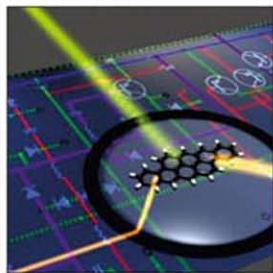


М ЭЛЕКТРОНИКИ И Р

НАНОТЕХНОЛОГИИ
В ЭЛЕКТРОНИКЕ – 3.1

Под редакцией
Ю.А. ЧАПЛЫГИНА



ТЕХНОСФЕРА



МИР электроники

Нанотехнологии
в электронике – 3.1

под редакцией
члена-корреспондента РАН
Ю.А. Чаплыгина

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2016

УДК 620.3
ББК 32.85
H25

Рецензент: академик РАН Ю.В. Гуляев

H25 Нанотехнологии в электронике-3.1

Под редакцией чл.-корр. РАН Ю.А. Чаплыгина

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 480с. ISBN 978-5-94836-423-0

Книга представляет собой сборник научных работ сотрудников и выпускников Национального исследовательского университета «МИЭТ» и касается развивающихся направлений нанотехнологий в электронике. Следует отметить, что каждая из статей – это законченный труд научно-исследовательского либо аналитического характера, отражающий современное состояние исследований в обсуждаемых авторами областях.

Книга будет полезна специалистам в различных областях микро- и наноэлектроники, а также молодым исследователям – аспирантам и студентам-магистрантам.

УДК 620.3
ББК 32.85

© 2016, МИЭТ

© 2016, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-423-0

Содержание

Предисловие	6
Теория, Моделирование, Эксперимент	13
1. Модели перспективных элементов устройств интегральной наноэлектроники. <i>Чаплыгин Ю.А., Артамонова Е.А., Балашов А.Г., Ключников А.С., Красюков А.С., Крупкина Т.Ю.</i>	14
2. Микроэлектромеханические методы моделирования поляризации сегнетокерамики. <i>Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Лавров И.В., Яковлева Е.Н.</i>	52
3. Магнитные нанокластеры: свойства, перспективы. <i>Звездин А.К., Плис В.И., Плохов Д.И., Попков А.Ф., Попов А.И.</i>	69
Материалы, Технологии	88
4. Материалы ограничителей интенсивности лазерного излучения на основе углеродных нанотрубок. <i>Бобринецкий И.И., Герасименко А.Ю., Подгаецкий В.М., Савельев М.С., Светличный В.А., Селищев С.В., Терещенко С.А.</i>	89
5. Органические нанокompозитные пьезоэлектрические материалы. <i>Гаврилов С.А., Роцин В.М., Силибин М.В., Солнышкин А.В.</i>	124
6. Гетероструктуры нитридов элементов третьей группы: физические свойства и применение в электронике. <i>Горбачевич А.А., Егоркин В.И., Земляков В.Е.</i>	145

7. Плазменные методы в технологиях МСТ и трехмерной интеграции кристаллов. <i>Амиров И.И., Голышиников А.А., Лукичев В.Ф., Путря М.Г.</i>	176
Методы исследований	215
8. Развитие методик измерений для совершенствования функциональных и точностных характеристик основных методов сканирующей зондовой микроскопии. <i>Белов А.Н., Силлибин М.В., Шевяков В.И.</i>	216
9. Метод фокусированного ионного пучка. <i>Боргардт Н.И., Волков Р.Л., Румянцев А.В.</i>	239
10. Зондовые нанотехнологии в исследовании молекул ДНК. <i>Морозов Р.А., Неволин В.К., Чаплыгин Е.Ю.</i>	271
Приборы и устройства	289
11. О некоторых проблемах при проектировании СВИС с наноразмерными компонентами. <i>Стемковский А.Л.</i>	290
12. Использование гетеропереходной SiGe интегральной биполярной базы для восстановления СВЧ-сигналов кабельных и проводных линий связи. <i>Тимошенко В.П.</i>	318
13. Развитие электрохимических накопителей электрической энергии на основе наноструктур. <i>Громов Д.Г., Галперин В.А., Лебедев Е.А., Кицюк Е.П.</i> .	347
14. Сенсоры на основе анизотропных магниторезистивных наноструктур. <i>Беспалов В.А., Дрюжев Н.А., Юров А.С., Мазуркин Н.С., Чиненков М.Ю.</i>	373
15. Композитные наноматериалы для газовых сенсоров обнаружения токсичных веществ. <i>Вернер В.Д., Сауров А.Н., Кузнецов А.Е.</i>	401
16. Разработка и изготовление инерциальных микроэлектромеханических систем. <i>Тимошенко С.П.</i>	435
17. Энергонезависимая твердотельная память в современной микроэлектронике. <i>Красников Г.Я.</i>	464

