотропного травления. Лишь при малом давлении газов происходит плавное изменение скорости травления SiO₂.

При этом максимальная скорость травления SiO₂ была получена при содержании кислорода до 4,0 об. %. При максимальном давлении в реакционной камере 8 Па наибольшая скорость травления была получена при содержании кислорода в объеме газовой смеси 2...4 об. %.

По-видимому, первоначальное уменьшение скорости травления связано с уменьшением плотности активных радикалов у поверхности подложки и, как следствие, с уменьшением скорости доставки их к ее поверхности. Выяснение механизма увеличения скорости травления свидетельствует в пользу того, что при давлении 1-8 Па в условиях ионной бомбардировки происходит нормальное падение ионов фтора на поверхность травящегося материала без значимого рассеяния на боковые стенки диоксида. В этом случае активация ионной бомбардировкой поверхности диэлектрика увеличивается. Кроме того, ионная бомбардировка усиливает травление поверхности SiO₂ благодаря тому, что реакционные частицы, такие как атомарный фтор, образуются на поверхности подложки в результате ионно-индуцированной диссоциации нейтральных молекул и радикалов, которые были первоначально адсорбированы из газовой фазы. Освобождающиеся реакционные частицы тут же образуют связи F-Si-O без миграции по поверхности, разрушая слой диэлектрика.

Снижение скорости травления при давлении газовой смеси > 8 Па объясняется тем, что направленная ионная бомбардировка [1] может осуществляться при таком давлении, когда длина свободного пробега иона λ_i больше толщины ионного слоя у поверхности d_{is} . Если $\lambda_i < d_{is}$, то столкновения ионов с нейтральными атомами и молекулами в пределах слоя приводят к изменению направления движения иона и их хаотическому воздействию на поверхность, что в свою очередь вызывает травление боковых стенок при давлении газовой смеси > 8 Па, в результате чего уменьшается скорость травления. Очевидно, чтобы идеально выдержать процесс анизотропного травления, давление должно быть < 10 Па.

Необходимо подчеркнуть, что скорость травления диоксида кремния в чистом октафторпропане (C_3F_8) [молекулярная масса 188] при давлении 1,0...10 Па гораздо хуже, чем при таком же давлении в присутствии кислорода.

По-видимому, в условиях дефицита свободного фтора ионы типа $C_3 F_7^+$ вызывают травление поверхности диоксида кремния только при условии ее очистки от сорбируемого углерода под действием ионной бомбардировки. Поэтому введение кислорода в плазму $C_3 F_8$ приводит к прекращению травления на вертикальных стенках и воздействию на горизонтальную поверхность ионов, ускоренных отрицательным смещением, что и стимулирует процесс AT.

Это позволяет сделать вывод, что на скорость травления влияет наличие кислорода в зоне реакции. Именно введение в плазму хладона-218 небольших добавок кислорода или добавок смеси кислорода с аргоном или гелием позволяет проводить анизотропное травление SiO₂ со скоростью от 45 до 100 нм/мин.

Вертикальность стенок достигается при давлении газовой смеси 4...8 Па и концентрации кислорода по отношению хладону-218 до 4,0 об. %.

В случае анизотропного травления эволюция скорости травления по поверхности пластины не так проста, как может показаться на первый взгляд.

Во-первых, почти всегда имеется различие в скорости травления центра пластины и ее краев. Края всегда травятся быстрее центра, т. е. имеет место влияние загрузочного эффекта [4, 9].

Во-вторых, снижение общего давления газовой смеси ниже 4 Па, как и его повышение выше 8 Па, приводит к заметному клину травления по поверхности пластины при прочих равных условиях и лишь в области суммарного давления 4—8 Па наблюдается максимальное сближение скорости травления по всей площади пластины. В любом случае изменение скорости анизотропного травления SiO₂ в плазме $C_3F_8 + O_2$ при АТ не коррелирует с изменением общего давления

газовой смеси в реакционной камере.

Тем не менее, профиль контактного окна и степень анизотропии весьма удовлетворительны. При давлении газовой смеси 10 Па уже наблюдается явное искажение профиля от вертикального. Надо отметить, что такое же искажение профиля проявляется и на давлениях < 4 Па газовой смеси.

Во всех случаях при АТ имеет место наклон стенок контактного окна, что свидетельствует о боковом подтраве вертикальных стенок. Очевидно, это объясняется недостаточной ионной бомбардировкой поверхности в указанных режимах АТ. Увеличение потока и энергии ионов, бомбардирующих поверхность путем подачи отрицательного потенциала смещения, хотя и приводит к увеличению глубины контактного окна, но вызывает искажение рисунка в диоксиде кремния. Искажение рисунка обусловлено неравномерным распределением плотности ионного потока, падающего на подложку. Оно возникает из-за зарядки диэлектрической пленки, а также из-за ограниченной толщины приэлектродного слоя, откуда происходит сбор ионов. В результате этого плотность потока ионов на поверхности диэлектрика большой площади будет выше, чем на малой площади. Искажение рисунка проявляется как на микрометровых так и на субмикрометровых его размерах.

Проведенные исследования влияния суммарного давления газовой смеси на основе хладона-218 с кислородом на скорость анизотропного травления SiO₂ показали, что резкое колебание скорости травления свидетельствует о неполном использовании реакционных газов и о нестабильности процесса AT, очень чувствительного к давлению газовой смеси и концентрации ионов фтора при прочих равных условиях. Экспериментальные данные показывают, что скорость AT в реакторе установки "Отелло-43" достигает максимального значения при подводимой ВЧ-мощности 300 Вт и давлении газовой смеси в зоне реакции 4...8 Па. В этом режиме плазмохимического травления SiO₂, где основную роль играет хладон-218 с малыми добавками (< 10 об. %) кислорода, предоставляется возможность сформировать контактные окна в диоксиде кремния практически с вертикальными стенками (рис. 2).

Наблюдения за изменением скорости анизотропного травления SiO₂ при давлении газовой смеси в реакционной камере 5,0 Па и концентрации кислорода 2,0 об. % показывают, что скорость анизотропного травления SiO₂ увеличивается во всем исследуемом диапазоне расхода хладона-218 от 0,45 до 3,6 дм³/ч (см. рис. 1, кривые *3*, *4*). По сути, в этом случае изменение скорости травления изменяется с увеличением атомов фтора в реакционном пространстве и именно с использованием хладона-218, поскольку другие хладоны, например четырехфтористый углерод (хладон-14), не обеспечивают необходимой степени селективно-



Рис. 2. Топография контактного окна в диоксиде кремния

сти к материалу диэлектрика. В этом травящем реагенте скорость травления кремния значительно превышает скорость травления диоксида кремния. Это обстоятельство во многом создает проблемы в отношении использования более дешевого хладона-14, поскольку в данном случае требуются крайне жесткие требования к контролю процесса при травлении структур SiO-SiO₂ в связи с тем, что более высокая скорость травления кремния приводит к значительному растравливанию после удаления пленок SiO₂.

Именно использование хладона-218 позволяет изменить селективность процесса травления в сторону SiO₂, т. е. при его использовании имеет место дефицит атомарного фтора в разряде, но при его диссоциации концентрация радикалов $C_3 F_7^+$ во много раз выше, чем при диссоциации CF₄ (хладона-14). Именно в условиях дефицита свободного фтора ионы типа $C_3F_7^+$ вызывают травление поверхности кремния только у его поверхности и только при условии ее очистки от сорбируемого углерода под действием ионной бомбардировки.

Изменение количественного содержания хладона-218 от 0,45 до 3,6 дм³/ч приводит к увеличению скорости травления диоксида кремния, при прочих равных условиях, с 10 до 60 нм/мин (см. рис. 1. кривая 3) с добавлением в зону реакции 2 об. % кислорода и с 5 до 30 нм/мин (см. рис. 1, кривая 4) с использованием только хладона-218. По-видимому, малая скорость травления в чистом хладоне-218 обусловлена процессом полимеризации последнего в плазме ВЧ-разряда, что вызывает образование полимерных пленок. Добавление кислорода подавляет процесс полимеризации и способствует увеличению выхода свободных атомов фтора.

Следует отметить, что наилучшие результаты в отношении воспроизводимости скорости анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния были получены при расходах хладона-218 1,8...2,4 дм³/ч и концентрации кислорода 2,0 об %. Использование как более меньших, так и более больших расходов приводит к заметному разбросу по толщине удаляемого диоксида кремния по поверхности пластины и, более того, в случае больших расходов газов порядка 3,0-3,6 дм³/ч в камере имеет место паразитный разряд.

Важно отметить, что самая высокая степень анизотропии травления диоксида кремния достигается в чистом октафтор-(C₃F₈)-хладоне-218 пропане при парциальном давлении 5 Па. Наблюдение за развитием профиля контактного окна во времени показывает, что наклон стенки его устанавливается уже в первые минуты травления. Далее изменения профиля контактного окна не происходит. Более того, при поминутном травлении с паузами в 1...2 мин и последующем поминутном травлении с паузами более 2 мин. Из этого следует, что скорость травления контактного окна также постоянна во времени. Однако в случае плохого контакта бразца с подложкодержателем (пыль, неплоскостность пластины) глубина травления уменьшается, т. е. имеет место уменьшение скорости травления. Оптимальным расходом в данном случае следует считать расход хладона-218 1,5...2,0 дм³/ч при давлении в реакционной камере 4...8 Па и подводимой ВЧ-мощности 300 Вт, где достигается высокая скорость анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния до 60 нм/мин и хорошая анизотропия процесса.

Выбранный нами для повышения селективности октафторпропан (C_3F_8) имеет отношение F/C = 2,67 (для сравнения CF_4 имеет F/C = 4) и склонен к полимеризации при отсутствии ионной бомбардировки. Для уменьшения полимеризации C_3F_8 необходимо либо увеличить степень ионной бомбардировки (что сказывается на стойкости фоторезиста) либо ввести дополнительный газ, например кислород, и увеличить его процентное содержание.

Первое условие выполняется при увеличении мощности разряда плазмы. Но увеличение мощности разряда, например, до 500 Вт и выше резко снижает стойкость фоторезиста к ионной бомбардировке и в этом случае требуется поиск новых фоторезистов и других маскирующих материалов, например, масок из металла, что усложняет технолологический процесс плазмохимического травления. В связи с этим предпочтительным следует считать введение в реакционную зону определенного количества кислорода, который в сильной степени влияет на анизотропию процесса травления.

Влияние изменения процентного содержания кислорода в рабочей камере при постоянном давлении газовой смеси 5 Па, расходе хладона-218 1,8 дм³/ч при подводимой ВЧ-мощности 300 Вт и 150 Вт на скорость анизотропного травления SiO₂ приведено на рис. 3. Полученные результаты позволяют установить, что при увеличении расхода кислорода от 0,5 до 2,0 об. %, происходит значительное увеличение скорости травления оксида кремния. В этом диапазоне концентрации скорость травления диоксида кремния при подводимой ВЧ-мощности 300 Вт увеличивается с 7 до 60 нм/мин, а при подводимой мощности 150 Вт увеличивается с 5 до 50 нм/мин. Далее с увеличением процентного содержания кислорода с 2 до 4 об. % идет незначительный рост скорости травления диоксида кремния, при подводимой ВЧ-мощности 300 Вт с 60 до 70 нм/мин. Увеличение содержания кислорода выше 4 об. %, приводит к снижению скорости травления.

Снижение скорости АТ диоксида кремния при избыточном расходе кислорода > 4,5 об. %, по-видимому, можно объяснить тем, что при таком содержании не исключается возможность его существования в форме молекул. Молекулярная форма кислорода по активности значительно уступает атомарной. Тем не менее, возможно, существует и другая причина, поскольку, как уже отмечалось выше, при более высоком значении подводимой ВЧмощности наблюдается более резкий спад скорости травления (рис. 3). А как известно [9], степень ионной бомбардировки увеличивается за счет увеличения мощности разряда плазмы, что в свою очередь должно стимулировать ионизацию реакционного газа, в том числе и кислорода. Возможно, кислород каким-то образом подавляет активность октафторпропана (C₃F₈) и способствует уменьшению времени нахождения активных частиц в зоне реакции, т. е. в зоне направленной бомбардировки контакт-



Рис. 3. Зависимость скорости анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния в плазме $C_3F_8 + O_2$ от объемного содержания кислорода в газовой смеси; $W_{\rm BY} - 300$ BT (1), $W_{\rm BY} - 150$ BT (2), $P_{\rm oбщ} - 5$ Па (1, 2). Температура подложкодержателя 361 K (1, 2)

ного окна. Однако факт остается фактом, что при увеличении содержания кислорода до 4,5 об. % по отношению к C_3F_8 в зоне реакции наблюдается спад скорости травления. При слишком малых расходах кислорода < 1,5 об. % спад скорости травления SiO₂ можно объяснить лишь возможной полимеризацией хладона-218.

Важно отметить влияние расхода кислорода, при прочих равных условиях, на остаточную толщину оксида кремния по поверхности пластины при заданном времени.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении расхода кислорода от 1,0 до 4,0 об. % и выше, что приводит к увеличению разброса остаточной толщины диоксида кремния по площади пластины.

Исходя из этого следует, что анизотропное травление SiO₂ необходимо проводить при малых концентрациях кислорода (2...4 об. %) и общем давлении газовой смеси 4...8 Па, для того чтобы избежать появления паразитного разряда в области подложки при подводимой ВЧ-мощности 300 Вт и выше.

Мощность плазменного разряда определяет эффективность процесса травления. Именно мощность плазменного разряда, как и снижение давления газов в реакторе, определяет эффективность ионной бомбардировки, поскольку приводит к увеличению энергии бомбардирующих ионов.

В результате проведенных исследований однозначно установлено, что увеличение мощности разряда плазмы приводит к возрастанию скорости травления диоксида кремния (рис. 4).

Увеличение мощности разряда плазмы до 500 Вт снижает стойкость фоторезиста во времени до 1...2 мин. Более того, при давлении газовой смеси в реакторе более 8 Па между подложкой и подложкодержателем возникает паразитный "коронный" разряд, что отрицательно сказывается на режиме процесса травления. Это свидетельствует о том, что при таких условиях давление в камере необходимо снижать до тех пор, пока явление "коронного" разряда исчезнет.

Важно отметить, что при ВЧмощности 50 Вт скорость травления крайне мала и практически не превышает единиц нанометров в минуту. Поэтому минимальная ВЧ-мощность должна составлять не менее 150 Вт.

Что касается разброса по толщине оставшегося диэлектрика по поверхности пластин, то он проявляется более всего при мощности разряда плазмы 100 Вт и ниже и 500 Вт и выше.

