
ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время микроэлектроника является одной из самых стремительно развивающихся областей техники. Микроэлектронные, а теперь и наноразмерные элементы широко применяются в различных устройствах как бытового и промышленного назначения, так и в военной и космической технике. Кроме того, следует отметить, что такое быстрое развитие микроэлектроники обусловлено в первую очередь совершенствованием технологии изготовления интегральных микросхем. Уменьшение размеров элементов интегральных микросхем позволяет решать задачи повышения их производительности при одновременном уменьшении массогабаритных характеристик, что важно не только для космической, но и для бытовой и другой техники.

Элементы микроэлектронных устройств в основном разработаны, и повышение степени интеграции микросхем идет путем масштабирования — пропорционального уменьшения размеров. Такой путь позволяет в короткий отрезок времени проектировать и изготавливать сложные интегральные микросхемы.

В промышленных условиях для проектирования интегральных микросхем используются разработанные программы (например, IC CAD). В данном учебном пособии излагаются физические основы проектирования современных интегральных микросхем. Кроме того, изложена основная система проектирования — А-система, которая в настоящее время используется для масштабирования.

В настоящее время наблюдается дефицит учебной литературы по проектированию интегральных микросхем (ИМС). Особенno это касается микросхем на изолирующей подложке — кремний на сапфире, кремний на изоляторе и гибридных микросхем. Кроме того, в учебной литературе не рассматриваются вопросы повышения надежности микросхем. При проектировании микросхем специального назначения необходимо применять рекомендации по повышению радиационной стойкости, о которых в известной учебной литературе не упоминается. В данном учебном пособии эти вопросы подробно рассмотрены.

Основное внимание в учебном пособии уделено физическим явлениям, которые необходимо знать при проектировании интегральных микросхем. Рассмотрены конструктивные методы повышения надежности ИМС. Кроме того, в связи с необходимостью применения ИМС в условиях радиационного воздействия (в военной и космической технике) приведены конструктивные методы повышения стойкости ИМС к ионизирующему излучению.

Данное учебное пособие написано по материалам курса лекций «Проектирование интегральных микросхем» для студентов факультета автоматики и электроники Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», специализирующегося в области микро- и наноэлектроники.

Учебное пособие состоит из шести глав. В главе 1 приведены общие принципы проектирования твердотельных ИМС. Рассмотрены рабочие слои микросхем и их основные характеристики. Подробно описана А-система проектирования, которая используется для масштабирования ИМС. Рассмотрены конструкции контактов. Представлены параметры межсоединений и их характеристики с учетом процесса повышения степени интеграции ИМС.

Глава 2 посвящена проектированию МОП ИМС. Рассмотрены конструкции МОП-транзисторов, в том числе с применением КНИ- и КНС-технологий. Наибольшее внимание уделено проектированию КМОП ИМС и ПМОП ИМС. Рассмотрено масштабирование МОП ИМС с учетом развития технологий.

В главе 3 рассматриваются особенности проектирования биполярных ИМС. Даётся методика расчета как вертикального, так и горизонтального транзисторов. Рассмотрено ограничение масштабирования биполярных ИМС, и представлены новые конструкции транзисторов. В этой же главе изложен материал по проектированию резисторов, конденсаторов и диодов.

Глава 4 посвящена проектированию гибридных ИМС (ГИМС). Рассмотрены материалы подложек, вопросы проектирования резисторов и конденсаторов, а также пленочных индуктивностей. Даётся методика оценочного расчета тепловых режимов ГИМС. Уделено внимание разработке топологии ГИМС. Рассмотрены разновидности ГИМС.

В главе 5 рассматриваются вопросы надежности ИМС. Применяется компонентный подход к анализу надежности. Даются рекомендации по повышению надежности конструктивными методами. Представлено описание различных схем защитных цепочек.

В главе 6 рассматриваются конструктивные методы повышения радиационной стойкости ИМС. Представлен анализ радиационных эффектов. Рассмотрены вопросы повышения радиационной стойкости как к импульльному излучению, так и к длительному воздействию ионизирующего излучения. Рассмотрены эффекты при воздействии отдельных частиц с высокой энергией и конструктивные методы борьбы с ними. Также внимание уделено особенностям проектирования МОП ИМС с КНИ-структурой.