Предисловие

Сегодня развитие нанотехнологий определяет научно-технологический статус государства и может проявляться в различных областях техники. При этом особенно яркое практическое проявления достижений нанотехнологий наблюдается именно в электронике, что обусловлено общемировой тенденцией к уменьшению размеров и критической необходимостью к увеличению степени интеграции и быстродействия микросхем. Развитию именно таких направлений научной деятельности применительно к электронике уделяется в МИЭТе самое пристальное внимание. Представленная читателю книга составлена из научных работ сотрудников и выпускников МИЭТа и касается развивающихся направлений нанотехнологий в электронике. Следует отметить, что каждая из представленных работ представляет собой законченный труд либо научно-исследовательского плана, либо обобщающе аналитического характера и отражает современное состояние исследований в обсуждаемой области.

Создание интегральной микросхемы представляет собой сложный многоступенчатый и достаточно длительный процесс, включающий этапы моделирования физических процессов, проектирование топологии, отработку и исследования технологических процессов. При этом значение приборно-технологического моделирования при проектировании СВИС сложно переоценить, особенно при переходе в область наноразмерных топологических норм. Возможностям программной среды приборно-технологического моделирования TCAD, непрерывно расширяющимся за счет внедрения новых моделей технологических процессов, основанных или использующих новые физические эффекты, посвящена 1 глава представленной монографии. Основное внимание главы уделено развитию методологии применения TCAD для преодоления барьеров, связанных со значительными вычислительными затратами при численном моделировании трехмерных, непланарных и многотранзисторных элементов интегральных схем.

Современную мировую тенденцию использования функциональных материалов в приборах нанoeлектроники отражают 2 и 3 главы, в которых рассмотрены вопросы моделирования процессов поляризации керамических сегнетоэлектриков и исследования мультиферроиков. Это объясняется возникновением новых технологических задач, например, создание сегнетоэлектрических структур (в том числе и тонкопленочных) для оптики, микро- и радиоэлектроники, что требует детального понимания процессов возникновения поляризованного состояния и динамики кристаллической решетки сегнетокерамики. С другой стороны, в последние годы, в химии и физике конденсированного состояния все большее внимание привлекает поиск и исследование тороиков — материалов, обладающих тороидным упорядочением, и магнитоэлектриков. Практический интерес к подобным материалам обуславливается привлекательной возможностью создания на единой материальной платформе устройств, преобразующих информацию в форме намагниченности в электрическое напряжение и обратно, что позволит решить ряд актуальных задач спинтроники, стремящейся соединить достоинства энергонезависимой магнитной памяти и быстродействующих электрических систем обработки информации. При этом подобные материалы представляют значительный интерес в качестве материальной базы для организации квантовых вычислений.

Несмотря на несомненную полезность применения лазерного излучения, не секрет, что мощные лазеры представляют существенную опасность для органов зрения и светочувствительной электронно-оптической аппаратуры. Эти обстоятельства служат причиной значительного роста интереса к созданию эффективных и надежных ограничителей интенсивности (лимитеров) опасного лазерного излучения. В главе 4 анализируется возможность использования углеродных нанотрубок в рабочих средах приборов защиты человеческого зрения, оптических элементов и сенсоров от опасного действия лазерного излучения. Предметом исследования являются нелинейные оптические свойства дисперсных и композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок, которые определяют возможности их введения в состав рабочих сред лимитеров. Описаны наиболее перспективные методы создания таких нелинейных материалов, а также результаты исследований их состава, структуры и оптических свойств.

