

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.382.8

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ*)*Дж. Мейндл*

Основным функциональным элементом современных электронных схем является транзистор. Методы микроэлектроники позволяют поместить в одну схему большое их количество.

Электронные устройства состоят из «активных» элементов, таких, как транзисторы, в комбинации с другими составными частями: резисторами, емкостями и индуктивностями. По старой технологии все эти элементы производили сначала по отдельности, а затем, соединяя их между собой металлическими проводниками, собирали требуемое электронное устройство. Основные элементы схем остались прежними и после возникновения микроэлектроники: микроэлектронные схемы тоже состоят из транзисторов, резисторов, емкостей и тому подобных элементов. Основное отличие в том, что и эти элементы, и соединения между ними теперь изготавливаются на общей подложке путем общей последовательности операций.

Так как основным материалом для микроэлектронных схем является кремний, развитие микроэлектроники в большой степени зависело от изобретения способов производства основных функциональных элементов на или в кристалле этого полупроводникового вещества. Такие методы для производства большинства стандартных электронных устройств были разработаны (только индуктивности нельзя изготовить методами микроэлектроники). При этом, однако, не только были заимствованы и миниатюризированы идеи старой, более громоздкой технологии. С уменьшением масштабов схем в распоряжении у конструкторов появляются новые методы, изменяются и традиционные конструкции схем. В частности, растущее число функций передается наиболее просто изготавливаемым и лучше всего выполняющим свои функции элементам схем — транзисторам. Разрабатываются как различные типы микроэлектронных транзисторов, так и целые семейства соединяющихся с ними элементов, различные образцы схем с применением этих элементов.

Следует различать активные элементы схем, представленные транзисторами, и все остальные электронные устройства. Последние, в отличие от первых, могут быть названы пассивными элементами схем. Активный элемент изменяет свое состояние под воздействием внешнего сигнала; резисторы, емкости и индуктивности такой способностью не обладают.

Любое вещество, проводящее электрический ток, — даже кусок прямого провода — имеет все характеристики пассивного элемента схем:

*) Meindl James D. Microelectronic Circuit Elements. — Scientific American, September 1977, v. 237, No. 3, pp. 70—81. — Перевод С. Г. Тиходева.

Дж. Мейндл — профессор электротехники Стэнфордского университета, директор фирмы «Stanford Electronics Laboratories», США.

© Scientific American, Inc., 1977.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук» 1979

сопротивление, емкость и индуктивность. Те элементы, которые применяются в схемах в качестве резисторов, емкостей и индуктивностей, обладают одним из этих свойств в большей степени. То, что металлическая проволока обладает электрическим сопротивлением, объясняется взаимодействием

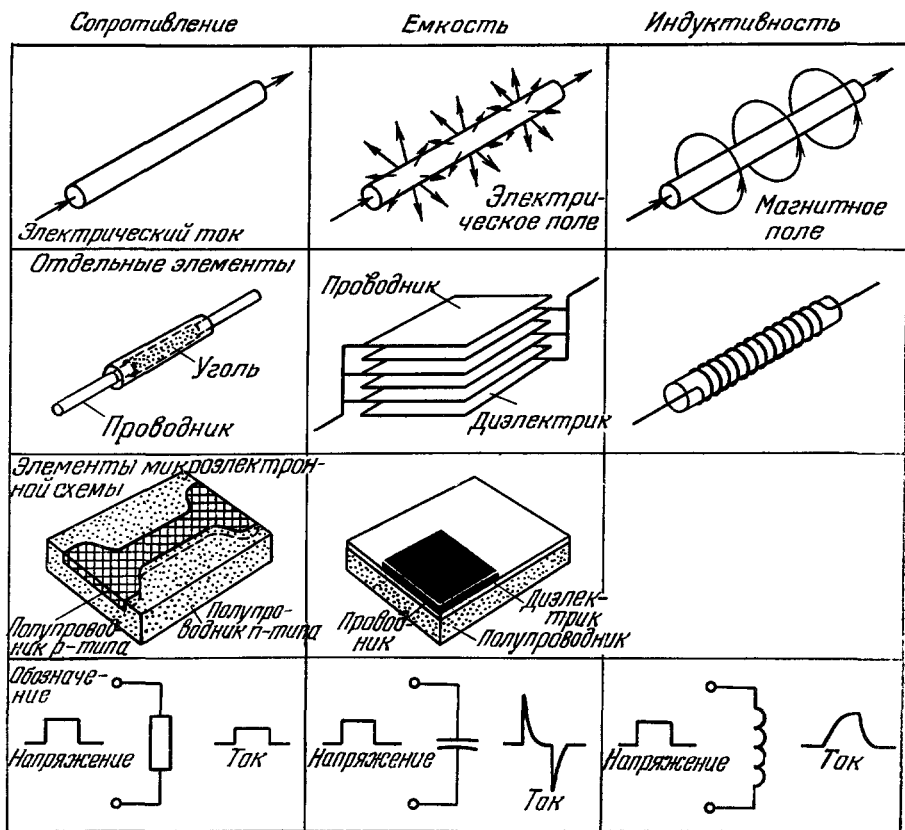


Рис. 1. Пассивные элементы схем, применяемые в электронных устройствах, — это резисторы, емкости и индуктивности.

В резисторах энергия электронов диссипирует при их движении сквозь вещество проводника, мерой диссипируемой энергии является сопротивление. Емкость есть мера энергии, запасенной электрическим полем, окружающим заряженный проводник. Индуктивность — мера энергии магнитного поля, индуцированного текущим по проводнику электрическим током. Резисторы как отдельные элементы изготавливаются из угля или другого плохо проводящего вещества, например сплава никрома; резисторы, входящие в микросхемные интегральные схемы, изготавливаются в виде тонкой ленты проводника одного типа, помещенной в полупроводник другого типа. Отдельная емкость составляется из большого количества проводящих слоев с изолирующими прокладками между ними; микросхемная емкость изготавливается отложением на поверхности полупроводника сначала тонкого слоя изолятора, а затем слоя металла. Таким путем могут быть получены только малые величины емкостей. Отдельная индуктивность представляет собой несколько витков проводника, намотанных плотно друг к другу, часто на сердечник из ферромагнитного материала; для производства микросхемных индуктивностей не было разработано удовлетворительных методов. Внизу показаны символические обозначения этих элементов и форма импульса тока, протекающего через них при приложении импульса напряжения.

электронов с атомной структурой вещества и их отклонением вследствие этого взаимодействия от упорядоченного движения. Резисторы как отдельные элементы схем обычно изготавливаются из материалов с весьма высоким удельным сопротивлением, таких, как углерод или сплав никром (рис. 1).

Емкость и индуктивность — величины, характеризующие электромагнитное поле, образованное вокруг проводника зарядом на нем или текущим по нему током. Емкость связана с электрическим полем, окру-

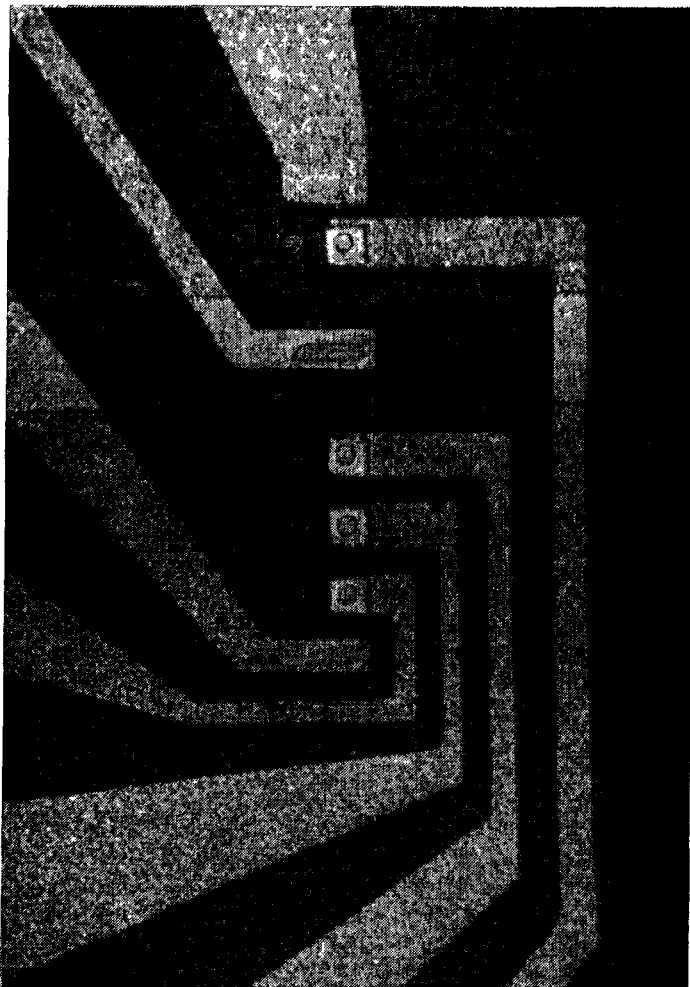


Рис. 2. На фотографии показана пара логических схем, изготовленных как одно целое на поверхности кремниевого кристалла.