В заключении отмечается проблема рассеиваемой мощности в ИМС. В данном учебном пособии предисловие, введение, заключение и главы 1, 2, 3, 5 и 6 написаны В. Д. Поповым, а глава 4 — Г. Ф. Беловой.

Авторы выражают глубокую признательность д. т. н., профессору О. Р. Мочалкиной за высказанные замечания и пожелания и благодарность М. А. Борсук за помощь в оформлении графического материала.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЛУ — аналоговое логическое устройство
БИС — ИМС большой степени интеграции
БТ — биполярный транзистор
ВБТ — вертикальный биполярный транзистор
ВО — верхняя обкладка
ГБТ — горизонтальный биполярный транзистор
ГИМС — гибридная интегральная микросхема
ДПХ — динамическая передаточная характеристика
И — исток
ИМС (ИС) — интегральная микросхема
КНИ — технология изготовления МОПТ «кремний на изоляторе»
КНС — технология изготовления МОПТ «кремний на сапфире»
МОП — структура металл — окисел — полупроводник
МОПТ — МОП-транзистор
МЭТ — многоэмиттерный транзистор
НО — нижняя обкладка
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОПЗ — область пространственного заряда
ПС — поверхностные состояния
С — сток
СБИС — сверхбольшая интегральная схема
СПХ — статическая передаточная характеристика
УБИС — ультрабольшая интегральная схема
body — «тело» полупроводника
it (interface traps) — ловушки на границе раздела Si — SiO₂
LD — область слабо легированного полупроводника
ot (oxide traps) — плотность заряда ловушечных центров в объеме SiO₂
STI — вертикальная изолирующая оксидная область

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микроэлектроника является бурно развивающейся отраслью науки, технологии и техники. Процесс повышения степени интеграции превысил уровень нескольких сотен миллионов транзисторов на кристалле микросхемы, а размеры их приближаются к размерам молекул органических и биологических веществ. Как можно видеть на рисунке В.1, размеры молекулы ДНК (рис. В.1а) соизмеримы с размером МОП-транзистора (рис. В.1б) [1].

Один из основателей широко известной фирмы Intel Гордон Мур проанализировал процесс повышения степени

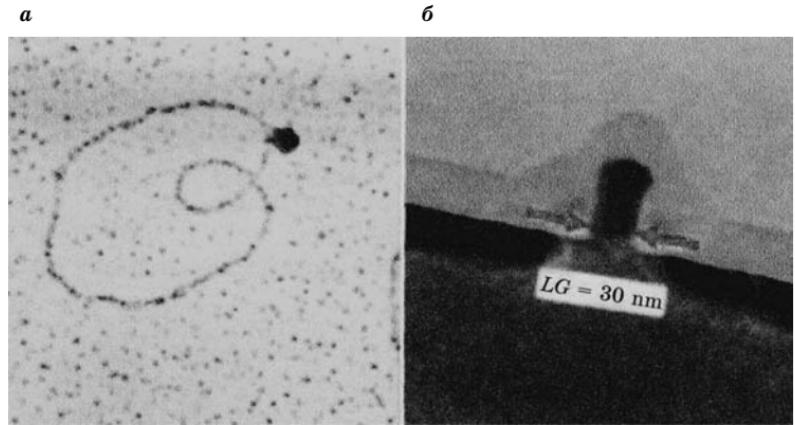


Рис. В.1
Сравнение размеров молекулы ДНК (а) и МОП-транзистора (б):

а — молекула ДНК декорирована частицами золота размером 10 нм; б — полевой транзистор фирмы Intel с длиной затвора 30 нм.