В последнее время значительно вырос интерес к полярным материалам, обладающим малой плотностью, хорошей эластичностью, значительной пьезоэлектрической и пироэлектрической активностью. К числу подобных объектов, рассматриваемых в главе 5, относятся композитные составы на основе полимеров и сегнетоэлектрической керамики. Создание таких систем диктуется необходимостью преодолеть ограни-

чения по ряду механических и электрофизических параметров как сегнетоэлектрической керамики, так и полимеров. Композиты, содержащие включения в виде зерен сегнетоэлектрической керамики в полимерной матрице, являются перспективными материалами в виду их механической эластичности, низкого акустического сопротивления, малой диэлектрической проницаемости и больших пьезо- и пироэлектрических коэффициентов. К тому же их свойства можно варьировать, используя различные полимеры и сегнетоэлектрическую керамику разного состава и дисперсности, что дает композитам дополнительные преимущества для их использования в качестве функциональных элементов пироэлектрических и пьезоэлектрических сенсоров, ультразвуковых преобразователей и т.п.

Широкозонные полупроводники и гетероструктуры на их основе за последние десятилетия стали важнейшими элементами твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники. Именно их использование в СВЧ полевых и гетеробиполярных транзисторах позволило получить параметры приборов, сопоставимые по шумовым и усилительным свойствам с лучшими вакуумными приборами, превосходя последние по массовым и надежностным показателям. Прежде чем получить транзисторы с выдающимися частотными и мощностными характеристиками на основе гетероструктур нитридов элементов III группы, исследователями были созданы, изучены и коммерциализированы целый ряд семейств транзисторных гетероструктур. Вопросам физики и технологии создания таких структур посвящена глава 6.

Известно, что, мгновенная скорость травления трехмерных структур, таких как, щелевой изоляции или контактных (переходных) окон с помощью низкотемпературной газовой плазмы зависит от многих их конструктивных параметров, в том числе и от аспектного отношения. Это приводит к снижению селективности травления функционального слоя и, как результат, накладывает определенные ограничения на схемотехнические принципы создания СБИС. Возможные способы решения подобных проблем изложены в главе 7. Основой исследований главы является разработка методов аспектнонезависимого травления для создания трехмерных структур в микро- и нанoeлектромеханических системах.

Развитие нанoeлектроники немыслимо без разработки методов исследования и диагностики свойств поверхности твердых тел с нанометровым разрешением. К эффективным относятся методы исследования на основе сканирующей зондовой микроскопии. Наиболее широкое применение среди них получил метод атомно-силовой микроскопии, позволяющий исследовать наноразмерную морфологию поверхности твердых образцов. Одним из перспективных методов является магнитно-силовая

микроскопия, позволяющая обеспечивать исследование и модификацию магнитных свойств поверхности с высоким разрешением. Исследовательский интерес представляет электропроводящая микроскопия, использующая режим атомно-силового микроскопа в контактной моде, что обеспечивает одновременное исследование топографии и картины растекания электрического тока на том же участке поверхности. Важное практическое значение имеет метод, использующий режим полуконтактной моды, позволяющий обеспечить локальную модификацию электрофизических свойств поверхности посредством ее локального зондового окисления. Значительное внимание в последнее время проявляется к силовой микроскопии пьезоотклика, позволяющей исследовать пьезоэлектрические свойства твердых материалов. Однако, существующие в настоящее время методики проведения измерений уже не в полной мере удовлетворяют требования исследователей. В главе 8 приведен ряд методик измерений в сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивающих совершенствование функциональных и точностных характеристик перечисленных выше методов зондовой микроскопии.

Метод фокусированного ионного пучка впервые начал активно использоваться в конце 80-х годов прошлого столетия в полупроводниковой промышленности для восстановления шаблонов, анализа и модификации интегральных микросхем. Хотя эта сфера применения и остается наиболее важной для этого метода, он получил широко распространение во многих других областях науки и техники, начиная от исследования, препарирования и модификации различных неорганических материалов, микро и наноструктур и заканчивая различными приложениями, связанными с изучением биоматериалов. Исследованиям в области разработок использования методов фокусированного ионного пучка посвящена глава 9.

Существует значительная неудовлетворенная потребность в принципиально новом подходе к анализу последовательностей сложных биополимеров, таких, как ДНК и РНК. Исследования главы 10 направлены на разработку технологии секвенирования нативной конфигурации ДНК/РНК без добавления дополнительных нуклеотидов, меток, амплификации, или другого любого метода, который вводит количественные ошибки или артефакты. Следует отметить, что зондовая микроскопия используется в биологии сравнительно давно и накоплен значительный методический опыт. При этом задачей главы является распространение зондовой микроскопии для более массового и недорогого исследования биополимерных молекул в атмосфере воздуха.

