Предисловие редактора

В России в настоящее время ощущается потребность в специалистах по конструированию, технологии и методам моделирования интегральных микросхем. Микроэлектроника в качестве полупроводникового материала в основном использует кремний. Поэтому практический интерес в первую очередь представляют кремниевые интегральные микросхемы.

Специалистов в области разработки и изготовления интегральных микросхем готовят практически все ведущие технические университеты страны. Однако учебные пособия по разработке, технологии и моделированию интегральных микросхем, соответствующие как современному уровню развития микроэлектроники, так и Государственным стандартам по направлениям подготовки специалистов в настоящее время практически отсутствуют.

Особенностью данного пособия является то, что оно содержит как фундаментальные представления о процессах и маршрутах, написанные на доступном для студентов уровне, так и новейший материал по субмикронной технологии кремниевых СБИС. Важным является и то, что в книгу включен современный материал по математическому моделированию технологических процессов, маршрутов изготовления и конструкций микросхем, а также раздел по особенностям моделирования субмикронных приборов и процессов их изготовления.

Методология изложения материала и его содержание имеют серьезную апробацию — авторами в течение многих лет читаются соответствующие курсы лекций на факультете Электроники и компьютерных технологий (ранее — физико-

техническом) Московского института электронной техники студентам четвертого и пятого курсов, которым преподаются учебные дисциплины «Технологические процессы изготовления ИС», «Маршруты СБИС», «Основы субмикронной технологии СБИС», «Моделирование технологических процессов ИС», «Моделирование элементов и маршрутов СБИС». Учебные планы и содержание учебных дисциплин формировались при активном взаимодействии с базовыми кафедрами МИЭТ на ведущих предприятиях электронной промышленности.

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой описаны основные технологические процессы изготовления кремниевых интегральных микросхем (раздел 1) и математические методы их моделирования (раздел 2). Вторая часть пособия посвящена современным маршрутам изготовления кремниевых СБИС и методам их математического моделирования. Особое внимание уделено основам субмикронной технологии СБИС.

Член-корр. РАН, профессор Ю. А. Чаплыгин

Введение

Эпоха полупроводниковой электроники началась в 1948 г., когда были созданы первые биполярные транзисторы на основе германия. Это были точечные транзисторы, поскольку для создания в них переходов металл–полупроводник необходимо было привести в контакт с кристаллом полупроводника (базой) две остро заточенные проволочки (эмиттер и коллектор) (рис. В.1, *а*). Очевидными недостатками такого технологического метода являлись нестабильность точечных контактов, низкая механическая прочность прибора, индивидуальность сборки; поэтому точечные транзисторы не нашли широкого применения.

В 1949–1950 гг. были созданы первые германиевые и кремниевые сплавные приборы (рис. В.1, *б*). В сплавном приборе с одной или с двух сторон пластинки полупроводника вплавлены электроды, под которыми находятся слои рекристаллизованного кремния, легированного материалом самого электрода или примесью. Для кремния *p*-типа в качестве электродного материала обычно использовался алюминий, для кремния *n*-типа — олово, легированное фосфором. Достоинства сплавной технологии — сравнительная простота процесса и относительно несложное технологическое оборудование. При хорошо отработанной технологии возможна автоматизация изготовления сплавных приборов, стоимость приборов при этом снижается. Сплавная технология, однако, обладала рядом принципиальных недостатков. Одним из них является трудность управления процессом вплавления, который проходит с образованием жидкой фазы. Плохо контролируемый характер смачивания кремния материалом электрода при вплавлении, высокая скорость растворения