Количество транзисторов

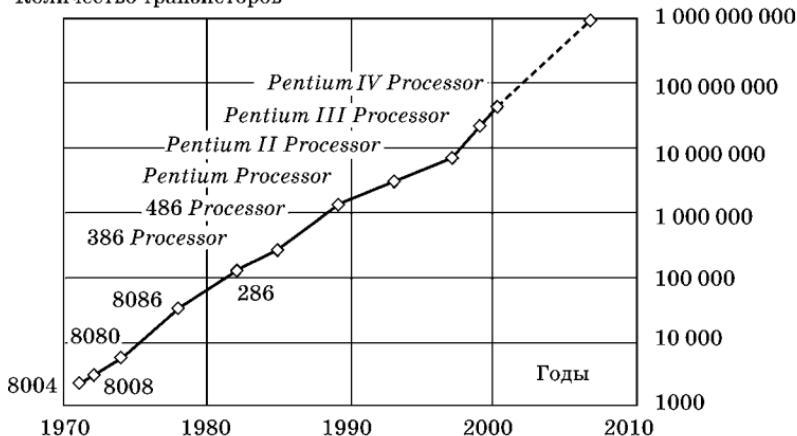


Рис. В.2

Увеличение количества МОП-транзисторов в цифровых ИМС

интеграции интегральных микросхем (ИМС) и сделал вывод, что количество транзисторов удваивается каждые два года [2]. При этом возрастает быстродействие ИМС. Это открытие получило название «закон Мура». Как можно видеть на рисунке В.2, в настоящее время количество транзисторов в ИМС достигло одного миллиарда. Такой быстрый рост степени интеграции объясняется не только совершенствованием технологического процесса производства ИМС, но и применением *масштабирования (скейлинга)* — пропорционального уменьшения размеров элементов. Масштабирование позволяет перенести имеющиеся схемные разработки на новый технологический уровень. При этом улучшается такой важный параметр, как быстродействие.

В настоящее время действует следующая классификация интегральных микросхем (ИМС) по количеству транзисторов в них, представленная в таблице В.1.

Надо отметить, что стремление получить ИМС высокой степени интеграции несколько «затмило» важность производства ИМС меньшей степени интеграции. Однако именно они составляют большое количество специализированных микросхем, необходимых для специальных применений (например, в бытовой технике, в устройствах военной и космической техники и т. п.). Как можно видеть на рисунке В.3,

Таблица В.1

Классификация ИМС по количеству транзисторов

Группа ИМС	Степень интеграции	Количество транзисторов
1	Малая степень интеграции (МИС)	До 100
2	Средняя степень интеграции (СИС)	До 1000
3	Большая степень интеграции (БИС)	До 10 000
4	Сверхбольшая степень интеграции (СБИС)	До 1 000 000
5	Ультрабольшая степень интеграции (УБИС)	До 1 000 000 000
6	Гигабольшая степень интеграции (ГБИС)	Более 1 000 000 000

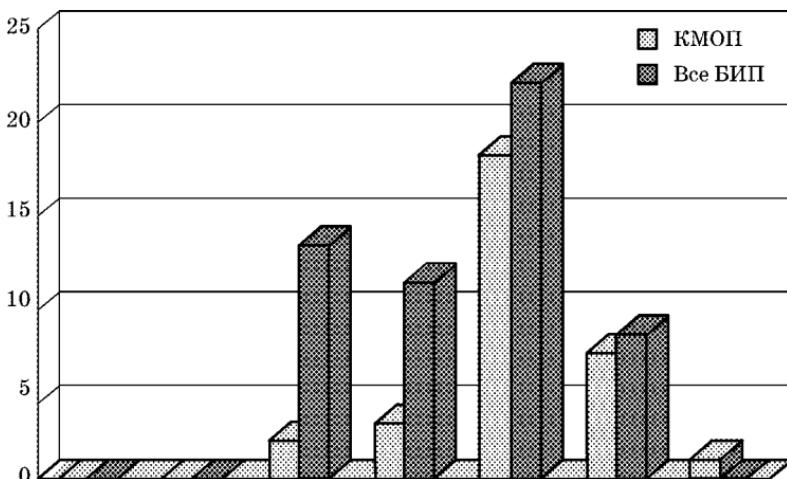


Рис. В.3
Распределение производимых ИМС по нормам технологии

	1,5 МКМ	1,0 МКМ	0,5–0,8 МКМ	0,35 МКМ	0,25 МКМ	0,18 МКМ	0,13 МКМ
1998 г. [3]							
2004 г. [4]	1,0 МКМ	0,8 МКМ	0,35 МКМ	0,25 МКМ	0,18 МКМ	0,13 МКМ	0,09 МКМ
2012 г. прогноз	0,8 МКМ	0,35 МКМ	0,25 МКМ	0,18 МКМ	0,13 МКМ	0,09 МКМ	0,035 МКМ

заимствованном из [3], «пик» производства ИМС приходится на более низкий уровень интеграции. Динамика этого процесса видна из таблицы к рисунку В.3. Производство микросхем сверхвысокой степени интеграции составляет доли от общего количества производимых ИМС. Таким образом, проектирование ИМС представляет интерес на всех уровнях интеграции.