Более того, при ВЧ-мощности 600 Вт наблюдается большой перетрав диэлектрика и кремния под ним по кольцу паразитного тлеющего разряда от края формируемого окна, причем углубления эти имеют различный геометрический профиль. Очевидно четкое различие в скорости травления материала по периферии и центру пластины, но оно не про-



Рис. 4. Зависимость скорости анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния в плазме $C_3F_8 + O_2$ от подводимой ВЧ-мощности: $P_{oбщ} - 5 \, \Pi a \, (I)$, 10 Па (2); расход $C_3F_8 - 1,8 \, дm^3/ч \, (I, 2)$; содержание кислорода 2,0 об. %; температура подложкодержателя 358 К (1-2)

тиворечит ранее описанному механизму AT, хотя для малых значений мощности разряда плазмы < 300 Вт и давлении > 8,0 Па в условиях формирования паразитного разряда есть отличия в разбросе толщины удаляемого материала по кольцу тлеющего разряда. В таких условиях по кольцу "паразитного" разряда скорость несколько меньше по отношению к рассматриваемому.

На обратной стороне таких пластин имеется след подтрава. В этом случае можно говорить о двух параллельно происходящих процессах — процессе химического взаимодействия и процессе ионной бомбардировки [9].

Большой краевой разброс скорости травления при тлеющем разряде > 600 Вт в условиях бомбардировки энергетическими ионами наблюдается в процессе физического распыления, облегчаемом химическим взаимодействием радикалов с поверхностью. Образующиеся на поверхности травящегося материала со-

единения типа SiF^{+++} , SiF_2^{++} ,

 ${\rm SiF}_3^+$ могут иметь больший коэффициент распыления, чем, например, SiO₂ и кремний (Si). Это и увеличивает их скорость удаления при бомбардировке в присутствии хладона-218. Более того, в процессе ионной бомбардировки возникают дефектные состояния поверхности в направлении ионного воздействия на поверхность (донышко) контактного окна. Они обладают высокой сорбшионной способностью по отношению к нейтральным частицам за счет удаления сорбционных слоев углерода, закиси углерода, кислорода, препятствующих химосорбции активных радикалов. Кроме того, ионная бомбардировка усиливает травление поверхности благодаря тому, что реакционные частицы, такие как атомарный кислород, атомарный фтор и др., образуются в результате ионно-индуцированной диссоциации нейтральных молекул и радикалов, которые были первоначально адсорбированы из газовой фазы. Освобождающиеся реакционные частицы тут же образуют связи Si—F без какой либо миграции по поверхности. Увеличение мощности разряда плазмы стимулирует эти процессы и, как установлено в результате проведенных исследований, приводит к увеличению скорости травления в целом (рис. 4).

Разброс в распределении толоставшегося диоксида ЩИНЫ кремния при малых значениях мощности разряда плазмы обусловлено, скорее всего, ослаблением ионной бомбардировки и снижением концентрации атомарного фтора в зоне реакции и степенью различия коэффициента его адсорбции на различных участках поверхности травящихся материалов. Уменьшение скорости травления в таких условиях может быть объяснено накоплением углерода и закиси углерода на поверхности SiO₂ и Si, которые могут быть удалены распылением и взаимодействием с фторсодержащими частицами, что происходит за счет уменьшения скорости травления. Именно увеличение мощности разряда плазмы позволяет подавить этот эффект при мощности разряда плазмы до 500 Вт и свести к минимуму клин травления. Тем не менее, и в этих случаях скорость травления по центру пластины остается несколько ниже, чем по периферии пластины.

Следует отметить, что ширина поясков перетрава или недотрава составляет 5...6 мм. Остаток в центре пластины от 0,01 до 0,03 мкм. В отдельных случаях это остаток в центре достигает 0,12...0,15 мкм. Возможно, что это связано с различным по структуре диэлектриком или плохим контактом между пластиной и подложкодержателем в силу имеющейся деформации пластины.

Таким образом, увеличение мощности тлеющего разряда во

всех случаях способствует увеличению анизотропного травления SiO₂. Однако, как уменьшение мощности ниже 150 Вт, так и его увеличение выше 500 Вт приводит к неравномерности стравливания по всей поверхности пластины. Более того, увеличение вкладываемой в ВЧ-разряд мощности выше 300 Вт вызывает разрушение фоторезиста, который мутнеет, осмаливается или сублимирует.

В силу этого необходимо обязательно делать паузы (около 1 мин) во времени при травлении, чтобы фоторезист не поплыл, так как с увеличением мощности увеличивается влияние загрузочного эффекта и больше всего он проявляется при подводимой ВЧмощности 600 Вт.

К аналогичным результатам приводит и увеличение температуры подложкодержателя от 298 до 363 К. Но это уже объясняется увеличением температуры пластины в результате ее нагрева как за счет термического воздействия, так и за счет дополнительного нагрева ее плазмой [9]. В данном случае основной и главной трудностью процесса АТ является то, что для увеличения скорости травления диоксида кремния до 200 нм/мин и выше необходима мощность тлеющего разряда порядка 500 Вт. а в этом случае происходит разрушение фоторезиста. Таким образом, для обеспечения высокой скорости травления следует использовать специальные фоторезисты, обладающие высокой стойкостью к ионной бомбардировке в условиях ВЧ-плазмы, или металлические зашитные пленки.

Выводы

На основании проведенных исследований кинетики анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния установлена степень влияния общего (суммарного) давления газовой смеси, парциальных давлений октафторпропана и кислорода, подводимой ВЧ-мощности и температуры подложкодержателя на скорость травления и анизотропию процесса.

Обнаружены колебания скорости анизотропного плазмохимического травления диоксида кремния по поверхности пластины в зависимости от условий процесса травления.

Показано, что вертикальность стенок профиля контактных окон обеспечивается только в очень узком диапазоне технологических параметров: вкладываемая в ВЧ-разряд мощность 150...300 Вт, температура подложкодержателя 294...375 К, общее давление газовой смеси 4...8 Па, объемный расход октафторпропана 1,6...2,4 дм³/ч, расход кислорода по отношению к октафторпропану 2...4 об. %.

Список литературы

1. Юдина Н. К., Чупахин М. С. и др. Исследование и контроль плазмохимических процессов. // Зарубежная электронная техника. 1980. № 3. С. 3—54.

2. Данилин Б. С., Кирсеев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для очистки и травления материалов // М. Энергоиздат. 1987. 372 с.

3. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и Связь. 1986. 467 с.

4. Айнспрук Н., Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС. М.: Мир. С. 92–100.

5. **Douglasser S.** Plasma etching of Si, SiO_2 , Si_3N_4 and resist with fluorine, chluorine and bromine compounds // J. Elec-

trochem. Soc. 1992. V. 139. № 6. P. 1736–1741.

6. Kovalevskii A. A., Sorokin V. M. Research of processes plasma chemical of isotropic-anisotropic etching at formation of a complex profile under contacts of the SBIC's // Proceedings of the 12-th International Colloquium of Plasma Processes (CIP-99). Antibes-Juan-Les-Pins, France. 6–10 June. 1999. P. 143–147.

7. Snyder H. R., Anderson G. K. Effect of air and oxygen content of the dielectric barrier discharge decomposition of chlorobenzene // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. \mathbb{N}_{2} 6. P. 1695–1699.

8. Schiitze A., Jeong J. Y. et al. The atmospheric-presure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. \mathbb{N}_{2} 6. P. 1685–1694.

9. Амиров И. И., Федоров В. А. Анизотропное травление субмикронных структур в резисте в кислородсодержащей плазме // Микроэлектроника. 2000. Т. 29. № 1. С. 32—41.

УДК 536.424.1

В. А. Непочатенко^{*}, канд. физ.-мат. наук * Белоцерковский государственный аграрный университет,

А. Ю. Кудзин, д-р физ.-мат. наук, проф., Днепропетровский национальный университет, Украина

УРАВНЕНИЯ 90-ГРАДУСНЫХ ДОМЕННЫХ СТЕНОК В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ ФАЗЫ ВаТіО₃

Предложен метод определения уравнений доменных стенок в системе координат сегнетофазы в сегнетоэластиках и многоосных сегнетоэлектриках. Получены уравнения 90-градусных доменных стенок в титанате бария и показано, что в этом кристалле возможно формирование четырех типов структурных доменов, которым соответствуют 12 ориентационных состояний и 24 электрических домена.

Введение

Метод Саприэля [1] является основным и признанным методом определения уравнений доменных стенок в системе координат (СК) парафазы. Он основан на условии согласования спонтанной деформации на границе раздела смежных ориентационных состояний. Согласно работе [1], возможны доменные стенки двух видов: *W*' — ориентация которой зависит от компонент тензора спонтанной деформации; *W* — соответствующая плоскости симметрии парафазы.

Наряду с работой [1], предложен метод [2, 3], основанный на согласовании тензора теплового расширения, т. е. сохранения сплошности среды при изменении температуры в полидоменном кристалле.

Известно [4—6], что при фазовом переходе типа смещения в сегнетофазе наблюдается поворот кристаллографических осей по отношению к доменной стенке, пропорциональный значению спонтанной деформации. Ориентация оси, знак угла поворота зависят от вида стенки и типа домена, что приводит к формированию близких ориентационных состояний (субориентационных) [7]. Следовательно, уравнение доменной стенки в СК сегнетофазы зависит от типа домена и температуры (спонтанной деформации).

В работе [3] предложен метод определения этих уравнений, если известна матрица преобразования СК, соответствующая смежным доменам. Однако определение этой матрицы является самостоятельной как теоретической, так и экспериментальной задачей. Поэтому представляет интерес получить более простой метод расчета уравнений доменных стенок в СК сегнетофазы.

В основе предлагаемого метода лежит тезис, что уравнение доменной стенки стабильно в СК парафазы [1, 7, 8]. Если в парафазе в плоскости доменной стенки выбрать два неколлинеарных вектора a_0 , b_0 и подействовать на них тензором теплового расширения *T*, то получим в сегнетофазе соответствующие им векторы a_1 , b_1 . Их векторное произведение даст нормаль к плоскости доменной стенки n_1 , а следовательно, и искомое уравнение в СК сегнетофазы. Аналогично можно получить уравнения доменных стенок, подействовав на a_0 , b_0 тензором спонтанной деформации.

В предлагаемой работе рассмотрены два описанных выше способа на примере многоосного сегнетоэлектрика BaTiO₃. Проведен анализ и сравнение полученных решений с экспериментальными результатами и с соответствующими параметрами модели тонкой псевдо-90-градусной доменной стенки.

Обозначим C_i — ориентационные состояния; W_{hkl} — доменные стенки, соответствующие ориентации плоскости (*hkl*) в СК сегнетофазы; X_{0i} кристаллофизические оси в парафазе, X_{ji} — то же в сегнетофазе (*j* — номер субориентационного состояния).

Уравнения 90-градусных доменных стенок в ВаТіО₃ в системе координат тетрагональной фазы

В тетрагональной фазе ориентационное состояние C_1 может быть отделено от C_2 и C_3 доменными стенками четырех разных ориентации.

Рассмотрим 90-градусную доменную стенку $W_{1\bar{1}0}$, разделяющую C_1 и C_2 , уравнение которой в СК парафазы, соответствующей C_1 , имеет вид [1]:

$$X_{01} - X_{02} = 0. (1)$$

Выберем в плоскости (1) неколлинеарные векторы $a_0(0; 0; 1), b_0(1; 1; 0)$ и, воздействуя на них тензором теплового расширения (ось X_1 параллельна $c, X_2 - a$)

$$T_2 = \begin{pmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ e_{22} & 0 \\ & e_{22} \end{pmatrix},$$
(2)

получаем соответствующие им векторы $\boldsymbol{a}_1(0; 0; 1 + e_{13}), \boldsymbol{b}_1(1 + e_{11}; 1 + e_{22}; 0)$. Нормаль к плоскости доменной стенки в сегнетофазе определяем из векторного произведения

$$\boldsymbol{n}_1 = \boldsymbol{a}_1 \times \boldsymbol{b}_1, \tag{3}$$

а соответствующее уравнение доменной стенки будет

$$X_{11} - B_1 X_{12} = 0, (4)$$

где $B_1 = \frac{1+e_{11}}{1+e_{22}} = \frac{c_1}{a_1}$; a_1 , c_1 — параметры тетрагональной фазы.

Аналогично определяем уравнения, соответствующие W_{110} , $W_{10\overline{1}}$, W_{101} :

$$X_{21} + B_1 X_{22} = 0; (5)$$

$$X_{31} - B_1 X_{33} = 0; (6)$$

$$X_{41} + B_1 X_{43} = 0. (7)$$

Из анализа уравнений, полученных в двух системах координат, видно, что при формировании $W_{1\bar{1}0}$, W_{110} в сегнетоэлектрической фазе наблюдается поворот кристаллографических осей вокруг X_{03} на угол $\pm \alpha_1$:

$$\alpha_{1} = \arccos\left(\frac{2 + e_{11} + e_{22}}{\sqrt{2}\sqrt{(1 + e_{11})^{2} + (1 + e_{22})^{2}}}\right) = \\ = \arccos\left(\frac{a_{1} + c_{1}}{\sqrt{2}\sqrt{a_{1}^{2} + c_{1}^{2}}}\right), \tag{8}$$

а для $W_{10\bar{1}}$, $W_{10\bar{1}}$ — на аналогичные углы вокруг X_{02} .

Следовательно, в тетрагональной фазе возможно формирование четырех субориентационных состояний, причем компоненты матриц совмещения их систем координат зависят от температуры. Такое поведение кристаллографических осей можно объяснить нецентральным смещением иона Ті в сегнетоэлектрической фазе, т. е. в BaTiO₃ формируется четыре типа структурных доменов. Применяя к ним *F* операции симметрии парафазы, получаем 12 ориентационных состояний. Обозначим их C_{ij} , где *i* — номер оси X_{0i} , близкой к ориентации тетрагональной оси *c*; *j* — номер одного из четырех типов доменов (см. рисунок).



Возможные ориентационные состояния в тетрагональной фазе ВаТіО₃ (стрелкой показана ориентация оси с)

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 6, 2006

Данный вывод и значение угла α_1 (t = 22 °C; $\alpha_1 = 0,314^\circ$) хорошо согласуются с результатами рентгендифрактометрических исследований ($\alpha_1 = 0,27 \pm 0,02^\circ$ [3]), и моделью тонких псевдо-90-градусных сегнетоэлектрических доменных стенок ($\alpha_1 = 0,316^\circ$).