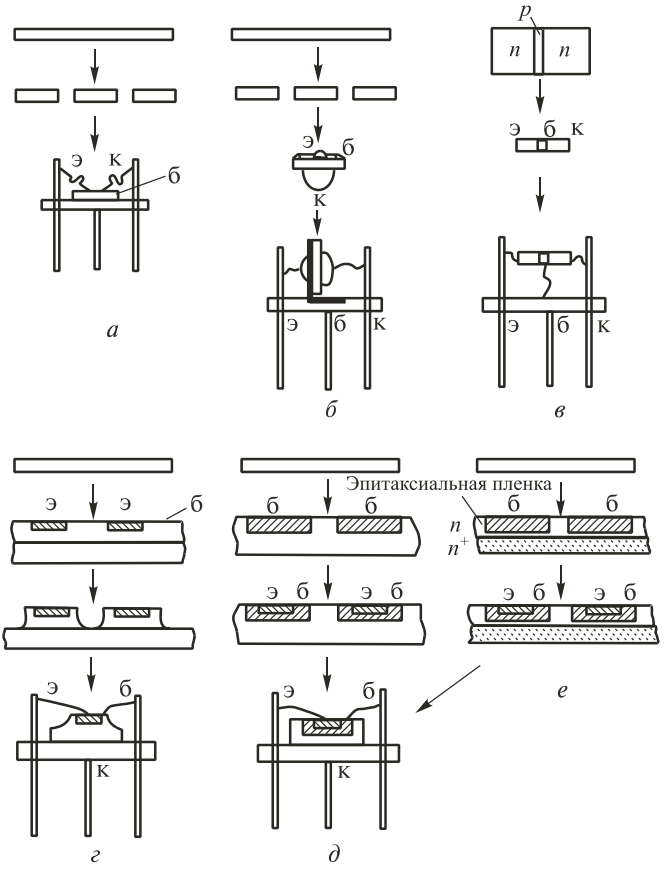

Рис. В.1. Технологические схемы изготовления полупроводниковых приборов: *а* — точечные, *б* — сплавные, *в* — тянутые, *г* — меза, *д* — планарные, *е* — планарно-эпитаксиальные

кремния в материале электрода при температурах плавления (600–800 °С) не позволяли получать толщину базы в транзисторе меньше 10 мкм. Серьезную проблему представлял также выбор оптимального электродного материала. Кроме того, в любых полупроводниковых приборах места выхода *p–n*-переходов на поверхность необходимо тщательно защищать от внешних воздействий. В сплавных приборах применяли, как правило, кремнийорганические покрытия, которые недостаточно эффективно предохраняли переходы

от проникновения влаги или газов и не обеспечивали стабильности параметров сплавных приборов. Быстродействие сплавных приборов было ограничено, поскольку нельзя было сделать электроды очень малыми по размеру.

В 1950 году была сделана попытка получения транзисторов с более тонкой базой для увеличения их быстродействия путем управляемого вытягивания слитка кремния из расплава. Изменяя режим вытягивания или вводя в нужный момент необходимую легирующую примесь, получили биполярные транзисторы с толщиной базы 5 мкм (рис. В.1, *в*). Однако эта технология не нашла широкого применения из-за сложности оборудования и низкой контролируемости параметров процесса.

Замена в 1953 г. метода вплавления на диффузию — процесс, идущий в твердой фазе и потому намного более медленный, позволила резко расширить возможности технологии. Скорость вплавления обычно составляет не менее 100 мкм/мин, в то время как скорость движения диффузионного фронта 1 мкм/ч. Кроме того, диффузия — это однонаправленный процесс, т. е. при понижении температуры фронт диффузионного p–n-перехода в отличие от сплавного не может вернуться в предыдущую фазу. В результате применения метода диффузии появилась практическая возможность создавать транзисторы с толщиной базы 0,2–0,3 мкм. Впоследствии для более точной регулировки количества примеси, вводимой в полупроводник, был разработан процесс ионной имплантации.

Однако способ получения переходов с малыми размерами и сложными конфигурациями в то время еще не был создан. Если в глубину p–n-переходы формировались посредством диффузии с высокой точностью, то для ограничения их площадей использовалось травление с довольно грубой защитой воском или другими кислотостойкими составами (рис. В.1, *г*). Создаваемые таким образом мезаструктуры («меза» в переводе означает стол) имели размеры сторон не менее 300–500 мкм, что ограничивало частотные свойства и быстродействие приборов.