Современное состояние микроэлектроники характеризуется существенным уменьшением топологических размеров компонентов, повышением степени интеграции СБИС, функциональным усложнением вычисли-

тельных и управляющих систем, размещаемых на кристалле. Указанные тенденции ставят перед разработчиками СБИС много новых проблем, требующих своего решения. Целью главы 11 является анализ, обобщение и выработка предложений по ряду подходов в проектировании современных СБИС.

Увеличение скорости передаваемой информации ВЧ и СВЧ диапазона повышает требования, как к полупроводниковой элементной базе, так и к проводным линиям передачи, в качестве которых используются кабель, микрополосок, копланар или витая пара. Такая линия передачи представляет собой сложную распределенную структуру с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом. Прохождение сигнала через линию передачи с потерями характеризуется ослаблением высокочастотной составляющей сигнала. Ситуация усложняется, если в тракте сигнала находятся пассивные размножители. В главе 12 исследованы принципы эквализации, т.е. компенсации потерь, сигнала, и предложена оптимальная с точки зрения соотношения цена/качество интегральная схемы.

Сегодня батареи обеспечивают электрической энергией наши мобильные устройства в течении дня, т.е. они имеют достаточную удельную емкость, однако на их зарядку требуется несколько часов. Для обеспечения высокой удельной мощностью используют другой тип накопителей энергии – суперконденсаторы. Принцип работы батарей и суперконденсаторов основан на электрохимических процессах. Исследованиям материалов и процессов в гибридных накопителях энергии, сочетающих преимущества суперконденсаторов и наноструктурированных материалов, посвящена глава 13. При этом такие гибридные суперконденсаторы позволяют достигать более высоких плотностей емкости и мощности, при этом сохраняя стабильность при циклировании.

Бурное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации и интеллектуализации процессов управления в промышленности, транспорте, энергосберегающих системах жилищно-коммунального сектора, а также мобильных потребительских приложениях. При этом необходимым условием интеллектуализации управляющих систем является получение информации о регулируемом параметре или процессе. Устройствами, обеспечивающими функции зрения, слуха, вкуса, обоняния и осязания интеллектуальных систем управления, и позволяющими преобразовать внешние физические воздействия на понятный для машин язык электрических сигналов, являются датчики и сенсоры. Принцип действия датчиков основывается на большом спектре физических эффектов, позволяющих манипулировать параметрами материала внешними воздействиями. По мере развития нанотехнологий все большую актуальность в разработке современных сенсоров приобретают эффекты, связанные с

магнитными свойствами материалов. Одним из эффектов (рассмотренных в главе 14), который обеспечивает перспективное использование магнитных материалов, является изменение электросопротивления в магнитном поле — магниторезистивный эффект.

Газовые сенсоры находят применение в химической и нефтехимической промышленности, в полупроводниковом производстве, машиностроении — практически везде, где требуется контроль и анализ газового состава. При этом подбор материала или композиции из нескольких материалов играет одну из ключевых ролей при разработке новой системы детекции. Стоит отметить, что не существует идеального универсального материала, удовлетворяющего всевозможным требованиям, из-за чего для каждой конкретной задачи и сценария использования газового датчика следует подбирать материал, опираясь на специфику использования разрабатываемого устройства. Проблемам определения состава газовых смесей, которые выбрасываются промышленными предприятиями и оказывают существенное влияние на экологическую обстановку, с помощью наноструктур посвящена глава 15.

Нанотехнологии являются фактором, непосредственно определяющим качественные стороны электронных, механических, а также опто-электромеханических элементов функциональных систем. Технологии изготовления подобных микро и наносистем очень разнообразны и находятся в стадии интенсивного развития. Наиболее значительные результаты по изготовлению МЭМС, НЭМС и МОЭМС (микро-, наноэлектромеханические системы и микрооптоэлектромеханические системы) достигнуты благодаря различным нано и микроэлектронным технологиям, технологиям интегральной оптики, а также успешно развиваемым технологиям капсулирования, трехмерной сборки, высокоплотной интеграции с использованием различных новых материалов и новых технологических процессов. Глава 16 посвящена разработкам приборов и устройств на основе инерциальных микроэлектромеханических систем.