Если воздействовать на a_0 , b_0 тензором спонтанной деформации, то получаем уравнения, которые отличаются от (4)—(7) коэффициентом B_1 :

$$B_1 = \frac{1-2b}{1+b} = \frac{3a_0 - 2(a_1 - c_1)}{3a_0 + a_1 + c_1},$$
(9)

где b — спонтанная деформация; a_0 , a_1 , c_1 — параметры пара- и сегнетофаз. Однако численные значения B_1 , соответствующие (4) и (9), являются близкими (отличие в шестом знаке после запятой).

Что касается 180-градусных доменных стенок, то тензор деформации не изменяет их ориентации, и по-видимому, предлагаемый метод определения уравнений в СК сегнетофазы к ним неприменим.

Выводы

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

 два предложенных метода определения уравнений доменных стенок в системе координат сегнетофазы отличаются незначительно и соответствуют известным экспериментальным результатам;

- в титанате бария формируются четыре типа структурных доменов, обусловленных, по-видимому, нецентральным смещением иона Ті, каждому типу соответствуют три ориентационных состояния и шесть электрических доменов;
- равновесные 90-градусные доменные стенки формируются при пересечении доменов разного типа.

Список литературы

1. **Sapriel J.** Domain — wall orientations in ferroelastics // Phys. Rev. B. 1975. **12**. N 11. P. 5128–1540.

2. Непочатенко В. А. Равновесные и неравновесные доменные стенки в $Pb_3(PO_4)_2$ // Кристаллография. 2002. 47. № 3. С. 514—517.

3. Непочатенко В. А. Сравнительный анализ двух методов расчета ориентации доменных стенок в сегнетоэластиках // Кристаллография. 2004. 49. № 5. С. 917—919.

4. Chabin M., Gilletta F. Investigation of the ferroelastic domain structure on lead phosphate // J. Appl. Cryst. 1977. 10. P. 247–251.

5. Wainer L. S., Baggio R. F., Dussel H. L. Study of domains and domains walls in the BiVO4 // Ferroelectrics. 1981. **31**. N 3-4. P. 121-126.

6. Шабельников Л. Г., Шехтман В. Ш., Царев Р. М. Рентгендифрактометрическое наблюдение структурных изменений в кристаллах титаната бария. // ФТТ. 1976. 18. № 6. С. 1529—1537.

7. Непочатенко В. А., Дудник Е. Ф. Тонкие W'и W доменные стенки в сегнетоэластике $Pb_3(PO_4)_2 // \Phi TT$. 2003. 45. № 10. С. 1870—1874.

8. Шувалов Л. А. Сегнетоэластики // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1979. **43**. № 8. С. 1554—1560.

УДК 681.2:510.67

И. А. Обухов, канд. физ.-мат. наук, "Интерфейс-МФГ" **E-mail:** obukhov@interface-mfg.ru, tel.: +7-495-105-00-49

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРОВОДОВ

Наблюдаемое в эксперименте изменение температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов при изменении их поперечного размера можно объяснить, если принять во внимание инжекцию электронов из контактных областей в проводящий канал квантового провода.

Введение

В статье [1] определялась температурная зависимость сопротивления квантовых проводов (КП) на основе Zn нанокомпозитов. Оказалось, что она качественно различна для "толстых" и "тонких" проводов. Так, при диаметре провода в 15 нм наблюдался типичный для металлов практически линейный рост сопротивления с ростом температуры. Однако для проводов с диаметром 9 и 4 нм наблюдался уже не рост, а уменьшение сопротивления при возрастании температуры. Эта аномальная температурная зависимость сопротивления более выражена для провода с диаметром 4 нм.

Данная в статье [1] теоретическая интерпретация полученных результатов не кажется убедительной. Она основывается на формуле, связывающей сопротивление квантового провода с длиной фазовой когерентности (*phase-breaking length*) электронов проводимости L_{Φ} (см. работу [2]). При этом никак не исследуются причины качественного изменения зависимости L_{Φ} от температуры при уменьшении диаметра провода, а только выполняется обратный пересчет L_{Φ} исходя из упомянутой формулы, на основе данных по измерению сопротивления.

В работах [3, 4] показано, что при определенных условиях существенное влияние на электрические



Рис. 1. Квантовый провод, состоящий из эмиттерного и коллекторного контактов и проводящего канала

характеристики квантовых проводов и приборов на их основе оказывает инжекция электронов из контактных областей в проводящий канал. В частности, учет этого явления позволяет объяснить наблюдаемые высокие значения плотности тока в канале полевого транзистора на основе углеродной нанотрубки [5]. Проведенные расчеты [4, 6] показывают, что собственных электронов в нанотрубке оказывается на порядок меньше, чем инжектированных, и именно последние практически полностью определяют электропроводность прибора.

В данной статье исследуется влияние поперечных размеров металлических квантовых проводов на их удельное сопротивление. Вычисления проводились в рамках модели квантового провода, подробно описанной в работах [3, 4].

Сопротивление металлических квантовых проводов

Представим квантовый провод (рис. 1) состоящим из эмиттерного и коллекторного контактов (ЭК и КК соответственно) и соединяющего их проводящего канала (ПК).

Для простоты положим, что ПК представляет собой прямоугольный параллелепипед с квадрат-

ным сечением плоскостью, перпендикулярной оси 0X. Длину стороны этого квадрата (поперечный размер ПК) обозначим L. Очевидно, что форма поперечного сечения ПК может повлиять на количественные характеристики прибора, но не скажется на его качественных особенностях.

На рис. 2 показаны первые восемь уровней энергии электронов, возникающих в ПК за счет размерного квантования, для трех значений поперечного размера канала L = 15 нм, 9 нм, 4 нм. Хорошо видно, что плотность состояний электронов быстро уменьшается с уменьшением L.

На рис. З показана разница в энергиях электронов второго и первого уровней размерного квантования $\Delta E = E_2 - E_1$ для тех же значений поперечного размера ПК. При L = 15 нм, ΔE порядка $5 \cdot 10^{-3}$ эВ и плотность электронных состояний в ПК достаточно высока. При L = 9 нм значение $\Delta E = 1,4 \cdot 10^{-2}$ эВ, а энергетический спектр электронов разрежен в 1,5 раза по отношению к проводу с L = 15 нм. Для провода с L = 4 нм значение $\Delta E = 7 \cdot 10^{-2}$ эВ, т. е. энергетический спектр электронов разрежен почти в 4 раза по отношению к спектру в ПК с L = 15 нм.

Количественные изменения в спектре размерного квантования энергии электронов, регулируемые размером поперечного сечения ПК, приводят к качественным изменениям в эффективном потенциальном рельефе для электронов проводимости в КП [4]. На рис. 4 видно, что для провода с L = 15 нм потенциальный барьер, создаваемый ПК между контактными областями, ниже энергии Ферми E_F (примерно на $2,61 \cdot 10^{-2}$ эВ для рассчитываемой структуры). Назовем такие провода "толстыми". Уменьшение поперечного размера проводящего канала приводит к уменьшению плотности электронных состояний в нем. При достаточно малых L потенциальный барьер, создаваемый ПК, становится выше энергии Ферми. Такие квантовые



Рис. 2. Первые восемь уровней размерного квантования энергии электронов в ПК для различных поперечных размеров проводящего канала L = 15 нм, 9 нм и 4 нм





Рис. 4. Энергия Ферми (E_F) и эффективный потенциальный рельеф для электронов проводимости в КП в направлении 0X для случаев L = 15 нм, 9 нм и 4 нм при нулевом смещении

провода назовем "тонкими". Как видно на рис. 4, КП с L = 9 нм и L = 4 нм являются "тонкими".

Для электронов в КП возможны три механизма переноса заряда [4]:

- дрейфово-диффузионный перенос электронов
 [7] с энергией, большей высоты потенциального барьера, создаваемого ПК;
- туннельный перенос через потенциальный барьер электронов с энергией, меньшей высоты этого барьера;
- инжекционный перенос электронов с энергией, меньшей высоты этого барьера [3, 4].

Под инжекционным переносом здесь понимается процесс, при котором в контакте, к которому приложено меньшее напряжение, электроны с энергией, меньшей высоты барьера, поглощают энергию тепловых флуктуации, увеличивая свою энергию до значений, превышающих высоту барьера. Далее они перемещаются в ПК между контактами посредством дрейфа и диффузии, а затем излучают дополнительную энергию в контакте с большим приложенным напряжением. Заметим, что уменьшение энергии инжектированных электронов возможно и при переносе в ПК, однако оно ограничено снизу высотой потенциального барьера.

Поскольку ширина потенциального барьера в КП, как правило, велика (100 нм для рассматриваемой структуры), туннелированием электронов через него можно пренебречь.

Если энергия Ферми электронов превышает высоту потенциального барьера более чем на среднюю энергию тепловых флуктуации kT, то число электронов, инжектируемых в ПК из контактов, много меньше их числа в надбарьерной области энергий. В этом случае основной вклад в проводимость дают надбарьерные электроны, и тип проводимости КП не отличается от типа проводимости контактных областей. Поэтому зависимость сопротивления от температуры для КП с попереч-



Рис. 5. Зависимость сопротивления КП, нормированного на сопротивление при T = 300 K, от температуры для различных значений поперечного размера проводящего канала L = 15 нм, 9 нм, 4 нм

ным размером проводящего канала L = 15 нм имеет обычный, характерный для металлов вид (см. рис. 4 и 5). Она главным образом определяется температурной зависимостью времени релаксации импульса электронов.

Для "тонких" ПК, когда энергия Ферми меньше высоты эффективного потенциального барьера, основным становится инжекционный механизм проводимости. Число собственных электронов в ПК в этом случае мало. Этим обусловлено высокое удельное сопротивление провода при низких температурах. На рис. 5 показана температурная зависимость сопротивлений квантовых проводов различного поперечного размера, нормированных на их значения при комнатной температуре (T = 300 K).

Характер температурной зависимости сопротивления КП, показанной на рис. 5, полностью коррелирует с особенностями его потенциального рельефа, демонстрируемого на рис. 4. Если энергия Ферми превышает высоту потенциального барьера, создаваемого ПК, то сопротивление металлического КП при повышении температуры растет. Если энергия Ферми меньше высоты потенциального барьера, то сопротивление КП при увеличении температуры уменьшается. Эти качественные изменения в электрических характеристиках КП регулируются поперечным размером проводящего канала.

При реализации в КП инжекционного механизма проводимости число электронов в ПК начинает существенно зависеть от температуры [4]. Чем выше температура, тем большее число электронов инжектируется в ПК из контактов, и их концентрация в канале возрастает. Дифференциальное сопротивление ПК пропорционально

 $(\tau n)^{-1}$,

где τ — время релаксации импульса электронов, а n — их концентрация в проводящем канале. В расчетах, на основе которых получены кривые (рис. 5), предполагалось, что время релаксации импульса электронов обратно пропорционально температуре. Для "тонких" КП уменьшение сопротивления с ростом температуры происходит за счет увеличения концентрации электронов в ПК. Этот эффект превышает обратное влияние, обусловленное температурной зависимостью времени релаксации импульса электронов.

Заключение

Таким образом, результаты измерений температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов, представленные в статье [1], можно объяснить особенностями переноса заряда в квантовых проводах различного поперечного размера.

Сопротивление "толстых" металлических проводов возрастает с температурой так же, как и сопротивление объемного материала. Это связано с тем, что в таких проводах энергия Ферми электронов проводимости превышает высоту расположенного между контактными областями потенциального барьера, создаваемого проводящим каналом прибора. Основным механизмом переноса заряда в этом случае является дрейфово-диффузионный, а основной вклад в проводимость дают надбарьерные электроны.

При уменьшении поперечного размера проводящего канала высота потенциального барьера увеличивается и, наконец, начинает превышать энергию Ферми. При этом превалирующую роль в переносе заряда в квантовом проводе начинает играть инжекционный механизм. Число электронов, инжектированных из контактов в проводящий канал, тем больше, чем выше температура. Именно этим обусловлено уменьшение сопротивления "тонких" металлических квантовых проводов при увеличении температуры.

Список литературы

1. Heremans J. P., Thrush C. M., Morelli D. T. and Wu M.-C. Resistance, Magnetoresistance, and Thermopower of Zinc Nanowire Composites // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. N. 076804.

2. **Beutler D. E. and Giordano N.** Localization and electronelectron interaction effects in thin Bi wires and films // Phys. Rev. 1988. B 38. N 8. V.

3. Обухов И. А., Квяткевич И. И., Лавренчук А. А., Румянцев С. В. Статические характеристики пересекающихся квантовых проводов // Матер. 14-й Международной Крымской Микроволновой Конференции. (Севастополь) 2004. С. 507—511.

4. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва—Киев—Минск—Севастополь: Вебер, 2005. 226 с.

5. Martel R.. Schmidt T., Shea H. R., Hertel T. and Avouris Ph. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 1998. 73, N 2447. V.

6. Квяткевич И. И., Обухов И. А., Чекандин М. С. Моделирование полевого транзистора на основе квантового провода // Матер. 12-й Международной Крымской микроволновой конференции. (Севастополь) 2002. С. 455—457.

7. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников, М.: Наука, 1990. 688 с.



УДК 621.335.2:621.3.049.77

Ю. Б. Рогаткин, канд. техн. наук, доц., Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СМЕШАННЫХ СФ-БЛОКОВ

Представлены результаты разработки аналого-цифровых сложно-функциональных блоков и рассмотрены вопросы методологии, которые могут быть полезны при проектировании. В качестве примера приведен 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь конвейерного типа с частотой дискретизации 20 МГц, который был изготовлен по КМОП технологии, использующей двойной поликремний и три металла, с нормами 0,25 мкм.

Создание сложно-функциональных (СФ) бло-ков можно рассматривать как создание современ-

ной высококачественной элементной базы для отечественной электроники. В настоящее время возможности технологии изготовления СБИС выросли настолько, что позволяют разместить на одном кристалле электронную схему, которая раньше могла располагаться в виде многих корпусов на печатной плате. Такие СБИС собираются из СФблоков и по сути являются "системой на кристалле" [1]. Важной частью современной электронной базы являются смешанные СФ-блоки, которые предназначены как для связи аналоговых датчиков с цифровой аппаратурой обработки информации, так и наоборот, преобразования цифрового сигнала для его использования в аналоговых блоках или устройствах.