Можно считать в самом общем виде, что технологические операции направлены на введение примеси с требуемым распределением концентрации по объему полупроводника, т. е.

как по поверхности (конфигурация перехода), так и в глубину. Мезатехнология в этом смысле неоптимальна, поскольку не решает важной задачи формирования конфигурации областей прибора.

В 1957 г. были проведены работы по локализации диффузии примесей в кремний. Оказалось, что тонкий слой двуокиси кремния, выращенный на его поверхности путем высокотемпературного нагрева в окислительной среде, хорошо маскирует кремний от проникновения большинства примесей. Объясняется это тем, что в двуокиси кремния коэффициент диффузии основных доноров и акцепторов весьма мал. В результате появилась возможность задавать конфигурацию электродных областей, удаляя в требуемых участках слой двуокиси кремния. Кроме того, как выяснилось в 1959 г., слой окисла гораздо лучше кремнийорганических покрытий защищает выход p–n-перехода на поверхность от внешних воздействий и обеспечивает стабильность электрических параметров прибора.

К 1958 г. относится разработка фотолитографического метода, сыгравшего наиболее значительную роль в становлении планарной технологии. Метод фотолитографии заключается в том, что на поверхность окисленного кремния наносят слой светочувствительного и кислотостойкого состава (фоторезиста), в котором образуют рисунок в виде окон необходимой конфигурации. Окисел в окнах удаляют травлением и создают таким образом маску, защищающую поверхность от диффузии примесей. С появлением фотолитографии стало доступным создание p–n-перехода с весьма малыми размерами и сложными конфигурациями.

Объединение метода диффузии, метода маскировки с помощью окисла (или других маскирующих покрытий, таких как нитрид кремния) и метода фотолитографии послужило основой планарной технологии. Изготавливаемые по данной технологии приборы назвали планарными потому, что все p–n-переходы в них выводятся на одну плоскость. Возникла возможность и формирования на одном кристалле нескольких транзисторов, соединенных между собой в схему. Такие приборы получили название «твердых схем» (рис. В.1, *д*).

Помимо названных методов окисления, фотолитографии и диффузии, для создания планарных приборов используется и эпитаксиальное наращивание кремния. Сущность этого метода, предложенного еще в 1951 г., заключается в том, что на пластине полупроводника, называемой обычно подложкой, выращивается слой кремния, составляющий с подложкой единый монокристалл, но отличающийся от последней типом или величиной проводимости.

Эпитаксиальные структуры, состоящие из подложки одного типа проводимости и выращенного на ней слоя того же или противоположного типа проводимости, позволили создать приборы с малым сопротивлением насыщения и высокими пробивными напряжениями и нашли широкое применение в технологии изготовления интегральных схем и планарных транзисторов с равномерным распределением примеси в базе (рис. В.1, *е*).

Маршрут дискретного МОП-транзистра короче, но включает в себя те же повторяющиеся циклы технологических операций.

Можно утверждать, что появление планарной технологии вызвало качественный сдвиг в полупроводниковом производстве. Возможность точного задания геометрических конфигураций p–n-переходов, их взаимного расположения, а также защита мест выхода p–n-переходов на поверхность от внешних влияний — вот те основные черты, которые качественно отличают планарную технологию от сплавной и мезатехнологии. Эти принципиальные отличия планарной технологии обеспечили важнейшие достижения в разработке и производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Не будет преувеличением сказать, что планарные приборы произвели такую же революцию в полупроводниковой технике, как сама полупроводниковая техника — в электронике. Только появление планарной технологии позволило создать современную микроэлектронику.

Технологический цикл изготовления планарных приборов включает от 250 операций (транзисторы среднего класса) до 1500 операций (интегральные схемы). Наиболее общая классификация технологических операций различает групповую

и индивидуальную обработку изделий. Чем больше удельный вес групповых операций, тем лучше технико-экономические показатели определенного технологического метода. Групповая обработка обеспечивает высокую производительность, при групповой обработке растет воспроизводимость результатов и, следовательно, снижается разброс параметров приборов и увеличивается процент выхода годных изделий. По сравнению с другими методами планарная технология характеризуется наибольшим удельным весом групповых операций. К ним относятся все операции обработки пластин — механическая, химическая обработка, эпитаксия, фотолитография, диффузия (ионная имплантация). Операции по обработке пластин являются наиболее сложными и ответственными: именно на этих стадиях формируются электрические параметры структур и определяется выход годных приборов. К индивидуальным операциям в планарной технологии относятся в основном сборочные операции. Индивидуальные операции непроизводительны, с трудом поддаются контролю и автоматизации. Они в основном влияют на себестоимость прибора и на его надежность.

Особенностью планарной технологии является повторяемость однотипных технологических операций. Как видно из технологической схемы маршрута изготовления даже дискретного биполярного транзистора (относительно простого по сравнению с технологическим маршрутом формирования интегральных схем) (рис. В.2), чередуясь, несколько раз повторяется последовательность: химическая обработка — термическая обработка (окисление кремния, диффузия) — фотолитография. Изменяя количество таких последовательностей, можно производить любые планарные приборы — от простых диодов до сложных интегральных схем. При этом основа операций часто остается неизменной, а меняются только технологические режимы и фотошаблоны, используемые для фотолитографии. Каждая такая последовательность (иногда ее называют блоком) формирует определенную часть структуры прибора. Завершает блок контрольная процедура, что позволяет своевременно устанавливать причины возникновения брака.

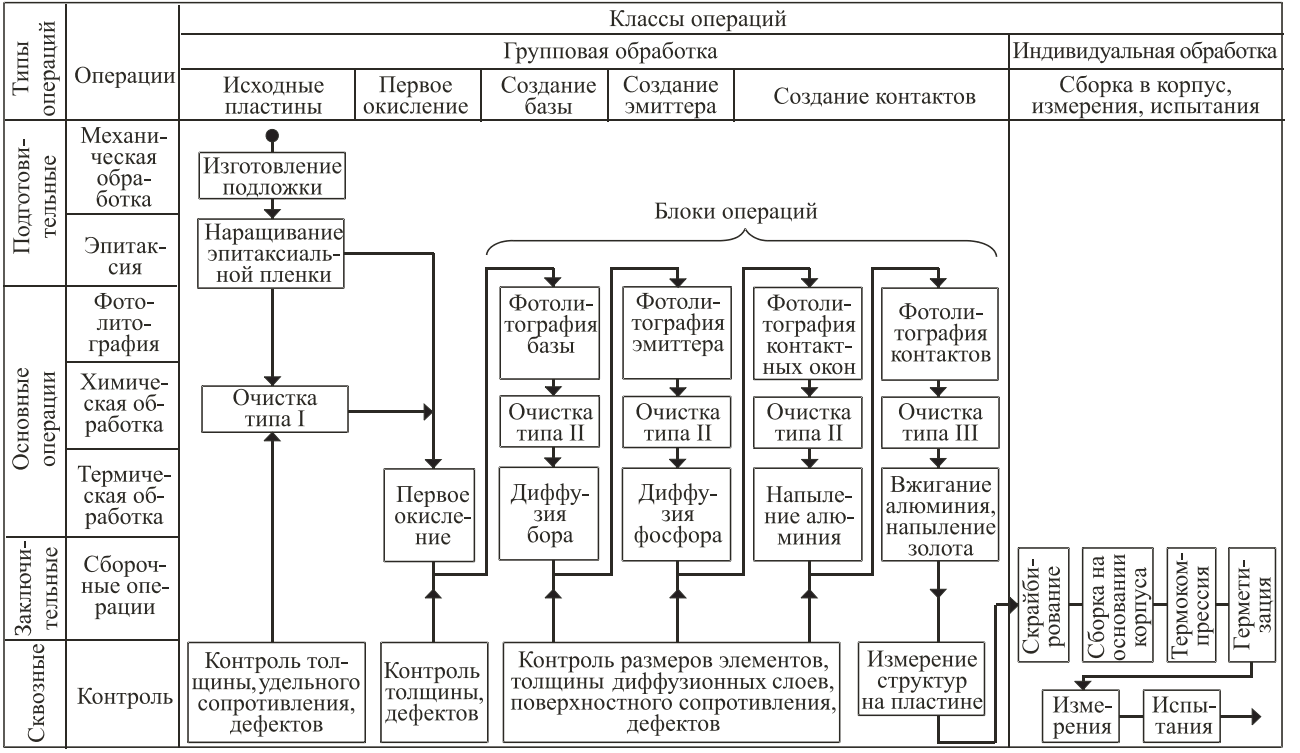

Рис. В.2. Типовой технологический процесс изготовления планарного транзистора n–p–n-типа

Конечно, структуры современных транзисторов, составляющих основу интегральных микросхем, существенно сложнее и включают в себя дополнительные области, такие как области изоляции, охранные области, скрытые слои, многослойную металлизацию и т. п. На рис. В.3 приведена структура биполярного интегрального транзистора, содержащая помимо основных (эмиттер, база, коллектор) и ряд специфических дополнительных областей. На рис. В.4 и рис. В.5 приведены структуры интегральных *n*-канального МОП-транзистора и КМОП-пары. Хотя для МОП-интегральных микросхем не требуется специальная межэлементная изоляция, но из рисунков видно насколько усложняются конструкции интегральных транзисторов.

Подробно маршруты изготовления таких интегральных приборов будут рассмотрены во второй части пособия, но и заранее можно отметить, что как ни сложен технологический маршрут — он состоит из чередующихся блоков основных операций.

Поэтому в первой части данного пособия рассмотрены именно эти повторяющиеся технологические операции, составляющие основу современного маршрута изготовления

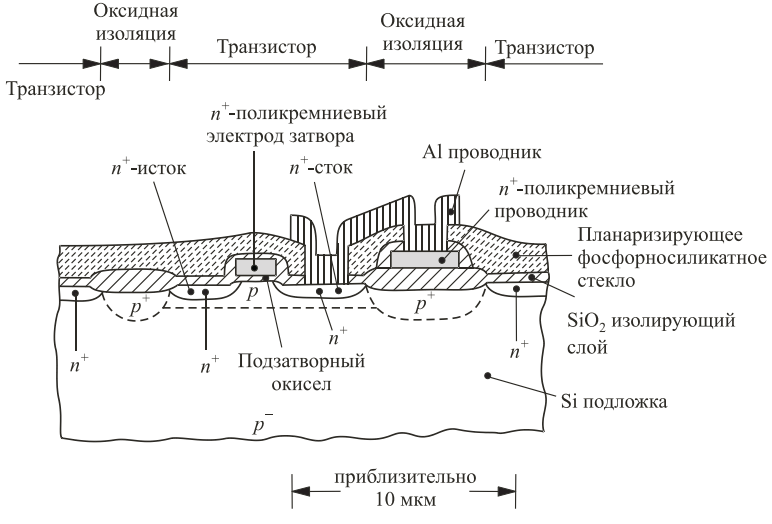

Рис. В.3. Типичная конструкция *n*-канального МОП-транзистора

кремниевых интегральных микросхем, а также методы их математического моделирования, позволяющие оптимизировать параметры технологического процесса.

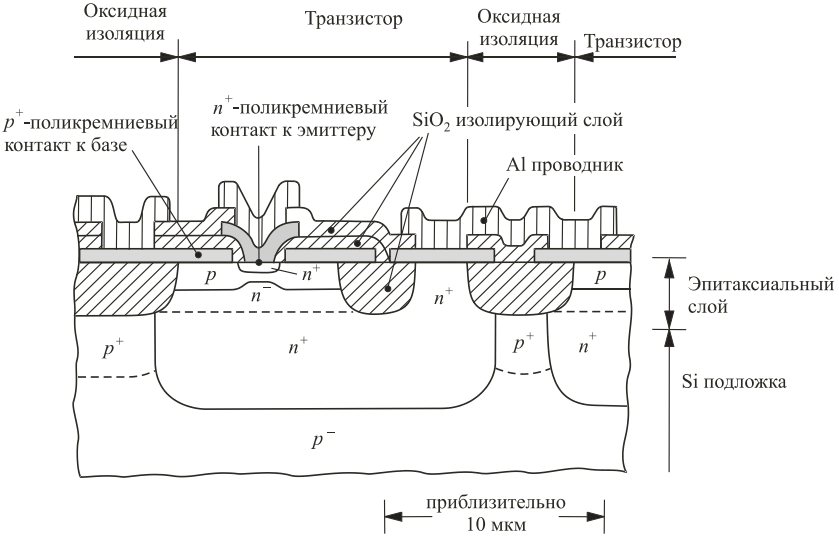

Рис. В.4. Биполярный транзистор с поликремниевыми контактами к базе и эмиттеру

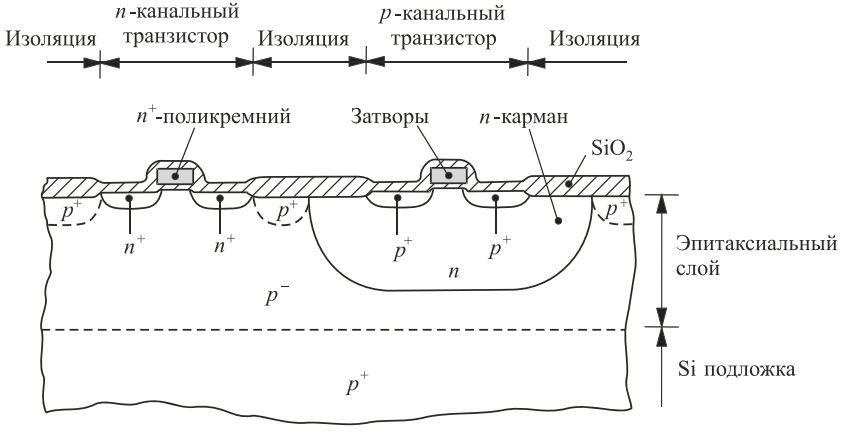

Рис. В.5. n- и p-канальные транзисторы в КМОП-схеме

Раздел 1

Основные технологические процессы изготовления кремниевых ИС

1. Поверхностная обработка полупроводниковых материалов

1.1. Кремний — основной материал для полупроводниковых интегральных микросхем

В производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем используются германий, кремний и арсенид галлия.

Основные физические и механические свойства этих материалов приведены в табл. 1.1.

В производстве приборов и схем используют полупроводниковые материалы, легированные различными примесями, что дает возможность существенно изменять свойства этих материалов. Однако основным материалом для изготовления интегральных микросхем (ИМС) и микросистем до настоящего времени остается кремний. Он обладает рядом свойств, позволяющих легко создавать на нем диэлектрические слои для маскирования от проникновения примесей и защиты поверхности от влияния внешней среды, обеспечивающих высокие рабочие температуры (до 150 °С). Поэтому именно технология кремниевых интегральных элементов будет рассматриваться в настоящем пособии.

Кремний имеет алмазоподобную кристаллическую решетку, которая может быть представлена как две гранецентрированные кубические решетки, сдвинутые относительно друг друга на 1/4 большой диагонали куба. Параметр решетки куба a равен 0,54 нм (длина ребра куба), а расстояние между двумя ближайшими соседними атомами составляет 0,23 нм. Каждый атом связан с четырьмя ближайшими соседями ковалентными связями, расположенными по отноше-

Таблица 1.1

Физические и механические свойства германия, кремния и арсенида галлия (при T = 300 К)

Свойства	Ge	Si	GaAs
Атомный (молекулярный) вес	72,59	28,09	144,6
Плотность, г/см^3	5,327	2,33	5,316
Модуль Юнга, $\times 10^9$ Н/м^2	13,7	16,9	1,13
Коэффициент Пуассона	0,256	0,262	0,336
Температура плавления, °С	936	1420	1238
Теплопроводность, кал/°С·м·с	0,14	0,2	0,125
Удельная теплоемкость, кал/г·°С	0,074	0,210	0,086
Критерий хрупкости	4,4	2,0	3,0
Коэффициент термического расширения α, $\times 10^{-8}$ (°С)$^{-1}$	5,75	2,23	5,74
Ширина запрещенной зоны, эВ	0,76	1,11	1,424
Тип кристаллической структуры	Алмаз	Алмаз	Цинковая обманка
Подвижность электронов, см^2/В·с	3900	1400	8800
Подвижность дырок, см^2/В·с	1900	480	400
Собственная концентрация носителей при 300 К, см$^{-3}$	$2\cdot 10^{13}$	$1{,}5\cdot 10^{10}$	$1{,}4\cdot 10^{6}$
Диэлектрическая проницаемость	16	11,8	11,1

нию к этому атому в вершинах правильного тетраэдра (рис. 1.1).

В кубической решетке кремния удобно выделить наиболее характерные плоскости и направления (рис. 1.2). Если в начало координат поместить куб с ребрами, отсекающими единичные отрезки по осям координат, то плоскости, образующие грани куба, будут иметь координату по одной из осей, например x, равную 1, а другим плоскостям будут парал-

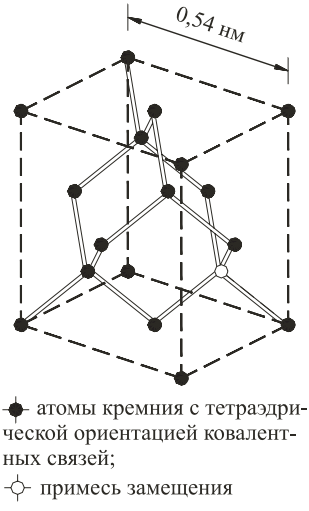

Рис. 1.1. Схематическое предствление кристаллической решетки кремния

лельны. Обратные величины отрезков, отсекаемых плоскостями по осям координат, для этой кристаллографической плоскости будут 1, 0, 0 (рис. 1.2, *а*). Это и есть индексы Миллера для граней куба. Соответственно для диагональной плоскости куба (рис. 1.2, *б*) эти индексы будут 1, 1, 0, а для плоскостей, отсекающих единичные отрезки по всем трем координатам (рис. 1.2, *в*) — 1, 1, 1. Для обозначения единичной плоскости ее индексы помещают в круглые скобки: (100), (110), (111). Если же речь идет о системе кристаллографически эквивалентных плоскостей, то используются фигурные скобки: {100}, {110}, {111}. Направления, перпендикулярные этим плоскостям, имеют те же индексы, но заключаются в квадратные скобки: [100], [110], [111], а семейство направлений с одинаковыми индексами — в треугольные скобки: <100>, <110>, <111>. Три указанных плоскости и направления являются наиболее важными в кристалле кремния и в основном используются в производстве кремниевых интегральных микросхем. Многие технологические процессы протекают различно при разных кристаллографических ориентациях поверхности кремниевой пластины. Для биполярных ИМС обычно используется ори-

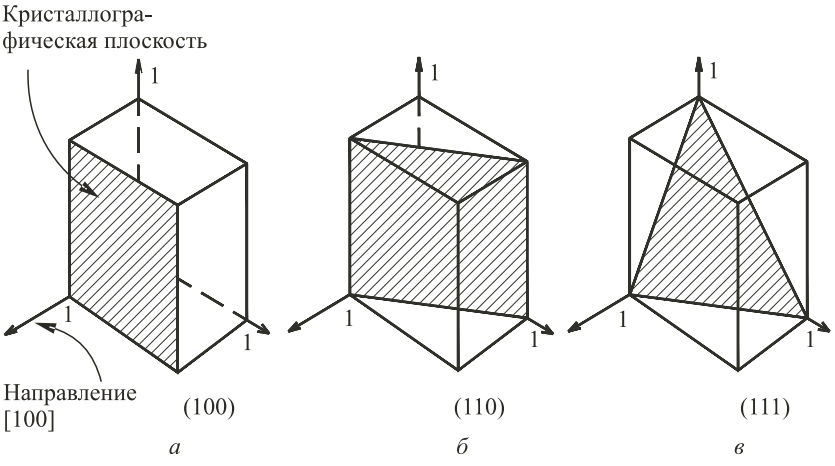

Рис. 1.2. Схематическое представление плоскостей с различными индексами Миллера в кубической решетке

ентация поверхности параллельно (111), для МДП схем предпочтительной является ориентация поверхности по плоскости (100).

1.2. Механическая обработка кремниевых пластин

Кремниевые слитки диаметром 100, 150, 200 мм режутся на пластины с помощью специальных дисков с алмазной абразивной кромкой. Перед резкой проводится ориентация слитков рентгеновским методом, чтобы поверхность пластин была параллельна нужной кристаллографической плоскости: (100) или (111).

После резки пластины подвергаются шлифовке и полировке. В результате шлифовки удаляется нарушенный при резке слитка слой на поверхности кристалла. Одновременно решаются задачи: получения плоскопараллельности сторон пластины; доведения толщины пластины до нужной величины; получения требуемой чистоты обработки поверхности пластины. Причем шлифовка в зависимости от требований производства может быть как двусторонней, так и односторонней. В процессе шлифовки, таким образом, формируются геометрические размеры пластины. Для уменьшения шероховатости

поверхности и глубины нарушенного в кристалле слоя после шлифовки проводится полировка пластин. Она необходима только для обработки рабочей стороны пластины, т. е. стороны, на которой непосредственно создаются структуры элементов. Полировка осуществляется с использованием алмазной пасты и мелкодисперсных абразивов из окислов редкоземельных элементов с величиной зерна 0,1–0,3 мкм.

После любой из этих операций на поверхности полупроводника остается нарушенный слой, который существенным образом влияет как на дальнейшую технологическую обработку (травление, окисление), так и в конечном счете на параметры полупроводниковых приборов, особенно с мелкими (меньше 1 мкм) активными слоями. Поэтому контроль структуры нарушенного слоя и способы его удаления представляют важную задачу современной планарной технологии.

Структуру нарушенного слоя полупроводниковой пластины после резки и шлифовки условно можно представить в виде четырех последовательных областей (рис. 1.3): верхняя область — микрорельеф, под ней расположена область микротрещин, далее область, содержащая петли и скопления дислокаций, затем следует слой кремния, где число дислокаций повышено по сравнению с остальным объемом полупроводника. В структурном отношении области микрорельефа и микротрещин представляют собой аморфные или мелкокристаллические состояния кремния. Области скопления и

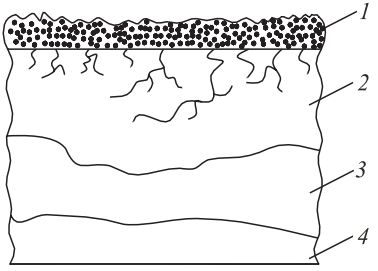

Рис. 1.3. Структура нарушенного при механической обработке поверхностного слоя: *1* — рельефный слой; *2* — микротрещины; *3* — область скопления дислокаций; *4* — монокристалл

[. . .]