Различают следующие виды интегральных микросхем (ИМС):

- **твердотельные ИМС** — микросхемы, изготовленные в объеме и на поверхности полупроводника;
- **гибридные ИМС** — микросхемы, изготовленные на изолирующей подложке, на поверхности которой создаются пленочные резисторы, конденсаторы и металлические дорожки межсоединений, а транзисторы и диоды в бескорпусном варианте приклеиваются к подложке;
- **микросборки** — гибридные ИМС, в которых вместо отдельных транзисторов и диодов используются твердотельные микросхемы в бескорпусном исполнении.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИМС

1.1. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование ИМС базируется на трех «китах» — физике полупроводников и полупроводниковых приборов, технологии и схемотехнике (см. рис. 1.1). На этой схеме: физика дает расчетные выражения, технология — допуски и нормы при проектировании ИМС, а схемотехника — схемы соединения элементов для получения нужного устройства.

Существует следующая классификация объектов проектирования ИМС:

1) *элементы* — транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и т. п.;

2) *логические элементы* — это простейшие элементы цифровой логики (НЕ, ИЛИ–НЕ, И–НЕ и другие), которые либо реализованы в виде ИМС малой степени интеграции, либо являются основой для библиотек следующего уровня интеграции; *усилительные элементы* — отдельные усилительные каскады, компараторы и подобные элементы;

3) *функциональные узлы* — триггеры, счетчики, регистры, операционные усилители и т. п., которые реализованы в виде ИМС средней степени интеграции и являются основой более сложных ИМС;

4) *функциональные блоки* — АЛУ, ОЗУ, ВИП и т. п., которые реализованы в виде отдельной микросхемы ИМС большой степени интеграции (БИС) и являются блоками ИМС более высокой степени интеграции;

5) *IP-блоки (intellectual property)* [5] — это микропроцессоры, микроконтроллеры и т. п., которые реализованы



Рис. 1.1
Составляющие процесса проектирования ИМС

в виде отдельных схем СБИС (сверхбольших интегральных схем) и являются устройствами ИМС более высокой степени интеграции;

6) *SoC (System-on-Chip — система на кристалле, микроЭВМ на кристалле)* [5] — это устройство, реализованное в виде ультрабольшой интегральной схемы (УБИС).

Исходными данными для проектирования являются:

- схема устройства (принципиальная или блок-схема);
 - технологические нормы производственного процесса.
- Порядок проектирования в общем случае следующий:
- проектирование элементов;
 - проектирование функциональных узлов (расположение элементов и разводка межсоединений);
 - проектирование функциональных блоков (расположение функциональных узлов и отдельных логических или усилительных элементов, разводка межсоединений);
 - проектирование IP-блоков (расположение функциональных блоков, а также отдельных функциональных узлов и дополнительных логических или усилительных элементов, разводка межсоединений);
 - проектирование системы на кристалле (расположение IP-блоков и дополнительных функциональных блоков, узлов и логических или усилительных элементов, разводка межсоединений).

Для удобства проектирования на предприятии создаются библиотеки. В общем виде структура библиотек представлена на рисунке 1.2. Для проектирования ИМС малой степени интеграции используется библиотека элементов, для ИМС средней степени интеграции — библиотека 1-го уровня и т. д. Поэтому проектирование начинается с того уровня, который Центр проектирования обеспечивает библиотекой в первую очередь.

Требования к библиотекам:

- полнота набора элементов и блоков;
- иерархическая организованность (для быстрого использования).

На рисунке 1.3 показан пример системы на кристалле [5], где указаны ИР-блоки, которые могут быть использованы в другой УБИС.

Различают два пути проектирования ИМС.