Разработка смешанного или аналого-цифрового СФ-блока возможна при наличии высокопроизводительной среды автоматического проектирования, например САПР Cadence, и начинается с выбора технологии, по которой данное устройство должно быть в дальнейшем изготовлено. Выбранная технология должна позволять реализовать такие сугубо аналоговые элементы, как линейные, т. е. не зависящие от приложенного напряжения, емкости и сопротивления (в том числе и высокоомные), так и транзисторные структуры различного типа. Возможности стандартного КМОП процесса довольно велики, он позволяет реализовать не только различного рода резисторы и конденсаторы, но и вертикальные *р*-*n*-*p*-транзисторы с коллектором на подложку, а также горизонтальные биполярные транзисторы [2]. Так, для линейного резистора на основе поликремния с поверхностным сопротивлением порядка нескольких сотен ом на квадрат характерны следующие цифры: коэффициент линейной составляющей зависимости сопротивления от температуры около $5 \cdot 10^{-4} (1/^{\circ})$, а коэффициент линейной составляющей зависимости сопротивления от приложенного напряжения около $2 \cdot 10^{-4}$ (1/В). Типичное значение коэффициента передачи тока базы для вертикального *p*—*n*—*p*-транзистора с коллектором на подложку в нормальном включении составляет несколько единиц. Поскольку ряд характеристик аналоговых устройств обеспечивается за счет одинаковости парных или повторяемых элементов, важной характеристикой технологического процесса является относительный разброс параметров отдельных элементов. Так. например. для дифференциального каскада важна идентичность транзисторов в дифференциальной паре, а для цифроаналогово преобразователя (ЦАП) на основе матрицы типа R-2R важен относительный разброс сопротивлений резисторов в матрице. Для современного КМОП процесса относительный разброс сопротивления резисторов или емкости конденсаторов может составлять 0,1...0,2 %.

Проектирование сложного аналого-цифрового микроэлектронного устройства является трудоемкой технической задачей, основные этапы решения которой изложены в [3]. Начинать следует с определения набора, в первую очередь, аналоговых библиотечных элементов, которые потребуются для его реализации. Для быстродействующего конвейерного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который рассматривается в качестве примера в данной работе и функциональная схема которого представлена на рис. 1, основными библиотечными элементами являются:

- быстродействующий операционный усилитель (ОУ) с токовым выходом или операционный источник тока, управляемый напряжением (ОИТУН);
- быстродействующий компаратор напряжений;
- источник опорного напряжения;
- аналоговый ключ;
- цифровые логические элементы.

Как видно из функциональной схемы, данный блок является типичным смешанным блоком, по-



Рис. 1. Функциональная схема АЦП конвейерного типа

скольку содержит развитую аналоговую и сравнительно небольшую цифровую части.

Основной аналоговой составной частью каскада АЦП является ОУ на основе ОИТУН [4, 5]. Исходя из общих требований ко всему устройству можно сформулировать основные требования к операционному усилителю, входящему в состав мульти-ЦАП каскада АЦП, представленного на рис. 2.

В отдельных каскадах АЦП конвейерного типа использовался умножающий усилитель на основе операционного усилителя с коммутируемыми конденсаторами в цепи обратной связи и дифференциальным выходом [6, 7]. Полоса пропускания составляет несколько сотен мегагерц, особые требования предъявляются к времени установления.

Особенностью быстродействующего ОУ с токовым выходом является необходимость наличия обратной связи по синфазному сигналу. Коэффициент усиления по постоянному току операционного усилителя (A_0) определяется исходя из допустимой ошибки каскада АЦП. Допустимая ошибка, как известно, должна быть меньше половины младшего значащего разряда (M3P):

$$\epsilon_{\rm tot} < 1/2^{N+1}$$
.

Для выполнения этого условия нужно выполнить следующее неравенство:

$$A_0 > 2^{N+B+1}/(2^B - 1),$$

где $B = B_i$ для i = 1...k (см. рис. 1).





Будем считать, что суммарная емкость нагрузки ОУ складывается из собственно емкости нагрузки C_L и емкости в цепи обратной связи $C_{o.c.}$. Тогда максимальная скорость нарастания выходного напряжения (*SR*) будет определяться максимальным током выходного каскада (I_{max}):

$$SR = I_{\text{max}} / (C_L + C_{\text{o.c}}).$$

Соответственно выходное напряжение для момента времени $T/6 = 1/6f_s$, где f_s — частота дискретизации АЦП, будет определяться выражением

$$V_{out,I}(T/6) = SR/6f_s$$
.

Время установления напряжения на выходе усилителя в мультиЦАП может быть определено как T/3. Для определения полосы пропускания ΔF операционного усилителя по уровню -3 дБ можно воспользоваться следующим выражением:

$$\Delta F = (3 \ln 2f_s(N_i + 1)/2\pi) \times \left((2^{Bi} + \left(\sum_{i=0}^{n-1} C_{s,i} + C_{\pi a p}\right) / C_L \right)$$

где N_i — разрешение, определяемое последним каскадом АЦП; $C_{\text{пар}}$ — паразитная емкость, включенная на входе операционного усилителя; $C_{s,j}$ — переключаемые емкости в мультиЦАП; $n = B_i - 1$.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики ОУ без обратной связи в режиме малого сигнала. При коэффициенте усиления, равном 4, полоса пропускания состав-



Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики операционного усилителя



M: Рис. 4. Время установления синфазного сигнала

ляет 137 МГц. Такой усилитель может быть использован в АЦП с частотой дискретизации до 40...50 МГц.

Точностные характеристики ОУ исследовались при отсутствии входного сигнала и при подаче на вход парафазного сигнала 200 мВ. Время установления выходного сигнала в отсутствии входного сигнала и с ошибкой, соответствующей 12-разрядному АЦП с полной шкалой преобразования 2 В, составило 9,14 нс. Абсолютная ошибка установления составляет ±488 мкВ. Время установления выходного сигнала усилителя с коэффициентом усиления K = 4 рассчитывалось на основе разработан-

ного ОУ с отрицательной обратной связью при подаче на вход парафазного сигнала ±100 мВ. Результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5. Моделирование проводилось с помощью программы электрического моделирования "spectre" как в частотной, так и во временной областях. Время моделирования в частотной области, как правило, существенно меньше, однако для определения некоторых параметров приходится прибегать к моделированию во временной области, которое, хотя и занимает наибольшее время, дает наилучшие представления о поведении моделируемого объекта. При моделировании устанавливалась относительная точность вычисления $10^{-3}...10^{-5}$, что в большинстве практических случаев является вполне приемлемым.

Другим важным элементом является компаратор напряжений, который



Рис. 5. Время установления парафазного сигнала

используется как во встроенном АЦП отдельного каскада АЦП конвейерного типа, так и в параллельном АЦП. Чувствительность разработанного компаратора составила несколько десятков микровольт, время переключения — несколько наносекунд. В операционном усилителе, компараторе и других блоках АЦП широко применялись аналоговые ключи с использованием вольт-добавки для управляющего сигнала на затворе ключевого транзистора, в зарубежной терминологии "Bootstrapped Switch".

Источник опорного напряжения — это аналоговый блок, к которому предъявляются повышенные требования по стабильности параметров во всем рабочем диапазоне. Как правило, в источнике опорного напряжения применяются биполярные транзисторы. Особенность расчетов при использовании источника опорного напряжения состоит в целесообразности его замены макромоделью, представляющей собой источник напряжения с внутренним импедансом и определенной температурной зависимостью напряжения холостого хода. Такая замена позволяет существенно уменьшить реальное время моделирования смешанного блока при прогонке конкретного теста. Пример принципиальной схемы макромодели опорного источника представлен на рис. 6.

Цифровая часть в данном примере представлена схемой цифровой коррекции. Цифровой алгоритм коррекции основан на кодировании с излишнем значащим разрядом (RSD-кодирование). RSD-кодирование с однобитной избыточностью (r = 1) в каждом каскаде используется в конвейерных АЦП для ослабления требований к точностным характеристикам квантования. Добавление лишнего бита означает увеличение разрешения

каскада на 1 бит минус один уровень квантования. Для примера сравним 2битный ($B_i = 2, r = 0$) каскад с 2,5битным каскадом ($B_i = 2, r = 1$). При введении избыточности число уровней квантования увеличивается с 4 до 6, при этом усиление остается равным 4. В результате этого выход 2,5-битного каскада находится в диапазоне от - $V_{REF}/2$ до + $V_{REF}/2$ при изменении входного сигнала от $-7/8V_{REF}$ до $+7/8V_{REF}$. Восстановление RSD-кодированных цифровых выходов каскадов выполняется сложением задержанных выходов с однобитным перекрытием. т. е. старший значащий разряд (СЗР) каскада і складывается с МЗР предыдущего каскада *i* – 1. Младшие разряды последнего каскада B_k не корректируются, считается что последний каскад должен быть без избыточности или

 D_0 исключается из выходного слова. Избыток аппаратных средств, вызванный RSD-кодированием, очень небольшой. В конвейерном каскаде, число компараторов в АЦП практически удваивается, а в мультиЦАП требуется только несколько дополнительных ключей, однако общая емкость сохраняется и характеристики усилителя остаются неизменными.

При сравнительно большом объеме цифровой части аналого-цифрового устройства целесообразно использование Verilog-моделей и смешанного моделирования (Mixed Signal). При числе транзисторов в цифровой части такого же порядка, как и в аналоговой, применение смешанного моделирования практически не приводит к уменьшению времени моделирования. Качественные соотношения времени моделирования для различных типов моделирования представлено на рис. 7. При относительно небольшом и примерно равном числе транзисторов в аналоговой и цифровой частях имеется небольшой выигрыш от применения смешанного моделирования. При большем числе транзисторов в аналоговой части и при одинаково большом числе транзисторов как в аналоговой, так и в цифровой частях выигрыша практически нет. Выигрыш есть при подавляющем большинстве транзисторов в цифровой части.



Рис. 6. Эквивалентная схема выходного импеданса источника опорного напряжения





Для уменьшения времени моделирования целесообразно использовать альтернативные программы с ускоренным алгоритмом моделирования. При моделировании АЦП в полном объеме использование такой программы позволяет уменьшить время моделирования более чем на порядок (правда, с возможной потерей точности). Если учесть, что длительность одного теста для АЦП в полном объеме составляет более 10 ч для программы "spectre", использование альтернативных программ моделирования, особенно для проверки правильности функционирования всего устройства, весьма актуально. Особо требуется остановиться на специфических вариантах моделирования. К таким вариантам, несомненно, относится расчет спектра сигнала. Для получения достоверных результатов очень важно корректно задать параметры моделирования, к которым относятся интервал выборки и число выборок.

Для проведения спектрального анализа выходного сигнала АЦП с помощью быстрого преобразования Фурье рекомендуется использовать на его выходе идеальный ЦАП, который позволяет получить аналоговое представление выходного кода. На рис. 8 приведены экспериментальные характеристики отношения сигнал/шум для АЦП, который



был спроектирован с использованием изложенных выше соображений и затем изготовлен по КМОП технологии с нормами 0,25 мкм. Обработка полученных экспериментальных результатов проводилась с помощью программы "Matlab".

Некоторые специфические требования предъявляются и к конструктивному выполнению смешанных СФ-блоков. Обязательно использование отдельных контактных площадок для подачи питающих напряжений, для общей шины. Необходимо предусмотреть меры повышенной конструктивной изоляции аналогового блока от цифровых блоков: применение областей с изолирующими карманами, областей подложки и др.

В заключение можно сделать следующие выводы:

- расчеты аналоговых блоков, как правило, сводятся к расчетам на постоянном токе (DC-анализ) и во временной области (TRAN-анализ).
 Реже используется АС-анализ, хотя с точки зрения времени расчетов он наиболее быстрый;
- как уже отмечалось выше, к существенному уменьшению времени моделирования приводит замена отдельных, вспомогательных в данном конкретном тесте моделирования, блоков макромоделями с сохранением их основной поведенческой структуры в расчетном диапазоне. Такими блоками могут быть источник опорного напряжения, генератор сигналов управления, блок выработки сигналов смещения и т. д.;
- использование смешанного метода моделирования не приводит к существенному сокращению времени моделирования, за исключением случаев подавляющего преобладания цифровых элементов;
- целесообразно применение альтернативных программ (даже с возможной потерей точности на начальном этапе проектирования) для уменьшения времени моделирования.

Список литературы

1. Немудров В. Г., Мартин Г. Система на кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносила, 2004.

2. Рогаткин Ю. Б. Некоторые особенности построения высокоточных аналоговых КМОП блоков // Сб. трудов 4-й научно-технической конференции "Электроника, микро- и наноэлектроника". М.: МИФИ, 2002. С. 51–54.

3. **Systematic** Design of Analog IP Blocks by J. Vandenbussche, G. Gielen and M. Steyaert. Boston.: Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 193.

4. **Waltari M.** Circuit Techniques for Low-voltage and Highspeed A/D Converters // Helsinki University of Technology, Electronic design Laboratory report 33. 2002.

5. Lewis S. H., Gray P. R. A Pipeline 5-Msample/s 9-bit Analog-to-Digital Convenor // IEEE J. Solid-State-Circuits. 1987. V. Sc-22. P. 954–961.

6. Рогаткин Ю. Б. Операционный усилитель для быстродействующего АЦП конвейерного типа // Сб. трудов 5-й научно-технической конференции "Электроника, микро- и наноэлектроника". М.: МИФИ, 2003. С. 69–73.

7. **Рогаткин Ю. Б.** Интегратор на коммутируемых конденсаторах // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 6. С. 414—420.

УДК 621.382.3

И. А. Каштанкин, Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, Ульяновский государственный университет ido@ulsu.ru, kashtankin@mail.ru

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ N-ПРИБОРОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Исследованы температурные характеристики Nприборов на основе двух кремниевых маломощных биполярных транзисторов с общей подложкой. Увеличение температуры приводит к росту тока максимума N-образной выходной вольт-амперной характеристики. Результаты моделирования температурных изменений статических вольт-амперных характеристик согласуются с экспериментальными данными.

Ряд уникальных особенностей маломощных интегральных биполярных приборов с N-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (негатронов), таких как позиционная фоточувствительность выходной ВАХ к инфракрасному излучению, простота конструкции, высокое быстродействие, малые массогабаритные показатели открывают широкие возможности их применения в качестве координатных фотодатчиков, в средствах телекоммуникаций, в качестве различных элементов автоматики [1—3]. В связи с этим возникает необходимость исследования температурных характеристик таких биполярных негатронов для определения их термостабильности и возможного применения в качестве интегральных термодатчиков.

В данной статье рассматриваются два типа негатронов: с шунтированием база—эмиттерного перехода и с модуляцией тока базы (рис. 1.) [1—3].

В первом из вышеуказанных N-приборов (рис. 1, a) участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) формируется за счет цепи положительной обратной связи, образованной биполярным транзистором T_2 , коллектор эмиттерная цепь которого шунтирует база—эмиттерную цепь транзистора T_1 , тем самым формируя N-образную выходную ВАХ при увеличении напряжения коллектора. Резистор R сопротивлением 100 Ом предотвращает переход транзистора T_2 в режим насыщения [1-3].