Рынок внешней и встроенной энергонезависимой памяти составляет существенную часть от мирового рынка микроэлектроники. С научно-технической точки зрения этот сегмент отличает использование широкой номенклатуры нетрадиционных материалов для микроэлектроники в целом: халькогенидов, сегнето- и ферроэлектриков, оксидов переходных металлов. Функционирование энергонезависимой памяти все более связывают с использованием новых для микроэлектроники физических эффектов спинтроники, гигантского магнитосопротивления, низкотемпературных фазовых превращений, акустики. Анализ перспективных направлений развития этого направления, мировые тенденции и возможные способы реализации энергонезависимой памяти являются предметом обсуждения главы 17.

В заключение, хотелось бы отметить, что достижения в микро- и нанoeлектронике, как показывает сравнительно короткая, пятидесятилетняя история микроэлектроники, вызывают настоящую революцию в смежных отраслях науки и техники, что приводит к возникновению новых направлений исследований. Все это дает перспективу развития современных, интересных и, самое главное, практически реализуемых и востребованных направлений в микро- и нанoeлектронике.

Коллектив авторов считает, что данная монография будет полезна не только специалистам в различных областях микроэлектроники, но и, прежде всего, молодым исследователям — аспирантам и студентам-магистрантам.

Теория, Моделирование, Эксперимент

ГЛАВА I

МОДЕЛИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

*Чаплыгин Ю.А., Артамонова Е.А., Балашов А.Г.,
Ключников А.С., Красюков А.С., Крупкина Т.Ю.*

С переходом в область наноразмерных топологических норм растет важность точного приборно-технологического моделирования в связи с увеличением количества технологических факторов, которые необходимо принимать во внимание не только для решения традиционных задач расчета электрических характеристик элементов ИС, но и для схемотехнического моделирования. Возможности программной среды приборно-технологического моделирования TCAD расширяются за счет внедрения новых моделей как для новых технологических процессов [1–3], так и для новых физических эффектов [4–8]. Развиваются методологии применения TCAD для решения задач проектирования в смежных областях [9–13], а также для преодоления барьеров, связанных со значительными вычислительными затратами при численном моделировании трехмерных, непланарных и многотранзисторных элементов ИС [14–16].

I.1. Направления развития приборно–технологического моделирования

Традиционно TCAD используется в сфере развития технологий, а программные продукты для схемотехнического моделирования применяются специалистами в области проектирования интегральных схем, и систем на кристалле. Однако можно открыть новые возможности и преимущества при реализации маршрутов проектирования ИС, используя более активно связь двух типов программных сред, приборно-технологической и схемотехнической. Главной областью их взаимодействия является моделирование транзисторов. Основными направлениями развития и улучшения могут быть [17]:

- использование расчетов в TCAD для частичного замещения экспериментальных результатов, необходимых для экстракции параметров схемотехнических моделей транзисторов; такое сочетание позволит оценить влияние разброса процессных параметров на характеристики схемы, усовершенствовать модели транзисторов;
- замещение схемотехнических моделей транзисторов численными приборными моделями, сгенерированными в среде TCAD, что позволяет учитывать физические эффекты, которые сложно ввести в схемотехническую модель транзистора, например трехмерные эффекты, явления пробоя, защелкивания, электростатического разряда и другие.

К преимуществам данных подходов можно отнести следующее. Комбинация расчетных и экспериментальных характеристик транзисторов для экстракции схемотехнических параметров позволяет провести экстракцию, когда экспериментальные характеристики сложно получить. Расчетные данные также разумно использовать для характеристики эффектов второго порядка. Использование численных моделей транзисторов приводит к значительному возрастанию вычислительных затрат, таким образом, данный подход имеет преимущества при анализе одного или нескольких критичных приборов в составе относительно простых схем.

Экстракция емкостей также является одним из ключевых моментов в маршруте проектирования интегральных схем и систем на кристалле. Распространенные методы включают две основные группы экстрагируемых емкостей, рассчитываемых по отдельности. Во-первых, емкости, связанные с разводкой (back-end-of-line, BEOL), получают на основе расчета полей в физической структуре, состоящей из металлических линий разводки, разделенных диэлектрическими слоями. Во-вторых, используются компактные схемотехнические модели, учитывающие емкости, связанные со структурой собственно транзистора (front-end-of-line, FEOL). Однако суммарный эффект в действительности может быть значительно выше, так как остается неучтенным взаимовлияние многослойной разводки и областей транзистора с неоднородным распределением примеси и подвижными носителями заряда. Результирующая ошибка растет при переходе к наноразмерным топологическим нормам, особенно для плотноупакованных регулярных структур в матрицах элементов СОЗУ и ДОЗУ.