Схемы состоят из нескольких связанных между собой транзисторов, являющихся самыми важными элементами в микроэлектронных устройствах. Из четырех алюминиевых проводников, окружающих устройство и подходящих к нему справа, верхний образует контакт с областью транзистора, в которой ток течет параллельно поверхности кристалла. Этот ток вытекает из проводника, заканчивающегося на горизонтальной линии. Ниже этого проводника расположены еще три транзистора другого типа. В этих транзисторах ток течет из подложки на ряд проводников, расположенных ниже полосы. Схема принадлежит к типу полупроводниковых устройств, называемых интегрально-инжекционными логическими устройствами (ИИЛ). Отличительной особенностью ИИЛ-схем является то, что некоторые части кристалла являются элементами сразу нескольких транзисторов. Полоса — это поверхность самого кристалла, зернистая структура всюду, кроме этой полосы, — поликристаллический кремний. Вариации в свете вызваны не различной окраской кремния, а интерференцией света в слоях двуокиси кремния, покрывающих поверхность. Устройство произведено в лаборатории автора в Стэнфордском университете Родериком Дэвисом, а сфотографировано Фрицем Гором.

жающим заряженный проводник. Наибольшие значения емкости достигаются тогда, когда большие поверхности проводника с противоположными зарядами расположены максимально близко друг к другу. Поэтому емкости как отдельные элементы схем изготавливаются в виде ряда металлических пластин, отделенных друг от друга тонким слоем изолятора. Индуктивность — это мера энергии, запасенной магнитным полем электрического тока в проводнике. Чтобы максимально сконцентрировать магнитное поле, индуктивности обычно изготавливаются в виде катушек с большим числом витков, часто с сердечником из ферромагнитного вещества.

В микроэлектронном устройстве нет места ни для угольного или никромового сопротивления, ни для разделенных слоями изолятора пластин емкости, ни для витков индуктивности. Все элементы микроэлектронной схемы должны быть изготовлены в кристалле кремния или на его поверхности (рис. 2). А кремний для таких целей — далеко не идеальный материал: можно получить только весьма умеренные значения сопротивлений и емкостей, не говоря об индуктивностях (которые вообще не удастся поместить в микроэлектронную схему). С другой стороны, кремний — вещество, не имеющее себе равных в качестве материала для изготовления транзисторов. Обилие этих активных элементов в микроэлектронных схемах способно более чем компенсировать нехватку пассивных элементов.

Свойство, делающее транзисторы незаменимыми в микроэлектронике, — это их способность усиливать. Для того чтобы понять это свойство, будем считать, что и пассивные, и активные элементы — «черные ящики», содержимое которых неизвестно, а о свойствах можно судить, только сравнивая входной и выходной сигналы. Сигнал, приложенный к входным клеммам черного ящика, содержащего только резисторы, емкости и индуктивности, будет преобразован определенным образом, но энергия его при этом обязательно понизится. С другой стороны, черный ящик, содержащий транзистор, может превратить слабый сигнал в более мощный.

□

Чтобы понять, как транзисторы и другие элементы схем могут быть изготовлены из кремния, необходимо рассмотреть физическую природу полупроводниковых материалов. В проводнике, таком, как металл, ток переносится свободно перемещающимися по решетке электронами. В диэлектрике электроны сильно связаны с атомами или молекулами, поэтому они не могут служить свободными носителями электрического тока. Полупроводник имеет промежуточные свойства: электроны связаны с атомами в основном состоянии, но становятся свободными после поглощения ими умеренных долей энергии (рис. 3).

На валентной, или внешней электронной оболочке атом кремния имеет четыре электрона. В кристаллическом кремнии эти электроны образуют пары, обобществленные соседними атомами, и располагаются симметрично так, что каждый атом окружен восемью обобществленными электронами. Поскольку все электроны образуют связи между атомами, кристалл чистого кремния является плохим проводником.

Полупроводниковые устройства изготавливаются путем введения в кристалл строго контролируемых количеств атомов примесей. Этот процесс называется легированием (рис. 4). Например, можно легировать часть кристалла кремния фосфором, атомы которого имеют пять электронов на валентной оболочке. Атомы фосфора занимают места атомов кремния без нарушения кристаллической структуры, при этом лишние (пятые) электроны не образуют межатомных связей. При отсутствии внешних воздействий эти электроны остаются в окрестностях атомов фосфора, но

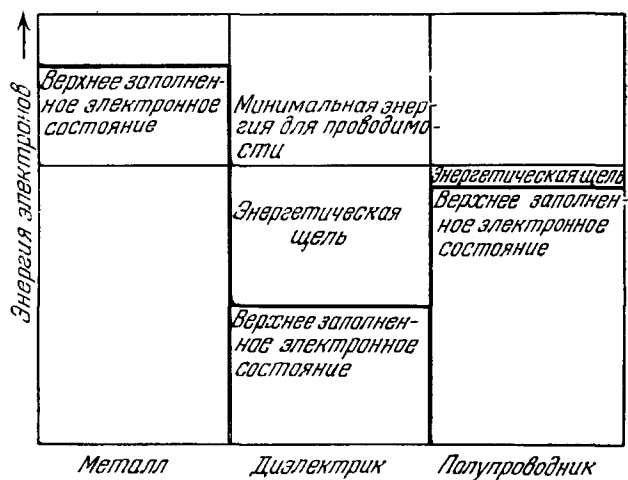


Рис. 3. Электронная структура металлов, диэлектриков и полупроводников определяет их электрические свойства.

Электроны вещества находятся в разрешенных состояниях (по одному электрону в каждом); разрешенные состояния заполняются по порядку, начиная с состояния с наименьшей энергией. Для проводимости требуются электроны с относительно более высокой энергией. (Минимальная необходимая для проводимости энергия для простоты показана одинаковой для всех веществ, хотя в действительности в разных веществах эти энергии сильно отличаются друг от друга.) В металле верхние заполненные состояния имеют энергии, превышающую этот минимум; поэтому в металле всегда есть электроны проводимости, которые свободно движутся сквозь атомную решетку. В диэлектрике между энергией, требуемой для проводимости, и верхним заполненным состоянием имеется широкая щель. Эта щель может быть интерпретирована как энергия, необходимая для того, чтобы оторвать электрон от атома, с которым он связан. В полупроводнике тоже имеется щель, в отличие от диэлектрика она узкая. Невозмущенные электроны в полупроводнике остаются в окрестностях своих атомов, но становятся свободными при поглощении ими малых долей энергии.

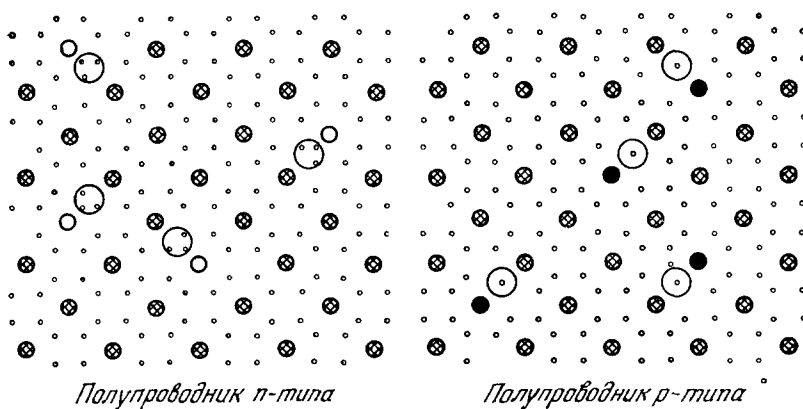


Рис. 4. Легирование кремния атомами примесей меняет его электронную структуру: появляются свободные носители электрического заряда.

Атом кремния (заштрихованные кружки) имеет четыре электрона на внешней, валентной оболочке; в чистом кристалле эти электроны вместе с электронами соседних атомов образуют пары. В результате каждый атом окружен восемью электронами; такая конфигурация является стабильной. Если заменить несколько атомов кремния атомами с пятью электронами на валентной оболочке, например фосфора (светлые маленькие кружки), получится полупроводник *n*-типа. Лишний электрон не образует межатомные связи и легко становится свободным носителем заряда. В полупроводнике *p*-типа вводимыми примесями являются атомы с тремя электронами на валентной оболочке, типа бора (черные кружки). Каждый атом примеси создает недостаток одного электрона, называемый дыркой. Дырка имеет эффективный положительный заряд и при приложении напряжения движется от атома к атому через кристалл. Символы *n* и *p* обозначают соответственно отрицательную (negative) и положительную (positive) полярности носителей заряда. На рисунке концентрация атомов примеси сильно преувеличена.

поглощения даже малых долей энергии достаточно, чтобы они стали свободными.