В *N*-приборе с модуляцией тока (рис. 1, δ) базы цепь положительной обратной связи по напряжению образована биполярным транзистором T_2 . По мере увеличения напряжения коллектор—эмиттер *N*-прибора растет потенциал базы транзистора T_2 относительно его эмиттера, транзистор T_2 из активного режима переходит в режим отсечки, при этом ток базы транзистора T_1 , равный току коллектора транзистора T_2 , уменьшается до силы тока утечки коллекторного p-n-перехода транзистора T_2 , что, в свою очередь, приводит к возникновению участка ОДС *N*-типа на BAX [2, 3].

Оба негатрона выполнены на основе планарной кремниевой структуры, имеющей следующие параметры: подложка-коллектор КЭФ-4,5 (100) легирована фосфором ($r_{\Pi} = 4,6 \text{ OM} \cdot \text{см}$), *p*-база толщиной 6 мкм легирована бором ($R_{\text{s}} = \text{Om}/\Box$), n^+ -эмиттер толщиной 1,2 мкм ($R_{\Pi} = 40 \text{ Om}/\Box$) легирован фосфором. Толщина металлизации, выполненной из сплава AK1, составляет 1 мкм.

Модели негатронов, разработанные в пакетах схемотехнического моделирования Orcad10, аналогичны рассмотренным в [2, 3]. Физико-топологические модели, основанные на решении основных термодинамических уравнений полупроводников, в частности уравнений Пуассона, в зависимости от основных физических параметров полупроводника (подвижности основных и неосновных носителей, диффузионной длины, времени жизни, коэффициентов рекомбинации и пр.) и температуры выполнены в пакете Piscess II-В. Решение систем дифференциальных уравнений получено методом Гуммеля.

Экспериментальная установка включает в себя измеритель полупроводниковых приборов Л2-56, зондовую установку, с помощью которой пластина с исследуемыми негатронами подключалась к измерительным приборам. Электрический нагревательный элемент помещался между пластиной и основанием зондовой установки, температура фиксировалась с помощью термопары на поверхности пластины. Погрешность измерения температуры $t = \pm 0,3$ °C, коллекторного тока $I_{\rm K} = \pm 0,2$ мА, напряжения $U = \pm 0,1$ В.



Рис. 1. Схемы замещения негатронов:

a — с шунтированием база—эмиттерного перехода; δ — с модуляцией тока базы





вого варианта негатрона при $U_{69} = 0,9$ В и температуре:

1 − 0 °С, *2* − 10 °С, *3* − 20 °С, *4* − 30 °С, *5* − 40 °С, *6* − 50 °С, *7* − 60 °С; - - - - экспериментальные данные; -- результаты схемотехнического моделирования; результаты физико-топологического моделирования

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики пер- Рис. 3. Вольт-амперные характеристики второго варианта негатрона при U_{бо} = 0,9 В и температуре: 1 – 0 °С, 2 – 20 °С, 3 – 30 °С, 4 – 40 °С, 5 – 50 °С; - - - экспериментальные дан-

- результаты схемотехнического моделирования; — результаты физиные: ко-топологического молелирования

Температурная характеристика первого варианта негатрона представлена на рис. 2. При увеличении температуры от 0 до 60 °С происходит рост тока пика при уменьшении его напряжения. Рост тока максимума обусловлен термогенерацией носителей заряда, происходящей равномерно по всей структуре в силу однородности нагрева пластины во время проведения эксперимента. В отличие от рассмотренного ранее процесса фотогенерации [1-3], при котором увеличение концентрации носителей происходило в базовой области негатрона и существовала возможность управлять положением ВАХ как в сторону увеличения тока пика, так и в сторону его уменьшения за счет облучения транзисторов T₁ и T₂ по отдельности, при повышении температуры происходит увеличение концентрации носителей как в активных, так и в пассивных областях кремниевой структуры, и возможно лишь увеличение тока максимума.

Сужение пика с ростом температуры обусловлено тем, что в приколлекторной области транзистора T_2 при большей температуре шунтирующий эффект за счет термогенерации проявляется при меньшем базовом напряжении транзистора T₂.

Во втором варианте негатрона с модуляцией тока базы коллекторный ток выходной ВАХ также растет с ростом температуры за счет увеличения концентрации носителей, обусловленного эффектом термогенерации (рис. 3). Но в отличие от предыдущего варианта с ростом температуры наблюдается увеличение ширины пика, так как модулирующий транзистор Т2 переходит в режим отсечки при большем значении тока коллектора негатрона, т. е. в тот момент, когда напряжение база-эмиттер U_{59} транзистора T_2 достаточно для его перехода в вышеуказанный режим, этот транзистор все же остается открытым за счет наличия носителей, обусловленных термогенерацией.







Рис. 5. Зависимости тока максимума выходной ВАХ первого варианта негатрона от U_{69} при температуре:

1-60 °C, 2-30 °C, 3-10 °C, 4-0 °C, 5-60 °C (результаты схемотехнического моделирования); экспериментальные данные при температуре:• -30 °C, $\times -10$ °C

Зависимость тока максимума рассмотренных негатронов от температуры близка к линейной в диапазоне от 20 до 80 °С (рис. 4) при соответствующих напряжениях база-эмиттер, что открывает перспективы их применения в качестве интегральных термодатчиков. Очевидно, что при уменьшении базового напряжения $U_{\mathbf{5}\mathbf{9}}$ негатронов температурные зависимости будут смещаться в сторону уменьшения тока максимума и при определенном значении U_{бэ} будут проходить через нулевое значение тока пика, что соответствует полному спрямлению выходной ВАХ при фиксированной температуре. Это утверждение справедливо для обоих типов негатронов, однако для негатрона с шунтированием база-эмиттерного перехода значение U_{69} , при котором будет наблюдаться спрямление ВАХ, как показывают результаты моделирования, не превышает 0,4 В при температуре не выше -30 °С. При более высоких температурах токи максимума будут несоизмеримо меньше токов паразитной вторичной ветви ВАХ (роста тока после *N*-участка) (рис. 2, 5). Для второго варианта негатрона значение напряжения U_{бэ}, при котором наблюдается полное спрямление пика, составляет 0,65 В при температуре 0 °С с отсутствием паразитной вторичной ветви выходной ВАХ (рис. 6, 7).

При более высоких температурах (> -30 °C для первого варианта и > 0 °C для второго варианта негатрона) токи максимумов слабо зависят от U_{69} в области малых значений U_{69} , что может быть использовано для работы негатронов при фиксированной температуре.

Таким образом, в биполярно-полевых негатронах с модуляцией тока базы наряду с регулированием начального положения выходной ВАХ базовым напряжением возможно спрямление пика при достижении определенной температуры. В исследованных негатронах зависимость тока максимума от температуры близка к линейной в интервале от 20 до 80 °C. Простота конструкции, малые линейные размеры и малая рассеиваемая мощность наряду с возможностями управления выходной ВАХ



Рис. 6. Вольт-амперные характеристики второго варианта негатрона при $U_{69} = 0,65$ В и температуре:

1 - 0 °C, 2 - 20 °C, 3 - 40 °C, 4 - 60 °C, - - - экспериментальные данные; <u>результаты</u> схемотехнического моделирования, <u>результаты</u> физико-топологического моделирования



Рис. 7. Зависимости тока максимума выходной ВАХ второго варианта негатрона от U_{69} при температуре:



базовым напряжением открывают перспективы применения негатронов в качестве интегральных термодатчиков.

Работа выполнена в рамках госконтракта № 02.445.11.7009 по Федеральной целевой научнотехнической программе "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002—2006 годы".

Список литературы

1. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Фоточувствительный кремниевый биполярный *N*-прибор с управляемой вольтамперной характеристикой // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 31. Вып. 13. С. 46—49.

2. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Фоточувствительные кремниевые биполярные *N*-приборы с управляемой вольтамперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005, № 6. С.39—42.

3. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Динамические характеристики фоточувствительных биполярных *N*-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10. С. 35—39.

УДК 621.3.049.77

А. С. Потягалова, канд. физ.-мат. наук, И. Е. Солтан, канд. физ.-мат. наук, Д. Ф. Ткачев, М. М. Хапаев, канд. физ.-мат. наук, ООО "Кейденс Дизайн Системз"

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДУКЦИИ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПОДПРОСТРАНСТВ КРЫЛОВА

Описана реализация метода редукции пассивной схемы, состоящей из R, C, L, К-элементов. Для редукции схем, содержащих паразитные элементы R (сопротивления), С (емкости), L (индуктивности), К (взаимные индуктивности), можно использовать алгоритм PRIMA. Этот метод позволяет преобразовать исходную схему к схеме меньшего размера, имеющую число портов такое же, как и исходная схема. Проводимости в портах для исходной и редуцированной схемы изменяются в пределах допустимой точности на заданном частотном интервале, доказана пассивность редуцированной схемы.

Введение

Для увеличения скорости моделирования SPICE-подобных систем используются различные методы, в том числе редукция линейных пассивных цепей, состоящих из паразитных элементов. По окончании разработки топологии интегральной схемы (ИС) ее необходимо проверить на соответствие правилам проектирования и провести экстракцию паразитных параметров с учетом реального размещения элементов и проводников на кристалле. Металлические межсоединения активных устройств не являются идеальными проводниками, поэтому необходимо учесть их вклад в задержки сигналов, падение напряжения и рассеивание энергии. Часто моделирование паразитных элементов ограничено только *RC*-цепями и критерий потери достоверности является относительным ("самый точный уровень, менее точный" и т. д.). Необходимость моделирования и редукции индуктивных паразитных связей межсоединений и рост размеров паразитных цепей требует создания методов более широкого спектра действия и с гарантированным качеством в пределах нескольких процентов точности искомых параметров на заданном интервале частот.

Такие способы редукции паразитных схем известны, но практическая реализация их наталкивалась на значительные алгоритмические трудности. Один из таких известных методов, основанный на блочном методе Арнольди, получил название PRIMA [1]. Этот метод эффективно сокращает размер эквивалентной схемы, содержащей *R*, *C*, *L* (индуктивность), *К* (взаимная индуктивность) элементы.

В нашей реализации этого метода желаемая точность редукции может быть задана в процентах от полной проводимости между заданной парой портов, в процентах от полной проводимости между любой парой портов или в процентах от *S*-параметров для всех пар портов. Портами в этом методе считаются все контакты цепи паразитных элементов с активными элементами.

Напомним, как с помощью модифицированного узлового анализа получаются эквивалентные схемы для межсоединений. На рис. 1 показано, как может моделироваться схема паразитных элементов в подложке и межсоединениях. Размеры таких схем могут достигать нескольких миллионов элементов. При использовании обычных подходов с использованием SPICE-подобных симуляторов время моделирования катастрофически нарастает, поэтому очевидна актуальность эффективных методов редукции больших схем паразитных элементов.

На рис. 2 в качестве примера приведен фрагмент схемы, содержащей паразитные элементы. Для формирования уравнений, позволяющих вычислить проводимость в качестве передаточной функции, мы должны задавать напряжения в портах и измерять токи в этих же портах.



Рис. 1. Пример моделирования межсоединений и подложки эквивалентной схемой, состоящей из паразитных элементов



Рис. 2. Фрагмент схемы, содержащей паразитные элементы



Рис. 3. Пример формирования уравнений для фрагмента, представленного на рис. 2

На рис. 3 и 4 показано, как формируются матричные уравнения для исходной схемы до редукции для фрагмента схемы, приведенного на рис. 2.

Постановка задачи редукции

Алгоритм PRIMA оперирует с матрицами модифицированного узлового анализа, в которые записываются соответствующие коэффициенты уравнений. Для задач редукции некоторые узлы должны быть объявлены портами, в которых могут быть поданы входные сигналы. Схема, содержащая только пассивные паразитные элементы, может быть описана линейной системой дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} E\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t) + Du(t). \end{cases}$$

В этой системе вектор x(t) — это искомый вектор напряжений в узлах и токов в ребрах, содержащих индуктивности, u(t) — вектор заданных напряжений в выделенных узлах (портах), y(t) — вектор измеряемых в портах токов. Матрица A определяется сопротивлениями схемы, матрица E — емкостями и индуктивностями, матрицы C и B определяются тем, какие узлы будут выделены как порты, матрица D в задачах редукции цепей паразитных элементов обычно нулевая. Более подробно о формировании системы уравнений можно прочитать, например, в [2]. Все матрицы в этой системе являются разреженными.

Преобразование Лапласа позволяет записать алгебраическую систему уравнений в частотной области:

$$\begin{cases} sEX = AX + BU; \\ Y = CX + DU. \end{cases}$$



Рис. 4. Формирование матриц для системы уравнений в задаче редукции

Или, принимая во внимание, что матрица *D* — нулевая, можно записать

$$\begin{cases} sEX = AX + BU; \\ Y = CX. \end{cases}$$

На рис. 4 проиллюстрирован способ формирования матриц для исходной системы алгебраических уравнений, соответствующих фрагменту пассивной схемы на рис. 2.

Проводимость определяется как матричнозначная функция от частоты *s*:

$$H(s) = C(sE - A)^{-1}B.$$

Задача редукции состоит в уменьшении размера схемы с сохранением проводимости между каждой парой портов в пределах допустимой точности для заданного интервала параметра *s*. При этом пассивность схемы должна быть сохранена, все виды анализа в частотной и временной области должны показывать хорошее совпадение характеристик исходной и редуцированной схем. Алгоритм PRIMA, используя блочный вариант метода Арнольди, строит прямоугольную матрицу-проектор *V*. Этот проектор применяется для получения плотно заполненных матриц существенно меньшей размерности:

$$A_{red} \leftarrow V^T AV; \ E_{red} \leftarrow V^T EV;$$
$$B_{red} \leftarrow V^T B; \ C_{red} \leftarrow CV.$$

Проводимость редуцированной схемы вычисляется по формуле

$$H_{red}(s) = C_{red}(sE_{red} - A_{red})^{-1}B_{red}$$

Сравнивая значения матриц H(s) и $H_{red}(s)$ при заданном значении частоты s, мы получим погрешность редукции. Реализованный алгоритм гарантирует, что при частоте моделирования, не большей заданной, редуцированная схема имеет проводи-

- 45

мость, отличающуюся от проводимости исходной схемы в допустимых пределах.

Пассивность схемы означает, что собственные числа матричного пучка (sE - A) не имеют положительных вещественных частей. Накопление ошибок округления и дифференциально-алгебраический характер исходной системы может привести к нарушению этого свойства для редуцированных матриц, поэтому необходим контроль пассивности. На практике контроль за сохранением пассивности потребовал дополнительных усилий. Еще одно полезное дополнение к блочному методу Арнольди — дефляция [4], т. е. динамическое уменьшение размера блока в случае линейной зависимости столбцов матрицы-проектора. Реализация этого механизма повышает устойчивость алгоритма и одновременно дополнительно уменьшает размер редуцированных схем. С описанными выше дополнениями классический алгоритм PRIMA peaлизован на С++ и успешно зарекомендовал себя в вычислениях.

Результаты вычислений

Классический алгоритм PRIMA с дополнительным контролем пассивности и дефляцией назван в таблице первым вариантом редукции. В процессе тестирования и исследования дополнительных возможностей уменьшения размеров редуцированных схем было предложено дополнительно использовать ортогональные преобразования подобия [5] для редуцированных матриц Ared, Ered. Эта операция уменьшает заполненность редуцированных матриц, что ведет к уменьшению числа элементов в редуцированной схеме. Было реализовано несколько вариантов для преобразований подобия (метод вращений Гивенса, обобщенных вращений) и получены сравнительные результаты накопления ошибки. Алгоритм PRIMA с контролем пассивности, дефляцией и преобразованием подобия для пучка матриц A_{red}, E_{red} назван в таблице вторым вариантом редукции.

В таблице приведены результаты тестирования двух реализованных вариантов метода редукции. Размер исходной схемы вычисляется как общее число сопротивлений (R), емкостей (C), индуктивностей (L) и взаимных индуктивностей (K). Этот размер приведен во второй колонке. Размер схемы после первого и второго вариантов редукции приведен соответственно в третьей и четвертой колонках. В колонке "Степень редукции" можно видеть уменьше-

	Общее коли-	Число эл	пементов		Время симуляции, ч : мин : с	
Тест	тов в исходной схеме (R + C + + L + K)	1-й вариант редукции	2-й вариант редукции	Степень		
1	1578	1230	244	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,78 0,15	1,6 0,4 0,2
2	31593	15792	1917	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,5 0,06	1:32,0 9 0,8
3	56169	9680	1859	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,17 0,03	9:00,0 4,4 0,9
4	155419	44548	7954	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,29 0,05	1 : 15 : 41,2 36 6
5	389266	22410	2444	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,06 0,006	6:30:00,0 14,0 1,1
6	11851	400	115	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,03 0,01	00:01,5 0,2 0,1
7	45761	710	203	Исходная 1-й вариант 2-й вариант	1,0 0,016 0,004	0:02:08,0 0:00:05,0 0:00:02,0

Сравнительные результаты времени симуляции исходной и редуцированной схемы



Рис. 5. Сравнение графиков S11-параметра для исходной и редуцированной схем. Кривая *1* показывает зависимость S11-параметра от частоты для исходной схемы, кривая *2* — для редуцированной



гис. 6. Сравнение графиков S12-параметра для исходной и редуцированной схем. Кри- mencar Analysis, vol. X1 вая 1 показывает зависимость S12-параметра от частоты для исходной схемы, кривая sevier. 2005. Р. 825—895. 2 — для редуцированной схемы 3. Kerns K., Yang A. 3.

ние размера схемы как отношение числа элементов в редуцированной цепи к числу элементов в исходной цепи. В последней колонке можно увидеть, как существенно — в десятки и сотни раз — уменьшается время симуляции в результате редукции.

Редукция была проведена для частоты, не боль-

шей 5 ГГц, и заданной погрешности проводимости в пределах 5 %. Разумеется, чем больше максимальная частота моделирования, тем больше размер редуцированной схемы.

Тесты, полученные из промышленных схем, прошли успешное моделирование симулятором SPEC-TRE (S-parameters, transient and periodic-steady state analysis) для сравнения характеристик исходной и редуцированной цепи. В качестве иллюстрации можно привести графики (рис. 5 и 6) сравнения S11- и S21-параметров для исходной и редуцированной схемы для разных пар портов некоторых тестов, приведенных в таблице. Частота моделирования задавалась в пределах от 100 МГц до 10 ГГц исходной и редуцированной цепи. В качестве иллюстрации можно привести графики сравнения S11 и S12-параметров для исходной и редуцированной схемы для разных пар портов некоторых тестов, приведенных в таблице. Частота моделирования задавалась в пределах от 100 МГц до 10 ГГц. Можно видеть хорошее, часто практически полное совпадение графиков для исходной и редуцированной схем. Заданная точность редукции — 5 %.

В настоящее время методы на основе подпространств Крылова не имеют успешных конкурентов среди других методов редукции паразитных цепей, содержащих индуктивные элементы.

Список литературы

1. Celik M., Pileggi L., Odabasioglu A. IC Interconnect analysis. Kluwer Academic Publishers. 2002. P. 310.

2. Bai Z., Dewilde P., Freund R. Reduced-Order Modeling // Numerical Methods in Electromagnetics / W. H. A. Schilders and E. J. W. ter Maten (eds.) Handbook of Numerical Analysis, Vol. XIII, Amsterdam: Elsevier. 2005. P. 825–895.

3. Kerns K., Yang A. Stable and Efficient Reduction of Large. Multiport RC Networks

by Pole Analysis via Congruence Transformations // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. 1997. Vol. 16. \mathbb{N} 7. P. 734–344.

4. Bai Z., Demmel J., Dongarra J., Ruhe A., van der Vorst H. Templates for the Solution of algebraic eigenvalue problems: a Practical Guide. SIAM. 2000.

5. Golub G., van Loan C. Matrix computations. The Johns Hopkins University Press. 1996. P. 694.

Справочные страницы

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск), Е. В. Лацапнёв, Белорусский национальный технический университет (г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО-И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Даны термины и наиболее широко употребляемые словосочетания и аббревиатуры по микро- и наносистемной технике и технологии их изготовления.

G

Gain — усиление, увеличение. Так обозначают коэффициент передачи (коэффициент усиления). Это есть отношение значения мощности (или напряжения, тока, амплитуды) на выходе системы к ее значению на входе. Если передающая система ослабляет сигнал, то вводят понятие коэффициента затухания. Это величина, обратная коэффициенту усиления. Коэффициент усиления — величина, как правило, переменная. Тогда ее называют функцией передачи.

Gallium arsenide (GaAs) — арсенид галлия. Химическое соединение галлия и мышьяка. Имеет вид темно-серых кубических кристаллов. Атомный вес — 144,64 ат. ед. В отличие от простых полупроводников Si и Ge, арсенид галлия относится к сложным полупроводниковым материалам группы А₃Б₅. Примеры А₃Б₅: GaAs, InP, InAs, GaP. Достоинства арсенида галлия как полупроводникового материала: высокая подвижность электронов, широкая запрещенная зона, диапазон рабочих температур от криогенных до 3500 °C, возможность получения полуизолирующего GaAs, превосходные оптические характеристики. Арсенид галлия широко используется для производства оптоэлектронных и СВЧ-микроустройств; используется в диодах Ганна, полевого транзистора с барьером Шоттки (MESFET) в высокочастотных интегральных схемах, светоизлучающих и лазерных диодах, в мобильных телефонах, твердотельных лазерах, некоторых радарных системах.

Gap — зазор. Так обозначаются разные понятия: запрещенная (энергетическая) зона; ширина запрещенной зоны; энергетическая щель; зазор (между фотошаблоном и полупроводниковой пластиной); воздушный зазор; зазор (промежуток) между контактами.

Gap model — модель зазора. Один из элементарных базовых блоков в САПР МЭМС для проектирования электростатических микроустройств. Представляет собой две балки с электростатическим зазором между ними.

Gel — гель. Дисперсная система, обладающая некоторыми свойствами твердого тела (способность сохранять форму, прочность, упругость). Свойства геля обусловлены тем, что в нем дисперсная фаза образует пространственную структуру (как бы сетку), а дисперсионная среда (жидкость или газ) расположена в ячейках этой структуры.

Germanium — германий. Хрупкий серовато-белый металлический элемент, обладающий полупроводниковыми свойствами. Назван в честь родины К. Винклера, открывшего этот элемент. Добывают из руд цветных металлов. Важный полупроводниковый материал для производства различных электронных приборов: диодов, транзисторов, фотодиодов, фоторезисторов и др.

Gettering — геттерирование. Захват примесей в нерабочей части полупроводника вдали от рабочей поверхности. Способность дефектов захватывать нежелательные примеси быстродиффундирующих металлов (так называемый эффект геттерирования) используется для улучшения электрофизических свойств полупроводниковых подложек. Дефекты, образовавшиеся в глубине подложки, геттерируют примеси из приповерхностных слоев, где расположены активные области полупроводниковых приборов. Один из методов удаления нежелательных примесей состоит во введении интенсивных дефектов в нерабочую поверхность подложек. Для этой цели применяют механическую абразивную обработку. Для более точного введения дефектов используют сфокусированные лазерные пучки. Фосфор используется не только для формирования эмиттерных и базовых областей биполярных транзисторов, но и для геттерирования быстродиффундирующих примесей, таких как Си и Аи. В общем, процесс геттерирования основан на следующих трех физических эффектах: освобождение примесей или разложение протяженных дефектов на составные части; диффузия примесей или составных частей дислокаций к области их захвата; поглощение примесей или собственных межузельных атомов некоторым стоком. Различают четыре основных механизма геттерирования примесей: геттерирование с использованием нарушенных слоев; внутреннее геттерирование; внешнее геттерирование; образование пар ионов.

Glass — стекло. Так называют диэлектрические пленки на основе двуокиси кремния: фосфосили-

катное стекло $P_2O_5 \cdot SiO_2$, боросиликатное стекло $B_2O_3 \cdot SiO_2$, борофосфосиликатное стекло $B_2O_3 \cdot P_2O_5 \cdot SiO_2$, алюмосиликатное стекло $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, мышьяксиликатное стекло $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, перманиевосиликатное стекло $GeO_2 \cdot SiO_2$, германиевосфорсиликатное стекло $GeO_2 \cdot SiO_2$, германиевофосфорсиликатное стекло $GeO_2 \cdot P_2O_5 \cdot SiO_2$ и др. Применяются в качестве пассивирующих покрытий, источников диффузионных примесей, ди-электрических слоев при создании многослойной металлизации, конденсаторов, приборов с зарядовой связью, микродвигателей вращения и др. Окисление моносилана — основной метод получения пленок стекла.

Glassivation — покрытие стеклом. Так называют пассивацию с использованием пленок двуокиси кремния. Пассивация — покрытие готовых микроизделий диэлектрической пленкой в целях механической защиты металлизации микроизделия. Это практически завершающая стадия изготовления чипов (кристаллов) микроизделия. Чаще всего применяют пассивацию на основе фосфосиликатного стекла $P_2O \cdot SiO_2$. Фосфор улучшает характеристики границы раздела кремний—термическая двуокись кремния и стабилизирует параметры микроизделия.

Grain — зерно. Так называют отдельный кристаллит в поликристаллическом материале (полупроводнике или металле). Например, в поликристаллическом кремнии исходный поликремний имеет столбчатую структуру с размером зерна 0,03—0,3 мкм; в ходе диффузии фосфора происходит рост кристаллов (кристаллитов) до размера 0,5—1 мкм; в процессе окисления рост зерен продолжается до 1—3 мкм.

Graphic Design Station II (GDSII) — станция графического дизайна II. Это общий выходной формат чертежных проектов, используемый в САПР МЭМС. Чертежи в конечном варианте становятся масками (фотошаблонами), используемыми в фотолитографии. Существуют две следующие разновидности GDSII: "Manhattan", где устройства имеют грани, составленные из прямых линий, и "Boston", где устройства могут иметь настоящие кривые линии.

Grinding — шлифование, шлифовка. Очень агрессивный процесс удаления материала, обычно использующий зафиксированный абразив. Шлифование на абразивном круге. Традиционно это процесс подготовки исходных подложек (исходных полупроводниковых пластин). Но в последнее время в связи с развитием технологии тонкого микрошлифования эти процессы все чаще появляются в техпроцессе изготовления самих чипов (кристаллов) микроизделия. Пример: микрошлифование для удаления избытков поликремния и планаризации поверхности перед металлизацией.

Groove — канавка, углубление (создание канавки; изолирующая канавка; V-образная канавка; Vобразная канавка с плоским дном; канавка для последующего заполнения ее металлом, двуокисью кремния или поликристаллическим кремнием и т. д.). Пример: канавка в полупроводнике, созданная лазерным лучом.



АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (http://www.rfbr.ru).

Моделирование структуры и физико-химических свойств растворов электролитов, заключенных в нанопоры микропористых сорбентов

Номер проекта: 99-03-32356 Год представления отчета: 2002

Разработана модель Монте-Карло жидкого электролита, заключенного в цилиндрические по-

ры инертной матрицы-носителя в равновесных условиях. Выполнено моделирование термодинамики двухкомпонентного дисперсного электролита и микроструктуры раствора (пространственное распределение воды и ионов соли) в пространстве узкой поры. Показано, что приближение "сплошной среды" для высокодисперсных концентрированных электролитов не дает адекватную картину структуры композитной системы. Напротив, применение метода моделирования Монте-Карло обнаруживает неравномерность (и немонотонность) распределения молекул воды даже в условиях незаряженной и неполяризуемой стенки поры.

На основе теорий объемного заполнения микропор и многослойной адсорбции БЭТ выполнено моделирование термодинамических свойств (активности воды в растворе, величины сорбции водяного пара) микропористых сорбентов с активными компонентами CaCl₂, LiCl и LiBr. Установлена область термодинамических условий (концентрации раствора, температуры и относительной влажности), в которой использование этих моделей дает хорошее описание экспериментальных данных. Однако обнаружено, что при использовании этих моделей для описания жидких суперконцентрированных растворов сильно гигроскопичных веществ погрешность расчетных значений может значительно возрастать с уменьшением содержания воды в растворе. На основе комплексных результатов исследования выведено новое термодинамическое уравнение состояния воды в таких системах. Моделирование электролитов показало, что с помощью этого уравнения возможно не только с хорошей точностью рассчитывать их термодинамические свойства, но и предсказывать равновесное давление водяного пара в области пересыщения, характерной для электролитов в мелкодисперсном состоянии.

Экспериментально измерено равновесное давление водяного пара над дисперсными растворами хлорида лития в порах силикагеля. На основе полученных результатов предложена методика для точного предсказания промежуточных значений сорбции воды микропористыми композитными сорбентами при наличии экспериментальных данных только для крайних значений давления пара.

