

1. ПОЛУПРОВОДНИКИ, ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1. Введение

Термином полупроводник описываются твёрдые материалы, которые по своей природе (из-за особенностей строения кристаллической решетки) и в зависимости от температуры могут иметь различное количество свободных электронов или дырок. В зависимости от количества свободных носителей заряда материалы будут иметь высокую или низкую проводимость, а величина, обратная проводимости — удельное электрическое сопротивление — для полупроводников при комнатной температуре будет лежать в диапазоне от 10^{-2} Ом·см (например, для арсенида индия и арсенида галлия) до 10^6 Ом·см (для селена). Материалы, не имеющие свободных носителей заряда и вследствие этого обладающие высоким внутренним сопротивлением, называются диэлектриками (например, стекло (SiO_2), слюда, янтарь, фарфор, поливинилхлорид (ПВХ)). Материалы, сохраняющие свою проводимость даже при низких температурах и имеющие в нормальных условиях чрезвычайно малое сопротивление, называются проводниками (алюминий, медь, серебро, золото). В отличие от твёрдых металлов, проводимость газов и жидкостей зависит от подвижности ионов этих веществ, а значит, и от подвижности самого вещества.

В следующих разделах мы будем говорить о полупроводниковых приборах, металлических проводниках, использующихся для создания межсоединений, и диэлектриках, служащих для разделения соседних компонентов. Способность объединить все эти элементы и наладить их экономически эффективное производство привела к успеху полупроводниковой промышленности и в результате позволила получить высокую степень интеграции компонентов (до 1 миллиарда элементов в одном приборе).

1.2. Исторический обзор

1.2.1. Полупроводниковые диоды

В 1939 году физики Вальтер Шоттки (Walter Schottky) и Эберхард Спенке (Eberhard Spenke), работавшие в компании Siemens & Halske, опубликовали научную ра-

боту «Zur quantitativen Durchfuhrung der Raumladungs- und Randschichttheorie der Kristallgleichrichter» (Количественное выражение поверхностного заряда и теория поверхностных слоёв полупроводниковых диодов), в которой описывался принцип действия полупроводниковых диодов с переходом металл — полупроводник. Их работа основывалась на глубоких фундаментальных исследованиях, как теоретических, так и экспериментальных, подтверждающих, что описываемые переходы обладают выпрямительными свойствами, т.е. различным электрическим сопротивлением в зависимости от направления протекания тока. Вклад Шоттки в развитие полупроводниковой техники почитается и по сей день, полупроводниковые диоды со структурой металл — полупроводник называются диодами Шоттки.

Первые выпрямительные диоды изготавливались из селена и германия. Например, в СВЧ технике, в особенности в радиолокации, германиевые диоды с точечным контактом стали использоваться с 1942 года. Для простых радиоприёмников диод успешно использовался в качестве детекторного элемента. С другой стороны, кремниевые диоды с самых первых этапов развития применялись в качестве выпрямителей.

1.2.2. Биполярные транзисторы

Значимым достижением была разработка транзистора, начавшаяся в 1945 году в лаборатории Белла под руководством Уильяма Шокли (William Shockley). В 1947 году, совместно с Вальтером Браттэйном (Walter Brattain) и Джоном Бардином (John Bardeen), Шокли создал на подложке из поликристаллического германия два диода с точечными контактами. 16 декабря 1947 года команда разработчиков случайно обнаружила, что изменение прямого напряжения, приложенного к одному диоду, приводит к изменению обратного тока второго диода. Они назвали этот эффект «транзисторным эффектом», а прибор — транзистором (от англ. transit — пропускать и resistor — резистор). Промышленное производство изначально оказалось слишком сложным,

поскольку параметры приборов имели очень большой разброс. Первые улучшения стали появляться с разработкой плоскостного транзистора. Они были результатом революционной идеи Шокли — не использовать для создания переходов контакты, а изготавливать их на кристалле путём выборочного легирования четырёхвалентного германия трёхвалентными (индий) или пятивалентными (мышьяк) материалами, таким образом изменяя проводимость и свойства кристалла (структуру энергетических уровней). Он описал эту идею в 1949 году, а в 1950 году создал первый германиевый *p-n-p*-транзистор. Такой принцип изготовления транзистора относится к сплавным плоскостным транзисторам, поскольку капля индия вплавается в германий.

Первые транзисторы всё ещё изготавливались из поликристаллического германия. Этот материал имел недостаток, заключавшийся в том, что дефекты кристаллической решётки и посторонние примеси уменьшали проводимость. На практике от указанного недостатка удалось избавиться только когда стало возможным получать сверхчистые монокристаллические материалы методом зонной плавки.

Другим новшеством стала диффузионная технология, разработанная лабораторией Белла и компанией General Electric. Она была представлена на симпозиуме в 1955 году. Преимущество данной технологии заключалось в том, что она позволяла точно изготавливать слой заданной толщины с заданным количеством примесей. За свои новаторские изобретения и связанные с ними исследования и разработки Шокли, Бардин и Браттэйн в 1956 году были награждены Нобелевской премией по физике.

Описание принципа работы биполярного транзистора можно найти в подразделе 1.3.1, где также рассматриваются биполярные интегральные схемы.

1.2.3. Победное шествие кремния

Преимуществом германия является его высокая проводимость, поэтому он особенно подходит для использования на высоких частотах. С другой стороны, кристаллическая решетка германия не может выдерживать без повреждения температуру выше $+75^{\circ}\text{C}$. Кроме того, обратный ток вызывает появление помех даже при комнатной температуре. В отличие от германия, кристал-

лы кремния выдерживают температуру до $+150^{\circ}\text{C}$, а большая ширина запрещённой энергетической зоны и более высокое внутреннее сопротивление приводят к меньшим значениям обратного тока. В дополнение к этому, кремний существует в природе практически в неограниченных количествах. В 1952 году Г. Тил (G. Teal) и Э. Бухлер (E. Buchler) представили второй метод (помимо зонной плавки) получения монокристаллического кремния из расплава поликристаллического кремния. Сегодня этот процесс более известен как метод Чохральского. В 1953...1956 годах компания Siemens разработала альтернативный процесс получения кристаллического кремния. При помощи этого процесса, так называемого химического парофазного осаждения (ХПО), из газовой среды осаждаются брусочки почти чистого, но поликристаллического кремния. После этого производится зонная плавка данных брусочков методом, предложенным В. Дж. Пфанном (W.G. Pfann), в результате чего они не только очищаются, но и становятся монокристаллическими. Претерпев огромное количество усовершенствований, данный процесс обработки кремния используется и по сей день.

В 1954 году Гордону Тилу удалось изготовить первый кремниевый биполярный транзистор в лаборатории Белла. В 1956 году он организовал промышленное производство транзисторов в компании Texas Instruments. Очень скоро эти приборы продемонстрировали своё превосходство при работе в низкочастотных схемах.

В июне 1958 года работник лаборатории Белла М. Аталла (M. Atalla) описал великолепные изоляционные свойства полученного термическим путем диоксида кремния, (который встречается в природе в виде кварцевого песка). Используя этот материал, стало возможным изготавливать планарные полупроводниковые структуры, т.е. полупроводниковые структуры, которые могут быть организованы слоями. Отдельные проводящие слои разделяются чрезвычайно тонким слоем диоксида кремния. Основным преимуществом такой конструкции является то, что слой оксида можно протравить в определенных местах, обеспечивая соединение между наложенными друг на друга слоями. Кроме того, поверхность кристалла остается плоской, что позволяет избежать влияния поверхностных эффектов. Такая планарная

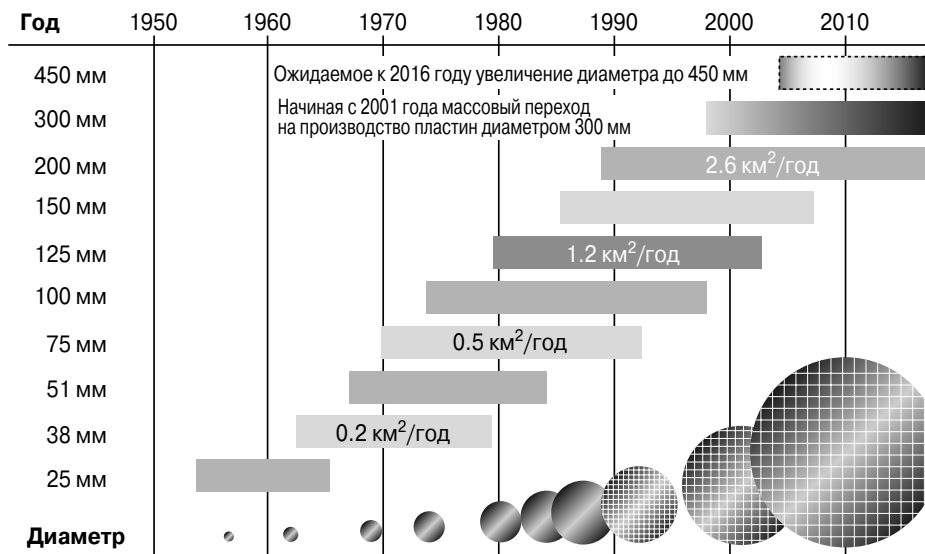


Рис. 1.1. Развитие производства полупроводниковых пластин.

технология позволила, используя процессы фотолитографии и диффузии из газовой фазы, в одном процессе получить на одной кремниевой пластине большое количество одинаковых транзисторов. В 1959 году компания Fairchild Semiconductors начала промышленное использование данной технологии. Помимо этого, планарная технология открыла путь для интеграции различных типов компонентов на одном полупроводниковом кристалле.

С развитием кремниевой технологии площадь пластин удваивалась каждые 10 лет (Рис. 1.1). Если в 60-х годах прошлого века диаметр пластин составлял 25 мм, то в 70-х годах их диаметр уже достигал 51 мм, в 80-е — 100 и 150 мм, в 90-е — 200 мм, а в 2002 году была выпущена полупроводниковая пластина диаметром 300 мм. Одновременно происходило сокращение плотности дефектов, как поверхностных, так и дефектов исходного материала и дефектов легирования. На сегодняшний день существует множество модификаций данной технологии, такие как эпитаксиальная технология, технология кремний-на-изоляторе (SOI) и технология напряжённого кремния. Целью всех этих разработок является удовлетворение требований к производительности и стоимости полупроводниковых приборов.

1.2.4. Другие полупроводниковые материалы и компоненты

В 1953 году Генрих Велкер (Heinrich Welker), проводя исследования в лаборато-

рии Siemens & Halske, обнаружил, что некоторые соединения трёх- и пятивалентных материалов, например арсенид галлия, обладают полупроводниковыми свойствами. С тех пор данные полупроводниковые материалы стали играть большую роль в области оптоэлектроники. Это произошло главным образом из-за того, что в указанных материалах во время рекомбинации электронов и дырок (в гораздо больших количествах, чем в кремнии или германии) высвобождающаяся энергия излучается в виде фотонов. Ещё с 1956 года было известно, что при работе *p-n*-перехода в прямом направлении он излучает фотоны. Однако промышленное производство красных светодиодов началось только в середине 60-х годов XX-го века. Основная проблема заключалась и заключается в получении света, излучаемого с поверхности кристалла, до того, как он будет поглощен. Это оказалось чрезвычайно трудным в случае с коротковолновым синим излучением и оставалось невозможным, пока в середине 80-х годов XX-го века сотрудники лаборатории Siemens не разработали синий светодиод (из карбида кремния).

Было разработано множество оригинальных технологий для изготовления компонентов и схем на основе полупроводников $A^{III}B^V$. Важную роль в процессах производства данных материалов играет молекулярно-лучевая эпитаксия.

Областью применения приборов на основе полупроводников $A^{III}B^V$ являются оп-

тические системы передачи данных и оптические устройства отображения информации. С этой целью проводились разработки полупроводниковых лазеров с большим количеством слоев, некоторые из которых являются мономолекулярными (имеют толщину в одну молекулу), а также интеграция оптоключей и фильтров. Проводимые сегодня исследования направлены на использование нитрида галлия (GaN) в качестве основы люминофора для различных длин волн при изготовлении осветительных приборов и основного материала компонентов, работающих на высоких частотах.

Карбид кремния (SiC) является основным перспективным материалом, используемым для изготовления силовых ключей. Главные требования, предъявляемые к силовым ключам, — это высокая теплоустойчивость, малое сопротивление в проводящем состоянии и высокая частота переключения.

1.2.5. Полевые транзисторы

В 1928 году Дж. Э. Лелейнфилд (J.E. Lilienfeld) и О. Хейл (O. Neil) описали идею создания прибора, управляемого полем, но использующего в качестве рабочей среды не вакуум, а твёрдые материалы. Их идеи подготовили почву для создания полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом (Junction Field-Effect Transistor — JFET) и полевых транзисторов со структурой металл—оксид—полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor — MOSFET), или, сокращенно, МОП-транзисторов. Однако в то время, из-за недостаточного развития физики твёрдых тел, эти приборы не могли быть ни экспериментально исследованы, ни изготовлены. Шокли был первым из тех, кто вернулся к этой идее снова в 1952 году. Но прошло ещё несколько лет, прежде чем был изготовлен первый полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом, а в 1959 году Аталла и Канг (Kahng), работавшие в лаборатории Белла, представили транзистор с ёмкостным управлением со структурой металл—оксид—полупроводник (т.е. МОП-транзистор). Долгое время МОП-транзисторы с каналами *n*-типа и *p*-типа развивались наравне друг с другом. Однако со временем *n*-канальная технология оказалась более развитой, и технология изготовления *p*-канальных транзисторов постепенно отошла

на второй план. В 1964 году компания RCA начинает применение технологии КМОП (комплементарный металл-оксидный полупроводник, *англ.* Complementary Metal-Oxide Semiconductor — CMOS), при которой на одном кристалле размещаются транзисторы с разными типами проводимости. Эти транзисторы включены последовательно, но открыт всегда только один из них, поэтому такая схема имеет очень низкий ток потребления. КМОП-технология и по сей день применяется, когда требуется низкое энергопотребление. Тем не менее, с увеличением тактовых частот растёт ток потребления, с уменьшением размеров транзисторов возрастают токи утечки, снижение напряжения питания требует меньших значений пороговых напряжений, и сегодня КМОП-технология приблизилась к своим пределам. Идёт постоянный поиск возможностей совершенствования компонентов и схемных решений, особенно в области портативных приборов. Более подробное описание принципа действия полевых транзисторов вы найдете в подразделе 1.3.2.