Кремний можно легировать также бором, атомы которого имеют три валентных электрона. Атом бора, попав в кристаллическую решетку кремния, создает недостаток одного электрона — состояние, называемое дыркой. Дырка также связана с атомом примеси при обычных условиях, но становится подвижной под воздействием приложенного напряжения. Дырка, конечно, не является реальной частицей; то, что она находится в данном месте кристалла, означает только, что в чистом кристалле в этом месте был бы электрон. Тем не менее дырка положительно заряжена и является носителем электрического тока. Дырка движется сквозь решетку подобно тому, как пузырек движется в жидкости: при переходе электрона

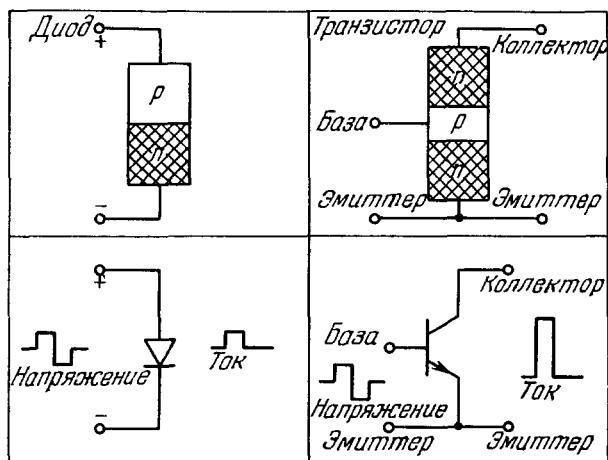


Рис. 5. Полупроводниковые устройства, из которых конструируются микроэлектронные схемы, — это диод (слева) и транзистор.

В обоих устройствах граничат между собой области легированного кремния двух типов: один называется кремнием *p*-типа, другой — *n*-типа. Существенное свойство диода — это его несимметричность: подключенный так, как показано на рисунке, он проводит сигнал положительной полярности и не проводит сигнал отрицательной полярности. В этом отношении транзистор тоже несимметричен; однако у него есть качество еще более важное. Транзистор способен усиливать: с помощью энергии от внешнего источника он способен слабый сигнал превратить в сильный.

от одного из соседних атомов к атому примеси «заполняется» дырка у примеси, и образуется другая дырка в электронном облаке первого атома; этот процесс повторяется, и в результате дырка эффективно движется от атома к атому.

Кремний, легированный фосфором или другим пятивалентным элементом, называется полупроводником *n*-типа (индекс *n* указывает на отрицательность заряда носителей тока в этом случае — электронов); кремний, легированный бором или другими трехвалентными элементами, называется полупроводником *p*-типа; *p* указывает на положительность заряда носителей тока — дырок *).

Простейшее полупроводниковое устройство — это диод, кристалл кремния, в котором примыкают друг к другу области проводимости *p*- и *n*-типа (рис. 5). Если приложить положительное напряжение к области *p*-типа и отрицательное к области *n*-типа, установятся встречные токи электронов и дырок. Дырки из области *p*-типа потекут через *p* — *n*-переход, отталкиваясь от положительного заряда на *p*-клемме и притягиваясь

*) От negative (англ.) — отрицательный и positive (англ.) — положительный.
(Прим. перев.)

к отрицательному заряду на n -клемме. Электроны из области n -типа потекут в противоположном направлении. Получающийся в результате большой ток через диод называется «прямым».

Если поменять полярности приложенного напряжения, дырки будут притягиваться к клемме области p -типа, теперь отрицательно заряженной. Электроны также притянутся к положительно заряженной клемме в области n -типа. В результате ток через $p - n$ -переход будет равен нулю. В действительности всегда существует очень малый «обратный» ток, переносимый небольшим количеством все-таки существующих электронов в области p -типа и дырок в области n -типа. Всегда имеются такие «меньшинства» свободных носителей, но концентрация их обычно невелика.

□

Диод не способен усиливать, поэтому он не является активным элементом схем; с другой стороны, он обладает свойством, отличающим его от других пассивных элементов. Резисторы, емкости и индуктивности являются симметричными устройствами: они преобразуют сигнал одинаково, независимо от его полярности и независимо от того, как они соединены с остальной частью схемы. Самым бросающимся в глаза свойством диода является его несимметричность: его сопротивление велико для сигналов одной полярности и мало для сигналов противоположной полярности.

Транзистор можно изготовить, добавив третий легированный слой к диоду, например приготовив нечто вроде «бутерброда» из области p -типа между двумя областями n -типа (см. рис. 5). Одна из областей n -типа называется эмиттером, другая — коллектором, а область p -типа между ними — базой. Следовательно, транзистор представляет собой два ориентированных навстречу друг другу диода в одном кристалле кремния. Как и должно из этого следовать, работа транзистора зависит от соотношения напряжений, приложенных к эмиттеру, коллектору и базе.

Пусть потенциал эмиттера n -типа равен нулю (как начала отсчета). Предположим, что к базе p -типа приложено малое положительное напряжение, к коллектору n -типа — тоже положительное, но большее напряжение. При таком распределении напряжений эмиттер и база представляют собой диод, работающий в прямом направлении: дырки движутся к эмиттеру, и электроны инжектируются в базу. Напротив, напряжения на базе и коллекторе таковы, что проводимость перехода между ними мала, и через переход протекает лишь пренебрежимо малый обратный ток. Однако коллектор не бездействует: электроны, инжектированные в базу эмиттером, диффундируют (подобно тому как смешиваются два газа) сквозь базу к коллектору. В хорошо спроектированном транзисторе почти все инжектированные электроны диффундируют через базу и большой ток электронов течет от эмиттера к коллектору.

Если приложенное к базе положительное напряжение уменьшать до нуля или сделать отрицательным, уменьшается и прекращается прямой ток электронов из эмиттера в базу. Поскольку электроны в базу больше не инжектируются, прекращается также и ток из эмиттера в коллектор. Таким образом, ток через коллектор управляется напряжением, приложенным к базе. Меняя полярность приложенного к базе напряжения, можно включить или выключить ток через коллектор; при промежуточных напряжениях ток через коллектор приблизительно пропорционален току через базу. Если легированные области транзистора имеют правильно подобранные размеры и расположение, ток через коллектор во много раз превысит ток через базу, т. е. транзистор будет усиливать ток. Отношение тока через коллектор к току через базу (называемое коэффициентом усиле-

ния по току) обычно бывает порядка 100, но могут быть получены коэффициенты усиления и более 1000.

При проектировании транзистора самым важным параметром является ширина базы: она должна быть настолько узкой, чтобы практически все электроны, инжектированные эмиттером, добрались через базу до коллектора. При узкой базе также уменьшается время, за которое инжектированный электрон добирается до коллектора, поэтому увеличивается скорость переключения транзистора из одного состояния в другое.

Описанный выше транзистор называется *npn*-транзистором (символ *npn* показывает взаимное расположение легированных областей кремния). Дополняющее устройство, *pnp*-транзистор получится, если поместить базу *n*-типа между областями *p*-типа; последние будут служить эмиттером и коллектором. Принципы работы *pnp*-транзистора те же, что и у *npn*-транзистора, только полярности всех напряжений противоположны: напряжение коллектора и базы при нормальной работе должно быть отрицательно по отношению к напряжению эмиттера. Меняется также и знак заряда носителей тока в устройстве: ток от эмиттера к коллектору состоит из инжектированных дырок.

npn- и *pnp*-транзисторы образуют класс устройств, называемых плоскостными транзисторами. Их называют также биполярными транзисторами, так как в их работе участвуют носители тока обеих полярностей. Первый биполярный транзистор был сконструирован в 1948 г. Джоном Бардином, Уолтером Бретеином, Уильямом Шокли, сотрудниками фирмы «Bell Telephone Laboratories».

Второй основной тип транзисторов был изобретен почти за 25 лет до изобретения биполярных устройств, но не выпускался в больших количествах до начала 60-х годов. Это так называемый полевой транзистор. Было предложено несколько типов таких транзисторов, из них наиболее обычным в микроэлектронике является полевой транзистор со структурой металл — окисел — полупроводник (сокращенно — полевой МОП-транзистор). В названии указаны три материала, из которых изготавливаются транзисторы этого типа.

Типичный полевой МОП-транзистор изготавливается следующим способом (рис. 6, а). В кремниевой подложке *p*-типа создаются два островка кремния *n*-типа. Прямо к островкам подводятся металлические контакты, один из которых называется стоком, а другой — истоком. На поверхности кремния над каналом между истоком и стоком наносится тонкий слой двуокиси кремния (SiO_2). Поверх этого слоя осаждается слой металла, образующего третий электрод, называемый затвором. Двуокись кремния является хорошим изолятором, поэтому затвор не имеет прямого электрического контакта с полупроводниковой подложкой. Однако он соединен с кремниевой подложкой через емкость, т. е. посредством электрического поля, генерируемого зарядом на затворе и воздействующего на движение заряженных носителей в полупроводниковом канале.

Исток и подложка обычно соединяются внешним проводником, и на них поддерживается нулевой потенциал. А к стоку прикладывается положительный потенциал. Так как исток и подложка заземлены, ток между ними равен нулю; между стоком и подложкой течет пренебрежимо малый обратный ток (так как они образуют диод). В состоянии покоя, когда к затвору приложен нулевой потенциал, в канале *p*-типа под затвором находятся в основном дырки и только малое количество электронов притягивается положительным потенциалом стока. Если же к затвору приложить положительный потенциал, почти все электроны под затвором притянутся к тонкому слою у поверхности кристалла прямо под затвором. Проводимость этой области, при нормальных условиях являющейся

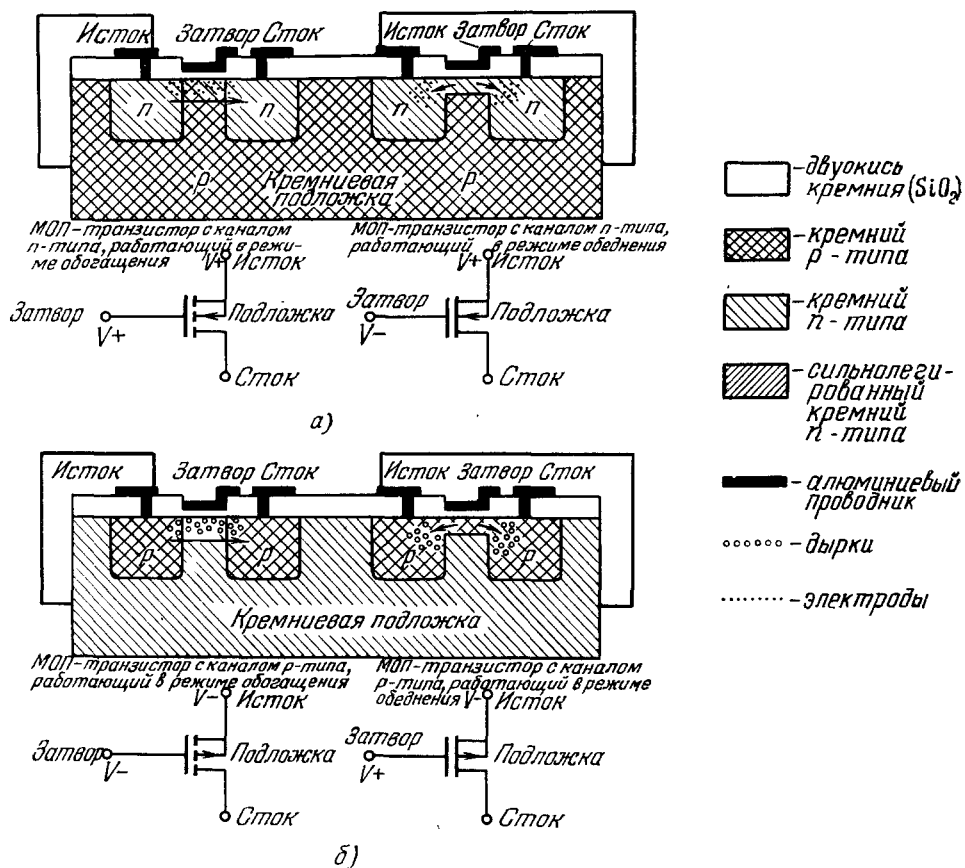


Рис. 6. Полевые транзисторы со структурой металл — окисел — полупроводник (МОП) отличаются от биполярных транзисторов тем, что в них используется только один из типов заряженных носителей.

Те транзисторы, в которых используются электроны, называются *n*-МОП-транзисторами; транзисторы, в которых используются дырки, называются *p*-МОП-транзисторами. В *n*-МОП-транзисторе (а) в подложке *p*-типа создаются два острова кремния *n*-типа, один из которых называется истоком а другой — стоком. Над каналом между истоком и стоком расположен металлический электрод, затвор, изолированный от полупроводника тонким слоем двуокиси кремния. В транзисторе, работающем в режиме обогащения (рис. а), слева), положительный потенциал на стоке создает поле, которое притягивает электроны истока. Электроны, однако, не могут добраться до стока из-за обилия дырок в области *p*-типа. Если к затвору приложить положительное напряжение, электрическое поле притянет электроны к узкому слою на поверхности канала между истоком и стоком; в результате по этому каналу потечет ток. В *n*-МОП-транзисторе работающем в режиме обеднения (рис. а), справа), между истоком и стоком имеется непрерывный канал из кремния *n*-типа. Такой транзистор в нормальных условиях проводит электрический ток. Если же к затвору приложить отрицательное напряжение, электроны будут выталкиваться из канала, в результате ток через транзистор прекратится. Если сделать острова *p*-типа в подложке *n*-типа, получится соответствующий *p*-МОП-транзистор (б), в котором носителями заряда являются дырки. МОП-транзисторы могут быть упакованы на поверхности кристалла кремния гораздо плотнее, чем биполярные транзисторы, так как для них не требуются изолирующие острова.

проводимостью p -типа, как бы инвертируется из-за большой концентрации электронов. В результате инверсии между истоком и стоком образуется непрерывный канал с проводимостью n -типа, по которому течет большой ток. Как и биполярный транзистор, полевой МОП-транзистор обладает способностью усиливать, однако коэффициент усиления в этом случае есть отношение напряжений на стоке и затворе, а не токов (усиление по напряжению).

Следует отметить, что в отличие от биполярного транзистора, ток через базу которого складывается из тока дырок и электронов, в инверсном канале МОП-транзистора ток образуется носителями только одного знака. В вышеописанном устройстве такими носителями являются электроны, а сам транзистор называется полевым МОП-транзистором с каналом n -типа или, сокращенно, n -МОП-транзистором. Можно изготовить и дополняющее устройство, состоящее из двух островков с проводимостью p -типа в подложке n -типа и с аналогичным соединенным через емкость затвором (рис. 6, б). Все полярности в этом устройстве меняются на противоположные, и носителями тока являются дырки, а не электроны. Такой транзистор называется p -МОП-транзистором.

Если соединить островки проводимости n -типа непрерывным тонким каналом с проводимостью n -типа, расположенным под затвором, получится полевой МОП-транзистор другого типа (см. рис. 6, а). В этом устройстве, при нулевом потенциале на затворе, между истоком и стоком течет ток, так как между ними имеется проводящий канал. Если к затвору приложить отрицательный потенциал, транзистор закроется, так как электроны выталкиваются из канала и ток через транзистор уменьшается. Этот транзистор называется полевым МОП-транзистором, работающим в режиме обеднения. Естественно, можно сконструировать соответствующее устройство с каналом p -типа (см. рис. 6, б). Описанные выше транзисторы, ток через которые включается приложенным к затвору напряжением, называются транзисторами, работающими в режиме обогащения. Итак, всего имеется четыре типа МОП-транзисторов: транзисторы с каналами n - и p -типа, работающие как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения.

Как и при изготовлении биполярных устройств, при изготовлении МОП-транзисторов некоторые параметры имеют решающее значение. В данном случае это толщина окисного слоя под электродом затвора и расстояние между стоком и истоком. Чувствительность транзистора к напряжению на затворе обратного пропорциональна толщине окисного слоя.

□

Основным материалом для изготовления микроэлектронных устройств является различным образом легированный кремний с проводимостью n - и p -типа. Кроме полупроводникового кремния применяются проводники, изготавливаемые или из металла, например алюминия, или из сильно легированного поликристаллического кремния, обладающего весьма высокой проводимостью. И, наконец, хорошим изолятором является двуокись кремния.

Схема изготавливается прямо на поверхности кристалла. Те области, которые должны быть легированы, сначала помечаются фотолитографическим способом, а затем легируются посредством диффузии в них атомов соответствующих элементов. Чтобы изготовить все требуемые легированные области, обычно помещающиеся друг в друга, процесс должен быть повторен несколько раз. Области, которые должны быть покрыты слоем окисла, тоже помечаются фотолитографическим способом, двуокись кремния образуется из вещества самого кристалла при его нагреве в присут-

ствии кислорода. Проводники осаждаются поверх толстого слоя окисла, покрывающего весь кристалл, и проходят сквозь слой изолятора только там, где необходим электрический контакт с кремнием.

Таким способом можно изготовлять и ограниченное количество пассивных элементов. Если поместить тонкую ленту кремния p -типа внутри области проводимости n -типа, получится резистор (см. рис. 1). Если потенциал ленты отрицателен по отношению к потенциалу окружающей области n -типа, ток через устройство течет только по ленте (так как через p — n -переход течет только малый обратный ток).

Сам по себе легированный кремний является неподходящим материалом для изготовления сопротивлений как отдельных элементов, так как его удельное сопротивление мало. Только благодаря большой точности микроэлектронной технологии, позволяющей изготовить ленту вещества с очень малым поперечным сечением, могут быть получены достаточно большие величины сопротивлений. И все-таки изготовлять резисторы с большим сопротивлением весьма трудно.

Кремниевые резисторы обладают также и другим недостатком: величина их сопротивления не может быть предсказана с достаточной степенью точности. Следовательно, схемы с резисторами должны проектироваться так, чтобы допускалось значительное отклонение величин сопротивлений от номинальных значений. Эти допуски частично компенсируются благодаря изготовлению всей интегральной схемы путем единой последовательности операций. Так как все резисторы на кристалле образуются в один и тот же момент времени, их сопротивления отклоняются от номинальных значений примерно на одну и ту же величину. Более того, величины сопротивлений меняются согласованно с изменением некоторых параметров транзисторов в этом же кристалле. Схема будет иметь очень хорошие характеристики, если спроектировать ее так, чтобы отклонение одних параметров компенсировалось отклонением других от номинальных значений.

Конструкция микроэлектронной емкости сходна с конструкцией описанного выше затвора МОП-транзистора (см. рис. 1). Если устройство должно обладать свойствами только емкости, область кремния под электродом сильно легируют с тем, чтобы увеличить ее проводимость. Эту область покрывают тонким слоем окисла, а затем слоем алюминия. Как и в случае резисторов, такой метод неприменим для изготовления отдельных емкостей. Дело в том, что, в отличие от некоторых других изоляторов, слой двуокиси кремния должен быть достаточно толстым, чтобы исключить возможность короткого замыкания. Кроме того, у такой емкости очень мала суммарная площадь проводящих поверхностей: если отдельные емкости имеют большое количество слоев проводника, их микроэлектронные эквиваленты состоят только из одной пары пластин. Поэтому величины емкостей, достижимые в микроэлектронике, малы, обычно не более одной десятитысячной доли величин емкостей в типичной схеме, составленной из отдельных элементов.

Если емкости трудно уменьшить до размеров, необходимых для интегральных схем, то индуктивности до сих пор вообще не удалось изготовить методами микроэлектроники. Витки проводника и ферромагнитный сердечник просто несовместимы с кремниевой технологией, а никакой замены не найдено. Поэтому, если в схеме необходима индуктивность, она должна быть добавлена в виде отдельного элемента.

Без сомнения, в результате дальнейшего улучшения микроэлектронной технологии увеличится выбор доступных конструктору пассивных элементов. Однако возможности улучшения еще шире, так как многие пассивные элементы вполне могут быть заменены активными.

Особенно драматична ситуация с резисторами. Их можно совсем исключить из микроэлектронной схемы, заменив транзисторами. Транзистор является резистором с управляемым током или напряжением. Следовательно, если необходимо посредством резистора получить требуемое значение тока или напряжения, вместо резистора почти всегда можно поставить транзистор. Так как отдельные транзисторы дороже отдельных резисторов, этот метод не применяется в схемах из отдельных элементов. В микроэлектронной же схеме стоимость элементов определяется в основном занимаемой ими площадью поверхности кремния, а площади, занимаемые резисторами, — того же порядка, что и занимаемые транзисторами.

Для замены других пассивных элементов активными требуются более изощренные методы. Пожалуй, самым искусным обходным маневром стало внезапное развитие в последние годы цифровой электроники. В традиционных электронных схемах большая часть емкостей и индуктивностей применяется для обеспечения передачи без искажений непрерывно меняющихся напряжений и частот аналоговых сигналов. Даже в таких схемах большие пассивные элементы могут быть заменены сетью активных. Для обработки же цифровых сигналов, имеющих только дискретные уровни, без пассивных элементов вообще можно обойтись. В большинстве случаев сигнал имеет два уровня напряжения: высокое и низкое (или нулевое). Поэтому в цифровых схемах транзисторы работают как переключатели, обладающие двумя состояниями: «включено» и «выключено». В режиме переключения транзисторы требуют значительно меньшего количества вспомогательных устройств.

□

Микроэлектронные схемы подразделяются на два больших семейства: схемы с биполярными транзисторами и схемы с полевыми МОП-транзисторами. Первыми были усовершенствованы биполярные транзисторы, поэтому сначала развивались устройства с применением биполярных транзисторов. Сейчас наибольшее количество элементов схем удается разместить на одном кристалле с помощью МОП-транзисторов, но это не значит, что биполярные схемы выходят из употребления.

Опишем последовательность операций для изготовления типичной схемы на биполярных транзисторах (рис. 7). Сначала весь кристалл кремния легируется примесью p -типа. Затем для каждого транзистора (и других элементов схемы, например резисторов) в этом «океане» кремния p -типа создаются «остров» проводимости n -типа. «Острова» нужны для того, чтобы изолировать друг от друга различные элементы схемы (схема проектируется так, что все ее элементы имеют положительный потенциал относительно подложки, поэтому между элементами может течь только малый обратный ток $p - n$ -переходов). Чтобы сделать npr -транзистор, на «острове» n -типа создают «озеро» p -типа и, наконец, в этом «озере» делают «островок» проводимости n -типа. Этот внутренний островок является эмиттером, озеро — базой, а внешний остров — коллектором. Электроны, составляющие ток коллектора, текут вниз с эмиттера через базу и попадают в относительно большой объем коллектора.

Можно сделать npr -транзистор аналогичного типа в этом же кристалле, однако для этого потребуются добавочная операция легирования (а их было уже по меньшей мере четыре). Надо снова создать «остров» n -типа в p -легированном «море», потом «озеро» p -типа, «островок» n -типа и, наконец, внутри него «лужу» кремния p -типа. И только последние три области принимают непосредственное участие в работе транзистора; главный остров служит только для целей изоляции. Чтобы избежать таких усложнений, npr -транзистор делается по-другому (см. рис. 7, справа) — так, чтобы ток

тек не вертикально, а горизонтально. В транзисторе такого типа базой является изолирующий остров с проводимостью n -типа; добавляются две области вещества p -типа. Обычно они имеют концентрическую форму: коллектор образует кольцо вокруг эмиттера. Характеристики pn -транзистора с горизонтальным током хуже характеристик транзистора с вертикальным током, так как при такой конструкции неминуемо шире база,

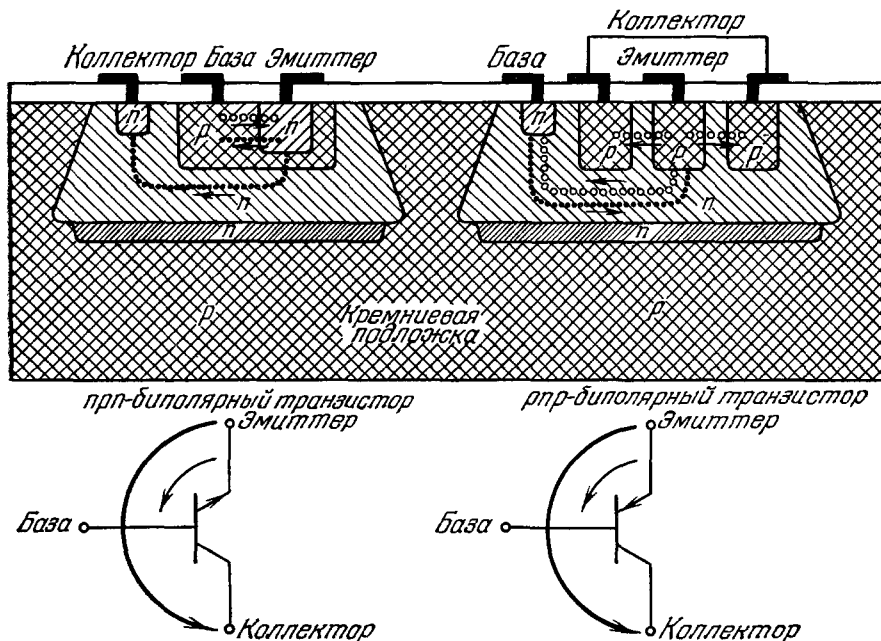


Рис. 7. Микроэлектронные транзисторы изготавливаются на одном кристалле кремния посредством серии операций.

При этом требуется доступ только к поверхности кристалла. В показанном на рисунке примере весь кристалл легирован примесями p -типа, затем созданы острова кремния n -типа. Затем созданы меньшие области проводимости p -типа и n -типа; в итоге получаются три основных элемента транзистора: эмиттер, база и коллектор. В pn -транзисторе (см. слева) к базе и коллектору прикладываются положительные напряжения, в результате дырки текут от базы к эмиттеру, а электроны инжектируются эмиттером в базу. Большая часть инжектированных электронов диффундирует сквозь базу и достигает коллектора, этот ток может даже превышать ток дырок. Устройство может усиливать сигналы, так как малый сигнал, приложенный к базе, управляет большим коллекторным током. В целях упрощения производства pn -транзистор (см. справа) обычно изготавливается по другому плану, когда эмиттерно-коллекторный ток не вертикален, а горизонтален. Принципы действия те же; все полярности противоположны. Контакты с элементами делаются в виде алюминиевых проводников, осажженных поверх изолирующего слоя двуокиси кремния; некоторые области кремния n -типа сильно легируются для увеличения проводимости. Большие острова проводимости n -типа нужны для того, чтобы изолировать транзисторы друг от друга. Эти устройства из-за того, что в их работе участвуют заряды обеих полярностей, называются биполярными транзисторами.

отделяющая коллектор от эмиттера. В результате у горизонтального транзистора меньше усиление по току и меньше быстродействие.

Транзистор со структурой металл-окисел-полупроводник также может быть сделан на поверхности «океана» кремния p -типа (см. рис. 6, а). Здесь, однако, не нужны изолирующие острова-диоды. Для создания МОП-транзистора, работающего в режиме обогащения, надо создать два маленьких острова проводимости n -типа, служащих истоком и стоком, затем, конечно, слой окисла и электрод затвора на поверхности кристалла над каналом между истоком и стоком. Изолирующие острова не нужны, так как напряжения, приложенные к истоку и стоку, не допускают тока между ними и подложкой. Транзистор изолирует сам себя от других элементов на кристалле.

МОП-транзистор с каналом n -типа, работающий в режиме обеднения, делается таким же образом, с той разницей, что исток и сток соединяются каналом из n -легированного кремния. МОП-транзисторы с каналами p -типа делаются в точности так же, но на подложке n -типа (см. рис. 6, б), при этом полярности всех приложенных напряжений и типы легирования областей заменяются на противоположные.

В случае микроэлектронных схем с применением МОП-транзисторов решение использовать устройства с каналом p -типа или с каналом n -типа является определяющим, так как все транзисторы на одном кристалле являются устройствами с каналами одного типа. Но ценой уменьшения плотности упаковки транзисторов и увеличения стоимости можно производить кристаллы с обоими типами МОП-транзисторов (рис. 8). В схемах

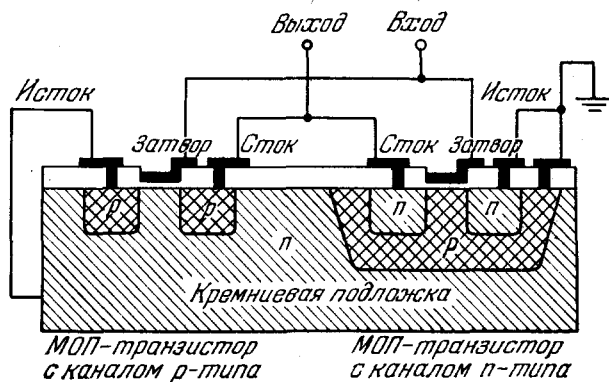


Рис. 8. В показанном на рисунке устройстве в одном кристалле совмещены n -МОП-транзистор и p -МОП-транзистор.

Если схема изготавливается на подложке n -типа, как показано на рисунке, транзистор с каналом p -типа делается обычным способом, а для транзистора с каналом n -типа необходимо создать остров проводимости p -типа. Это добавляет лишний этап к процессу изготовления и уменьшает плотность упаковки и, следовательно, общее количество транзисторов, которые можно разместить на одном кристалле. МОП-устройства с дополняющими транзисторами проектируются так, чтобы обеспечить минимальность потребления энергии. В показанной на рисунке схеме затворы обоих транзисторов присоединены к общему входу. Оба транзистора не могут одновременно находиться в проводящем состоянии, так как для этого требуются сигналы противоположных полярностей, поэтому от источника $(+V)$ на землю течет сравнительно малый ток.

с дополняющими МОП-транзисторами устройства с каналами p -типа помещаются внутри изолирующих островов кремния n -типа. Такие интегральные схемы труднее производить, но в ряде случаев повышенная стоимость окупается. Так, например, схемы на дополняющих МОП-транзисторах потребляют очень мало энергии (рис. 9).

Высокая плотность упаковки традиционных МОП-транзисторов с каналами p - и n -типа на поверхности кристалла объясняется в основном тем, что для них не нужны изолирующие острова. Различия в плотности весьма значительны: на одной и той же площади поверхности кремния может быть размещено вчетверо больше МОП-транзисторов, чем биполярных транзисторов. Поэтому при изготовлении больших интегральных схем, каждая из которых состоит из десятков тысяч активных элементов, используют в основном МОП-транзисторы. Большая часть микропроцессоров и почти все полупроводниковые запоминающие устройства изготавливаются при помощи металл-окисел-полупроводниковой технологии.

Основным достоинством биполярных схем является их высокое (по сравнению с другими устройствами) быстродействие. Скорость переключения биполярного транзистора из одного состояния в другое определяется в основном шириной базы, так как задержка определяется временем, за

которое электроны диффундируют от эмиттера до коллектора. Базы транзистора с вертикальной конструкцией (обычно применяющейся в транзисторах *npn*-типа) может быть сделана очень узкой, существенно уже самой узкой линии, которая только может быть нанесена на поверхности кристалла кремния фотолитографическим способом. В МОП-транзисторе эту же роль играет ширина затвора. Так как МОП-транзисторы — горизонтальные устройства, ширина затвора не может быть сделана меньше

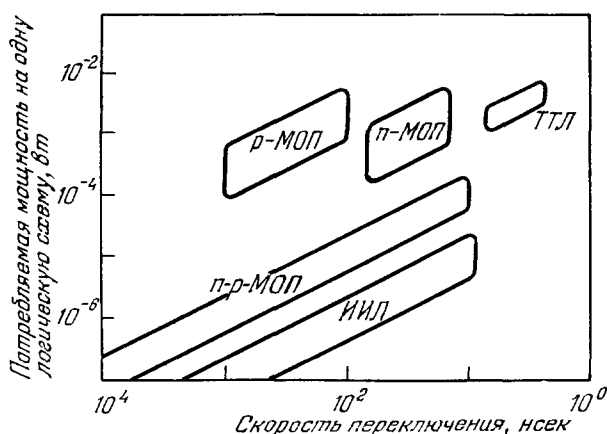


Рис. 9. Быстродействие и потребляемая мощность микросхем связаны между собой: можно заставить устройство действовать быстрее, вкладывая в него большую энергию.

Важным показателем достоинств численной схемы является произведение времени переключения на потребляемую мощность: эта величина является энергией, необходимой для одного переключения. Самые быстрые логические устройства в настоящее время — это биполярные схемы, типа ТТЛ-устройств. Эти схемы также рекордсмены по потребляемой мощности. В МОП-устройствах *p*-МОП-транзисторы заменяются *n*-МОП-транзисторами, так как последние работают быстрее без увеличения потребляемой мощности. МОП-схемы с дополняющими транзисторами (*n* — *p*-МОП) потребляют еще меньшую мощность без уменьшения быстродействия. ИИЛ-устройства весьма привлекательны из-за того, что даже при самом высоком быстродействии потребляемая ими мощность весьма мала.

предела разрешения. Подвижность носителей также влияет на скорость переключения МОП-транзисторов: электроны движутся быстрее, чем дырки; поэтому устройства с каналом *n*-типа обладают большим быстродействием, чем устройства с каналом *p*-типа. Наконец, скорость переключения МОП-транзисторов ограничивается тем, что требуется определенное время для зарядки и перезарядки емкости, образованной затвором, слоем окисла и подложкой. Уменьшение этой емкости приводит к увеличению быстродействия, но при этом уменьшается усиление.

□

За последние два десятилетия высококачественные транзисторы, благодаря развитию микроэлектроники, становились все дешевле и применялись все в больших количествах, емкости и резисторы применялись все реже, а индуктивности вообще не использовались. В результате были созданы устройства, максимально использующие возможности микроэлектронной технологии. Проследим это по эволюции численных логических схем.

Основными элементами электронной логической схемы являются так называемые вентили. Вентили всех разновидностей преобразуют входные сигналы в соответствии с определенными для каждой разновидности правилами. У многих вентилях несколько входов, а выходной сигнал зависит

от комбинации входных сигналов. В любом вентиле основным элементом является по крайней мере один активный элемент, переключатель. Этот переключатель управляет выходным сигналом и управляется в свою очередь входным сигналом.

Одним из типов логических схем, разработанных в середине 50-х годов, были так называемые транзисторно-реостатные логические схемы

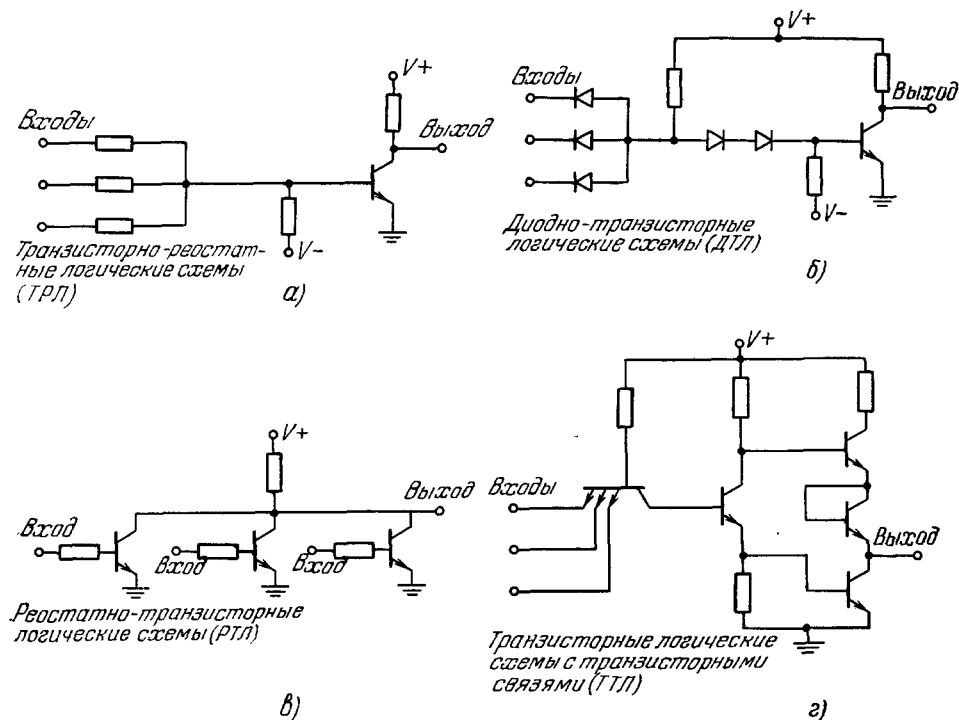


Рис. 10. Численные логические схемы, использующие биполярные полупроводниковые устройства, эволюционировали так, что почти все функции теперь выполняются транзисторами.

Сигналы в численных логических схемах обладают только двумя дискретными уровнями (например, высокое напряжение и низкое напряжение). Такие сигналы поступают в логические схемы в качестве входных и преобразуются ими в соответствии с фиксированными правилами в выходные сигналы. Первые поколения биполярных логических схем собирались из отдельных элементов. В транзисторно-реостатных логических схемах (ТРЛ) максимальным было число резисторов, бывших тогда самыми дешевыми элементами. В диодно-транзисторных логических схемах (ДТЛ) рабочие характеристики были улучшены путем замены большинства резисторов полупроводниковыми диодами. Первым поколением микроэлектронных логических схем были реостатно-транзисторные логические устройства (РТЛ); в каждом входе имелось по транзистору, осталось лишь несколько резисторов с малым сопротивлением. Самыми распространенными биполярными микроэлектронными устройствами сейчас являются транзисторно-транзисторные логические устройства (ТТЛ). В них много транзисторов, и связаны они прямо друг с другом. В показанной на рисунке схеме есть устройство, не имеющее эквивалентных среди отдельных элементов, — многоэмиттерный транзистор.

(ТРЛ) (рис. 10, а). Схемы собирались целиком из отдельных элементов. В основном это были резисторы, самые надежные и дешевые тогда устройства. Типичный вентиль с тремя входами состоял из одного транзистора и пяти резисторов.

В конце 50-х и начале 60-х годов полупроводниковые диоды, тоже отдельные элементы, стали достаточно дешевыми, чтобы соперничать с резисторами. В результате появились диодно-транзисторные логические схемы (ДТЛ) (рис. 10, б). Диоды были нужны для того, чтобы изолировать входные сигналы друг от друга и сдвинуть уровни напряжений. Типичный вентиль состоял по-прежнему из одного транзистора-переключателя вмес

те с тремя резисторами и пятью диодами. Такой вентиль потреблял меньше энергии и обладал большим быстродействием по сравнению с эквивалентным транзисторно-реостатным.

В следующем поколении логических устройств, преобладающем в начале и середине 60-х годов, использовались первые микроэлектронные логические схемы. Это семейство получило название реостатно-транзисторных логических устройств (РТЛ); однако резисторы в этих устройствах играли гораздо меньшую роль, чем в предыдущих схемах, а транзисторы использовались гораздо шире (рис. 10, а). В типичном вентиле каждый из трех входов имел свой собственный переключающий транзистор. И снова было уменьшено потребление энергии и увеличено быстродействие. Размеры интегральных РТЛ-схем были таковы, что на одном кристалле помещались один или несколько вентилях.

Четвертое основное поколение логических устройств и сейчас остается самой распространенной разновидностью биполярных численных схем. Такие устройства называются транзисторно-транзисторными логическими устройствами (ТТЛ), и в них, как видно из названия, большая часть функций передана активным элементам (рис. 10, б). ТТЛ-вентили стали первыми имеющими промышленное значение устройствами с микроэлектронными элементами, которые нельзя собрать из отдельных компонентов. Таким элементом является многоэмиттерный транзистор, у которого два или три эмиттера, одна база и один коллектор. В ТТЛ-вентиле на каждый из эмиттеров поступает входной сигнал. Многоэмиттерный транзистор управляет одним переключающим транзистором, который в свою очередь управляет выходным каскадом из трех транзисторов. По сравнению с предшествующим поколением РТЛ-вентилей ТТЛ-схемы дают большую выходную мощность сигнала (которым поэтому можно управлять большим количеством последующих вентилях), требуют меньшей точности при производстве и более устойчивы к электрическим шумам. Теперь обычными являются интегральные схемы с несколькими сотнями ТТЛ-вентилей.

Быть может, благодаря тому, что технология производства устройств со структурой металл — окисел — полупроводник развивалась позже, это развитие встретило меньше трудностей. Как правило, новые поколения логических устройств не вытесняли полностью предшествующие поколения, наоборот, для каждого семейства находились наиболее подходящие области применения.

В первых микроэлектронных полевых МОП-схемах использовались из-за простоты производства только устройства с каналами p -типа. Они являются самыми медленнодействующими из МОП-устройств из-за низкой (по сравнению с подвижностью электронов) подвижности дырок. Теперь там, где требуются хорошие эксплуатационные характеристики, МОП-устройства с каналами p -типа в основном заменены другими разновидностями устройств. Но первые еще широко используются в дешевых электронных калькуляторах, где не требуется высокая скорость счета и основным требованием является низкая стоимость.

В микропроцессорах и полупроводниковых запоминающих устройствах взамен МОП-транзисторов с каналом p -типа сейчас в основном используются устройства с каналом n -типа. Рассмотрим разновидность МОП-устройств с каналом n -типа на примере простой вентилях схемы с одним входным МОП-транзистором, работающим в режиме обогащения и с каналом n -типа (рис. 11). Возможные конфигурации схем различаются по элементам, используемым в качестве нагрузки этого транзистора.

Простейшим вариантом нагрузки является резистор (рис. 11, а). При этом, однако, получаются наихудшие характеристики. Другим возможным элементом, ограничивающим нагрузочный ток, является соеди-

ненный последовательно с первым транзистором аналогичный транзистор с каналом n -типа, работающий в режиме обогащения (рис. 11, б). Такие схемы проще всего производить; они часто применяются там, где требуется низкая стоимость. Наибольшая плотность упаковки достигается, если использовать в качестве нагрузки n -канальное устройство, работающее

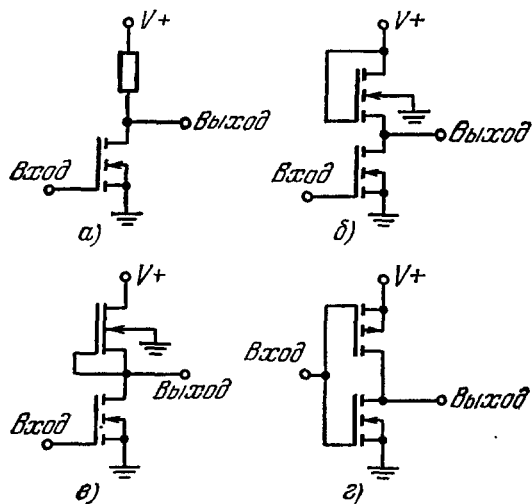


Рис. 11. Логические схемы со структурой металл — окисел — полупроводник развивались позже биполярных и выпускались в основном в микроволновой модификации.

Схемы, представленные на рисунке, служат для инвертирования сигнала (выходной сигнал большой при малом входном сигнале, и наоборот). Во всех схемах входом является затвор n -МОП-транзистора, работающего в режиме обогащения; различаются схемы по элементам, используемым в качестве нагрузки для ограничения тока через транзистор. Простейший элемент — резистор (а), но при этом получаются наихудшие характеристики. Второй n -МОП-транзистор, работающий в режиме обогащения (б), легче всего изготовить; при использовании n -МОП-транзистора, работающего в режиме обеднения (в), достигается наибольшая плотность упаковки. И, наконец, если использовать p -МОП-транзистор, работающий в режиме обогащения (г), получится схема на дополняющих транзисторах со свойственным ей низким потреблением энергии.

изводства и успехам материаловедения. Однако брешь между ними остается весьма значительной (см. рис. 9). Кандидатом для заполнения этой бреши является новое биполярное устройство — так называемое интегрально-инжекционное логическое устройство (сокращенно ИИЛ) *) (рис. 12).

В интегрально-инжекционном логическом устройстве основным элементом является не одиночный транзистор, а пара транзисторов, образующих на кремниевой подложке одно целое. Один из транзисторов имеет вертикальную конструкцию, но ток электронов направлен вверх, а не вниз, как в обычной конструкции. В этом транзисторе эмиттером является сама подложка, которая одновременно служит базой другого, горизонтального транзистора. Так как напряжение приложено к легированным областям разного типа, изолирующие острова не требуются, пара «сверх-

в режиме обеднения (рис. 11, в). Поэтому такие устройства применяются в больших интегральных схемах, например микропроцессорах. И, наконец, в качестве нагрузки может использоваться транзистор с каналом p -типа, работающий в режиме обогащения (рис. 11, г). Такой вентиль принадлежит к разновидности схем с дополняющими МОП-транзисторами. В нем, за исключением самого момента переключения, только один из транзисторов находится в проводящем состоянии. Поэтому через вентиль течет малый постоянный ток и потребление энергии мало. Область, где такие МОП-устройства не имеют себе равных, — производство ручных часов, способных длительное время работать на энергии, запасенной маленькой батарейкой.

Плотность упаковки биполярных схем и быстродействие МОП-устройств постоянно увеличиваются, в основном благодаря усовершенствованию методов про-

*) Общепринятое английское сокращение — I^2L (от integrated-injection logic). (Прим. перев.)

интегрированных» транзисторов образует не требующий вспомогательных устройств вентиль.

По быстродействию ИИЛ-вентилей, вероятно, не догнать самые быстродействующие ТТЛ-устройства, однако уже сейчас они превзошли все

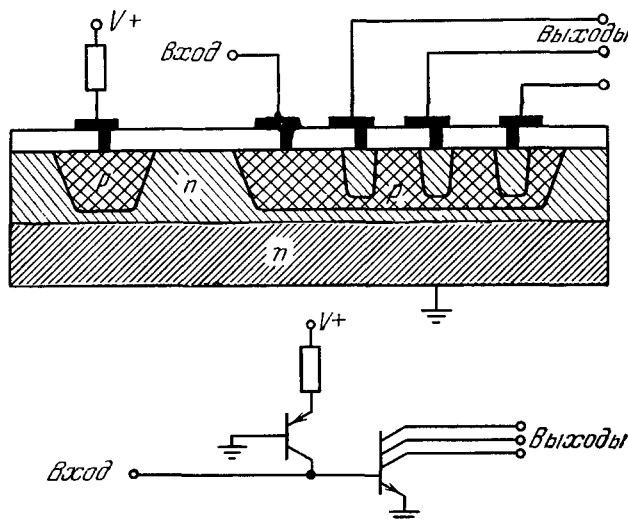


Рис. 12. В интегрально-инжекционных логических схемах (ИИЛ) в одно целое объединены два транзистора, составляя самостоятельное логическое устройство.

Подложка служит эмиттером *pnp*-транзистора (справа), ток электронов в котором течет вверх через базу к нескольким коллекторам. Подложка одновременно является базой другого транзистора *pnp*-типа, ток в котором течет горизонтально. При таком расположении элементов не нужны изолирующие острова (необходимые в обычных биполярных устройствах); поэтому достижима такая же плотность упаковки, как и у МОП-устройств.

разновидности полевых МОП-транзисторов (см. рис. 9). С другой стороны, компактность интегрально-инжекционных логических устройств делает их естественными кандидатами для производства больших интегральных схем. Достижима плотность упаковки таких устройств, сравнимая с плотностью упаковки МОП-устройств с каналом *n*-типа.

□

Рассмотренные нами устройства находятся в главном русле развития микроэлектроники. Технология, исследованная при производстве численных логических устройств, может быть также применена с успехом для производства других видов микроэлектронных устройств. В таких применениях, как для радио и телефона, не обойтись без схем, обрабатывающих аналоговые сигналы. Некоторые из них можно выпускать в виде микроэлектронных устройств. Обычный усилитель малой мощности, собирающийся из отдельных элементов, имеет только один транзистор, четыре резистора, два из которых с весьма большим сопротивлением, и три больших или очень больших емкости. Эквивалентное микроэлектронное устройство состоит из семи транзисторов и только одного резистора. В некоторых случаях более выгодно превращать аналоговые сигналы в численную форму для обработки с тем, чтобы, когда потребуется, вновь обратить их в аналоговую форму. Устройства для обращения сами могут быть изготовлены в микроэлектронной форме.

Полупроводниковая технология также обеспечивает широкий выбор преобразователей, посредством которых электронные приборы могут быть связаны с окружающей средой. Одна из новинок в этой области —

манометр, рабочим элементом которого является тонкая диафрагма из полупроводящего кремния. Сопротивление кремния меняется при его механической деформации, поэтому давление на диафрагму можно вычислить, зная ее сопротивление.

Более привычными преобразователями являются фотодиод и сходный с ним в основных чертах фототранзистор. При поглощении фотона, кванта электромагнитного поля, в области p -типа фотодиода рождается электронно-дырочная пара. Электрон затем мигрирует к $p-n$ -переходу, пересекает его; суммарный ток фотоэлектронов пропорционален числу падающих фотонов. Обратное устройство — светоизлучающий диод — использует столкновения между электронами и дырками. При столкновениях электрон и дырка аннигилируют; их энергия излучается в виде фотона. В кремнии

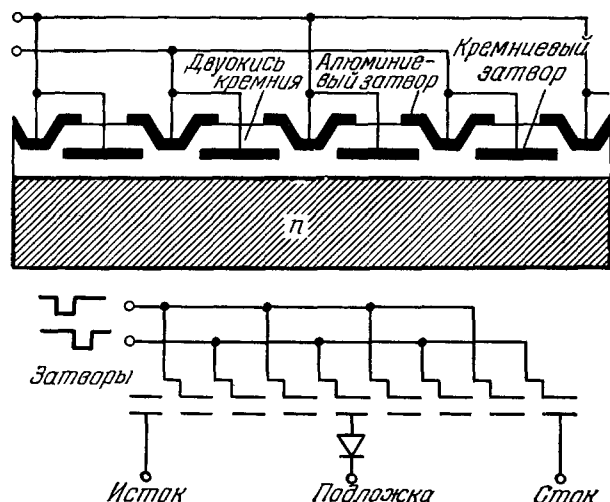


Рис. 13. Зарядосвязывающее устройство — это микросхема, которая не может быть заменена никаким набором отдельных элементов.

Это устройство напоминает растянутый МОП-транзистор с большим количеством затворов (вплоть до 1000) между истоком и стоком. В показанном на рисунке устройстве с каналом p -типа зарядовый пакет, состоящий из дырок, может короткое время удерживаться на месте путем приложения постоянного отрицательного напряжения к одному из затворов. Зарядовый пакет передвинется на новое место под вторым затвором, если приложить к нему отрицательное напряжение и одновременно снять напряжение с первого затвора. Прикладывая импульсы к чередующимся затворам, можно передать последовательность зарядовых пакетов от истока к стоку.

при аннигиляции испускается инфракрасное излучение, а в полупроводниковом веществе арсениде галлия излучаемый свет имеет длину волны в красной части видимого спектра. Числовые индикаторы многих электронных калькуляторов изготавливаются в виде матриц из светоизлучающих диодов из арсенида галлия.

Недавно было разработано микросхемное устройство, являющееся квинтэссенцией микроэлектроники. Невозможно собрать его аналог из отдельных элементов. Это устройство называется зарядосвязывающим и является остроумным развитием идеи МОП-транзистора, работающего в режиме обогащения. Зарядосвязывающее устройство состоит из истока и стока, разделенных длинным рядом затворов (рис. 13). Если к первому затвору приложить напряжение, то пакет инжектированных истоком электронов будет захвачен этим затвором. Если понизить напряжение на первом затворе и одновременно повысить напряжение на втором затворе, зарядовый пакет пригнётся и захватится вторым затвором. При повторе-

нии процесса пакет электронов будет передаваться от затвора к затвору, пока не достигнет стока.

Используя зарядосвязывающее устройство примерно с 1000 затворов, можно создать устройство, запоминающее числа в виде длинных цепочек двузначных символов. Так как плотность упаковки может быть весьма высокой, на одном кристалле уместится много таких устройств. Можно генерировать зарядовые пакеты фотоэлектрически, а не путем инжекции из истока. Следовательно, матрица зарядосвязывающих устройств может служить рабочим элементом телевизионной камеры с численным выходом.

Давно прошло то время, когда ученый, проектирующий микроэлектронное устройство, должен был сначала изучить поведение предполагаемой схемы, создавая макеты из отдельных элементов. Эта процедура заменена исследованием при помощи вычислительных машин математической модели проектируемого контура. Модель в свою очередь должна основываться на точном описании электрических свойств входящих в схему элементов. Так как элементы все больше удаляются от привычных «человеческих» масштабов, все труднее становится проверка правильности соответствующих описаний. При размерах элементов менее микрона становятся существенными или даже доминирующими физические процессы несущественные в больших устройствах. Следовательно, необходимо развивать улучшенные модели схем, и это является одним из условий продолжения прогресса.

Столь же систематический подход потребуется для производства следующего поколения интегральных схем. Однако необходимо при помощи моделей не только исследовать работу схем, но и получать рекомендации для их изготовления. В настоящее время, в отличие от моделей электрического поведения, модели для конструирования элементов находятся на примитивной стадии развития: конструирование остается эмпирическим искусством. Дальнейший прогресс микроэлектроники зависит от того, насколько мы сможем предсказывать свойства транзисторов, исходя из методов их изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

- Gibbons J. F. Semiconductor Electronics. — N.Y.: McGraw Hill, 1966.
Grove A. S. Physics and Technology of Semiconductor Devices. — N.Y.: J. Wiley and Sons, 1968.
Meindl J. D. Micropower Circuits. — N.Y.: J. Wiley and Sons, 1969.
Hamilton D., Howard W. Basic Integrated Circuit Engineering. — N.Y.: McGraw Hill, 1975.