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН

Конформационный анализ молекул в полимерных матрицах и на поверхностях твердых тел как метод зондирования стеклообразных полимеров и поверхностей

Номер проекта: 99-03-33190 Год представления отчета: 2002

Методом конформационных зондов проведено исследование распределения свободного объема и локальной подвижности фрагментов полимерных цепей следующих стеклообразных полимеров: полистирола (ПС), поливинилхлорида (ПВХ), полиметилметакрилата (ПММА), поливинилацетата (ПВА), поливинилбутираля (ПВБ), полипропилена (ПП), полибутадиена (ПБД), полиизобутилена (ПИБ), полиэтилакрилата (ПЭА), полибутилметакрилата (ПБМА), поливинилтриметилсилана (ПВТМС) и политриметилсилилпропина (ПТМСП). В качестве зондов использовались 1,2-бромфторэтан (БФЭ), 1,2-дихлорэтан (ДХЭ), метилдихлорфосфат $Cl_2P(O)OCH_3$ (МДХФ), 1,1,2,2-тетрабромэтан (СНВг₂)₂ (ТБЭ), транс-1,2-дихлорциклогексан (ДХЦГ), 1,2-ди(парабромфенил)этан (ДПБФЭ) и 1,2-ди(паранитрофенил)этан (ДПНФЭ).

При поиске новых зондов исследованы колебательные спектры и проведен конформационный анализ ДПНФЭ и гексахлордиоксатрициклододекаена. Обнаружены уникальные конформационные свойства ДПНФЭ.

Методами ИК спектроскопии исследованы стеклообразные и кристаллические пленки ДХЭ и этилбензола (ЭБ), полученные конденсацией паров на охлажденные до 80 К пластинки из КВг и Ge. Исследована кинетика кристаллизации ДХЭ и ЭБ. Показана возможность изучения свойств поверхности по конформационному составу образующихся на этой поверхности твердых пленок. Исследованы контуры ИК полос поглощения групп СН, СН₂ и СН₃. Определены параметры ориентационной диффузии и свободного вращения групп СН₃ в молекулах СН₃Х (конденсированная фаза). Обнаружено взаимодействие СН валентных колебаний с низкочастотными колебаниями. Методом Фурье-ИК спектроскопии проведено исследование кинетики конформационных переходов в криорастворах фторциклогексана. Разработан новый путь приложения факторного анализа для ИК спектроскопического исследования сложных смесей. Показано, что возможности когерентной спектроскопии рассеяния света при разрешении наложившихся линий могут быть расширены применением метода вариации фазовой расстройки.

ГОУ ВПО "Казанский государственный технологический университет"

Влияние структуры границ зерен и их дефектности на физико-химические свойства нанокристаллических материалов

Номер проекта: 99-03-32208 Год представления отчета: 2002

На примере нанокристаллических металлов и нанокристаллов соединений переходных металлов показано, что дефектность границ зерен принципиально влияет на физико-химические свойства этих веществ. Так, особо чистая медь после интенсивной пластической деффермации приобретает слабый ферромагнетизм из-за того, что в границах зерен выделяются нанокристаллические частицы растворенного ранее в меди очень малого количества железа. Выделение ниобия в границах зерен нанокристаллического трисилицида железа, полученного интенсивным размолом, обеспечивает стабильность наноструктуры вплоть до температур порядка 1000 К. Результаты работы показывают, что дефектность внутреннего объема нанозерен тоже существенно влияет как на образование наноструктур, так и на свойства наноструктурированного вещества. Действительно, дефектность карбида ванадия удалось использовать для получения нанокристаллического состояния этого вещества. Вместе с тем, использование дефектности и фазового перехода порядок—беспорядок также позволило создать нанодоменную структуру этого вещества.

Кроме того, в работе были получены и исследованы нанокристаллические палладий и карбид титана. Исследования этих веществ обнаружили влияние дефектности в объеме зерен на такие свойства, как магнитная восприимчивость.

Для объяснения свойств были разработаны различные теоретические модели. Эти модели учитывали дефектность как в границах зерен, так и в объеме зерен нанокристаллических веществ. С помощью разработанных моделей удалось принципиально понять те изменения в свойствах, которые происходят как при образовании наноструктурного состояния из крупнокристаллического, так и при релаксации наносостояния и возврате в крупнокристаллическое состояние.

Государственное учреждение Институт химии твердого тела УрО РАН

Процессы аномальной диффузии и заряжения в на неструктурированных оксидных электродах

Номер проекта: 99-03-32014 Год представления отчета: 2002

Отработана технология приготовления наноструктурированных пленок смешанного состава (методом матрицы — template) на основе оксидов олова и титана с заданной морфологией и исследованы особенности их структуры. Выявлена динамика изменения сверхтонкой структуры наночастиц, образующих электроды при изменений условий термогидролиза и установлено, что она контролируется концентрациями аморфной и кристаллической фаз в наночастицах. Кристаллическая фаза (ядро наночастицы) представляет собой твердые растворы на основе оксидов олова и титана с врастаниями аморфного оксида олова, внешняя оболочка наночастиц образована преимущественно гидратированными аморфными оксидами олова. Исследования процессов заряжения — разряда показали, что эти электроды могут обладать огромной электрохимической емкостью — до 150 Φ/Γ , близкой по значению к электродам на основе $RuO_2 \times H_2O$, являющихся в настоящее время рекордсменами среди электрохимических конденсаторов.

Получены экспериментальные электрохимические данные (хроноамперограммы, зависимости заряда от скорости развертки по данным ЦВА),

удовлетворяющие уравнению Коттрела и модели сфер только в предположении о наличии в этих электродах не одного, а множества коэффициентов диффузии. Последнее объясняется тем, что наночастицы в электроде объединены в коррелированные ансамбли наночастиц, размеры и электронные свойства которых меняются при поляризации — своего рода размерный эффект, не принимавшийся ранее во внимание при исследованиях оксидных материалов. Предложена модель фрактальной границы раздела двух взаимопроникающих сред, какими являются сильнонеупорядоченные оксидные электроды и электролит. Предполагается, что между любыми включениями одной среды всегда найдется частица другой среды. Такой подход приводит к понятию объемной границы раздела двух сред, когда объем граничного слоя заполнен сильно развитой поверхностью раздела, при этом эта граница раздела легко доступна как электронам, так и ионам раствора. Этим самым возникают идеальные условия для образования сверхразвитого двойного электрического слоя. При этом эффективная диэлектрическая проницаемость фрактальной объемной границы может достигать очень высоких значений, что может обеспечить огромную зарядозапасающую способность. Этот слой легко доступен и электронам, и интеркалирующим частицам, но при катодной поляризации существуют быстрые маршруты электронного и ионного переноса, при анодной происходит их разрушение и интеркалированные частицы оказываются локализованными в наночастицах, предположительно на границе раздела фаз кристаллическое ядро — аморфная оболочка.

Таким образом, полученные в проекте новые результаты позволяют объяснить высокую электрохимическую емкость и стабильность, а также особенности заряжения в наноструктурированных оксидных электродах.

Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова

Механизмы стабилизации биополимеров в водных дисперсиях фуллеренов и фуллерено-подобных структур шунгитового углерода

Номер проекта: 99-03-32388 Год представления отчета: 2002

Исследованы закономерности возникновения кластерной организации в растворах глобулярного белка и в молекулярно-коллоидной дисперсии гидратированных фуллеренов C60, а также изучен механизм влияния последних на гидратацию, структурно-динамические характеристики и способность белка формировать надмолекулярные структуры. Теоретически и экспериментально показана определяющая роль удельной поверхностной энергии в активационном механизме возникновения кластеров белков и в безактивационном механизме их разрушения, вызываемом увеличением концентрации электролита.

Исследования проведены на базе разработанной в рамках проекта методики измерения поверхностного натяжения в водно-белковой матрице методом ЭПР спиновой метки с использованием вязкостных изотерм. В рамках этой же методики предложен усовершенствованный способ определения изменений свободной энергии смешения в гидратной оболочке белка в процессе ее фазовых переходов, сопряженных с образованием белковых кластеров.

Обнаружено стабилизирующее по отношению к действию температуры влияние дисперсии фуллеренов на структуру сывороточного альбумина и мембрану эритроцитов, обусловленное способностью фуллереновой подсистемы поддерживать кластерную организацию как белкового раствора, так, наиболее вероятно, и мембранных белков.

Предложена схема взаимодействия белковой и фуллереновой подсистем на основе механизма деплеций, которая учитывает изменение взаимодействия ионов электролита с белком, а также роль поверхностных и дальнодействующих сил.

Получены устойчивые коллоидные водные экстракты из шунгитового углерода и нерастворимые после высушивания экстрактов пленки. Они имеют выраженную фрактальную структуру. В коллоидах идентифицированы нативные фуллерены, фуллереновые производные и их молекулярные комплексы с полярными молекулами, что позволяет обосновать биологическую активность шунгитового углерода.

Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук

Фювости нанотехнологий

Ученые впервые составили полные компьютерные "чертежи" вируса

Полную модель структуры вируса табачной мозаики составили ученые из Университета Иллинойса, США. Так, примитивнейшая жизненная форма "оцифрована" учеными и может изучаться далее с помощью компьютерного моделирования.

Детальным моделированием на компьютере автомобиля или самолета давно уже никого не удивишь. Однако о том, чтобы на атомном уровне смоделировать живое существо, до последнего времени можно было прочитать только в научно-фантастических рассказах. И вот фантастика становится реальностью. Группа биоинформатиков из Университета штата Иллинойс в Урбане-Шампейне и Университета штата Калифорния в Ирвине впервые в мире построила динамическую модель целого живого организма — вируса.

Результат работы ученых сходен с проектированием инженерами, например, самолета Boeing, только в обратном порядке. Биологи сначала досконально изучили вирус, а лишь затем смогли составить его модель с точностью до атома в специальных программах молекулярного моделирования. Их исследование можно сравнить с последовательным разбиранием дома, начиная с крыши и заканчивая фундаментом, при этом каждый кирпич заносится в план, который потом оцифровывают, так, что бы получилась трехмерная модель, полностью (до кирпичика) соответствующая реальному строению. Вирусы являются самыми простыми живыми существами. Многие биологи даже не признают их организмами и называют органическими частицами. Размножаться вирусы могут, только проникнув в живую клетку и используя ее ресурсы и механизмы. Для моделирования был выбран самый один из самых простых известных вирусов — вирус-сателлит табачной мозаики. Его размер составляет всего около 20 нм. Свое название он получил за то, что не может даже самостоятельно взять под контроль клетку и размножается только в тех клетках, которые уже атакованы вирусом табачной мозаики (рис. 1), часто поражающим сельскохозяйственные культуры, особенно, томаты.

Однако разобрать вирус на части не так-то просто. Для изучения его внутренней белковой структуры ученые использовали современные методы кристаллографии.

Дальнейшие исследования структуры вируса и его физических характеристик помогут ученым глубже изучить его особенности — механизм инфицирования, развития и его размножения. Так, например, эти знания помогут вирусологам в медицине при борьбе с распространенными вирусными заболеваниями. Также генные инженеры смогут вывести растения, устойчивые к воздействию этого вируса, что принесет огромный вклад в агротехнику и сельское хозяйство.

Но наиболее ценным компьютерный чертеж (рис. 2, см. третью сторону обложки) оказался для инженеров-нанотехнологов, создающих и проектирующих молекулярные машины. Оказывается, на ос-



нове чертежа капсида вируса, содержащего виральную РНК, можно будет создавать различные полезные молекулярные машины. Также не исключено, что подобные машины могут быть самореплицирующимися, т. е. смогут

Рис. 1. Вирус табачной мозаики (фотография)

создавать копии друг друга.

И не следует забывать, что это первая, беспрецедентная в истории человечества возможность целиком смоделировать жизнь в цифровом виде. На основе цифрового организма ученые смогут не только изучать его свойства, но и создавать в виртуальном виде жизненные формы, не существующие в природе. Возможно, с развитием компьютерной техники появится возможность полностью смоделировать, например, высших животных, млекопитающих и даже человека.

Вирус-сателлит состоит из сферической молекулы РНК, окруженной белковой оболочкой. Чтобы обеспечить реалистичность модели, виртуальный вирус поместили в крошечный куб, состоящий из соленой воды. Вся модель в целом содержала более миллиона атомов. Их взаимное расположение и движение рассчитывалось с учетом сил межатомного взаимодействия, как это обычно делается при моделировании макромолекул.

Пока модель не позволяет проследить за поведением вируса в клетке, поскольку для этого понадобилось бы смоделировать внутриклеточную среду. Однако расчет, выполненный в американском Национальном центре суперкомпьютерных приложений (NCSA), позволил в течение короткого отрезка модельного времени следить за динамикой вируса, когда он представлен самому себе. Кроме простых моделей-изображений ученые получили также данные о динамическом поведении вируса. В результате были уточнены и механические свойства, и внутреннее строение вирусной частицы.

Расчеты на суперкомпьютере были проведены в лаборатории биофизики при Институте развитых наук и технологий.

Несмотря на то, что в новой модели действительно впервые в мире на компьютере целиком смоделировано живое существо, это не самый крупный расчет подобного рода. Осенью прошлого года в Лос-Аламосской национальной лаборатории была создана динамическая модель работы рибосомы, синтезирующей молекулу белка, в которой учитывалось движение более 2,5 млн. атомов.

Источник: EurekAlert — Researchers simulate complete structure of virus — on a computer (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2006-03/uoia-rsc031006.php)

Молекулярная многоножка раскручивает микростержни

Ученые из Нидерландов смогли создать наномоторы, которые работают с микроскопическими объектами, передавая им движение. Работа ученых имеет важное значение для дальнейшего развития наномашин, так как до сих пор не удавалось передавать движение от нано- к микрообъектам, теперь же появляется надежда, что в ближайшем будущем могут появиться движущиеся тротуары, неоднократно описанные фантастами.

"Нам удалось впервые продемонстрировать работающий молекулярный мотор, приводимый в движение светом. Если ранее удавалось просто привести в движение микроскопические машины, то сегодня мы заставили их выполнять полезную работу", — говорит Бен Феринга из Гронингенского университета.

"Мы добились того, что матрица моторов может перемещать предмет в 10 000 раз больше одной отдельно взятой молекулярной машины. Конечно, это стало возможным только благодаря коллективной работе моторов. Полученная нами поверхность, покрытая наномоторами, представляет собой настоящий мускул".

Феринга и коллеги взяли за основу наномотора в качестве "оси" молекулу с двойной связью C=C в центре. Верхняя часть молекулы представляет собой ротор, а нижняя — статор.

Далее ученые решили сделать плоскость, на которой будет располагаться матрица наномоторов, превращая ее в "тысяченожку". Молекулы наномоторов расположили рядами на жидкокристаллической пленке.

В итоге, у ученых получилась поверхность, покрытая моторами, как ковер ворсом. Так как наномотор работает исключительно от энергии фотонов, то заставить ворс зашевелиться может только луч света. В эксперименте ученые включили наномоторы светом с длиной волны 365 нм.

Свет вызывает в одном отдельно взятом наномоторе химическую фотоизомеризацию, т. е. проворачивание роторной части вокруг оси. Это приводит к тому, что из правоориентированной молекула становится левоориентированной. А энергия фотонов, приводящая к нагреванию молекулы, вызывает дальнейшее вращение ротора до 360°. Так происходит полное оборачивание ротора вокруг своей оси.

"Изменение формы наномоторов при вращении роторов приводит к макроскопическому изменению геометрии поверхности жидкого кристалла, добавляет Феринга. — Так, макроскопический объект, помещенный на поверхность пленки, будет вращаться".

В эксперименте ученые заставили наномоторы вращать стеклянный стержень размерами 5 × 28 мкм (рис. 3, см. третью сторону обложки). Он вращался

со средней скоростью 0,67 мин $^{-1}$ благодаря фотохимической изомерии и 0,22 с $^{-1}$ благодаря только тепловой изомерии.

"Самое главное наше достижение — то, что мы заставили наномоторы работать. Теперь мы сможем их использовать в полезных целях, например, попробуем на их основе сделать наномашину, способную перевозить грузы. Также будет полезным разработка наноконвейера", — заключает Феринга. Работа ученых была проведена совместно с лабораториями Philips Labs.

Исследователи также планируют сделать некий гибрид с изобретенной ранее нанобагги с колесами из фуллеренов. Если в оси багги между фуллереном и рамой вставить изобретенные наномоторы, то наномашинки смогут ездить, приводясь в движение светом.

Если дальнейшие разработки ученых увенчаются успехом, не исключено, что в будущем могут появиться движущиеся ленты, принцип действия которых основан на совместной работе миллиардов наномоторов. Так, описанные фантастами движущиеся тротуары могут стать реальностью.

Источник: Nanotechweb.org — Molecular motor rotates objects (http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/3/6/1)

Наночастицы — будушее диагностики и лечения рака

В настоящее время методы использования наночастиц в диагностике и лечении опухолей стремительно приближаются к внедрению в клиническую практику. Наночастицы представляют собой мельчайшие, не более одной миллионной метра, структуры различной формы: шарики, трубочки, сферы, капсулы, способные перемещаться к опухолевым клеткам, не повреждая окружающие ткани.

Конечно, на детальную разработку и официальное внедрение наночастиц в практическую медицину уйдет еще не один год, однако некоторые из них уже проходят тестирование на пациентах, а еще целый ряд стоит на пороге клинических испытаний.

Пресс-конференция "Достижения нанотехнологии в диагностике и лечении рака", проводившаяся в рамках международной конференции "Молекулярные мишени и методы терапии рака", проходившей 14—18 ноября 2005 г. в Пенсильвании (США), была полностью посвящена развитию этого нового направления в медицине.

Мы предлагаем вашему вниманию информацию о некоторых наиболее перспективных разработках в этой области.

Однослойные углеродные нанотрубки с адсорбированными антителами для обнаружения клеток рака груди. Биохимики и инженеры университета Дэлавера (Ньюарк, США) под руководством Балайи Панчапакесан (Balaji Panchapakesan) разработали способ выявления клеток рака груди с помощью покрытых антителами углеродных нанотрубок. Антитела, своего рода управляемые снаряды, специфичные к рецептору инсулиноподобного фактора роста I (IGF1R), экспрессирующемуся на большинстве злокачественных клеток, находят эти клетки и связываются с ними. При помещении образующегося комплекса между электродами происходит изменение его электропроводимости, причем оно прямо пропорционально числу рецепторов, экспрессируемых на поверхности клеток.

Результаты этих разработок могут лечь в основу метода обнаружения опухолевых клеток в крови как в случае образования новой опухоли, так и в случае рецидива опухоли или микрометастазов, оставшихся после проведенного ранее лечения.

Кроме экономической рентабельности, важным достоинством этого метода является то, что он позволяет определить злокачественность клеток в течение нескольких минут, в отличие от нескольких часов или даже дней, требующихся для применяемых в настоящее время методов.

Авторы планируют протестировать свою методику с использованием антител к другим маркерам рака груди, а также белкам, характерным для других видов опухолей.

Иммунонаносферы для избирательной фототермической терапии и наносферы для комбинированной терапии рака и визуализации опухолей. В университете Раиса (Хьюстон, США) ведется разработка нового подхода к лечению рака, основанного на двух приемах, которые безвредны сами по себе, но при совместном использовании губительны для опухолевых клеток.

В методике используются структуры, называемые "наносферами" (рис. 5, см. третью сторону обложки) и представляющие собой микроскопические силиконовые шарики, покрытые тончайшим слоем золота, а также свет длинноволновой инфракрасной области спектра. Наносферы нетоксичны и выводятся из организма без каких-либо побочных эффектов, а длинноволновое ИК излучение, испускаемое лазером, практически не взаимодействует с тканями организма.

При введении наносфер экспериментальным животным, больным раком, происходит их аккумуляция в опухоли. Последующее воздействие длинноволнового ИК света разогревает золотую оболочку частиц, что приводит к гибели опухолевых клеток. Кроме того, благодаря своему размеру — несколько нанометров в диаметре — наносферы взаимодействуют со светом определенным образом, что позволяет, меняя размер ядра и оболочки, "настраивать" их на определенную длину световой волны.

Одна из групп исследователей вводила наносферы в кровь экспериментальных животных с раком прямой кишки. При этом уверенность в том, что частицы аккумулируются именно в области опухоли, основывалась на ранее полученных результатах. Это происходит благодаря тому, что стенки кровеносных сосудов, формирующихся в быстрорастущих солидных опухолях, неполноценны и сильно проницаемы; таким образом, наночастицы, путешествующие по кровотоку, в конечном итоге попадают из таких "протекающих" сосудов в ткань опухоли. Опухоль, в свою очередь, постепенно выводит их в окружающие ткани. При этом покрытые защитным слоем полиэтиленгликоля (ПЭГ) наносферы "невидимы" для иммунной системы организма.

Через 20 ч после введения наносфер ученые получают возможность визуализировать наличие их в опухоли с помощью оптической когерентной томографии (OKT), используемой дерматологами для обнаружения рака кожи. После этого опухоль может быть уничтожена с помощью ИК излучения.

Вторая группа занималась усовершенствованием метода доставки наночастиц к опухолям. Использование несовершенства кровеносных сосудов опухолей не позволяет обнаружить маленькие зарождающиеся опухоли, недостаточно зрелые для образования собственной системы кровоснабжения. Для решения этой проблемы были сконструированы "иммунонаносферы" — наносферы, к которым, поверх золотого слоя, прикрепляются антитела, специфичные к опухолевым маркерам и позволяющие обнаружить опухоль в любой части тела.

Пока эта модификация метода проверялась только "в пробирке". К наносферам прикреплялись антитела, специфичные к маркеру рака груди HER2. При пропускании ИК излучения через суспензию происходила гибель только экспрессирующих HER2 клеток. Следующим шагом разработчиков будет тестирование метода на лабораторных животных.

Лечение рака груди с помощью комбинации люлиберина, цитотоксического белка и наночастиц оксида железа. Исследователи Пеннингтонского центра биомедицинских исследований под руководством Каролы Лейшнер (Carola Leuschner) использовали в своей работе другой подход.

С учетом большого числа рецепторов к люлиберину (гормону, стимулирующему выработку лютеинизирующего гормона) на клетках рака молочной железы они создали молекулярный комплекс, состоящий из люлиберина, цитотоксического препарата Гекат (Hecate) и суперпарамагнитной частицы оксида железа диаметром 10 нм.

Тестирование метода проводилось на двух культурах раковых клеток и контрольной культуре мышиных клеток. Оказалось, что комплекс эффективно уничтожает опухолевые клетки лишь в том случае, когда люлиберин и гекат наносятся на наночастицу по отдельности, а не в виде комплекса, так как для полноценной реакции необходим контакт обоих соединений с клеточной мембраной.

В опытах на иммунодефицитных мышах с привитым раком груди человека было доказано, что обнаружение опухолевых клеток в организме и связывание с ними происходит именно за счет наличия на поверхности наночастицы гормона люлиберина, так как при его отсутствии в комплексе или предварительном введении соответствующие рецепторы блокировались и уничтожения клеток не происходило.

Разработчики считают, что применение этого метода перспективно как для визуализации и лечения опухолей, так и для мониторинга ответа опухолей на лечение. Кроме рака груди, он может быть использован при опухолях толстого кишечника, легких, яичников, а также меланомы и неходжкинской лимфомы.

Сейчас ведется работа по оптимизации доз гормона и лекарства на поверхности частиц в целях возможного снижения стоимости комплекса.

Опухоль-ориентированные системы доставки. Эстер Чанг (Esther H. Chang) из Медицинского центра Джорджтаунского университета (Вашингтон, США) с коллегами создали липосомные наночастицы, которые благодаря антителам, покрывающим их поверхность, способны находить опухоль в любой части организма. Внутри липосом содержится ген p53, кодирующий белок, запускающий апоптоз процесс самоуничтожения клетки в случае ее генетического повреждения. При связывании антител с рецепторами трансферрина, в избытке присутствующими на поверхности раковых клеток, содержимое липосом перемещается внутрь клеток, что приводит к их гибели.

В более чем 50 % случаев злокачественные клетки имеют мутацию в гене p53, являющемся "охранником" генома, так как он обеспечивает избавление от генетически измененных клеток. Авторы считают, что внесение нормальной версии этого гена в патологические клетки повысит эффективность радио- и химиотерапии, действие которых направленно на разрушение генов злокачественных клеток.

В доклинических испытаниях на животных метод достоверно повышал эффективность других терапевтических приемов, причем повреждения нормальных клеток во время лечения зарегистрировано не было.

Фаза I клинических испытаний нанолипосом уже начата. Планируется включение в программу 20 пациентов с прогрессирующими опухолями головы, шеи, предстательной железы, поджелудочной железы, груди, желчного пузыря, толстого кишечника, шейки матки, мозга, кожи и легких.

Эта методика также может быть использована для доставки в опухоль контрастных веществ в целях ее обнаружения и анализа структуры для постановки точного диагноза.

Таким образом, нет оснований сомневаться, что в недалеком будущем многие проблемы диагностики и лечения онкологических заболеваний лягут на плечи маленьких, но эффективных наночастиц.

Источник: Интернет-журнал "Коммерческая биотехнология" — (http://www.cbio.ru/)

CONTENTS

Seisyan R. P. EUV Lithography as Means of Ulsi Production and an

Analytical review of the ideas and the current state of the Extreme Ultraviolet (EUV) nanolithography, as well as Deep Ultraviolet (DUV) lithography, with elements of the original study is presented. The key factors having an influence on photolithography process resolution like wavelength and numerical aperture dependences, along with reduction possibilities of the "technological" coefficient in the expression for a minimal stripe resolved by photolithography are considered. The data on development of the native model of the Experimental Nanolithography Tool aimed at most high resolution are presented. Limiting resolution of the method of EUV Lithography is estimated as well as prospects of further achievement of the several nanometers resolution necessary for creation of any nanostructure is estimated.

Butyvskaya M. V. Creation of Structures "Silicon on Insulator" with

In this article, the technology of creation of structures "silicon on insulator" (SOI) by method Smart Cut is described. The new approach to optimization of this technology regarding achievement of high efficiency of conditions shear and decrease in a total doze of implantation of hydrogen is presented.

Kovalevskii A. A., Dolbik A. V., Tzybulskii V. V. Research of Process

Anisotropic Plasmachemical of Etching Film Dioxid of Silcon The process dry anisotropic of etching dioxide of silicon with consist of for and oxygen to environment is investigated.

Nepochatenko V. A., Kudzin A. Y. The Equations 90° Domain Walls

a Coordinate System of Tetragonal Phase in BaTiO₃..... The method of determination of the equations domains walls is proposed in a coordinate system paraphase in ferroelastics and multiaxial ferroelectrics. The equations 90° domains walls in barium titanate are obtained and is shown that is possible formation of 4 types of structural domains, to which correspond 12 orientations states and 24 electric domains in this crystal.

Obukhov I. A. About Temperature Dependance of Metal Quantum

Wires Resistance Abstract - The change of temperature dependence of metal quantum wires resistance caused by change of wires diameter was observed in experiment. This effect can be explained if to take into account the emission of electrons from contacts to conducting channel of quantum wire.

Rogatkin Yu. B. Systematic Design of Analog-Digital IP Blocks

This paper describes the design of analog-digital IP blocks and introduces a design methodology that can help to bridge the gap. This paper describes the design of a 12-b 20-Msample/s pipeline analogto-digital converter (ADC) implemented in 0,25-µm double-poly triple-metal CMOS process for example.

Is shown, that major factors influencing on a condition anisotropic plasma chemical of etching are: common pressure of a gas mix, partional of pressure of each of components and size given up to a substrate of HF-capacity. The vertical position of walls of contact windows in dioxide of silicon with anisotropic plasmachemical etching is provided with common pressure of a gas mix octafluorpropane (Chladon-218) - oxygen 4-8 Pa and contents of oxygen, in relation to octafluorpropane 2-4 vol. %.

Kashtankin I. A., Gurin N. T. Temperature Characteristics of Bipolar Silicon N-shaped Devices with Guided I–V Characteristics

The temperature models of bipolar silicon N-shaped devices with guided I-V characteristics were developed. The temperature changes cause the increasing of the max current in the output I-V characteristics. The results of modeling correspond to experimental data.

Potyagalova A. S., Soltan I. E., Tkachev D. F., Khapaev M. M.

Practical Technique for Reduced-Order Modeling of RLCK Circuits Based on Krylov Space Methods

In this paper, we present an implementation of model order reduction (MOR) for resistance-inductance-capacitance (RLCK) network. The algorithm generates guaranteed-passive models using numerically stable and efficient Krylov-subspace iterations. A result of reduction algorithm is a small network whose port behavior is similar to that of large RLCK-network. Further it is shown how to reduce a model via congruence transformations of matrix pencil. This paper presents some results of comparison simulation for full and reduced networks.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1684-6419) Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(495) 684-5008. Fax: +7(495) 681-3798

> The journal bought since november 1999. Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

> > ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru; nmst@zknet.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор И. С. Павлова. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 28.02.2006. Подписано в печать 12.04.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,20. Заказ 626. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15