1.2.6. Интегральные полупроводниковые схемы

Главными движущими силами развития полупроводниковой промышленности являются:

- снижение стоимости приблизительно на 25% ежегодно;
- удвоение плотности размещения элементов примерно каждые 18 месяцев;
- увеличение сложности схем из-за интеграции на кристалле функций периферийных устройств;
- скорость (сравни, тактовые частоты микропроцессоров);
- **потребляемая мощность(!)**, в особенности это касается устройств с батарейным питанием;
- интеграция дополнительных функциональных возможностей, например памяти, и интерфейсов — датчиков и исполнительных устройств.

На сегодняшний день количество транзисторов и других полупроводниковых приборов, которые могут быть интегрированы на одном кристалле, достигает нескольких миллиардов. Изготовление интегральных микросхем основывается на сложной последовательности процессов легирования,

Таблица 1.1. Упрощённая последовательность изготовления интегральных микросхем

Этап	Описание
Подложка	Изготовление подложки
Карманы	Основное легирование для <i>n</i> - и <i>p</i> -канальных транзисторов в случае КМОП-технологии
Изоляция	Создание диэлектрической изоляции соседних приборов, в основном при помощи диоксида кремния SiO ₂
Прибор	Задание характеристик прибора путём изменения степени легирования канала, толщины подзатворного диэлектрика и подбора материала затвора
Межсоединения	Создание легирующего профиля для соединения области канала с уровнями соединительной разводки. Создание низкоомных соединений с уровнями разводки
Локальные соединения	Создание коротких высокоомных соединений внутри схемы (более высокие сопротивления не оказывают вредных воздействий на схему)
Металлизация	Основная разводка в зависимости от сложности схемы может насчитывать до 10 слоёв
Глобальные монтажные соединения	Создание низкоомной разводки с гибкими требованиями в отношении размера структуры для длинных соединений и организации электропитания блоков
Пассивирование	Изолирование (герметизация) схемы от внешних воздействий и, следовательно, обеспечение длительного срока службы
Корпусирование на уровне 0	Для современных технологий — подготовка неразделённой на кристаллы пластины к корпусированию: формирование столбиковых выводов, корпусирование на уровне пластины, технология chip-on-board (кристалл на плате)

осаждения проводящих и изолирующих слоёв, а также создания горизонтальной структуры при помощи литографии и травления (см. Табл. 1.1). Развитие полупроводниковой промышленности связано с разработкой подходящих материалов с соответствующими свойствами (однородность, избирательность, чистота, технологическая совместимость) и специального технологического оборудования. В частности, процесс фотолитографии совершенствовался в течении многих лет, в результате теперь можно изготавливать структуры с размером, меньшим чем длина волны света. Для процесса осаждения существует оборудование, позволяющее осаждать слои толщиной в один атом, а толщина слоёв, используемых в современных компонентах, лежит в диапазоне от 3 до 4 атомов. Значительные трудности пришлось преодолеть для достижения однородности пластины (например, размером 300 мм), воспроизводимости и получения бездефектных слоёв. Для малых фокусных расстояний, связанных с высокой разрешающей способностью, были разработаны специальные процессы сглаживания поверхности (химико-механическая полировка).

Изготовление отдельной законченной пластины часто состоит из сотен этапов. В процессе производства следует уделять

внимание точности изготовления и чистоте материала, поскольку для микроскопических структур даже незначительные отклонения имеют большие последствия. Выход за требуемые пределы точности на отдельных этапах производства может значительно уменьшить процент выхода годных микросхем.

Из-за требований по тактовой частоте, энергопотреблению и габаритным размерам, накладываемых на компоненты конечными приборами, классическая цепочка процессов изготовления приборов «Разработка — Топология — Шаблоны — Пластина — Измерения — Корпусирование — Завершающие испытания» не имеет такого чёткого деления на отдельные этапы. Современные методы предусматривают комплексные решения пластина-корпус, использование концепций «система-в-корпусе» и модульных концепций. С увеличением объёма производства для современных специализированных корпусов можно добиться оптимизации стоимости за счёт использования трёхмерной (3D) интеграции нескольких чипов (ASIC + память + аналоговый интерфейс + MEMS).

Биполярные микросхемы

Первый патент на интеграцию нескольких компонентов был независимо получен

в 1959 году Джеком Килби (Jack S. Kilby) из Texas Instruments и Робертом Нойсом (Robert N. Noyce), коллегой Уильяма Шокли по Fairchild Semiconductors. Возникший в результате этого спор о правах на изобретение был решён апелляционным судом США таким образом, что обе стороны обладали одинаково равными правами. Первая интегральная схема (ИС) состояла из биполярного транзистора, трёх резисторов и конденсатора (Килби использовал германий). Большой интерес к новой технологии пришёл со стороны компьютерной индустрии, где до появления ИС приходилось изготавливать большое количество отдельных схем, которые часто были идентичными. В скором времени, между 1961 и 1963 годами появились микросхемы, использующие резисторно-транзисторную логику (РТЛ) (Fairchild), диодно-транзисторную логику (ДТЛ) (Signetics), транзисторно-транзисторную логику (ТТЛ) (Pacific Semiconductors) и эмиттерно-связанную логику (ЭСЛ) (Motorola). ТТЛ-логика (особенно серия 7400 производства Texas Instruments) и ЭСЛ-логика очень быстро нашли широкое применение в цифровых устройствах. Вскоре, несмотря на большие трудности, удалось добиться успеха и в производстве аналоговых интегральных микросхем. Особо отметим компании Fairchild и National Semiconductor, которые приступили к производству интегральных операционных усилителей.

МОП-микросхемы

Развивающаяся с 1964 года МОП-технология также становилась интегральной и стремилась к ещё большей степени интеграции компонентов. Одним из шагов на этом пути было появление технологии локального окисления кремния (LOCAL Oxidation of Silicon — LOCOS), которая была доведена до рыночной реализации компанией Philips в 1966 году. В данной технологии островки транзисторов были разделены кольцом из диоксида кремния, что позволяло сделать зазоры между транзисторами значительно меньше, чем раньше, при этом отсутствовали паразитные транзисторы. Дальнейшие усовершенствования были получены путём использования ионной имплантации, которая позволила селективно легировать небольшие области. Несмотря на то что этот процесс уже был описан в

1952 году С. Олом (S. Ohl), который был сотрудником лаборатории Белла, и запатентован Уильямом Шокли в 1954 году, его техническая реализация до 1970 года оставалась невозможной.

В устройствах, сочетающих аналоговую и цифровую обработку сигналов и использующих аналого-цифровые преобразователи, требуется высокая скорость обработки информации, высокая нагрузочная способность, высокая линейность и хорошее отношение сигнал/шум, в то же время для них требуется высокая плотность размещения компонентов цифровых схем. В связи с этим стала быстро развиваться БиКМОП-технология, при которой совместно используются КМОП- и биполярные приборы. В последние годы активно развивается кремний-германиевая (SiGe) технология, которая позволяет получать высокие скорости передачи данных и/или высокие максимальные рабочие частоты. Важными областями её использования являются трансиверы (приёмопередатчики), параллельно-последовательные и последовательно-параллельные преобразователи, драйверы для лазерных диодов и малошумящие усилители (LNA).

Микросхемы памяти

Начиная с 1966 года даже использующаяся в компьютерах память на магнитных сердечниках стала вытесняться полупроводниковыми микросхемами памяти. Первая ИС такого типа была выпущена компанией International Business Machines (IBM). Она содержала 16 триггеров на биполярных транзисторах и могла хранить 16 бит информации. В 1968 году IBM выпустила 64-битную ИС памяти на триггерах, но она состояла из 664 компонентов (это больше, чем 10 компонентов на один бит памяти). В этом же году создатель интегральных схем Роберт Нойс (Robert Noyce) совместно с двумя сотрудниками компании Fairchild, Гордоном Муром (Gordon Moore) и Эндрю Гривом (Andrew Grove), основывает компанию Integrated Electronics, позже переименованную в Intel. К началу 1969 года Intel выпустила на рынок ИС статического ОЗУ объёмом 64 бит (изготовленную по биполярной технологии Шокли). Три месяца спустя на рынке появилась 256-битная ИС памяти, изготовленная по той же технологии. Обе микросхемы были неудачными с финансовой точки зрения: они были слишком доро-

гими по сравнению с памятью на магнитных сердечниках. Но компания Intel была на верном пути. В этом случае решающим фактором было снижение стоимости путём использования меньшего количества транзисторов на бит памяти. На самом деле, компания IBM уже изобрела в 1966 году однотранзисторную память (динамическое ОЗУ), но компания Intel была первым производителем, который превратил эту разработку в коммерчески выгодный проект. В конце 1970 года появилась ИС 1103 — 1024-битное динамическое ОЗУ, изготовленное по технологии NMOS (n -канальная МОП-технология). Она была дороже памяти на магнитных сердечниках, но в 1972 году стала самой продаваемой микросхемой памяти благодаря своему техническому превосходству. Она была заменена в 1975 году микросхемой динамического ОЗУ объёмом 4 Кбит, которая в дальнейшем вытеснила с рынка память на магнитных сердечниках. Затем, с интервалом в 3—4 года, появились ИС памяти объёмом 16, 64 и 256 Кбит. Сегодня выпускаются ИС динамического ОЗУ объёмом свыше 1 Гбит. Гордон Мур, один из основателей компании Intel, в 1964 году предсказал, что каждые 18 месяцев число транзисторов в ИС будет удваиваться. По существу, эта гипотеза верна и по сей день и известна как закон Мура. Более подробное описание технологии изготовления динамической памяти вы можете найти в главе 6.

Простая транзисторная память имела и имеет только один недостаток: она энергозависима, т.е. может хранить информацию только тогда, когда на неё подано напряжение питания. В отличие от неё, данные, записанные в энергонезависимую память, не изменяются при исчезновении напряжения питания, и такая память может быть запрограммирована как производителем (массочное ПЗУ), так и пользователем (ППЗУ, ЭПЗУ, СППЗУ, ЭСППЗУ, флэш-память, параметрическое ОЗУ, NROM, нанокристаллическая память). Начиная с 1970 года, одновременно с ОЗУ на рынке появились микросхемы ПЗУ и СППЗУ. Также вскоре после них появилась и ЭСППЗУ. Хотя ИС ПЗУ со временем и увеличивались по объёму, они не могли держаться наравне с ИС динамического ОЗУ. В 1987 году компания Intel выпустила на рынок первую ИС флэш-памяти. За последующие десять лет этот дешёвый аналог ЭСППЗУ завоевал большую

часть рынка энергонезависимой памяти, и на сегодняшний день без неё невозможно представить многие современные устройства (карманные компьютеры, портативные радиостанции, мобильные телефоны, цифровые фотокамеры и т.д.). Более подробную информацию об этом типе памяти вы сможете найти в разделах 1.3 и 1.4 данной главы.

В стремлении получить более высокие плотности записи информации в сочетании с более низкими напряжениями питания был разработан и изучен ряд новых методов хранения данных:

- NROM — флэш-память, использующая в качестве носителя информации диэлектрик;
- FeRAM — ферроэлектрическая память;
- MRAM — магниторезистивная память;
- PRAM — память на основе фазового перехода.

Важную роль в развитии памяти играют два требования: удобство в использовании и энергонезависимость.

Микропроцессоры

В 1969 году японский концерн Busicom захотел создать карманный электронный калькулятор на основе 5 интегральных схем. Сама компания была не в состоянии изготовить эти чипы и запросила их у компании Intel. Когда спецификация на данное устройство поступила к разработчику Марсиану Хоффу (Marcian E. (Ted) Hoff), ему пришла в голову мысль, почему бы не попробовать создать это устройство, используя только одну ИС. После некоторых сомнений концерн Busicom согласился и сделал заказ. Впоследствии разработанный компанией Intel чип стал первым микропроцессором. Он имел разрядность 4 бита, содержал 2300 транзисторов и удовлетворял всем требованиям спецификации. В дальнейшем Intel выкупила права на этот микропроцессор у концерна Busicom и представила его на рынке под кодовым обозначением 4004. Через небольшой промежуток времени появился 8-битный микропроцессор 8008. Последующая разработка, микропроцессор 8080, был представлен компанией Intel в 1974 году. К этому времени компании Texas Instruments, Motorola, National Semiconductor, Fairchild, Signetics и Toshiba также представили на рынке свои микропроцессоры. Компания RCA даже выпустила микропроцессор с малым энергопотреблением, вы-

полненный по КМОП-технологии, а Федерико Фаггин (Frederico Faggin), один из разработчиков 4004, основал компанию Zilog Company, представившую на рынке микропроцессор Z80. Компания Intel оставалась лидером на рынке микропроцессоров, но под давлением конкурентов, в особенности компании Motorola, которая сделала ответный ход, выпустив семейство микропроцессоров 68000, в 1974 году компания Intel представила 16-битный микропроцессор 8086. Вскоре компания Motorola получила лицензии на выпуск и продажу своих микропроцессоров, и, как следствие, вскоре заняла значительную долю этого рынка. Компания даже добилась, чтобы первый производитель микрокомпьютеров, компания Apple, стала использовать микропроцессоры серии 68000. С 1976 года, когда компания, основанная Стивеном Джобсом (Steven Jobs) и Стивеном Возняком (Steven Wozniak) представила компьютер Apple I (с 8-битным процессором компании Motorola), и по сей день она использует микропроцессоры Motorola. Однако компании Intel удалось привлечь внимание производителя компьютеров IBM, которая выбрала 8-битный вариант микропроцессора 8086 для создания первого микрокомпьютера, так называемого персонального компьютера (ПК). Первый ПК появился в 1981 году и обеспечил Intel долгосрочный успех на рынке благодаря серии 8086 и её преемникам — 286, 386, 486, Pentium, Itanium, Xscale, Centrino, Opteron и т.д. На сегодняшний день компания Intel доминирует на рынке микропроцессоров с долей 85%, в то время как AMD занимает только 15%.

Микроконтроллеры

В конце 70-х годов прошлого века компания Intel выпустила 8-битный микропроцессор 8048 со встроенной периферией. Он имел ПЗУ, ОЗУ, таймер и различные порты ввода/вывода. Кроме того, в качестве опции, ПЗУ могло быть заменено на ППЗУ (серия 8748). Поскольку данное устройство применялось, главным образом, для задач управления, оно получило название «микроконтроллер». В 1980 году появилась следующая разработка, микроконтроллер 8051, который и по сей день остаётся стандартом де-факто для 8-битных микроконтроллеров. Покорение рынка 16- и 32-битных

микроконтроллеров шло параллельно с разработкой микропроцессоров.

В 1975 году компания IBM доказала, что правило 80/20, которое гласит, что в течение 80% времени используется только 20% доступных команд, применимо и к процессорам. Вскоре стало ясно, что более выгодной, в особенности для осуществления управляющих функций, будет разработка микропроцессора с сокращенным набором команд (Reduced Instruction Set Computer — RISC), который появился на рынке в середине 80-х годов прошлого века благодаря компании MIPS Computing. С этого момента большинство функций управления и обработки сигналов стало осуществляться RISC-процессорами.

Помимо вычислительных и управляющих функций, чрезвычайно важную роль, особенно в области беспроводной связи, стала играть быстрая цифровая обработка сигналов (Digital Signal Processing — DSP). В этой области прочные позиции с конца 90-х годов прошлого века занимают компании Texas Instruments и ARM.

Специализированные интегральные микросхемы (ASIC)

В начале 80-х годов прошлого века всё более четко вырисовывалась ещё одна дилемма: стандартные ИС стали преградой на пути к интеграции готовых устройств. Тот набор функций, который хотели бы реализовать разработчики, редко является стандартным для ИС. А заказные ИС с высоким уровнем интеграции были и остаются достаточно дорогими, и их изготовление является экономически выгодным только при массовом производстве. Именно поэтому производители разработали ИС, которые могут модифицироваться пользователем. Их можно разделить на два больших класса: программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и специализированные интегральные схемы (Application-Specific Integrated Circuit — ASIC). Компания Monolithic Memories Inc. (MMI) в 1983 году первой выпустила на рынок ПЛИС с использованием программируемой матричной логики (ПМЛ). ПМЛ-технология заключалась в том, что программируемая матрица элементов И управляет входами специальной матрицы элементов ИЛИ. Программирование данных микросхем осуществлялось аналогично программиро-

ванию ППЗУ. В 1985 году компания Xilinx предложила технологию с использованием матрицы логических элементов (Logic Cell Array), при которой программа хранится в ячейках ОЗУ. Каждый раз при включении модуля программа из энергонезависимой памяти загружалась в ОЗУ. Достоинство этой технологии заключается в том, что для программирования и управления более дорогой матрицей логических элементов может использоваться более дешёвый стандартный модуль. Специализированные ИС, напротив, являются микросхемами с большим количеством стандартных блоков, которые могут быть запрограммированы в соответствии с определенными правилами. В этом случае полупроводниковая пластина изготавливается, по мере возможности, с помощью стандартных технологических процессов. И только некоторые определённые этапы изготовления осуществляются в соответствии с требованиями заказчиков. Такой метод производства сокращает стоимость ИС, но является целесообразным только при больших объёмах производства. При малых и средних объёмах более выгодным является применение ПЛИС или матрицы логических элементов. Более подробную информацию о специализированных ИС вы сможете найти в главе 12.

Технология поверхностного монтажа

Строго говоря, технология поверхностного монтажа на самом деле не является технологией изготовления полупроводниковых приборов. Однако её появление внесло большой вклад в расширение возможностей по комбинированию всё более миниатюрных полупроводниковых структур в виде модулей. В традиционной технологии выводы компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, дроссели и транзисторы, устанавливались в отверстия на печатной плате или соединялись при помощи проводов, тогда как в новой технологии монтаж компонентов осуществлялся непосредственно на поверхность печатной платы. В связи с этим была разработана новая миниатюризованная форма корпуса, который стал более компактным и надёжным. Компоненты такого типа называют SMD (от *англ.* Surface Mounted Devices — компоненты для поверхностного монтажа). Однако с появлением технологии поверхностного монтажа стало фактически невозможным осуществление ремонта поврежденных узлов.

1.2.7. Классификация полупроводниковых компонентов

Полупроводниковые компоненты могут быть классифицированы по различным критериям, например:

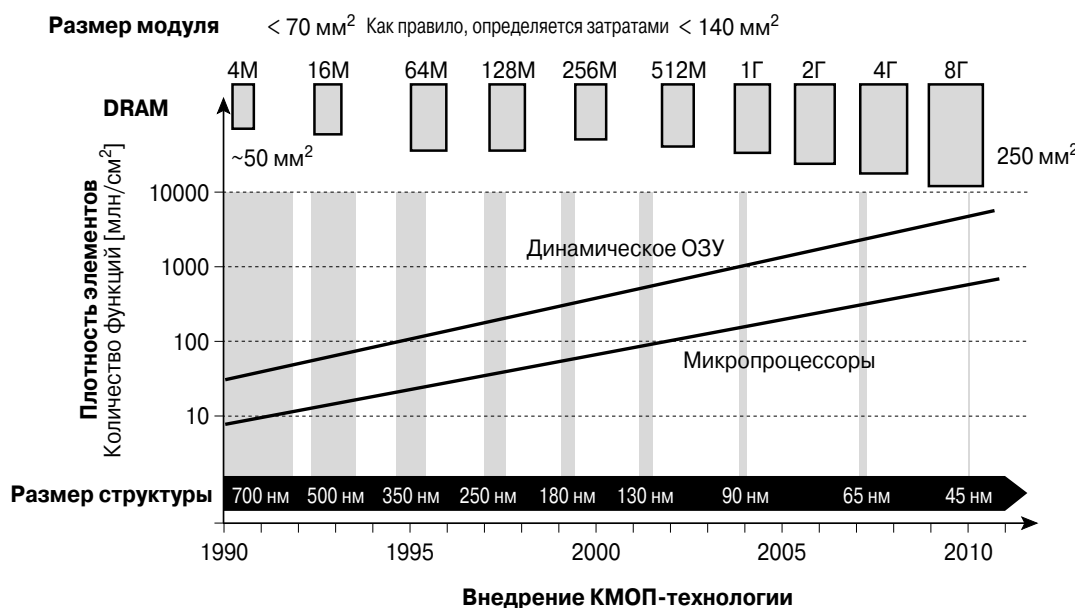


Рис. 1.2. Увеличение плотности размещения компонентов позволило изготавливать кристаллы с миллиардами кристаллов.

- технология изготовления (биполярная, МОП, КМОП, БиКМОП, Шоттки);
- внутреннее устройство, т.е. отдельные полупроводниковые приборы или интегральные схемы;
- область применения (аналоговые устройства, цифровые устройства, силовая электроника, обработка сигналов, оптоэлектроника).

С точки зрения потребителя, последний критерий классификации является наиболее значимым. Именно поэтому мы используем его в последующих разделах, где полупроводниковые приборы будут описываться в соответствии с их областями применения.

1.3. Конструкция и принцип действия интегральных схем

В случае интегральных схем все элементы схемы и соединяющие их провода изготавливаются одновременно в течение одного производственного процесса на одном монокристаллическом полупроводниковом кристалле, или чипе. Элементы схемы, расположенные на кристалле в непосредственной близости, должны быть электрически изолированы друг от друга. Микросхема заключена в корпус, в котором, как правило, контактные площадки кристалла соединяются с выводами корпуса при помощи очень тонкой проволоки.

Кремний является основным полупроводниковым материалом, используемым на сегодняшний день в интегральных схемах, и последующие разъяснения будут относиться к кремнию, поскольку другие материалы (GaAs, GaN, SiC) в обозримом будущем будут играть второстепенную роль в производстве ИС.

Основным преимуществом ИС перед схемами на дискретных компонентах являются низкая стоимость при больших объемах производства, высокая надежность, малые габариты и высокое быстродействие. Поэтому основной тенденцией развития ИС является повышение уровня интеграции, плотности размещения, быстродействия и сложности схем, размещаемых на одном кристалле. В основном, этого удалось добиться путём уменьшения размера структур на кристалле. По финансовым соображениям предпринимаются постоянные попытки увеличения размера кремниевой пластины таким образом, чтобы размес-

тить на ней как можно большее количество кристаллов. На **Рис. 1.2** показано развитие этих тенденций с течением времени.

Как известно, основные типы транзисторов — биполярный и полевой. Аналогично ИС классифицируются как биполярные и МОП-микросхемы. В следующих подразделах описываются технологическая конструкция и принцип действия этих ИС.

1.3.1. Биполярные интегральные микросхемы

p-n-переход

Чистый кремний является полупроводником, электрическая проводимость которого достаточно мала при комнатной температуре. Это происходит главным образом из-за того, что в данном материале почти отсутствуют свободные носители зарядов. Однако, если один из тысячи атомов кремния будет заменён атомом примеси (например, атомом бора, фосфора или мышьяка), значение проводимости вырастет во много раз, потому что атом примеси имеет дополнительный носитель заряда (в зависимости от валентности атома, это может быть электрон или дырка), который может легко разорвать атомную связь и свободно перемещаться. В зависимости от типа примеси, свободный электрон или дырка, перемещаясь, оставляет после себя дырку или электрон соответственно, который, в свою очередь, готов принять другие носители заряда. Этот процесс называется рекомбинацией. Соответственно, легированная область кремния будет являться резистором с большим или меньшим сопротивлением, которое зависит от концентрации примеси (см. **Рис. 1.3**).



Рис. 1.3. Легированная область и её эквивалентная схема замещения.

Вторым важным свойством полупроводниковых материалов является то, что тип свободных носителей заряда, отвечающих за проводимость, — отрицательно заряженные электроны или положительно

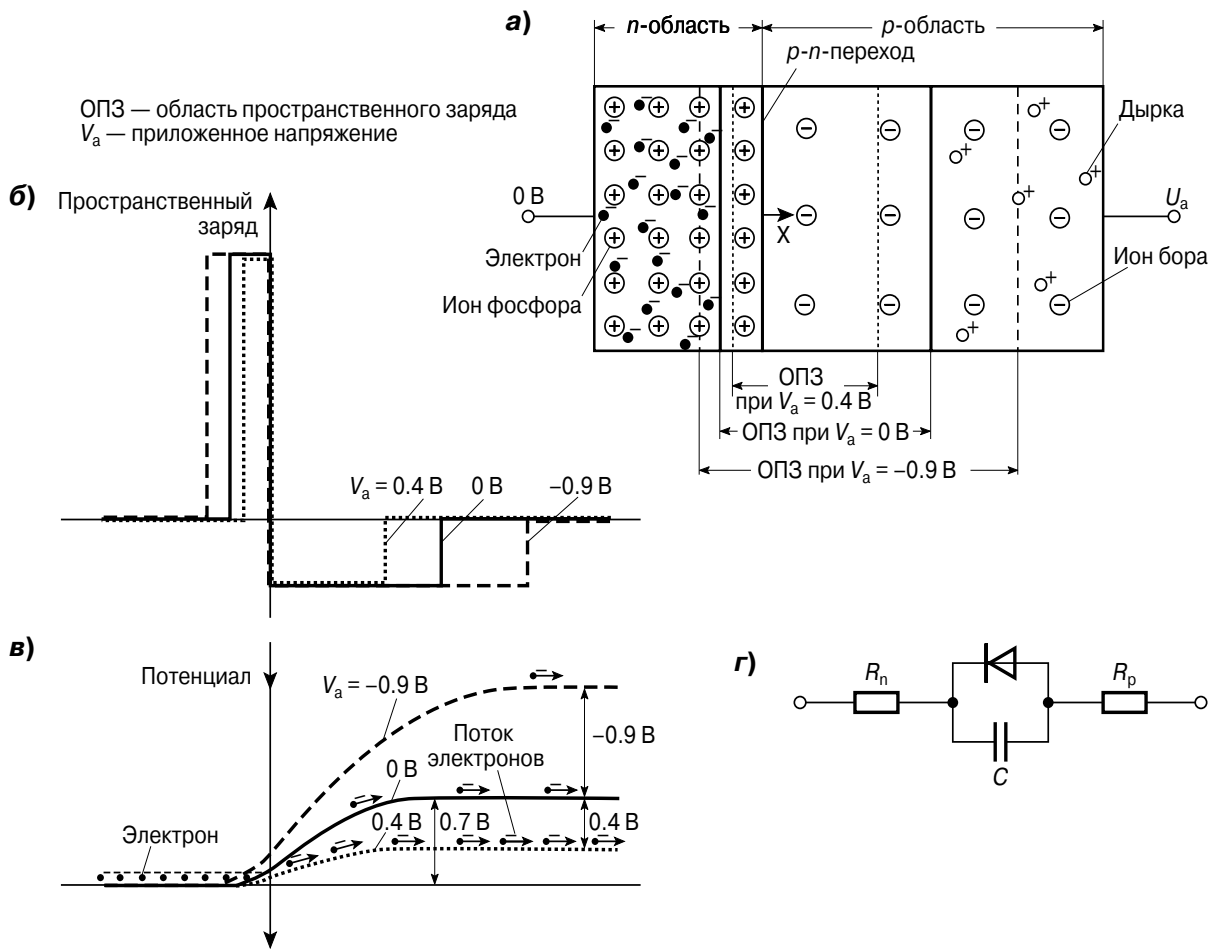


Рис. 1.4. Потенциальный барьер в полупроводнике:

a — структурная схема полупроводникового прибора; *б* — распределение заряда; *в* — распределение потенциала; *г* — эквивалентная схема замещения.

заряженные дырки — зависит от того, легирована ли кремниевая подложка пятивалентными (фосфор, мышьяк, сурьма) или трёхвалентными (бор) атомами примеси. Области, в которых основными носителями заряда являются электроны, называются областями *n*-типа (*n*-областями), а области, в которых основным носителями заряда являются дырки, — областями *p*-типа (*p*-областями).

n- и *p*-области изначально являются электрически нейтральными. Например, в областях *n*-типа свободные электроны, определяющие силу протекающего тока, скомпенсированы таким же количеством положительно заряженных ионов (доноров) фосфора, мышьяка или сурьмы, которые находятся в определённых областях кристаллической решётки кремния. В областях *p*-типа положительно заряженные подвижные носители заряда уравновешены неподвижными электронами (акцепторами).

В пограничном слое между *p*- и *n*-областями (*p-n*-переход) появляется потенциальный барьер, обусловленный диффузией электронов из *n*-области в *p*-область, а также диффузией дырок из *p*-области в *n*-область (см. Рис. 1.4). Диффундирующие в *p*-область электроны оставляют в *n*-области тонкий слой, обеднённый электронами, заряд которого определяется неподвижными положительно заряженными донорами (см. Рис. 1.4, *a*). Соответственно, в *p*-области, в зоне *p-n*-перехода, появляется отрицательно заряженный слой, обеднённый дырками. Таким образом, *n*-область получает больший потенциал, чем *p*-область (Рис. 1.4, *в*). Теперь для того чтобы диффундировать в *p*-область, электроны должны преодолеть этот потенциальный барьер. Когда величина потенциального барьера достигает определённого значения (для кремния оно составляет примерно 0.7 В), диффузия электронов или дырок прекращается.

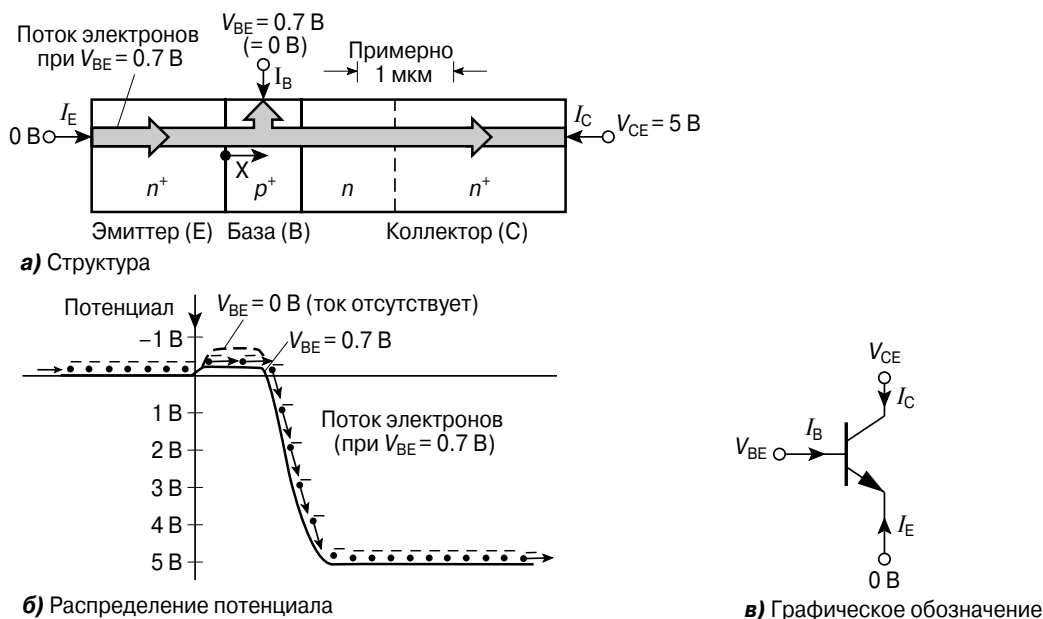


Рис. 1.5. Структура и принцип действия биполярного $n-p-n$ -транзистора.

Если приложить между p - и n -областями отрицательное напряжение, то потенциальный барьер на $p-n$ -переходе возрастёт (пунктирная линия на Рис. 1.4, в). В этом случае только небольшое количество электронов или дырок сможет преодолеть возросший потенциальный барьер (будет протекать малый обратный ток). Соответственно, если приложить положительное напряжение между p - и n -областями, то будет протекать большой ток. Таким образом, $p-n$ -переход работает как диод с прямым падением напряжения 0.7 В. С другой стороны, зона пространственного заряда $p-n$ -перехода, обеднённая свободными носителями заряда, представляет собой ёмкость. Следовательно, эквивалентная схема замещения $p-n$ -перехода состоит из диода и подключённой параллельно ему ёмкости (см. Рис. 1.4, г).

Пробой $p-n$ -диодов происходит при некотором значении обратного напряжения, которое для известных $p-n$ -переходов лежит в пределах от 5 до более чем 100 В. В некоторых биполярных схемах пробивное напряжение диода (стабилитрона) используется для ограничения падения напряжения вне зависимости от протекающего тока.

Помимо $p-n$ -диодов, во многих ИС используются диоды Шоттки. Они образованы алюминием и слабо легированной n -областью. Основное отличие от обычных диодов заключается в том, что они имеют меньшее прямое падение напряжения (примерно 0.4 В) при небольших напряжениях пробоя.

Биполярный транзистор

Биполярный $n-p-n$ -транзистор состоит из двух n -областей — коллектора и эмиттера, и находящейся между ними p -области — базы.

На Рис. 1.5 приведена общая структурная схема такого биполярного транзистора, а также пояснён его принцип действия. Когда напряжение, приложенное к базе транзистора, равно нулю ($V_{BE} = 0$), величина потенциального барьера между эмиттером и базой составляет 0.7 В, и лишь малая часть электронов может преодолеть данный барьер (см. Рис. 1.4). Транзистор находится в закрытом состоянии. При приложении напряжения $V_{BE} = 0.7$ В, величина потенциального барьера уменьшается, и из эмиттера в область базы течёт поток электронов. Если ширина базы, т.е. расстояние между $p-n$ -переходами эмиттер—база и база—коллектор, равняется нескольким десяткам микрометра, то почти все электроны диффундируют в переход база—коллектор, на котором они ускоряются и после прохождения области коллектора выводятся через контакт коллектора. И лишь небольшая часть электронов рекомбинирует с дырками, присутствующими в области базы.

Если переход эмиттер—база смещён в прямом направлении, то помимо потока электронов из области эмиттера в область базы, в обратном направлении, из области базы в область эмиттера, течёт поток дырок. Тем не менее, если концентрация примеси в

области эмиттера во много раз превышает концентрацию примеси в области коллектора, то поток дырок будет во много раз меньше электронного. Поток дырок из области базы в область эмиттера затем складывается с потоком, поступающим в базу (Рис. 1.5, а).

На Рис. 1.6 представлено семейство типичных характеристик биполярного транзистора. Важная особенность биполярного транзистора состоит в том, что можно управлять большим током коллектора при помощи малого тока базы. Отношение тока базы к току коллектора называют коэффициентом усиления по току. Его значение обычно составляет 100.

Биполярный транзистор можно включить в обратном направлении, т.е. поменять местами эмиттер и коллектор. Однако в этом случае коэффициент усиления по току значительно меньше (его значение примерно равно 1) из-за более низкой концентрации примеси в области эмиттера.

Структура биполярных ИС

Биполярная ИС состоит из множества биполярных транзисторов, расположенных на кремниевом кристалле недалеко друг от друга и соединенных проводящими дорожками в соответствии с функциональным назначением.

На Рис. 1.7 представлена типовая структура биполярного *n-p-n*-транзистора с окружающими его элементами в ИС. Предпо-

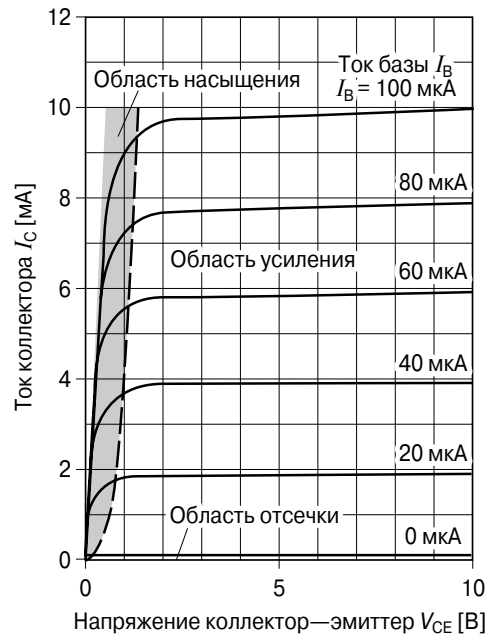


Рис. 1.6. Семейство характеристик биполярного *n-p-n*-транзистора.

ложим, что в этом примере коллектор транзистора соединён с базой соседнего транзистора алюминиевой перемычкой. Область *p⁺*, окружающая транзистор, электрически функционирует как два встречно включенных диода, обеспечивая изоляцию соседних транзисторов.

Изолирующая область и кремниевая подложка с проводимостью *p*-типа, соединенная с данной областью, поддерживаются под самым низким потенциалом в схеме.

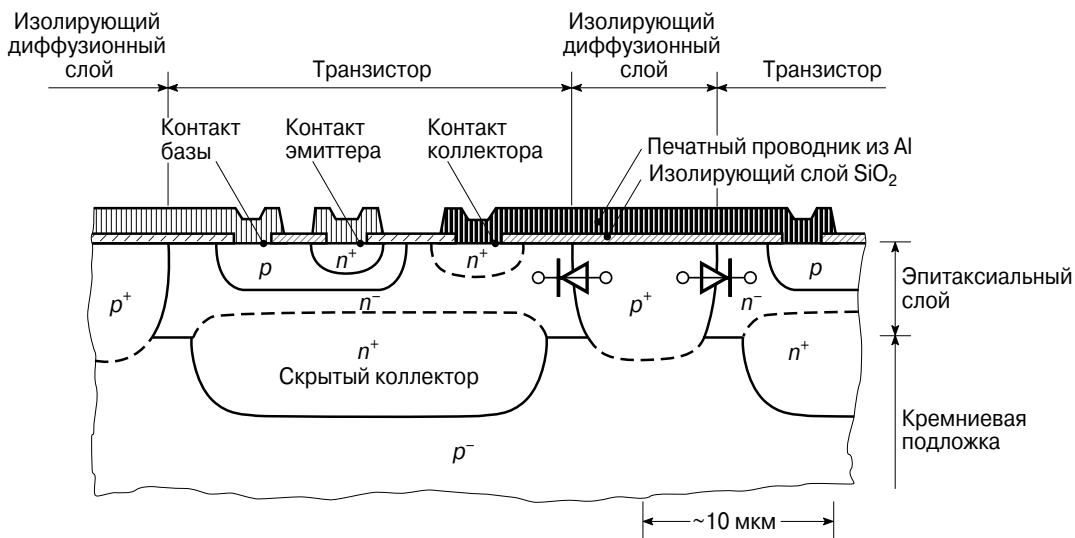


Рис. 1.7. Строение интегрального биполярного *n-p-n*-транзистора.

На практике, большая часть транзисторов — это *n-p-n*-транзисторы, поскольку они имеют лучшие электрические характеристики и более просты в изготовлении, чем *p-n-p*-транзисторы.

Расположение отдельных легированных областей на **Рис. 1.7** определяется, среди прочих факторов, внешними требованиями, которым должен удовлетворять процесс интеграции: контакты располагаются только на поверхности кремния, а для изоляции коллекторных областей каждый транзистор окружается областью, легированной примесью *p*-типа.

Например, чтобы обеспечить малое значение сопротивления коллектора, требуется скрытый слой *n*-типа с большим содержанием примесей (скрытый коллектор). Это означает, что после создания скрытого слоя, поверх него выращивается эпитаксиальный слой монокристаллического кремния, в котором формируются база и эмиттер. Изолирующая *p*-область, которая проходит через весь эпитаксиальный слой, занимает относительно много места. В связи с этим, транзисторы в ИС, имеющие общий коллектор, располагаются в одном кармане *n*-типа.

Для того чтобы организовать изолирующий слой между поверхностью кремния и проводящей дорожкой, расположенной на его поверхности, используют слой, изготовленный из диоксида кремния SiO_2 толщиной 0.5 мкм, который можно получить путём термического окисления поверхности кремния. В данном случае изготовление контактов требует использования фотолитографических масок для того, чтобы протравливать отверстия в слое SiO_2 . В общем случае от каждого транзистора в ИС требуется вывести три контакта в слой межсоединений (требуется много места). Например, если соседние транзисторы имеют общую базу, то можно уменьшить число контактов до 5.

Соединительные дорожки в основном выполняются из алюминия. Сопротивление R проводящей дорожки толщиной d , шириной b и длиной l равно:

$$R = \rho \cdot l / d \cdot b,$$

где ρ — удельное сопротивление алюминия. Отношение l/b можно представить как количество квадратов (\square) со стороной b , составляющих дорожку проводника. Тогда отношение ρ/d — это сопротивление одного такого квадрата. Данное сопротивление на-

зывается поверхностным сопротивлением и измеряется в Ом/ \square . Алюминиевая дорожка толщиной 1 мкм имеет поверхностное сопротивление 30 Ом/ \square . Это означает, что участок дорожки шириной 5 мкм и длиной 50 мкм (что эквивалентно 10 квадратам) имеет сопротивление 0.3 Ом. Для получения меньшего сопротивления и лучшей устойчивости к электромиграции в передовых технологиях используется медь (Cu) или золото (Au).

Более сложные биполярные ИС, такие как логические матрицы или память не могут обойтись только одним слоем металлизации. Используя изолирующие слои, нанесённые между слоями металлизации, становится возможным реализовать многослойную разводку схемы. Контактные отверстия между слоями металлизации называются сквозными межсоединениями. Они создаются точно так же, как и контактные окна для соединения с кремнием.

В отличие от структуры, приведенной на **Рис. 1.7**, в современных биполярных схемах можно обнаружить два нововведения: это использование оксидной изоляции соседних транзисторов и использование выводов базы и эмиттера из поликремния (**Рис. 1.8**). Обе разработки привели к значительному уменьшению размеров и, как следствие, к уменьшению паразитных ёмкостей и сопротивлений, что сделало возможным изготовление более быстродействующих схем. Кроме того, использование контактов эмиттера из поликремния привело к улучшению характеристик транзистора.

Очевидно, что биполярные ИС должны включать в себя не только транзисторы, но и другие элементы, которые можно реализовать, используя легированные области по отдельности либо в сочетании. В качестве диода можно задействовать переход база—эмиттер (возможно при закороченном переходе база—коллектор для увеличения прямого тока) или контакт алюминия с n^- -областью. Конденсатор можно получить, используя *p-n*-переход в обратном смещении (см. **Рис. 1.4, г**) или слой диоксида кремния в качестве диэлектрика между обкладками из n^+ -области и алюминия. Резисторы можно получить, используя легированные области заданных размеров, электрически изолированные от окружающих элементов обратным смещённым *p-n*-переходом (см. **Рис. 1.3**). При использовании высоко легированных

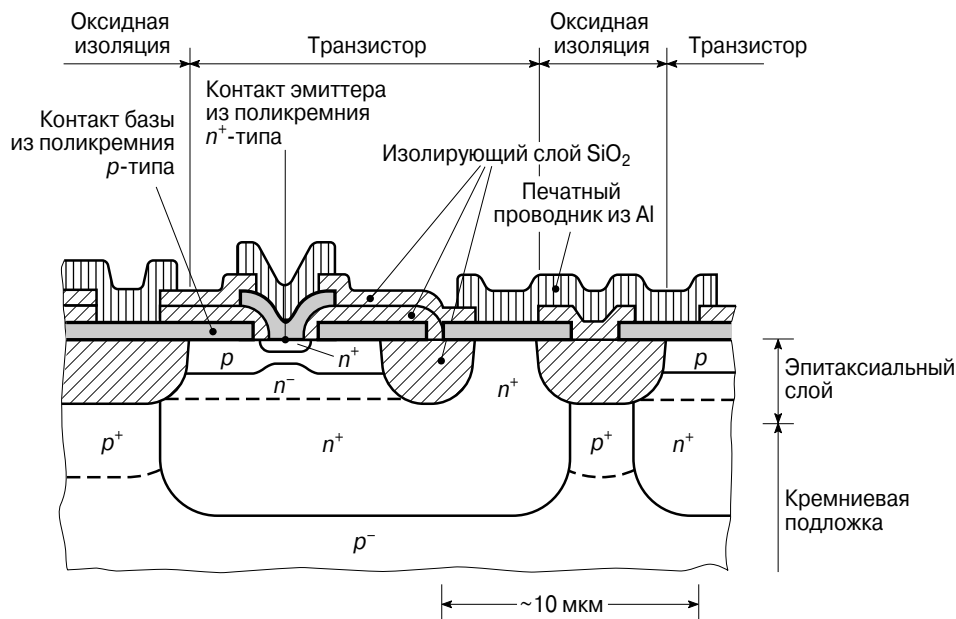


Рис. 1.8. Строение интегрального биполярного n - p - n -транзистора с контактами базы и эмиттера, изготовленными из поликремния.

областей n^+ (см. **Рис. 1.7**) можно получить удельные сопротивления в диапазоне от 2 до 40 Ом/см, в то время как обычное легирование позволяет получить сопротивление в диапазоне от 100 до 300 Ом/см. Из **Рис. 1.7** видно, что если ток протекает горизонтально через узкую зону базы под эмиттером, то этот участок имеет сопротивление порядка 5 Ом/см (пинч-резистор), кроме того, данное сопротивление нелинейно и имеет малое напряжение пробоя (5...8 В). С другой стороны, это предоставляет возможность управлять величиной сопротивления, прикладывая положительное напряжение к n^+ -области эмиттера (полевой транзистор с управляющим p - n -переходом). Большие значения сопротивлений порядка МОм/см могут быть получены путём создания поликремниевых структур с низкой степенью легирования на подложке из диоксида кремния (SiO_2).

В заключение следует отметить, что биполярные p - n - p -транзисторы могут быть изготовлены на том же самом кристалле, но их структура будет отличаться от приведённой на **Рис. 1.7**. Если убрать скрытый слой под коллектором, то мы получим вертикальную структуру p - n - p -транзистора (подложечный p - n - p -транзистор). Ещё одно решение — расположить две легированные области p -типа на расстоянии нескольких микрометров внутри кармана n -типа (латеральный p -

n - p -транзистор). Обе структуры p - n - p -транзисторов, изготовленные на одном кристалле, имеют значительно более низкие значения коэффициента усиления по току и максимальной рабочей частоты, чем изготовленные на том же кристалле n - p - n -транзисторы. Но p - n - p -транзисторы могут изготавливаться без дополнительных этапов производства, что обеспечивает преимущества при их использовании в некоторых приложениях (например в микросхемах интегральной инжекционной логики (I^2L)).

Технология изготовления биполярных схем

Биполярные ИС используются как в аналоговых, так и в цифровых схемах. В то время как в аналоговых схемах биполярные транзисторы работают в режиме усиления, в цифровых схемах они функционируют как ключи, находясь в одном из двух состояний: в режиме отсечки и в режиме насыщения.

Биполярные схемы имеют следующие преимущества перед МОП-схемами:

- возможность управления большими токами;
- наличие высокостабильного и воспроизводимого порогового напряжения в виде прямого падения напряжения база—эмиттер, составляющего 0.7 В;
- малое время переключения или высокая рабочая частота биполярных транзисторов.

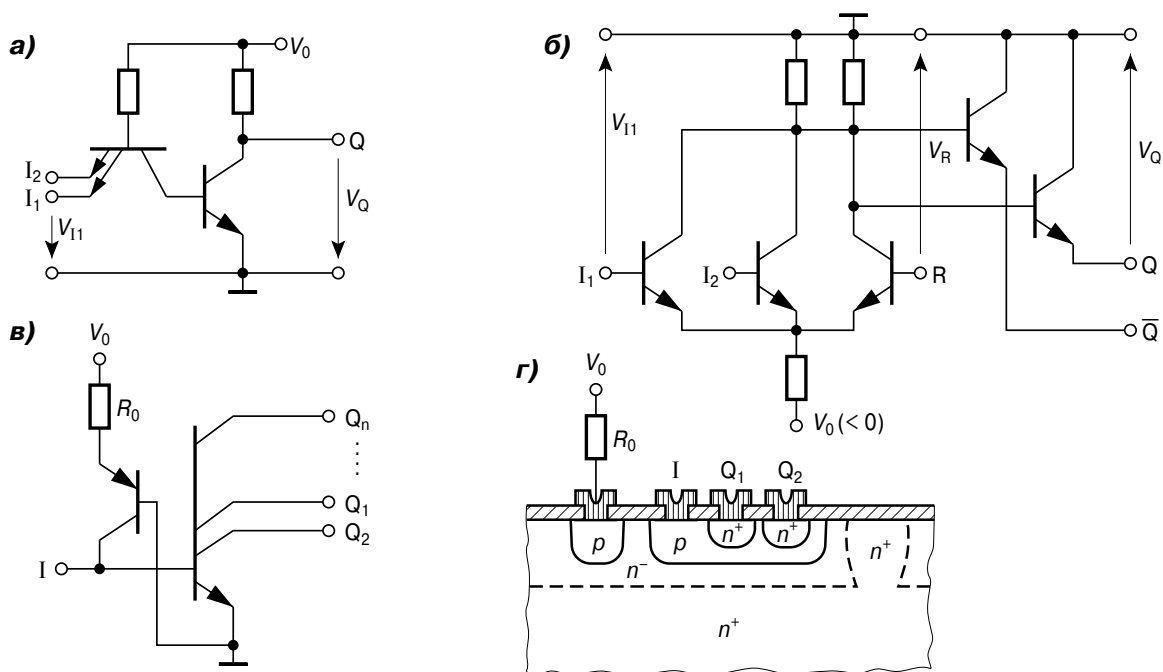


Рис. 1.9. Элементарные вентили, выполненные по технологии ТТЛ (а), ЭСЛ (б) и И²Л (в и г).

Несмотря на большое разнообразие типов и областей применения, аналоговые схемы чаще всего состоят из относительно простых базовых схем, уже знакомых нам по схемам на дискретных компонентах. Вместе с тем, чаще применяются базовые схемы, которые сильнее выигрывают при переходе на интегральную технологию, при которой характеристики элементов схемы и температура кристалла подвержены лишь ограниченному случайным изменениям, а состояние поверхности кристалла и величина сопротивлений поддерживаются с высокой точностью. Здесь необходимо упомянуть токовые зеркала и дифференциальные усилители, а также умножители и операционные усилители. С помощью биполярной технологии наиболее эффективно осуществляется интеграция оконечных усилительных каскадов, которые имеют низкое выходное сопротивление. В случае цифровых схем (логические микросхемы и микросхемы памяти) может быть выделено несколько семейств по типу элементарного вентиля. Наиболее важными семействами логических ИС являются ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и И²Л (интегральная инжекционная логика).

На Рис. 1.9 показаны элементарные ТТЛ-, ЭСЛ- и И²Л-вентили. На Рис. 1.9, а приведена схема ТТЛ-элемента И-НЕ,

на Рис. 1.9, б — схема ЭСЛ-элемента ИЛИ/ИЛИ-НЕ, а на Рис. 1.9, в — схема И²Л-инвертора. Микросхемы ЭСЛ характеризуются чрезвычайно высоким быстродействием. Возможная задержка на логическом элементе составляет порядка 100 пс. Необходимо отметить, что технология И²Л характеризуется меньшими размерами и энергопотреблением, но она медленнее, чем ЭСЛ-технология.

1.3.2. Интегральные МОП-микросхемы

МОП-транзисторы

n-канальный МОП-транзистор состоит из двух областей *n*-типа (стока и истока), между которыми находится область канала *p*-типа, а над ней расположен изолированный управляющий электрод — затвор.

На Рис. 1.10 представлена структура МОП-транзистора и принцип его действия. На Рис. 1.10, а показаны процессы, происходящие в транзисторе при приложении к нему напряжения, на Рис. 1.10, б — график распределения потенциала вдоль поверхности кристалла кремния и электронный ток от истока к стоку. На Рис. 1.10, в приведено графическое обозначение МОП-транзистора. Вывод V_{BS} , как правило, не изображается. Буква *n* ставится для *n*-канальной структуры. Аналогично биполярному транзистору, управление током через МОП-

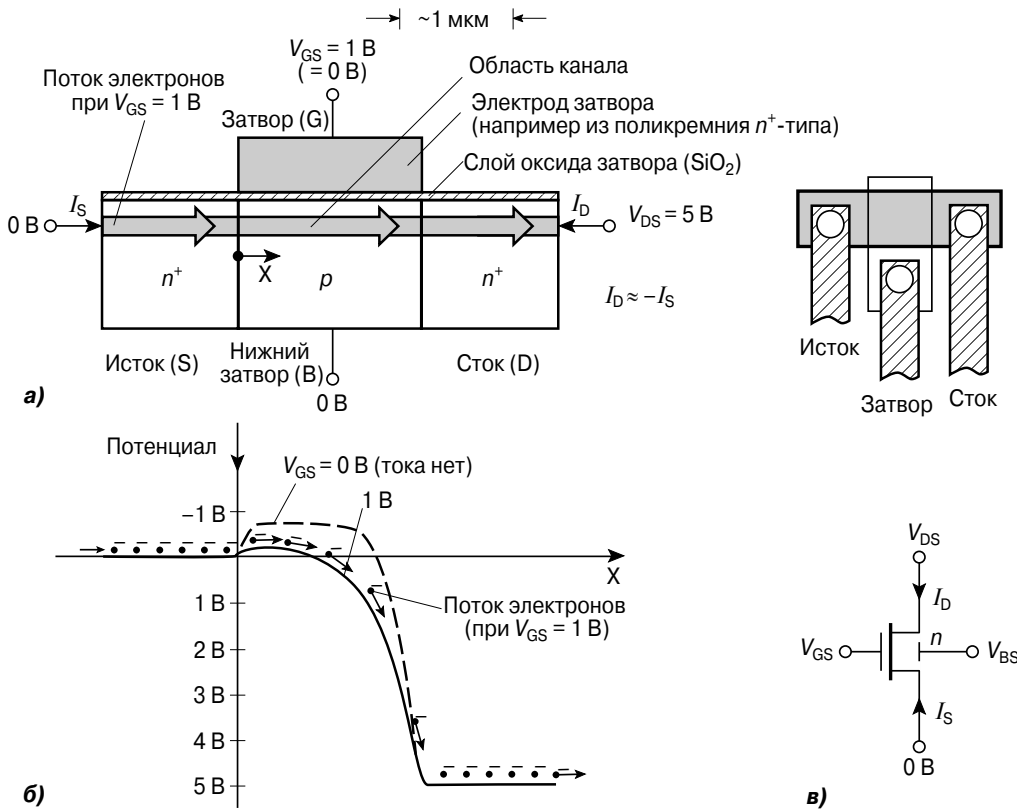


Рис. 1.10. Структура (а), принцип работы (б) и графическое изображение (в) МОП-транзистора.

транзистор осуществляется соответственно увеличением или уменьшением напряжения между затвором и истоком. Однако отличие от биполярного транзистора состоит в том, что управляющее напряжение приложено к изолированному электроду затвора над *p*-областью, а не к самой *p*-области. На

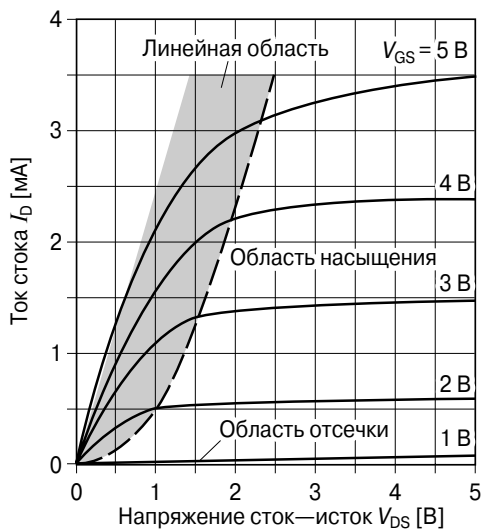


Рис. 1.11. Характеристики *n*-канального МОП-транзистора.

Рис. 1.11 представлено семейство характеристик. Они построены для транзистора с толщиной оксида затвора 20 нм, длиной канала 1 мкм и шириной канала 10 мкм. Различные механизмы управления также влияют на существенную разницу в поведении МОП-транзистора в сравнении с биполярным:

- Поскольку затвор изолирован, ток через него не течёт. Это означает, что при управлении МОП-транзистором не потребляется мощность. Ток через затвор течёт только при переключениях и заряжает или разряжает ёмкость перехода исток—затвор.
- Поскольку положительное напряжение на затворе притягивает к поверхности кристалла кремния электроны, влияющие на величину тока от истока к стоку, а, с другой стороны, дырки, присутствующие в избытке в *p*-области, отталкиваются от поверхности (зона объёмного заряда), то токовый канал вместе с *n*⁺-областями истока и стока электрически изолирован от окружающей *p*-области (снизу и по сторонам — зоной объёмного заряда, а сверху — подзатворным диэлектриком). Так как затвор тоже изолирован, МОП-транзистор представляет со-

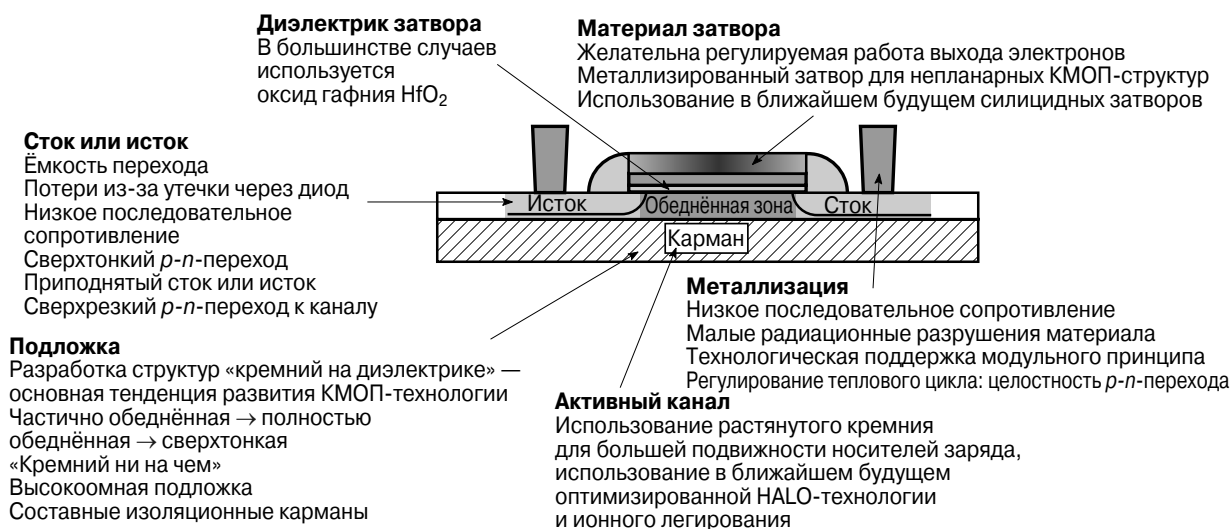


Рис. 1.12. Усовершенствования в критических областях при постоянном уменьшении размеров структуры.

бой самоизолирующийся, а следовательно, компактный компонент, что очень важно для интегральных схем.

- Падение части управляющего напряжения затвора на подзатворном оксиде и области объёмного заряда, расположенной под затвором, сильно зависит от концентрации легирующей примеси. Поэтому напряжение, при котором начинает протекать ток (пороговое напряжение), для биполярного транзистора почти не зависит от технологии производства и составляет около 0.7 В, а в случае МОП-транзисторов — оказывается зависимым от технологии изготовления. Поскольку размеры структуры малы, пороговое напряжение зависит от длины и ширины канала (что является недостатком). С другой стороны, появляется возможность варьировать пороговое напряжение транзисторов (преимущество). Например, внедрение фосфора в область канала n -канального транзистора может использоваться для смещения порогового напряжения в область отрицательных значений.
- По той же причине (падение напряжения на подзатворном диэлектрике) крутизна передаточной характеристики $\Delta I_D / \Delta V_{GS}$ при сопоставимых условиях меньше, чем крутизна $\Delta I_C / \Delta V_{BE}$ биполярного транзистора. Сопротивление насыщения открытого МОП-транзистора

больше, чем биполярного (сравните характеристики на **Рис. 1.6** и **Рис. 1.11**). По этой причине МОП-транзисторы меньше подходят для использования в качестве драйверов тока.

- Параллельно с непрерывным сокращением размеров структуры происходит усовершенствование всех критических областей МОП-транзистора (**Рис. 1.12**). За счёт снижения управляющего напряжения (с 5 до 3.3 В, и до ≈ 1 В) была снижена мощность, потребляемая при переключениях. В будущем, при уменьшении толщины оксидного подзатворного слоя, благодаря применению новых материалов будут улучшены характеристики транзистора с коротким каналом. При использовании для изготовления затвора материалов с низким активным сопротивлением повышается скорость переключения транзисторов. Путем оптимизации состава легирующих примесей были уменьшены паразитные сопротивления и расширены рамки применимости устройств. В совокупности все улучшения приведут к тому, что КМОП-схемы, особенно КМОП-схемы «кремний на изоляторе» (КНИ, *англ.* SOI — Silicon-On-Insulator), также станут использоваться на более высоких частотах, там где раньше применялись только биполярные схемы и схемы на базе соединений $A^{III}B^V$ (**Рис. 1.13**).

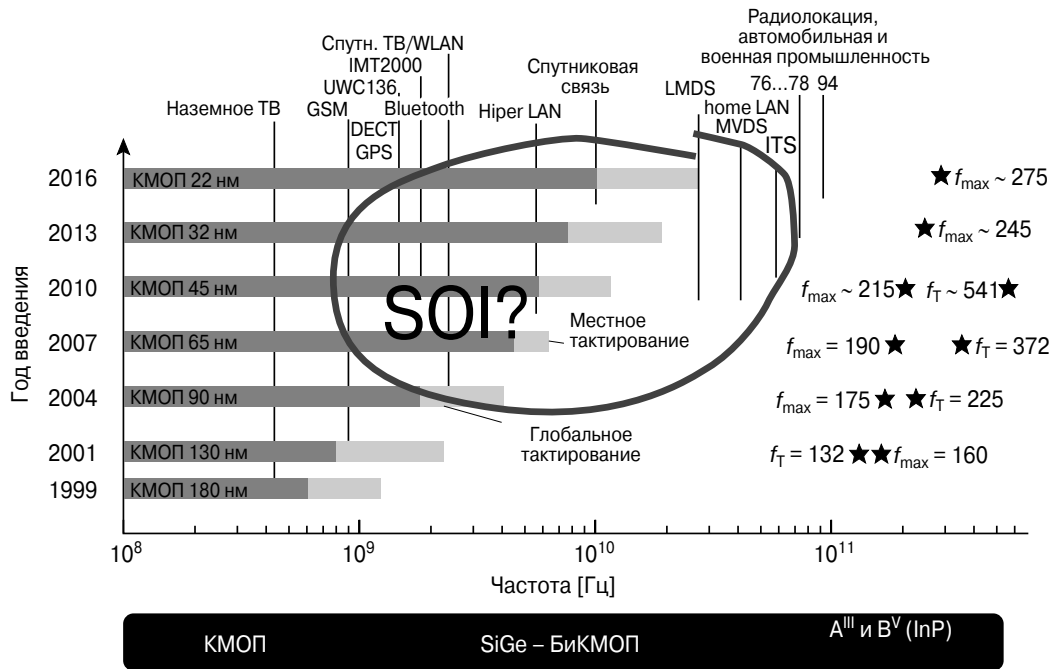


Рис. 1.13. Цифровые ИС заменяют аналоговые ВЧ ИС.

МОП-схемы

Интегральные МОП-схемы состоят из множества МОП-транзисторов, расположенных рядом друг с другом на кристалле кремния и соединённых металлическими проводниками в соответствии с требуемыми функциями схемы.

На Рис. 1.14 представлена типовая структура *n*-канального транзистора и непосредственно окружающей его области в МОП ИС. Электрически транзистор является полностью симметричным; сток и исток взаимозаменяемы. В этом примере предполагается, что область стока связана с поликремниевой «проводящей дорожкой» при помощи алюминиевой проводящей дорожки.

Как уже упоминалось, МОП-транзистор является самоизолирующимся элементом схемы. Необходимо только, чтобы слой оксида между соседними транзисторами был толще, чем оксидный слой затвора — благодаря этому проводящая дорожка, проходящая над слоем оксида, не сможет действовать как управляющий электрод, наводя проводящий канал между транзисторами. В результате данная структура становится более компактной по сравнению с интегральным биполярным транзистором (см. Рис. 1.7 и Рис. 1.8). Дополнительное снижение объёма появляется из-за того, что нет необходимости обеспечивать контакт с проводящей дорожкой отдельно для каждо-

го стока, затвора или истока. Вместо этого можно реализовать электрические соединения путём продления области истока или стока или электрода затвора соответствующим образом за границы области транзистора. Однако сопротивление таких проводящих дорожек примерно в тысячу раз выше, чем у алюминиевых проводящих дорожек (примерно 30 Ом/). Можно снизить сопротивление слоя на порядок (около 3 Ом/) при помощи силицидных слоев (например, TaSi₂, MoSi₂, TiSi₂). Кремниевые или силицидные *n*⁺-дорожки применяются для экономии места в МОП-схемах при организации соединения с землёй.

В зависимости от приборов, расположенных на кристалле — только *n*-канальные транзисторы или только *p*-канальные транзисторы или *n*-канальные и *p*-канальные транзисторы, — мы имеем дело с *n*-МОП или *p*-МОП или КМОП-схемами соответственно. В настоящее время КМОП является доминирующей технологией, потому что она имеет меньшее энергопотребление и предоставляет разработчикам схем множество дополнительных возможностей.

Если *n*-канальные транзисторы КМОП-схемы формируются в подложке *p*-типа, как показано на Рис. 1.15, то *p*-канальные транзисторы должны размещаться в *n*-карманах, поскольку для самоизоляции *p*-канальных транзисторов требуется *n*-область.

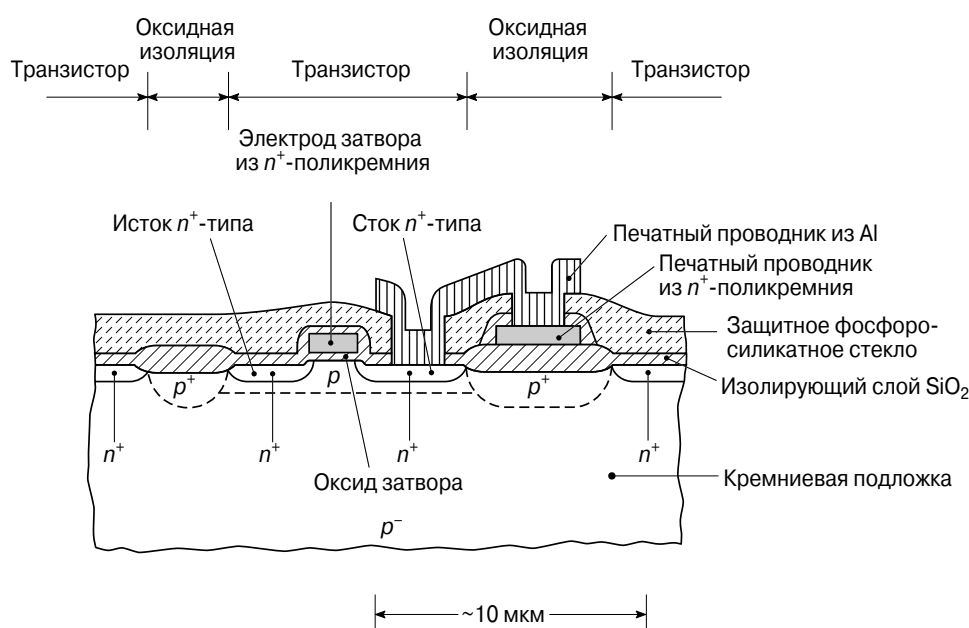


Рис. 1.14. Типовая структура n -канального МОП-транзистора.

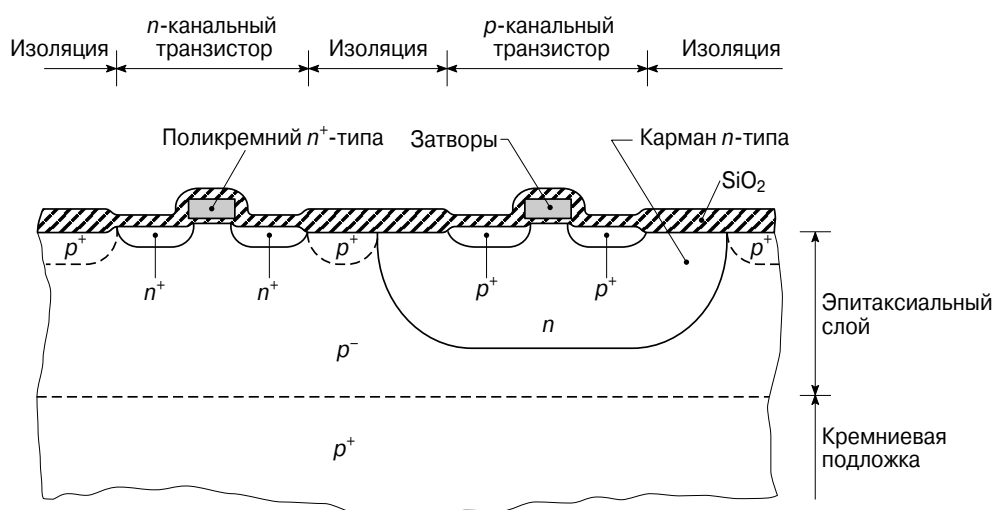


Рис. 1.15. n - и p -канальные транзисторы в КМОП-схеме.

Для того чтобы постоянно поддерживать p - n -переходы карманов в закрытом состоянии, к любой p -подложке или p -карману прикладывается самый низкий потенциал в схеме (в общем случае 0 В), тогда как любая n -подложка или n -карманы должны иметь самый высокий потенциал в схеме (V_{DD}).

Для того чтобы избежать влияния помех (например, защелкивания), предпочтительнее использовать слабо легированный эпитаксиальный слой на сильно легированной подложке, а не слабо легированную подложку.

Как и в случае с биполярными схемами, использование МОП-схем позволяет реа-

лизировать диоды, резисторы и конденсаторы соответствующим расположением легированных областей, а также проводящих и изолирующих структур. Например, тонкий слой оксида затвора позволяет получить относительно высокую удельную ёмкость, требуемую в микросхемах памяти. Возможность реализации памяти ЭСППЗУ при помощи плавающего затвора будет обсуждаться позже.

С помощью нескольких дополнительных технологических операций можно совместить на одном кристалле как МОП- так и биполярные транзисторы (технология БиКМОП).

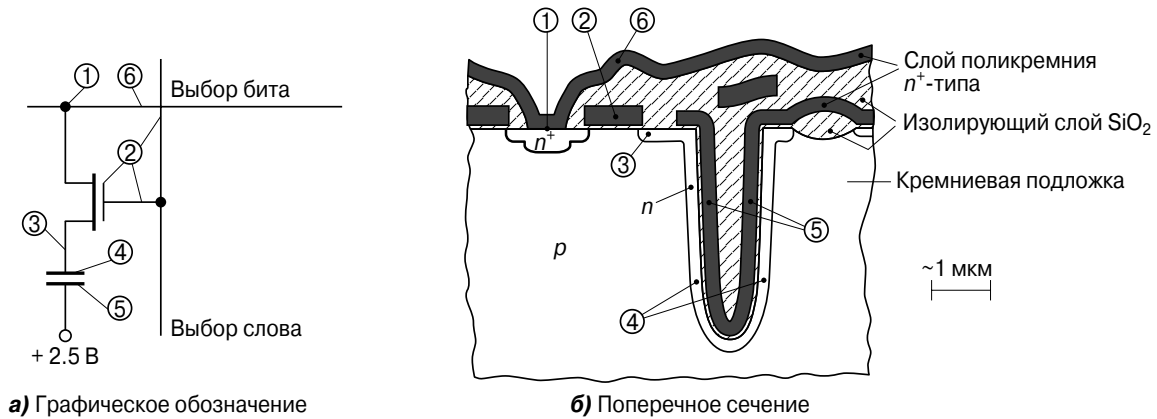


Рис. 1.16. Ячейка динамической памяти.



Рис. 1.17. Методы разработки специализированных ИС.

Технология изготовления МОП-схем

МОП-схемы используются, главным образом, в цифровых схемах. Однако на МОП-структурах все чаще реализуются и аналоговые функции. Благодаря компактности МОП-транзисторов, МОП-схемы преобладают среди ИС высокой степени интеграции. Здесь из-за малого энергопотребления и удобства разработки преобладает КМОП-технология.

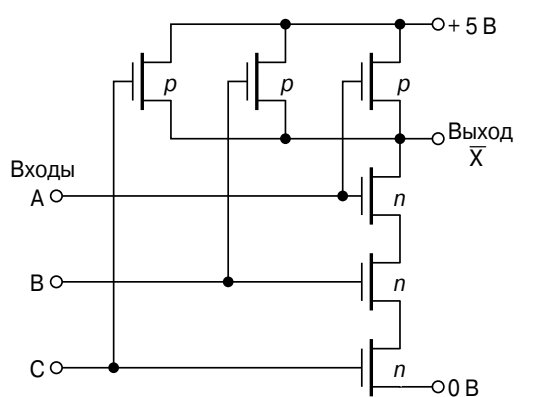
При разработке схем различают стандартные и специализированные ИС. Стандартные ИС, такие как модули памяти (динамическая память, Рис. 1.16) или микрокомпьютерные устройства (микроконтроллеры, микропроцессоры, периферийные модули) разрабатываются по классической методике, в случае же специализированных ИС используется усовершенствованный процесс разработки, который обращается к ранее разработанным базовым схемам с определёнными функциями. На Рис. 1.17 показаны различные методы разработки, которые применяются в настоящее время для создания специализированных ИС. Чем больше разработано базовых схем с использованием стандартизованных базовых функций, тем выше уровень рационализации процесса разработки. Все большее значение приобретают стандартные ячейки, которые собираются в библиотеки. На Рис. 1.19 по-

казан пример стандартной ячейки — логический элемент И-НЕ.

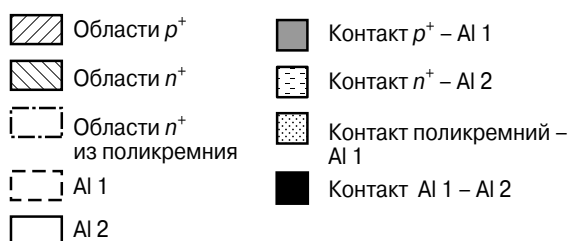
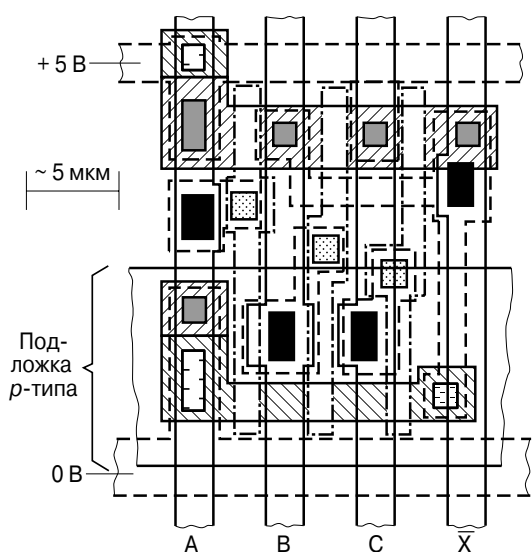
На Рис. 1.19, а приведена принципиальная схема ячейки памяти, а на Рис 1.19, б показана её топология. Для уменьшения размеров, необходимых для заданного объёма памяти, в приведенном выше примере ячейки динамического ОЗУ конденсатор продлевается вниз, в область кремниевой подложки, приблизительно на 4 мкм.

Увеличение ёмкости памяти ячеек динамического ОЗУ происходит в вертикальном направлении, как вниз (канавки), так и вверх (стеки) от транзистора. В обоих случаях целью является достижение как можно большей ёмкости памяти — и, следовательно, обеспечение достаточной помехоустойчивости — в пределах наименьшей возможной площади. Использование третьего измерения для указанного увеличения объёма памяти связано с накоплением значительного производственного опыта, позволившего получать чрезвычайно высокие значения соотношений ширина/глубина, а также изготавливать специальные материалы, толщина слоёв которых составляет всего несколько атомов.

Кроме устройств памяти, таких как динамическое и статическое ОЗУ, важную роль играет энергонезависимая память. В энергонезависимой памяти для сохранения данных используются либо изменения в кристаллической структуре, либо накоп-



а) Электрическая схема



б) Топология (вид сверху)

Рис. 1.19. Элемент 3-И-НЕ в качестве примера стандартной ячейки.

ление заряда в изолированной (режим чтения) области.

К энергонезависимой памяти, в частности, относятся:

- ЭППЗУ (EPROM) — электрически программируемое ПЗУ;
- ЭСППЗУ (EEPROM) — электрически программируемое и стираемое ПЗУ;
- флэш-память (FLASH) — разновидность памяти ЭСППЗУ, отличающаяся программированием и технологией изготовления схемы, а также компактностью;

- NROM — элемент памяти, в котором заряд накапливается в слое диэлектрика, а не в проводящем слое;
- FeRAM — резистивное запоминающее устройство, в котором данные хранятся в кристаллической решетке ферроэлектрика (сегнетоэлектрика);
- MRAM — данные хранятся в структуре магнитного сопротивления;
- PRAM — память с фазовым переходом (параметрическое ОЗУ);
- OUM (Ovonyx United Memory) — данные хранятся в структуре халькогенидного кристалла, которая программируется посредством нагревания;
- Polymer — данные хранятся в слое полимера — принцип, схожий с OUM;
- Quantum dots — квантовые точки (применимость пока не определена).

Основное преимущество энергонезависимой памяти заключается в том, что даже если батарея или источник питания перестает действовать, данные в памяти сохраняются. По этой причине энергонезависимая память используется в таких важных областях, как мобильная телефония, цифровые камеры и смарт-карты.

Работа элементов памяти, выполненных на базе ЭСППЗУ/флэш/NROM, основана на изменении порогового напряжения транзистора с помощью изолированного заряда в области затвора (Рис. 1.18).

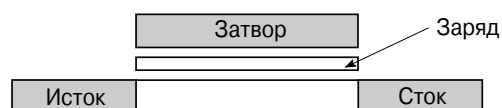


Рис. 1.18. Структура ячейки памяти типа ЭСППЗУ, флэш или NROM.

Этот заряд изменяется во время записи или удаления данных посредством горячих носителей заряда или туннельных токов. В обоих случаях требуются относительно высокие напряжения или уровни энергии. По этой причине важной задачей при разработке является оптимизация условий стирания и программирования.

Другие типы энергонезависимой памяти основаны, главным образом, на изменении сопротивления соответствующего слоя, которое осуществляется при помощи электрических полей или нагревания.

1.4. Другие полупроводниковые приборы

В рамках этой книги невозможно подробно рассмотреть все типы полупроводниковых приборов. Поэтому далее приводится краткое описание некоторых из них. При этом основное внимание будет уделено их техническому и историческому значению. Дополнительную информацию можно найти в Глоссарии (см. главу 16).

1.4.1. Полупроводниковые приборы без специальной структуры

Большинство полупроводниковых приборов имеют специально созданные структуры, например поверхностный слой, или работают на полевом эффекте, но могут использоваться и другие свойства полупроводниковых материалов.

Позисторы

Большинство проводников являются термисторами, т.е. их проводимость изменяется с изменением температуры. Однако, в общем случае, значение температурного коэффициента их проводимости составляет менее 1%/К. Простые задачи измерения и регистрации температуры требуют использования приборов с большим температурным коэффициентом. При изучении одного из керамических материалов (титанита бария), который в конце 30-х годов прошлого века использовался для производства конденсаторов, было обнаружено, что он проявляет полупроводниковые свойства при легировании определёнными материалами. Важное свойство данного материала состояло в том, что при температурах выше точки Кюри наблюдался резкий скачок значения температурного коэффициента. Приборы, в которых используется этот материал, были названы позисторами (термисторами с положительным температурным коэффициентом, PTC — Positive Temperature Coefficient). Они входят в семейство термисторов (терморезисторов). Начиная с 1963 года стало возможным изменять температуру Кюри, вследствие чего стали изготавливать термисторы с различными характеристиками. Современные позисторы состоят из сплавов карбоната бария и некоторых оксидов металлов. Начиная с конца 60-х годов прошлого века, в качестве мате-

риала для позисторов использовался легированный кремний. Позисторы применяются в основном как датчики температуры.

Негисторы

В 1941 году при исследовании магнетомягкого феррита неожиданно были обнаружены смеси, проводимость которых увеличивалась с ростом температуры. Термисторы, изготовленные из таких материалов, называются негисторами (термисторами с отрицательным температурным коэффициентом, NTC — Negative Temperature Coefficient). Несмотря на то что полупроводниковые материалы также обладают отрицательным температурным коэффициентом, они не могут использоваться в качестве резисторов из-за сильной нелинейности характеристик. Негисторы применяются в качестве датчиков температуры или при последовательном включении с позисторами для их защиты от пусковых токов при низких температурах.

Варистор

На практике, в большинстве случаев сопротивление не зависит от напряжения (при постоянной температуре). С другой стороны, в варисторах (от *англ.* varistor (variable resistor) — переменный резистор) существует зависимость омического сопротивления от напряжения, в некоторых случаях — сильная. Как правило, сопротивление варистора уменьшается с увеличением напряжения, и данная характеристика является симметричной (т.е. варисторы не имеют ярко выраженной полярности). Для производства первых варисторов использовался карбид кремния. Сегодня варисторы преимущественно изготавливаются из оксидов металла, например оксида титана или оксида цинка, которые в общем случае имеют более высокую крутизну характеристики. В результате спекания материала образуется множество отдельных зёрен, на границах которых и проявляется варисторный эффект. Таким образом, варистор обычно состоит из множества последовательно и параллельно соединённых микроваристоров. В основном, варисторы используются для защиты схем или отдельных компонентов от перенапряжений. Металлооксидные варисторы могут также использоваться для стабилизации напряжения.

Фоторезисторы

Фотоэлектрический эффект, открытый Альбертом Эйнштейном, проявляется в полупроводниках, когда падающие фотоны имеют достаточную энергию для высвобождения валентных электронов из узлов кристаллической решетки. Эти подвижные свободные носители заряда увеличивают внутреннюю проводимость материала до тех пор, пока они не рекомбинируют после дрейфа в течение большого или малого промежутка времени. Данный эффект сделал возможным появление фоторезисторов. Они состоят из смешанных кристаллов, не имеют p - n -перехода и изготавливаются из селенида кадмия или сульфида кадмия, сопротивление которых резко уменьшается при падении на них видимого света. Такими же свойствами обладают структуры, состоящие из сульфида свинца или антимонида индия, при падении на них инфракрасного излучения.

1.4.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковые диоды имеют граничный слой и могут использоваться не только в качестве диода, но также и для других целей.

Туннельные диоды (диоды Эсаки)

В 1954 году Уильям Шокли выдвинул предположение, что в некоторых материалах скорость миграции электронов будет уменьшаться под воздействием сильных электрических полей. Компонент с такими свойствами будет иметь на вольтамперной характеристике участок с отрицательным наклоном, т.е. отрицательное дифференциальное сопротивление. В 1958 году, японский инженер Лео Эсаки (Leo Esaki) подтвердил идею Шокли при проведении экспериментов с сильно легированными p - n -переходами. Из-за малой толщины граничного слоя, которая является следствием высокой степени легирования, даже при малых напряжениях (при которых диффузионный ток будет фактически равен нулю) возникает электрическое поле большой напряжённости. Это сильное электрическое поле изначально обеспечивает возникновение так называемого туннельного эффекта — явления квантовой механики, при котором электроны в определённом направлении «пробиваются» через граничный слой. С увели-

чением напряжённости электрического поля туннельный эффект фактически исчезает, таким образом возникает спад тока (см. **Рис. 1.20**). Первый туннельный диод для

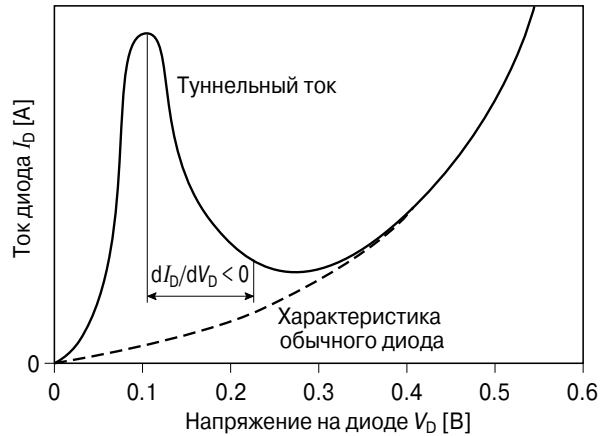


Рис. 1.20. Вольтамперная характеристика туннельного диода.

микроволновой техники появился на рынке в 1960 году. В 1973 году Эсаки, совместно с американцем Иваром Гайвером (Ivar Giaever), исследовавшим явление туннельного эффекта в полупроводниках, был награждён Нобелевской премией по физике.

Варикапы

Как видно из названия, варикап — это диод с изменяемой ёмкостью p - n -перехода. Данное свойство основывается на нелинейности характеристик слоя p - n -перехода: с увеличением обратного напряжения зона перехода становится шире, что приводит к снижению ёмкости. Если используется подходящий профиль распределения легирующей примеси, то ёмкость перехода может изменяться в широком диапазоне (см. **Рис. 1.21**). Одним из примеров применения варикапов является их использование в качестве подстроечного диода в высокочастотных схемах.

Стабилитроны (диоды Зенера)

Во время исследования запирающих свойств p - n -переходов К. Зенер (C. Zener) обнаружил, что при определённой степени легирования резко снижается напряжение пробоя, выше которого резко возрастает обратный ток. Указанный эффект был обусловлен тем, что при приложении высокого напряжения (напряжения Зенера) свобод-

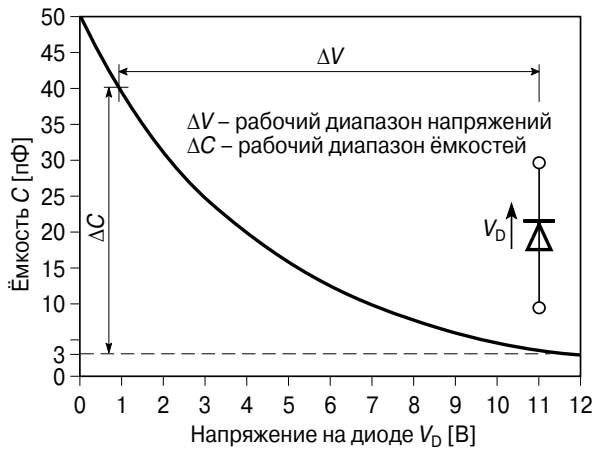


Рис. 1.21. Зависимость ёмкости p - n -перехода от напряжения на варикапе.

ные носители заряда переходили из валентной зоны в зону проводимости, резко увеличивая проводимость. Данный эффект в честь его открывателя называют эффектом Зенера или лавинным пробоем. При напряжениях, меньших напряжения пробоя (также называемого напряжением Зенера), которое составляет 1...50 В в зависимости от степени легирования, протекает только небольшой обратный ток (см. Рис. 1.22). Если

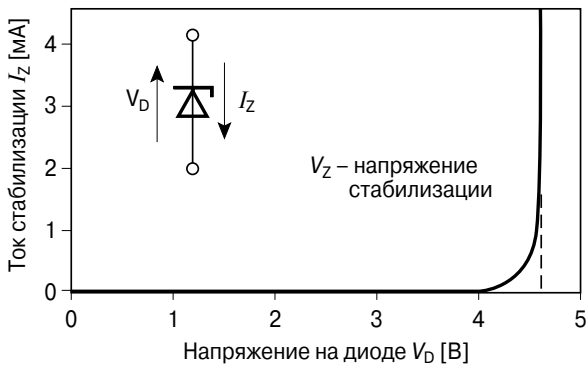


Рис. 1.22. Вольтамперная характеристика стабилитрона.

напряжение превышает напряжение пробоя (напряжение Зенера), то ток лавинообразно возрастает. Поэтому стабилитроны подходят для ограничения и стабилизации напряжения в электрических цепях.

Лавинные диоды

В лавинных диодах происходит лавинное усиление эффекта Зенера. Если напряжённость электрического поля и длина свободного пробега достаточно велики, то свобод-

ные носители заряда, высвобожденные благодаря эффекту Зенера, ускоряются до такой степени, что их кинетической энергии будет достаточно для того, чтобы позволить вторичным электронам перейти из валентной зоны в зону проводимости.

Диоды Шоттки

С разработкой планарной технологии производства полупроводниковых приборов стало возможным изготавливать диоды, состоящие из слоя полупроводника и слоя металла. Эти так называемые диоды с горячими носителями часто называют диодами Шоттки (в честь одного из пионеров полупроводниковой техники Вальтера Шоттки), или, более точно, диодами с барьером Шоттки. Их преимущества — сверхмалое время переключения, малый разброс параметров, низкий уровень шумов и высокая нагрузочная способность. Областью применения диодов Шоттки являются быстродействующие логические схемы.

Диоды Ганна

В 1963 году, во время исследований арсенид-галлиевых (GaAs) и фосфид-индиевых (InP) резисторов в исследовательской лаборатории IBM, английский физик Джон Ганн (John V. Gunn) обнаружил, что при напряжениях, превышающих определённое пороговое значение, уровень собственных шумов резисторов резко увеличивался вплоть до возникновения собственных колебаний. Этот эффект был назван эффектом Ганна в честь его открывателя, несмотря на то что он уже был теоретически описан Ридли (Ridley), Ваткинсом (Watkins) и Хилсумом (Hilsum). Данный эффект возник из-за того, что при увеличении напряжённости поля свыше определённого значения носители заряда группируются в домены. Таким образом, снижается их подвижность. Как следствие, при протекании тока возникает колебательный дрейф частиц, который может использоваться в высокочастотных генераторах (в некоторых генераторах частота колебаний может превышать 100 ГГц). Не совсем корректно называть эти приборы диодами, поскольку диоды Ганна не имеют p - n -перехода, но они состоят из материала с различным уровнем легирования примесью n -типа.

Инжекционно-пролётные диоды

Так же как и туннельные диоды, диоды Ганна и лавинно-пролётные диоды, инжекционно-пролётные диоды (BARITT) имеют на вольтамперной характеристике участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В этих диодах происходит фактическая инжекция носителей заряда в область p - n -перехода. Они преимущественно используются в СВЧ схемах.

Лавинно-пролётные диоды

Лавинно-пролётный диод (IMPATT) — это полупроводниковый диод, работающий в зоне лавинного пробоя вольтамперной характеристики, когда в некоторых областях обеднённой зоны наряду с лавинным эффектом проявляется и ударная ионизация, так что с ростом прямого напряжения падает ток. Так же как туннельные диоды, диоды Ганна и инжекционно-пролётные диоды, эти диоды имеют на ВАХ участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Идея создания лавинно-пролётного диода была выдвинута еще в 1958 году В.Т. Ридом (W. T. Read), коллегой Уильяма Шокли, но её удалось реализовать только в 1964 году, когда группа учёных смогла предотвратить разрушение диода при появлении лавинного пробоя (группа учёных под руководством А. С. Тагера в Советском Союзе смогла добиться этого в начале 60-х годов прошлого века, но на западе эта разработка стала известна много позднее). Максимальная рабочая частота лавинно-пролётного диода составляет примерно 300 ГГц. Диоды этого типа могут пропускать большую по сравнению с диодами Ганна мощность (хотя у последних меньше уровень внутренних шумов). Данные диоды в основном используются в СВЧ схемах.

Лавинно-пролётный диод с захваченной плазмой

Лавинно-пролётный диод с захваченной плазмой (TRAPATT) — это полупроводниковая структура быстрого СВЧ диода. В нём используется эффект лавинного пробоя в захваченной плазме, одним из следствий которого является участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Диоды Барраса

Диод Барраса — это диод, излучающий электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне в «обратном направлении», через отверстие в подложке (протравленном после изготовления диода). p - n -переход такого диода находится с нижней стороны подложки. Это создаёт чрезвычайно хорошие предпосылки для встраивания подобных диодов в волоконно-оптические кабели. Поскольку благодаря своему внутреннему строению эти диоды являются чрезвычайно быстродействующими, они используются при передаче данных в волоконно-оптических каналах связи.

Лавинные фотодиоды

Лавинные фотодиоды (APD) — это фотодиоды, работающие при обратном включении, когда генерируемый фототок высвобождает вторичные носители заряда, вызывающие лавинный пробой. Лавинный пробой подобного рода возникает при высоких напряжённостях электрического поля, но такое поле можно создать, только если соединительный слой будет однородным. Если в нём будут неоднородности, то появятся локальные пробои, и это не позволит создать поле с высокой напряжённостью. Поэтому процесс изготовления данных диодов представляет сложную технологическую задачу. Как следствие, лавинные фотодиоды большой площади встречаются редко и дороги в изготовлении. При использовании лавинных фотодиодов можно точно обнаружить даже очень слабое световое излучение.

Фотоэлектрические ячейки

Если энергия излучения проникает в область p - n -перехода, то образуются электронно-дырочные пары. Электроны под влиянием диффузии перемещаются в слой p -типа, а дырки — в слой n -типа. На контактах возникает фотоЭДС, и она может использоваться в качестве источника напряжения, т.е. в цепи будет протекать фототок, а фотоэлектрическая ячейка будет питать нагрузку энергией. С увеличением интенсивности излучения фотоЭДС будет возрастать по логарифмическому закону — сначала резко, затем асимптотически стремиться к диффузионному напряжению (см. Рис. 1.23). Примером использования фотоэлектрических ячеек являются экспонометры.

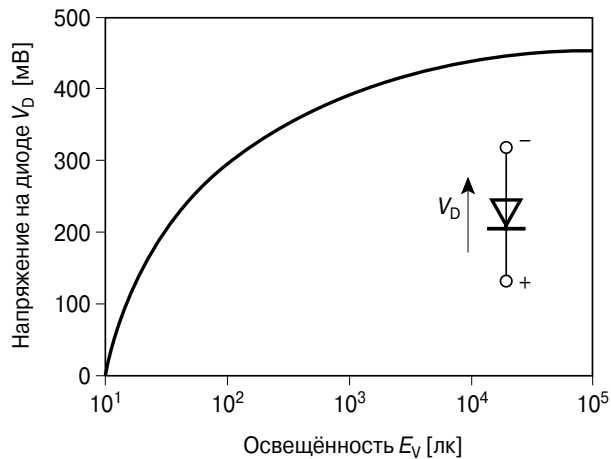


Рис. 1.23. Характеристика фотоэлектрической ячейки.

Солнечные фотоэлементы

Фотоэлектрические ячейки с большой площадью поверхности называются солнечными фотоэлементами. Такие структуры позволяют получать электрическую энергию из солнечного света при помощи фотоэлектрического преобразования.

1.4.3. Транзисторы

Появление транзисторов произвело революцию в электронике. Без них множество инновационных изобретений и разработок было бы невозможным.

Однопереходный транзистор

Даже при использовании только одного p - n -перехода можно создать структуру транзисторного типа. Такая структура называется однопереходным транзистором (UJT), она аналогична полевому транзистору с управляющим p - n -переходом, но имеет два устойчивых состояния. Если к управляющему электроду транзистора приложено достаточно большое напряжение (пороговое напряжение, которое пропорционально напряжению коллектора), то база переходит в проводящее состояние. Чаще всего однопереходные транзисторы применяются в релаксационных генераторах.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) — это гетероструктурные полевые транзисторы с обеднённым слоем. Канал полевого транзистора имеет

квантовую яму, которая создаёт двумерное (плоское) облако электронов с высокой подвижностью. Высокая подвижность электронов позволяет добиться высоких скоростей переключения. Поэтому данный транзистор целесообразно использовать в устройствах с короткими периодами и малым временем переключения.

Биполярный гетеротранзистор

Биполярный транзистор с гетеропереходами (HJBT) — это биполярный аналог полевого транзистора с высокой подвижностью электронов.

Резонансно-туннельный транзистор на горячих электронах

Резонансно-туннельный транзистор на горячих электронах (RHET) — это специальный тип транзистора, предназначенный для СВЧ устройств. В основе его принципа действия лежит квантово-механический туннельный эффект «горячих электронов», которые представляют собой свободные электроны с кинетической энергией, значительно превышающей значение kT (где k — постоянная Больцмана, а T — значение температуры в градусах Кельвина).

Транзисторы, управляемые одним электроном

Транзистор, управляемый одним электроном (SET), является новой разработкой, в которой операции переключения инициируются одним носителем заряда. Это снижает потери энергии на управление до сверхмалых значений. В настоящее время реализация такого принципа возможна только при очень низких температурах (порядка 100 К).

Тиристор (транзистор с коллекторной ловушкой)

Если n - p - n - и p - n - p -транзисторы соединены вместе таким образом, что коллектор каждого из них управляет базой другого, то мы получим структуру с двумя устойчивыми состояниями, которая перейдет в проводящее состояние, если на базу одного из транзисторов подать достаточно большой управляющий импульс. Структуру подобного типа можно также изготовить в виде одного устройства с тремя выводами — анодом, катодом и управляющим электродом.

Это устройство называется тиристором (от *англ.* thyristor — thyra = дверь и transistor), оно применяется для коммутации больших токов (см. **Рис. 1.24**). Первый тиристор был

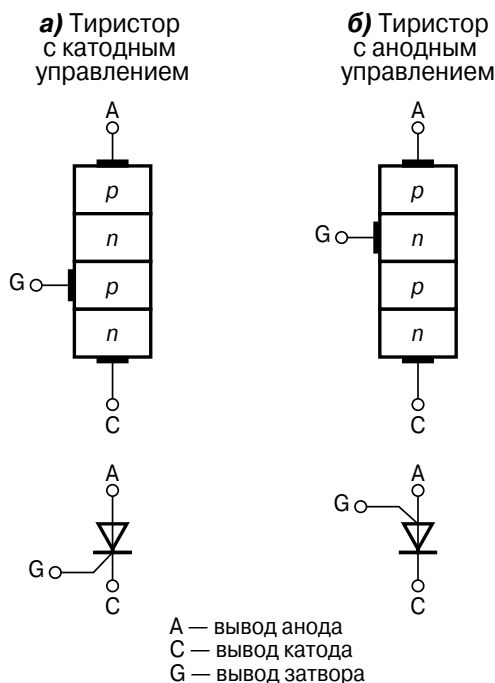


Рис. 1.24. Структура тиристора.

создан компанией Radio Corporation of America (RCA). Тиристор также часто называют кремниевым управляемым диодом (от *англ.* Silicon Controlled Rectifier — SCR). Данный прибор обладает односторонней проводимостью, но можно соединить встречно-параллельно два тиристора, и тогда получится двусторонний ключ. Обычно тиристоры выключаются при уменьшении приложенного к ним напряжения ниже рабочего уровня, но существуют также и тиристоры с запирающим электродом — в этом случае тиристор отключается током, обратным току управления. Такие запираемые тиристоры называются GTO (от *англ.* Gate-Turn-Off).

1.4.4. Другие интегральные полупроводниковые приборы

Приборы с зарядовой связью (ПЗС)

Приборы с зарядовой связью (CCD) — это переключательные приборы, имеющие МОП-структуру, в которых шаговые заряды переносятся при помощи близко расположенных МОП-конденсаторов (они также

называются приборами с переносом заряда типа «пожарная цепочка»). В результате становится возможным создание сдвигового регистра для аналоговых сигналов. Принцип использования зарядовой связи открыли в 1970 году два сотрудника лаборатории Белла, У. Бойль (W.S. Boyle) и Дж. Смит (G.E. Smith). Приборы с зарядовой связью используются, главным образом, в датчиках изображения.

Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ)

Информация из ПЗУ (ROM) может только считываться. На практике ПЗУ состоит из полупроводниковой матрицы, информация в которую заносится во время производства с помощью маски (шаблона), определяющей наличие соединений между двумя слоями (именно поэтому такие ПЗУ называются масочными). Как следствие, содержимое памяти такого типа неизменно.

Программируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ)

Программируемое ПЗУ (PROM) состоит из полупроводниковой матрицы, в которой после изготовления не все ячейки имеют записанные с помощью маски значения, как это делается в случае с ПЗУ. Отдельные ячейки могут быть запрограммированы пользователем путём безвозвратного разрушения определённых соединений, используя программирующее напряжение. Последнее обычно создаётся внешним устройством (программатором), таким образом, содержимое памяти не может изменяться после его программирования.

Электрически программируемое ПЗУ (ЭППЗУ)

Электрически программируемое ПЗУ (EAROM) — это устройство, содержимое которого может быть изменено при помощи электрических сигналов. В отличие от электрически стираемого и программируемого ПЗУ (EEPROM), при его очистке удаляется только часть данных (как у флэш-памяти). Однако не все приборы данной памяти поддерживают возможность удаления отдельных ячеек. Эти устройства очень дороги и используются, только когда нет другой альтернативы.