Методология, построенная на использовании средств TCAD [18], показала возможность значительного повышения точности при экстракции емкостей за счет генерации в среде TCAD и анализа емкостей в структурах, включающих как BEOL, так и FEOL физические слои. Для

блоков СОЗУ на основе КНИ-технологии с топологическими нормами ниже 32 нм получено улучшение точности при экстракции емкости шины данных на 11%, а при экстракции емкости словарной шины — на 38%.

Экстракция и моделирование вольт-фарадных характеристик представляют собой также один из подходов к решению задачи инверсного моделирования и калибровки параметров моделей в среде TCAD.

На современном этапе развития и применения средств TCAD для решения производственных задач, связанных с запуском новых изделий, первоочередной проблемой является преодоление непомерно высоких вычислительных затрат при трехмерном анализе топологических вариантов многозатворных транзисторов, элементов СОЗУ, кольцевых генераторов и других схем, включающих несколько транзисторных структур. Такие задачи, как правило, включают несколько этапов, имеющих следующие диапазоны временных затрат [15]:

- 3D-моделирование технологических процессов для различных вариантов топологии занимает от нескольких дней до нескольких недель;
- трехмерное моделирование приборных характеристик на основе простых физических моделей с учетом вариации параметров технологических процессов или топологии потребует порядка месяцев;
- для таких же расчетов с использованием наиболее точных моделей переноса или при анализе переходных процессов может потребоваться несколько месяцев/лет в зависимости от сложности моделируемого фрагмента.

Данные временные рамки неприемлемы для практического использования в промышленности или научных исследованиях.

Альтернативой может служить подход, основанный на генерации многотранзисторных структур путем автоматизированного синтеза [15]. При этом возможно повторное использование отдельных блоков моделируемой структуры, а также снижение уровня точности в некритичных с точки зрения технологического процесса областях. Методология автоматизированного синтеза включает несколько этапов. Вначале проводится этап технологической, или процессной, характеристики.

Характеризация технологии включает выделение процессных зон, как показано на рис. 1.1, создание базы данных топологических вариантов используемых приборов для 3D- и 2D-структур (зоны PA-GA-типа); генерация правил, определяющих геометрию, профили и сетку в зонах PW-PA, PW-GW.

На следующем этапе выполняется топологическая характеристика, которая включает автоматизированный анализ топологии и экстракцию транзисторов из топологии, а также генерацию базы данных литогра-

фических эффектов, необходимых для точного моделирования в зонах PA-GA-типа.

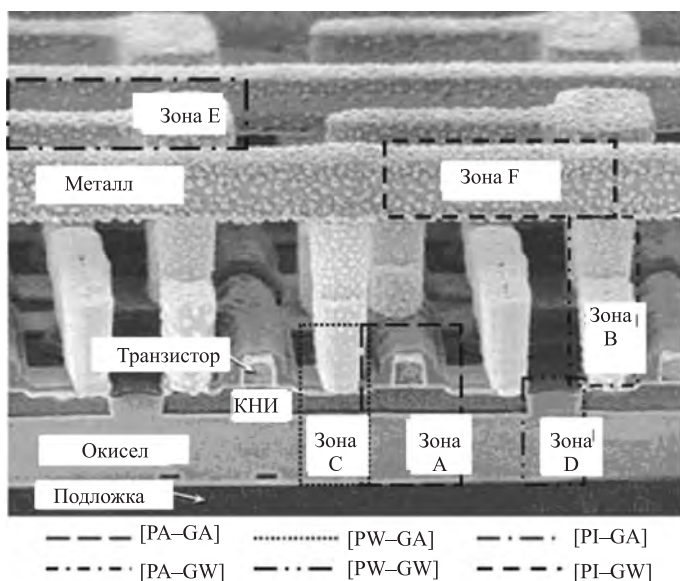


Рис. 1.1. Пример выделения процессных зон шести типов на этапе характеристики технологии; в зависимости от требуемой точности определения распределения примесей и механических напряжений: высокая точность — PA, средняя точность — PW, от технологии не зависит — PI; в зависимости от требуемой точности задания геометрических размеров: высокая точность — GA, средняя точность — GW [15]

Заключительным шагом является собственно синтез структур для моделирования, который проводится в трех вариантах:

- только транзисторные структуры (FEOL);
- только разводка (BEOL);
- объединенная структура (FEOL + BEOL).

Применение разработанного метода позволило повысить эффективность использования программных продуктов TCAD. Например, время экстракции емкостей для 6-транзисторной ячейки COZY с топологическими нормами 32 нм сокращено с 75 до 17,5 часов, необходимый объем памяти — с 64 до 12 Гб.

Моделирование современных ячеек энергонезависимой памяти также является одной из актуальных задач, решаемых с применением средств TCAD. Проблемы при решении данного класса задач связаны с необходимостью моделирования механизмов записи и стирания информа-

ции, определяемых процессами захвата и удаления носителей, в том числе изучение механизмов туннелирования носителей из зоны проводимости кремния в зону проводимости нитрида, характерных для МОНОП-структур с очень тонкими слоями оксида (< 3 нм), а также исследование механизмов утечки заряда во время хранения.

1.2. Особенности моделирования элементов энергонезависимой памяти

Энергонезависимая (флэш-память) память широко используется в современных устройствах. Современные ячейки флэш-памяти, совместимые с технологией создания цифровых интегральных схем формируются на основе МДП-транзисторов с плавающим затвором либо транзисторов с составным подзатворным диэлектриком (МОНОП-структуры), как показано на рис. 1.2.

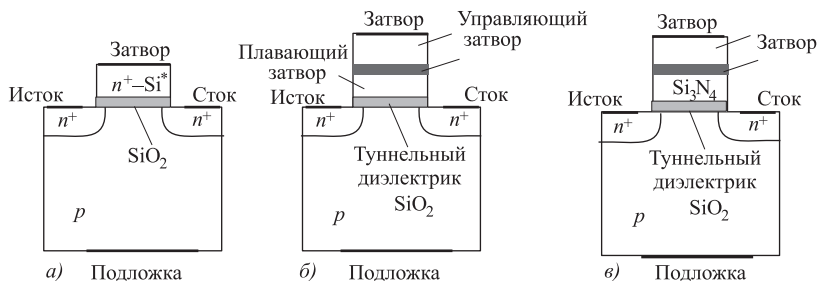


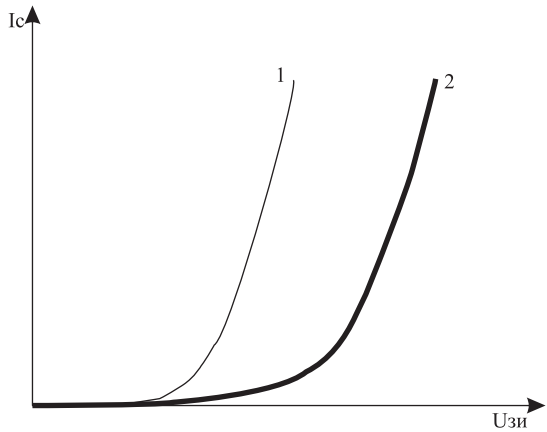
Рис. 1.2. Упрощенные структуры ячеек флэш-памяти, построенные на основе МДП-транзистора: а) n -канальный МДП-транзистор; б) ячейка флэш-памяти на основе n -МДП-транзистора с плавающим затвором; в) ячейка флэш-памяти на основе n -МДП-транзистора с составным подзатворным диэлектриком

Как известно, принцип работы ячейки энергонезависимой памяти заключается в изменении порогового напряжения МДП-транзистора за счет захвата или удаления заряда на плавающий затвор или в промежуточный диэлектрик (Si_3N_4), как показано на рис. 1.3.

В ряде работ [19–20] было установлено, что стирание носителей с затвора может оставлять плавающий затвор положительно заряженным (для n -МОПТ), что приводит к возникновению больших утечек ячейки памяти. Для предотвращения этого эффекта ячейка флэш-памяти выполняется в виде последовательного соединения двух транзисторов — транзистора с плавающим затвором и транзистора выборки, размыкающего цепь после записи/стирания. На рис. 1.4 показаны различные

конструкции двухтранзисторной ячейки флэш-памяти [20–23].

Рис. 1.3. Сдвиг проходных ВАХ ячейки памяти при записи и удалении заряда с плавающего затвора; 1 — удаление отрицательного заряда; 2 — запись отрицательного заряда в плавающий затвор



Для моделирования работы ячейки памяти важно описать механизмы захвата и удаления носителей заряда в плавающий затвор. Как правило, при работе флэш-памяти рассматривают два основных механизма записи и стирания — туннелирование Фаулера–Нордгема (Fowler-Nordheim, FN) носителей из канала транзистора в плавающий затвор через туннельный диэлектрик и захват горячих носителей (Source-Side-Injection SSI, Channel hot injection CHI). В табл. 1.1 приведены механизмы записи/стирания для конструкций ячеек флэш-памяти, показанных на рис. 1.4.

Таблица 1.1. Механизмы записи/стирания различных конструкций ячеек флэш-памяти

Структура	Механизм записи	Механизм стирания
SuperFlash	SSI	FN-туннелирование между поликремниевыми затворами poly-poly
2TrCell	FN	FN туннелирование из плавающего поликремниевого затвора в подложку
1,5 TrC	SSI	FN
МОНОП (SONOS)	CHE	FN

В модели Фаулера–Нордгема ток затвора МДП-транзистора зависит от величины напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике согласно [24] выражением (1.1):

$$j = A \cdot E^2 \cdot \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (1.1)$$

где A и B — параметры модели.

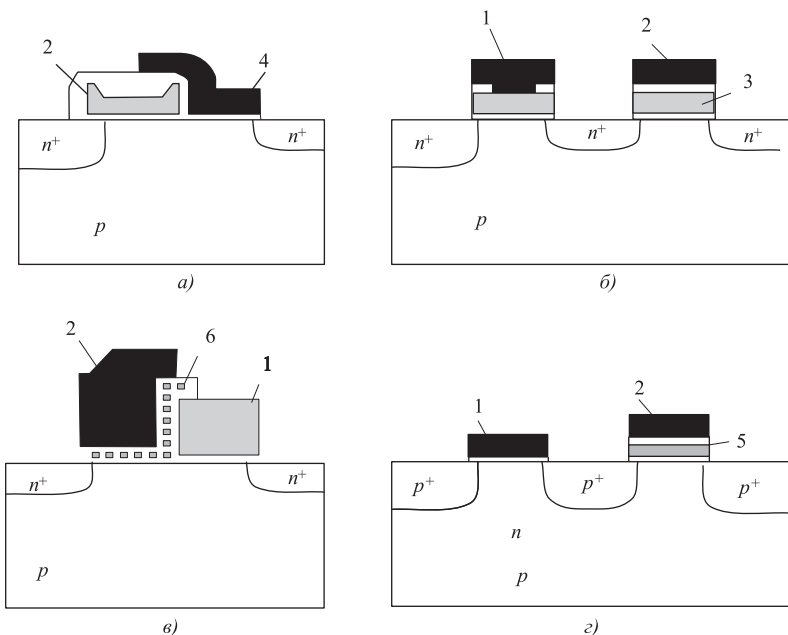


Рис. 1.4. Конструкции ячеек флэш-памяти: а) 1,5 TrCell SuperFlash [21]; б) 2TrCell [22]; в) 1,5 TrC [22]; г) 2 Tr SONOS PMOS [23] (1 — затвор транзистора выборки, 2 — управляющий затвор, 3 — плавающий затвор, 4 — шина данных, 5 — структура оксид-нитрид-оксид, 6 — нанокристаллы)

Для описания инжекции горячих носителей в подзатворный диэлектрик МДП-транзистора наиболее распространенными являются модели Lucky electron injection и Fiegna. Ток затвора первой модели описывается согласно [25] выражением (1.2):

$$I_g = \iint J_n \cdot P_s P_{\text{ins}} \left(\int_{E_b}^{\infty} P_\varepsilon P_i d\varepsilon \right) dx dy, \quad (1.2)$$

где P_s — вероятность того, что электрон пройдет расстояние y без потери энергии; $P_\varepsilon d\varepsilon$ — вероятность того, что энергия электрона находится между ε и $\varepsilon + d\varepsilon$; P_{ins} — вероятность рассеяния; P_i — вероятность отражения электрона.

Вероятности в выражении (1.2) описываются следующими формулами:

$$P_i(\varepsilon) = \frac{1}{2\lambda_r} \left(1 - \sqrt{\frac{Eb}{\varepsilon}} \right), \quad (1.3)$$