Первый путь — проектирование заказных ИМС. Проектирование осуществляется для данной технологии (кон-

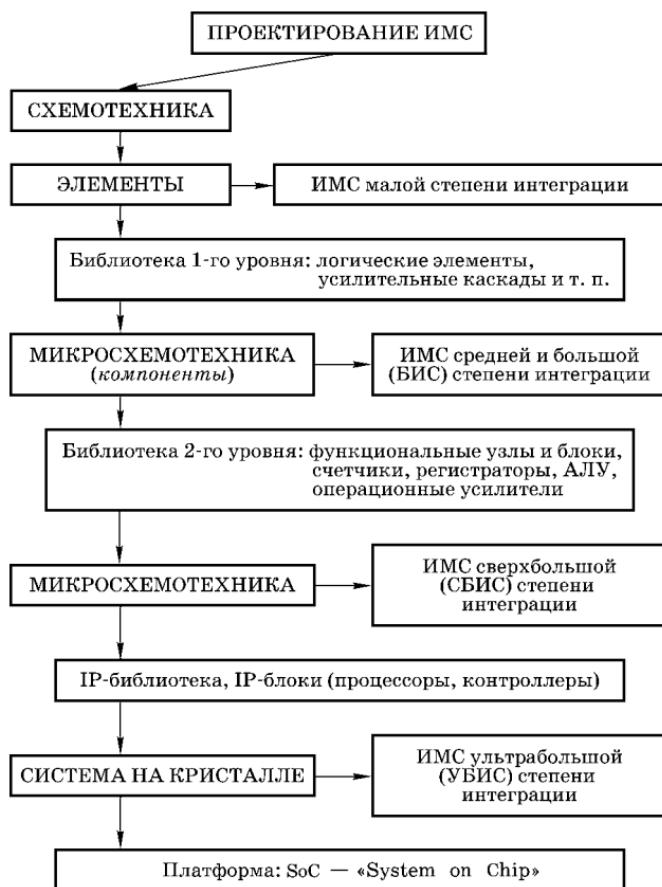


Рис. 1.2

Структура библиотек и уровни проектирования

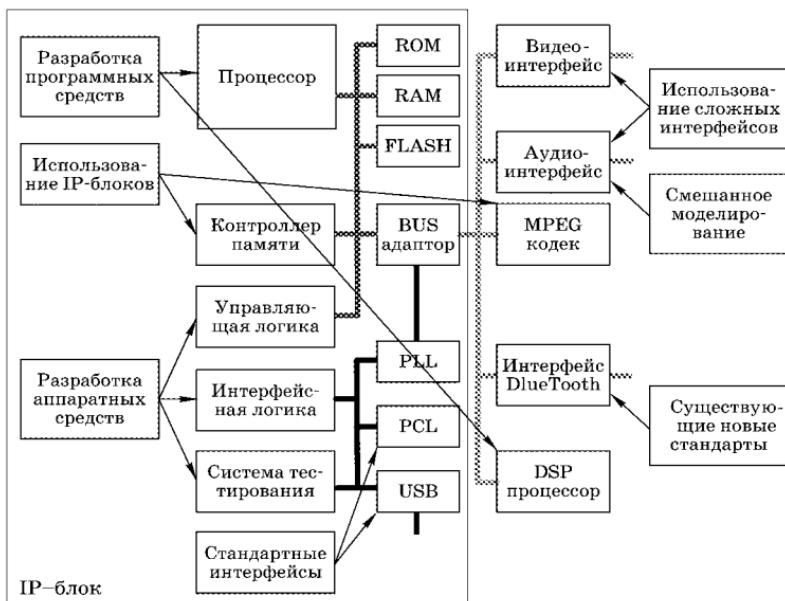


Рис. 1.3
Пример системы на кристалле. Выделен IP-блок

Таблица 1.1

Изменение некоторых параметров при масштабировании

Параметр	Длина канала МОНТ	
	более 0,35 мкм	менее 0,35 мкм
Напряжение питания	$1/\alpha_m$	$1/\alpha_m^{0.8}$
Толщина полевого оксида	$1/\alpha_m$	$1/\alpha_m^{0.1}$
Толщина межслойного диэлектрика	$1/\alpha_m$	$1/\alpha_m^{0.4}$

крайнего предприятия). В этом случае используются минимальные допуски на размеры конкретного технологического цикла производства ИМС, разрабатывается топология микросхемы и максимально используется площадь чипа. Но если технология изменилась, то топологию микросхемы необходимо проектировать вновь.

Второй путь — использование *масштабирования*. При уменьшении размеров сохраняется работоспособность элементов и узлов микросхемы. Поэтому не требуется разраба-

тывать вновь топологию элементов и блоков, а можно использовать библиотеку. Недостатком этого пути является то, что проектирование производится с некоторым «запасом», а значит, не удается максимальное использование площади чипа.

Необходимо отметить, что процесс масштабирования корректируется при развитии технологического процесса. В таблице 1.1 по данным [6] и [7] иллюстрируется эволюция коэффициента масштабирования α_M , который показывает, во сколько раз уменьшаются линейные размеры элементов ИМС.

1.2. РАБОЧИЕ СЛОИ ИМС

1.2.1. ОСНОВНЫЕ СЛОИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИМС

Основой твердотельных ИМС является кристалл полупроводника. Иногда на поверхность кристалла наносится эпитаксиальная пленка полупроводника. Поверхность полупроводника покрывается изолятором — оксидом кремния (SiO_2).

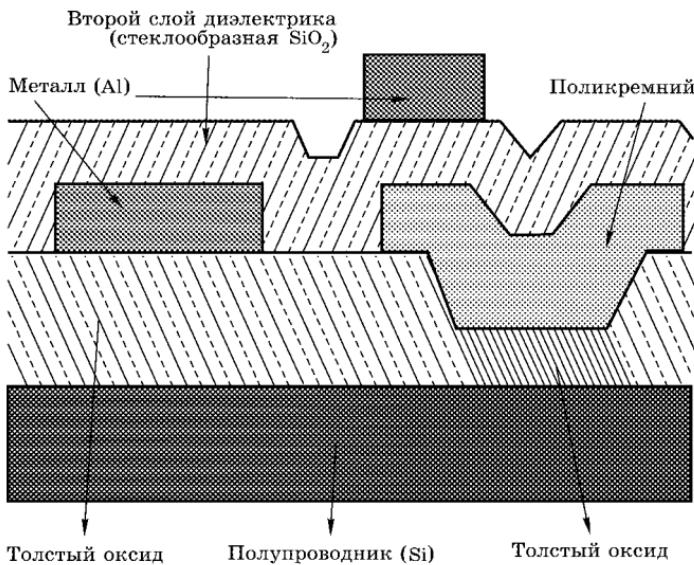


Рис. 1.4
Разрез рабочих слоев на поверхности полупроводника

Пленка оксида кремния выполняет пассивирующую функцию поверхности полупроводника и изолирует от полупроводника поликремниевые и металлические полоски межсоединений. Поверх слоя межсоединений наносят изолирующий слой стеклообразного диэлектрика (иногда легированного бором или фосфором). Следующие слои межсоединений выполняются металлическими пленками, разделенными слоями стеклообразного диэлектрика. Наиболее широко используются алюминиевые пленки, но в последнее время применяются пленки силицидов (например, CoSi_2) и меди. Общий вид расположения слоев ИМС показан на рисунке 1.4.

1.2.2. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ИМС

Кристалл характеризуется упорядоченной атомарной структурой — наличием ближнего и дальнего порядка. Ближний порядок предусматривает наличие валентных связей между атомами и их чередование. Дальний порядок имеет место в случае совпадения фрагмента атомарной структуры одной части кристалла с аналогичным фрагментом другой. В настоящее время в микроэлектронике используются два вида полупроводниковых материалов: кремний и арсенид галлия. Но наибольшее распространение получила *кремниевая* технология, используемая и на изолирующих подложках (*кремний на сапфире* и *кремний на изоляторе*).

Оксид кремния выращивается на поверхности полупроводника путем термического окисления кремния или наносится каким-либо другим способом и обладает хорошими изолирующими свойствами. Этот качественный слой имеет полиморфную структуру, которая характеризуется малой плотностью дефектов. Для нее характерно наличие ближнего и отсутствие дальнего порядка атомов, то есть имеет место чередование атомов Si и O, но валентные связи между ними имеют большой разброс углов.

Поликремний используется для изготовления затворной структуры МОП-транзисторов и для межсоединений, а иногда и в качестве эмиттера биполярных транзисторов. Это поликристаллический материал, в котором кристалли-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru