ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.

Электроника является динамично развивающейся областью науки и техники. Весь арсенал средств, которым располагает современная электроника, был создан всего за несколько десятилетий. Фундамент электроники был заложен трудами физиков в XVIII— XIX в. Выделяют несколько этапов развития электроники.

1 этап — до 1904 г. (в 1873 г. А. Лодыгин изобрел лампу накаливания с угольным стержнем; в 1883 г. Т. Эдисон открыл явление термоэлектронной эмиссии; в 1874 г. Ф. Браун открыл выпрямительный эффект в контакте металла с полупроводником; в 1895 г. А. Попов использовал этот эффект для детектирования радиосигналов и т.д.).

2 этап — до1948 г.— период развития вакуумных и газоразрядных электроприборов (в 1904 г. Д. Флеминг сконструировал электровакуумный диод; в 1907 г. Ли—де—Форест изобрел триод; в 1920 году Бонч—Бруевич разработал генераторные лампы с медным анодом и водяным охлаждением, мощностью до 1 кВт; в 1924 г. Хеллом разработана экранированная лампа с двумя сетками (тетрод) и в 1930 г. лампа с тремя сетками (пентод); в 1929 г. В. Зворыкиным был изобретен кинескоп; с 30–х годов ведется разработка приборов СВЧ—диапазона и т.д.).

В настоящее время электровакуумные приборы занимают значительную нишу в ряду существующих классов приборов электроники и работают в области высоких уровней мощностей $(10^6-10^{11}~{\rm Bt})$ и частот $(10^8-10^{12}~{\rm \Gamma ц})$.

3 этап – с 1948 г. – период создания и внедрения дискретных полупроводниковых приборов.

4 этап – с 1960 г. – период развития микроэлектроники (Роберт Нойс предложил идею монолитной интегральной схемы и, применив планарную технологию, изготовил первые кремниевые монолитные интегральные схемы).

Развитие серийного производства интегральных микросхем шло ступенями:

- 1) 1960 1969 гг. интегральные схемы малой степени интеграции, 10^2 транзисторов на кристалле размером 0.25×0.5 мм (МИС).
- 2) 1969 1975 гг. интегральные схемы средней степени интеграций, 10^3 транзисторов на кристалле (СИС).
- 3) 1975 1980 гг. интегральные схемы с большой степенью интеграции, 10^4 транзисторов на кристалле (БИС).
- 4) 1980 1985 гг. интегральные микросхемы со сверхбольшой степенью интеграции, 10^5 транзисторов на кристалле (СБИС).
- 5) С 1985 г. интегральные микросхемы с ультрабольшой степенью интеграции, 10^7 и более транзисторов на кристалле (УБИС).

Полупроводниковая электроника и микроэлектроника являются основными направлениями при изучении курса электроники в ПГАТИ, поэтому на них следует обратить особое внимание.

5 этап – с 80-х годов развивается функциональная электроника, позволяющая реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стан-

дартных базовых элементов (диодов, резисторов, транзисторов и т.д.), базируясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле.

6 этап – в последние годы развивается новое направление – наноэлектроника. Нанотехнологии позволяют манипулировать атомами (размещать в каком—либо порядке или в определенном месте), что дает возможность конструировать новые приборы с качественно новыми свойствами.

Охватывая широкий круг научно-технических и производственных проблем, электроника опирается на достижения в различных областях знаний. При этом, с одной стороны, электроника ставит задачи перед другими науками и производством, стимулируя их дальнейшее развитие, и с другой стороны, вооружает их качественно новыми техническими средствами и методами исследования.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

К изделиям электроники относят дискретные элементы и компоненты, а также интегральные схемы (ИС).

Обычно их делят на два больших класса: активные и пассивные. **Пассивные** дискретные элементы предназначены для перераспределения электрической энергии: резисторы, конденсаторы, индуктивности, трансформаторы [4, с.110-172], интегральные схемы (ИС) в виде наборов пассивных элементов.

К **активным** относят такие компоненты, которые способны преобразовывать электрические сигналы и усиливать их мощность. Это диоды, транзисторы, тиристоры, ИС и т.д.

По виду рабочей среды выделяют следующие крупные группы приборов (табл.1): полупроводниковые, вакуумные, газоразрядные, хемотронные (рабочая среда – жидкость).

Таблица 1. Вид Рабочая среда Носители Примеры приборов Электронные лампы, электронно-Электровакуумные Вакуум Электроны лучевые трубки, вакуумные люминесцентные индикаторы Газ при низком Ионы и Газоразрядные Ионный стабилитрон, тиратрон. давлении электроны Кристалличе-Электроны и Полупроводниковые диоды, тран-Полупроводниковые ский полупродырки зисторы, тиристоры. водник Специальные приборы, приме-Раствор Ионы и Хемотронные нение ограничено очень низкиэлектролита электроны ми частотами

По виду энергии, действующей на входе и выходе, приборы делятся на электропреобразовательные (на входе и выходе - электрические сигналы), электросветовые (на входе - электрический сигнал, на выходе - оптический), фото-электрические (на входе - оптический сигнал, на выходе - электрический), термоэлектрические (на входе - тепловой сигнал, на выходе - электрический), акустоэлектрические (акустические сигналы преобразуются в электрические и наоборот), магнитоэлектрические, механоэлектрические и оптоэлектронные (электрический сигнал в оптический, затем опять в электрический).

По *диапазону рабочих частот* электронные приборы делятся на низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные; *по мощности* — на маломощные, средней мощности и мощные.

К электродам электронных приборов подключают источники как постоянных, так и переменных напряжений, поэтому различают статический, квазистатический и динамический режим работы приборов. Режим работы прибора при постоянных напряжениях, все параметры которого не изменяются во времени, называют *статическим*. Режим, при котором хотя бы на одном из электродов напряжение изменяется во времени, называют *динамическим*. Если параметры режима изменяются во времени медленно (в каждый момент времени несущественно отличаются от статических), то такой режим называют *квазистатическим*.

Основными свойствами и параметрами электронных приборов являются:

- вид преобразования сигнала, выполняемого прибором;
- номинальные и предельные значения параметров (по току, напряжению и т.п.);
 - частотные свойства (частотный диапазон);
 - интервал рабочих температур;
 - уровень собственных шумов;
 - потребляемая от источников питания мощность;
 - стабильность параметров;
 - малые габариты и вес;
 - надежность, долговечность и др.

ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Барьеры на пути перехода от микро- к наноэлектронике

В основе физики полупроводников и всей остальной микроэлектроники лежит фундаментальное понятие – энергетический барьер. Это, прежде всего, традиционный p-n-переход, а также граница полупроводника либо с другим веществом, либо с окружающей средой (воздух, вакуум, твердое тело). Основной тенденцией развития микроэлектроники является увеличение степени интеграции. В соответствии с пресловутым законом Мура число элементов, входящих в состав одной только микросхемы, удваивается каждые полтора (два) года. Однако на пути продолжения этой тенденции встают барьеры: технологический, физический, энергетический... Так, фотолитографическая технология, лежащая в основе технологии производства интегральных схем, достигла своего физического совершенства. Сейчас на подходе рентгеновская и лазерная литография. Лазерная литография позволяет получить разрешение элементов схемы лучше 10 нм. Процесс печати схемы занимает всего 250 нс. На преодоление технологического барьера направлена американская программа «The National Technology Roadmap for Semiconductors». В соответствии с этой программой к 2015 году будут проектироваться транзисторы с шириной затвора 20 нм при технологической норме 30 нм. Будут увеличены площади кристаллов интегральных схем до 10 см². Это позволит разместить на кристалле 109 вентилей. При этом рабочая частота составит 30 Гц-30 ГГц. Однако до сих пор множество вопросов, касающихся преодоления физических барьеров, остаются нерешенными. Среди них известная проблема межсоединений: в современных интегральных схемах лишь 10% площади занято транзисторами, а 90% межсоединениями. Масштабирование элементов транзисторных структур с целью перехода от микро- к нанометровым масштабам является весьма деликатным процессом. Создать транзисторные структуры в нанометровом масштабе сегодня уже под силу серьезным фирмам. Однако так и не решены вопросы их интеграции, вопросы создания групповой технологии производства интегральных схем в нанометровом масштабе, создание новых или традиционных компонентов интегральных схем. В традиционных схемах микроэлектронной схемотехники устройства всегда имеют «вход» и «выход», которые пространственно разделены и локализованы в электрической схеме, а также в определенных контактах интегральной схемы. Все связи в интегральных схемах реализованы с помощью гальванических или емкостных связей. Реализация таких связей осуществляется путем изменения типа проводимости исходной подложки и создания различных энергетических барьеров на пути потока носителей (электроны, дырки).

Информация обрабатывается и хранится в виде отдельных битов (логические нуль и единица), которые физически реализуются в виде тока, напряжения или заряда в определенной точке интегральной схемы.

Совсем иная физическая картина рисуется при рассмотрении наноэлектронных устройств. Уменьшение размеров на несколько порядков практически меняет физические основы работы наноэлементов. Так, в наноэлементе используются уже не электроны, как частицы, переносящие электрический заряд, а их

волновые функции. Процессы дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных элементов, и вовсе отсутствуют в наноэлектронных элементах. В основе наноэлементов лежат полевые связи, сформированные потенциальные барьеры. «Вход» и «выход» элемента локализованы не в пространстве, а во времени. В наноэлектронных структурах определение «входа» или «выхода» возможно только в определенные промежутки времени, когда существует определенный порог внешних воздействий, соответствующий «входу» или «выходу». Этот промежуток времени получил название рефракторного периода и с его помощью обеспечивается распространение сигнала в определенном направлении. Переход от одного устойчивого состояния наноструктуры в другое происходит через возбужденные неустойчивые состояния.

Как правило, наноэлектронный элемент состоит из набора квантовых ям и потенциальных барьеров. Энергетический спектр таких элементов зависит от размеров, а добавление лишь одного электрона существенно меняет энергетическую диаграмму. В микроэлектронике функциональный логический элемент представляет собой совокупность структурных компонентов — резисторов, конденсаторов, диодов и транзисторов. В наноэлектронике структурированные компоненты обладают свойством многофункциональности, и способны выполнять сложные динамические функции.

В качестве материалов изделий микроэлектроники используются легированные полупроводники. В наноэлектронике применяются гетероструктуры, наноструктурированные материалы, кластеры, органические материалы. Технология формирования наноструктур основана на процессах направленного роста, методах, связанных со сканирующими туннельным и атомным силовым микроскопами. Если плотность размещения активных элементов в интегральных схемах достигает 10^8 см², то в устройствах наноэлектроники она может достигать 10^9 — 10^{10} элементов на квадратный сантиметр. Наноэлементы дают возможность получать передатчик и приемник в диапазонах частот 10^9 — 10^{13} Гц.

Физические основы наноэлектроники

Под **наноэлектроникой** понимают направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разработка нанотехнологии создания приборов и устройств, в которых данное взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации.

Под **нанотехнологией** будем понимать совокупность способов и приемов создания элементов и приборов нанометровых размеров, в том числе из отдельных молекул и атомов.

Исключительно малая инерционность электронов позволяет эффективно использовать взаимодействие электронов с микрополями внутри атома, молекулы или кристаллической решетки для создания приборов и устройств нового поколения, отличающихся высокой производительностью, ничтожным потреблением энергии, сверхминиатюрными размерами.

Наноэлектроника является логическим развитием микроэлектроники. Твердотельные информационные приборы уменьшились от микро- (10^{-6}) до нанометрового (10^{-9}) размера.

По мере приближения характерного размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляются квантовые свойства электронов. Если в микроэлектронных приборах поведение электрона определилось поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в наноэлектронных приборах поведение электрона определяется его волновыми свойствами.

Де -бройлевская длина волны электрона равна

$$\lambda_e = \frac{h}{P}$$

ипи

$$\lambda_e = \frac{2\pi\hbar}{m_e \cdot V},$$

где $P = m_e \cdot V$ – импульс электрона, m_e - масса электрона, V - скорость его движения,

 \hbar - постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$).

Импульс электрона P связан с ускоряющим напряжением соотношением $P = \sqrt{2mE}$,

где E- энергия электрона. Для определения длины волны электрона удобно пользоваться практической формулой

$$\lambda \cong \sqrt{\frac{150}{V}}$$
,

где V— ускоряющее напряжение, B; λ — длина волны Å.

Движение электрона как волны описывается уравнением Шредингера для нерелятивистских электронов и уравнением Дирака для релятивистских. В наноэлектронике обычно используются нерелятивистские электроны. Для электрона массой m_e , движущегося под действием силы, порождаемой потенциалом V(x, y, z, t), уравнение Шредингера имеет вид:

$$-i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi + V(r)\Psi.$$

Для электрона, находящегося в стационарном состоянии традиционно используют уравнение Шредингера в виде:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi = E \psi$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - функция положения электрона в пространстве;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} -$$
 оператор Лапласа; *E*— полная энергия электрона; ψ ,

Ψ- собственные функции соответствующих волновых уравнений, называемые волновыми функциями частиц (электронов). Данное уравнение не содержит

времени. Смысл функции ψ состоит в том, что квадрат ее модуля определяет плотность вероятности нахождения нахождения электрона в объёме dxdydz.

Движение электрона в свободном пространстве V(r) = C описывается уравнением

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi = E\psi$$

Распространение волновой функции электрона в твердотельных наноразмерных структурах связано с эффектом квантового ограничения, интерференцией, дифракцией волновой функции электрона, туннелирования через потенциальные барьеры.

В приборах квантовой наноэлектроники роль носителя информации отводится волновой функции электрона. Такой подход в обработке, предоставлении и хранении информации сводится к контролируемой передислокации волновой функции в наноструктуре.

Туннелирование электронов

Процесс туннелирования электронов заключается в квантовом переходе системы через потенциальный барьер в случае, когда энергия электронов

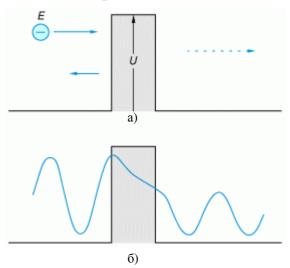


Рис. 1. Процесс взаимодействия электрона с энергией E с барьером в классической интерпретации (а) и взаимодействие волновой функции электрона с потенциальным барьером высотой U > E (б)

Процесс туннелирования квантовой механикой разрешен благодаря соотношению неопределенности между импульсом частицы и ее координатами. Поэтому имеется отличная от нуля вероятность обнаружения электрона в области, запрещенной классической механикой, например за потенциальным барьером. Соответственно появляется определенная вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер и возникновение процесса туннелирования через барьер. Эта вероятность тем больше, чем меньше масса частицы, уже потенциальный барьер и чем меньше разность между энергией частицы и высотой потенциального барьера. На рис. 1 показан процесс взаимодействия электрона с барьером в классическом и квантовом приближениях.

меньше высоты потенциального барьера.

В многослойной структуре с ограниченным числом слоев механизм туннелирования носит резонансный характер. Другими словами, туннельно просочиться через структуру с множеством потенциальных барьеров могут только электроны с определенной энергией. Рассмотрим многослойную, структуру—сверхрешётку, сформированную из слоев GaAs ($n^+ \sim 10^{17}$ см⁻³, $E_F = 0.005$ эВ) и $Al_{0.5}$ $Ga_{0.5}$ As ($n^+ \sim 10^{17}$ см⁻³), которые создают барьеры ~ 0.5 эВ (рис. 2).

Процесс туннелирования в многобарьерной структуре может быть описан уравнением Шредингера для периодического потенциала U(x), взятого вдоль сверхрешетки.

Общую энергию электронов E запишем как сумму продольных и поперечных составляющих:

$$E = E_1(U) + \frac{\hbar^2 k t^2}{2m^*}$$

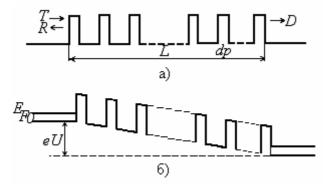


Рис. 2. Энергетическая диаграмма сверхрешетки длиной L в равновесии (а) и при приложении внешнего напряжения (б). Здесь T — падающий поток электронов, R — отраженный поток электронов, D — прошедший поток электронов.

Длина свободного пробега электронов в полупроводнике составляет несколько периодов сверхрешетки (~ 5 барьеров). На рис. 3 приведена зависимость рассчитанной плотности тока от приложенного напряжения при T=0K

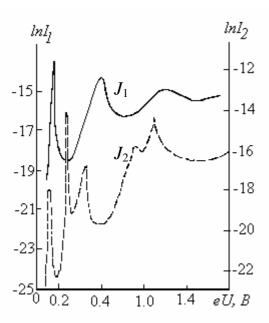


Рис. 3 Зависимость тока от напряжения для структуры с двумя (J_1) и тремя барьерами (J_2)

для структур с двумя (J_1) и тремя барьерами (J_2)

Вольтамперные характеристики носят резонансный характер и имеют максимумы. Соответственно, существуют области структуры с дифференциальным отрицательным тивлением (ОДС). Первый пик ВАХ приходится на 0,082 В, что соответствует первому квантоворазмерному уровню в яме. Максимальный ток возникает при напряжениях, при которых резонансные энергии кратны энергии Ферми E_F . Вследствие того, что средняя длина свободного пробега электронов имеет конечное значение, электроны могут протуннелировать через несколько слоев прежде, чем они столкнутся. Большинство электронов вернутся на низкие уровни. Под влиянием приложенного напряжения эти электроны будут туннелировать через следующие слои. Многократное некогерентное туннелирование приводит к расширению пиков

и увеличению напряжений на пиках на ВАХ.

Квантовые точки

При запирании электрона в полупроводниковой среде квантовые эффекты начинают возникать при характерных размерах области запирания ~ 100 Å. Технология изготовления квантовых точек предполагает многократное исполь-

зование электронолитографических шаблонов и многоразовое реактивное травление, которые используются в технологии приготовления интегральных схем.

После ряда этапов технологического процесса резист заменяется тонким слоем металла в тех областях поверхностей, которые были просканированы электронным лучом при повышенной интенсивности. Последующая обработка потоком реактивной плазмы позволяет стравить материал, незакрытый слоем металла. При этом металлами остаются столбики с характерным размером примерно 1000 Å. Сверху и снизу от материала, образующего квантовую яму расположены тонкие слои диэлектрика, называемые туннельными барьерами, за которыми следуют проводящие контактные слои (рис. 4).

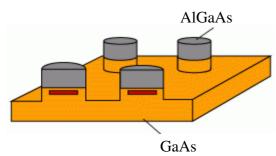


Рис. 4. Квантовые точки, сформированные в двумерном электронном газе на границе двух полупроводников

Изолирующие слои запирают электроны в яме. Квантово-механическое туннелирование электронов может происходить как в яму, так и из ямы. Как только напряжение на контактах ямы окажется соответствующим энергии одного из ее резонансных состояний, туннельный ток возрастет.

Приповерхностный слой, из которого электроны уходят вглубь, образует изолирующую оболочку вокруг столбика. Из столбика с характерным размером 1000 Å получается квантовая точка диаметром 100 Å.

Конструктивно квантовая точка в виде столбика не совсем удобна. В альтернативной конструкции поверх и ниже лежащего слоя материала, образующего квантовую яму, наносятся электроды определенной формы. Если на эти электроды подать напряжение, то электростатическое поле вытолкнет электроны из нижележащего слоя везде, за исключением малых островков — квантовых точек. Квантовым запиранием электронов в островках можно управлять напряжением электродов.

Исследования показали, что в каждой точке можно запирать по одному электрону, добавляя или вычитая по одному электрону за один процесс, что аналогично биту в цифровой технике.

НОВЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Наноэлектроника является, с одной стороны, неким продолжением развития традиционных идей микроэлектроники, связанных со схемотехническими методами обработки информации. С другой стороны, совершенно новые идеи, касающиеся квантово-размерных явлений и эффектов, открывают широкие возможности создания приборов нового поколения. Американская программа развития технологии «The National Technology Roadmap For Semiconductors» предусматривает, в частности, создание к 2015 году транзисторов с шириной затвора 200 Å. Это позволит разместить 10 транзисторов на 1 см² интегральной схемы при частотах 30—40 ГГц.

Полевые транзисторы

Традиционные полевые транзисторы, выполненные по субмикронной технологии, приобретают новые свойства. Уменьшение толщины окисла, длины канала приводит к квантованию поперечного движения в канале. В результате образуется квазидвумерный газ носителей заряда, увеличивается их подвижность и туннельный ток. При длинах затворов транзисторов до 20 нм они становятся сравнимы с длиной когерентности и длиной волны Де-Бройля при комнатной температуре.

Используя кремниево-германиевую технологию, были получены двух- и трехзатворные транзисторы, которые обладали более эффективным управлением. Фирма IBM создала кремниево-германиевый транзистор, способный работать 350 млрд циклов в секунду. На основе этой конструкции транзисторов можно получить специализированный микропроцессор для телекоммуникационных приборов, работающих на частоте 150 ГГц. Американская фирма AMD создала двухзатворный транзистор с длиной затвора 10 нм, изготовленный по технологии Fin Field Effect Transistor (Fin FET), при которой используется кремниевый плавник (FIN), позволяющий предотвращать утечки токов в от-

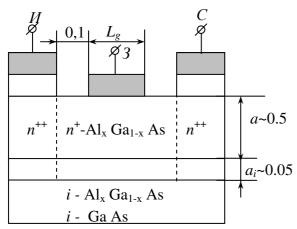


Рис.5. Структура арсенид–галлиевого транзистора: И – исток, C – сток, 3 – затвор.

ключенном состоянии, при этом резко возрастает производительность информационной системы. «Плавниковая» технология представляет собой островок кремния, высота которого больше, чем ширина, на котором и изготавливается транзистор. Короткий участок такого плавника и становится каналом. Правда, это уже не планарный прибор.

Весьма перспективна технология кремния на диэлектрике. Толщина кремния в 20 нм позволяет сформировать планарные транзисторы практически малых паразитных емкостей.

Полевой транзистор на гетеро-

структурах (ГСПТ) с использованием арсенида галлия представляет собой эпитаксиальную пленку, нанесенную на полупроводниковую подложку (рис. 5). Образуется гетеропереход с потенциальной ямой со стороны подложки, в которой формируется проводящий канал, подобный каналу в сильно инвертированном выраженном поверхностном слое.

Когда квазиуровень Ферми подвижных носителей, представляемый потенциалами истока и стока, пересечет дно ямы, то яма деформируется. Она станет узкой и состояние носителей в ней приобретет квантовый характер. Образуется квазидвумерный газ, подвижность носителей в котором увеличится благодаря уменьшению рассеивания носителя на примесях.

Причиной тому является малая концентрация остаточных заряженных центров в буферном слое полуизолирующей подложки вблизи поверхности ($\sim 10^{14}~{\rm cm}^{-3}$) и высокое качество поверхности границы гетероперехода. Форми-

рование со стороны эпитаксиальной пленки тонкого, порядка нанометра, нелегированного пограничного слоя, который отделяет канал от сильнолегированной области в эпитаксиальной пленке, также способствуют увеличению подвижности носителей. Наиболее эффективны и канальные ГСПТ, выполненные на основе гетероструктуры типа n^+ - Al_x - $Ga_{l-x}As/i$ -GaAs со значением x-0,3. При нормальной работе эпитаксиальная плёнка обедняется носителями, а пространственный заряд в ней создаётся ионизированными донорами с концентрацией – 10^{-18} см⁻³. При ширине затвора L_g -0,25 и температуре 300 К обнаруживается квазибаллистический характер переноса носителей.

Транзисторы с резонансным туннелированием

Технология молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать различные структуры с квантовыми ямами, создавать туннельные полупроводниковые гетероструктуры с определенными потенциальными барьерами, сверх-

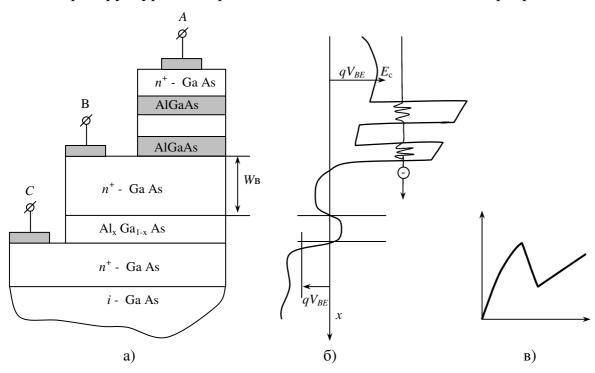


Рис. 6. Структура транзистора на горячих электронах с резонансным туннелированием (а), его энергетическая диаграмма (б) и выходная ВАХ (в)

решетки с периодической структурой туннельных барьеров.

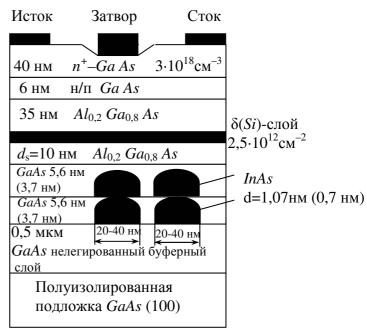
На рис. 6 приведена типовая структура транзистора на горячих электронах с резонансным туннелированием (Resonant Tunneling Hot Electron Transistors).

Эмиттер имеет структуру, состоящую из двух потенциальных барьеров с заключенной между ними квантовой ямой шириной ~5 нм. За счет резонансного туннелирования в базу поступает монохроматический электронный поток. Характерной особенностью ВАХ такого транзистора является ее *N*-образный характер с участком отрицательной дифференциальной проводимости.

Научный и практический интерес представляют полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми точками. Методом гетероэпитаксии слоя на несо-

гласованной по параметру решетки подложке получены транзисторы, в которых квантовые точки встраиваются в «токовый» канал (рис. 7). Средний размер

квантовых точек составляет ~ HM, a концентрация— $3 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$. В сильных полях была выявлена аномальная двухступенчатая форма ВАХ, обусловлено что вкладом квантовых точек в процесс протекания тока. Это объясняется двумя типами состояния электронов: подвижные двумерные электроны и электроны, локализованные на квантовых точках. Это принципиально новый тип транзистора на горячих электронах, который имеет хорошие перспективы использования в высокочастотных системах.



Puc. 7. Структура *n-AIGaAs / GaAs / InAs / GaAs / InAs / GaAs / InAs / GaAs* с квантовыми точками *InAs*, встроенными в приборный канал

Одноэлектронные приборы

В туннельных переходах малой площади при низких температурах наблюдается дискретное туннелирование одиночных электронов. Это возможно в переходах с малой собственной емкостью C, при которой напряжение изменяется на величину $\Delta V = E/S$, причем это изменение напряжения должно быть больше термических флуктуации $\Delta V \ge kT/E$, где k— постоянная Больцмана. Эта смелая идея легла в основу нового перспективного направления в наноэлектронике — одноэлектроники.

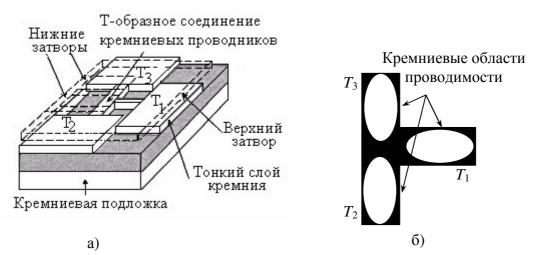


Рис. 8. Структура кремниевого T- образного транзистора (a) и схема расположения кремниевых областей проводимости (б).

Фундаментальным одноэлектронным устройством является одноэлектронный транзистор. Он содержит область проводимости, соединенную с истоковыми и стоковыми электродами — туннельными барьерами, которые имеют емкостную связь с затвором.

Изменяя напряжение на затворе, можно моделировать ток через область «исток—сток». Если создать несколько областей с взаимной емкостной связью, то возможно перемещение через эти области дискретных электронов. В этом случае можно реализовать логические функции. Одной из перспективных конструкций является Т-образная транзисторная структура (рис. 8).

Транзисторы изготавливаются на кремниевой подложке по технологии изоляции имплантированным кислородом (S1MOX, Separation by IMplantation of OXygen). Такая технология позволяет получить тонкий слой кремния, изолированный от кремниевой подложки.

С помощью процесса электронно-лучевой литографии возможно получение T-образного соединения из слоя кремния толщиной 30 нм, шириной плеча 40—50 нм и длиной плеча 50—80 нм. Кремниевые области проводимости сделаны так, что сужения кремниевых проводников образуют туннельные барьеры.

Такое конструктивное решение стало возможным благодаря использованию эффекта самопроизвольного формирования сужения кремниевого проводника в процессе окисления. Этот эффект основан на двух противоположных механизмах окисления: снижение степени окисления в связи с ростом внутренних напряжений и рост степени окисления вблизи края проводника. *Т*-образная конструкция позволяет снизить степень окисления в плечах из-за наличия внутренних напряжений. Одновременно можно увеличить степень окисления в точке соединения областей, где из-за относительно большой площади снижается внутреннее напряжение.

Тонкие поликремниевые затворы над каждым плечом T – образного соединения были сформированы с помощью электронно-лучевой литографии и процесса их легирования фосфором. Точность перекрытия в 20 нм позволяет использовать их для управления электростатическим потенциалом областей проводимости каждого плеча.

После изготовления тонких затворов был сформирован промежуточный изолирующий слой оксида кремния и верхний поликремниевый затвор. И наконец, используя верхний затвор как маску, формировались выводы истока и стока путем имплантации ионов фосфора.

Сложную транзисторную структуру можно разложить на отдельные части и для удобства расчета составить ряд эквивалентных схем.

Устройство состоит из двух одноэлектронных транзисторов, связанных между собой через туннельный конденсатор. Область в плече T_1 не имеет над собой затвора, и ее электростатический потенциал управляется верхним затвором $L_{\rm g3}$ (рис. 9).

Потенциал кремниевой области в плече T_2 управляется верхним и нижним затворами L_{g2} и L_{g3} . Это возможно из-за неполной экранировки области

проводимости каждой из областей. Верхний электрод играет роль общего затвора, управляющего всеми кремниевыми областями проводимости.

Управление напряжением нижнего затвора позволяет получать различные конфигурации транзисторных структур. Если включен канал J_3 , то получаются два параллельно включенных одноэлектродных транзистора (рис. 10 а).

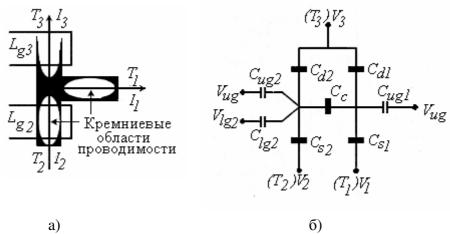


Рис. 9. Структурная схема (a) и эквивалентная схема устройства для двух областей проводимости (б)

Если считывать напряжение в плече T_3 , то формируется аналог инвертора КМОП-типа (рис. 10 б). Если канал J_3 выключен, то формируется схема из двух последовательно включенных транзисторов, работающих в одноэлектронном устройстве передачи. Эта схема также называется одноэлектронным насосом (рис. 10 в).

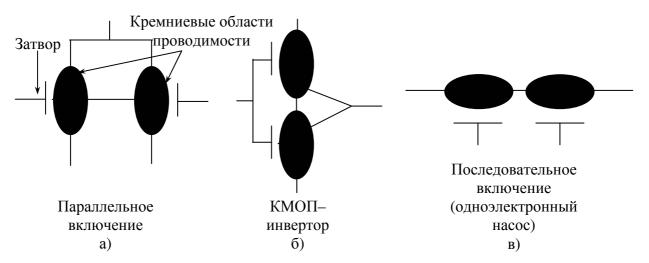


Рис. 10. Формирование различных структур при включенном (a, б) и выключенном канале J_s (в)

Устройство может быть использовано для коммутации тока между двумя кремниевыми областями. Если подать напряжение $V_3 = 10$ мB, а $V_1 = V_2 = 0$, то вольтамперная характеристика будет иметь вид, представленный на рис. 11.

На ВАХ видны колебания, связанные с эффектом кулоновской блокады. Различные периоды колебаний связаны с размерами областей. Противофазность колебаний позволяет осуществить коммутацию тока между плечами T-

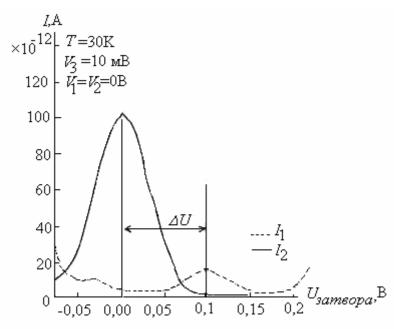


Рис. 11. ВАХ одноэлектронного насоса (T= 30 K)

образного соединения. Отметим, что переключение токов с соотношением 1:20 реализовано в области 200×300 нм².

Ha основе *T*образных транзисторных тэжом структур быть реализован ряд уникальсхем. Одноэлектронный коммутатор или одноэлектронный насос представлен на рис. 12 а. Гармонический сигнал управления с частотой fподается на затворы и

позволяет прокачивать одиночные электроны. На рис. 12б представлен одноэлектронный коммутатор, использующий три области проводимости.

В этом устройстве соединены два одноэлектронных насоса. Каждый

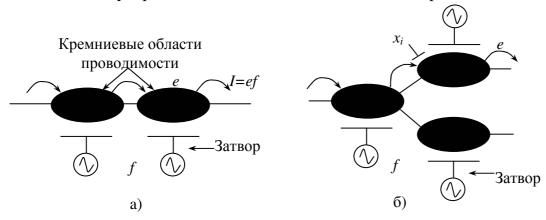


Рис. 12. Схема устройств перемещения одиночных электронов: одноэлектронный насос (а) и коммутатор одноэлектронного перемещения (б)

одиночный электрон может перемещаться по одному из двух путей — плат T-образного соединения. Выбор конкретного пути перемещения определяется входным управляющим сигналом X. Такие устройства позволяют осуществить построение логических структур с использованием отдельных электронов. Эти одноэлектронные структуры могут иметь сверхвысокую степень интеграции и сверхмалое потребление мощности при минимальных габаритах.

Новые материалы наноэлектроники

С 60-х годов прошлого века стала известна третья модификация углерода, структура которого состоит из одномерных линейных цепочек. В 1960 году были найдены стабильные долгоживущие кластеры C_n , где n = 32, 44, 50, 58, 60,

70, 72, 78, 80, 82 и т. п. Наиболее стабильные из них C_{60} и C_{70} назвали фуллеренами в честь американского архитектора и изобретателя Ричарда Фуллера, предложившего строительные конструкции в виде полусфер или *полусфероид*, состоящих из фрагментов многогранных поверхностей.

Аллотропная модификация углерода C_{60} получила название ϕ уллерит.

Фуллерены, которые образуют соединения и комплексы с простыми элементами, получили название фуллериды.

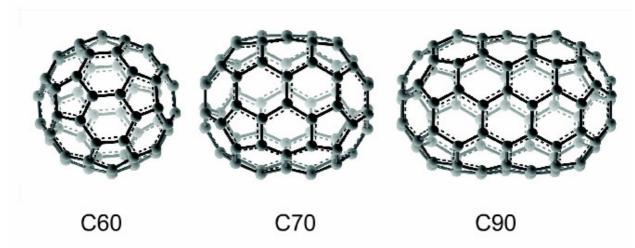


Рис. 13. Аллотропные модификации углерода-структуры некоторых фуллеренов

В отличие от графита и алмаза, представляющих собой периодическую решетку атомов, фуллерены представляют собой молекулы. Минимальный элемент фуллерена состоит не из атомов, а из молекул. Каркас молекулы C_{60} , например, состоит из 12 правильных пятиугольников (пентагонов) и 20 неравносторонних шестиугольников (гексагонов).

Впервые фуллерены были обнаружены при анализе продуктов абляции в результате воздействия лазерного излучения на графит.

Фуллерены нашли применение в наноэлектронике в качестве механически прочных резистов с высоким разрешением. Добавление фуллеренов позволяет повысить стойкость резистов к плазменному травлению и уменьшить оптическое поглощение на длине волны 193 нм. Сейчас резисты, содержащие фуллерен, выходят на уровень эффективного коммерческого использования.

В 1991 году японский исследователь Сумио Инджима изучал осадок, образующийся на катоде при распылении графита в электрической дуге в вакууме или инертном газе. Цепочки осажденных атомов углерода завиваются в трубочки диаметром несколько нанометров, длиной до нескольких микрон. Концы трубок закрыты одно- или многослойными полусферическими молекулами, напоминающими по структуре фуллерены.

Протяженные структуры, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах, получили название **нанотрубок**. С точки зрения структуры нанотрубки можно разделить на два типа. Одним из них являются трубки, свитые из цилиндрически изогнутого листа графита — так называемые одностенные нанотрубки, а другим являются многостенные нанотрубки, в которых вышеупомянутые цилиндрические листы графита организованы в виде

концентрической структуры. При диаметре в несколько нанометров ее длина может составлять от нескольких нанометров до нескольких микрон (высокое аспектное отношение).

На современном этапе исследований возможны два применения углеродных нанотрубок (УНТ) в полупроводниковых приборах. Одно из них состоит в использовании УНТ в качестве канала затвора в полевых транзисторах, учитывая, что характеристики, подобные характеристикам полупроводника, могут быть получены путем контроля вектора хиральности. Другое применение заключается в использовании УНТ в качестве межслойных контактов или многослойных пленок, принимая во внимание такие преимущества УНТ, как высокая электропроводность, высокая теплопроводность, высокая плотность электрического тока и высокое аспектное отношение. Например, медная или вольфрамовая проволока диаметром 100 нм и длиной 500 нм может быть заменена УНТ с диаметром 2-3 нм. Только одностенная УНТ демонстрирует характеристики, похожие на характеристики полупроводника. Было замечено, что одностенная УНТ может иметь разную ширину запрещенной зоны: 1.5 эВ, как у арсенида галлия, приблизительно 1 эВ, как у кремния или 0.7 эВ, как у германия, в зависимости от различий в диаметре. Причем, ширина запрещенной зоны изменяется при возрастании диаметра нанотрубки всего на 0.1 нм, что вызывает необходимость жесткого контроля диаметра УНТ для того, чтобы получить желаемую ширину запрещенной зоны.

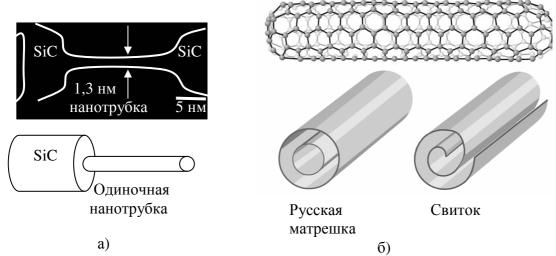


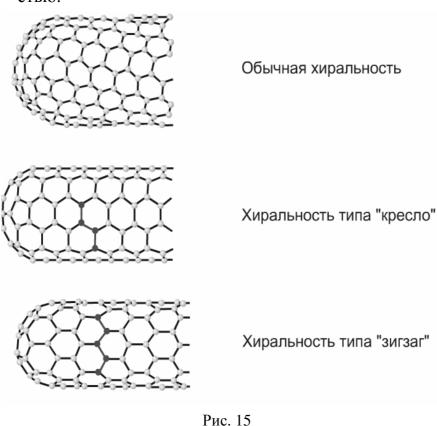
Рис. 14. Углеродные нанотрубки: общий вид в электронном микроскопе (а) и их структура (б)

На рис. 14 представлены нанотрубки, полученные в исследовательском центре компании NEC.

Нанотрубки обладают рядом уникальных свойств. Однослойные нанотрубки могут удлиняться на 16% длины. Нанотрубка в 6 раз легче, и в 50-100 раз прочнее стали (несмотря на свою "невидимость"). Нанокабель от Земли до Луны из одиночной трубки можно было бы намотать на катушку размером с маковое зернышко, а небольшая нить диаметром 1 мм, состоящая из нанотрубок,

могла бы выдержать груз в 20 т, что в несколько сотен миллиардов раз больше ее собственной массы!

Из нанотрубок можно получить сверхпрочную и эластичную ткань. Нанотрубки с открытыми концами проявляют капиллярный эффект и способны втягивать жидкости, а также расплавленный металл. Это позволяет на основе нанотрубок изготавливать сверхпроводящие нити диаметром в несколько нанометров. Высокая проводимость нанотрубок сравнима со сверхпроводимостью.



Электрические свойства нанотрубок определяются их хирально-Под хиральностью. понимается угол стью ориентации графитовой плоскости относительно оси трубки. В зависимости OT хиральности однослойная трубка может проявлять свойства графита-полуметалла, не имеющего запрещенной зоны. Нанотрубка может обладать и свойствами полупроводника с шириной запрещенной зоны в пределах 0,01—1,5 эВ.

Если состыковать две нанотрубки, имеющие разную хиральность,

то возможно создание p–n-перехода. Размер такого перехода составляет несколько нанометров и открывается возможность компоновки электронных устройств.

В современных чипах с помощью нанотрубок возможна реализация ультраплотной металлизации. Для этого необходимо научиться приделывать механические контакты к нанотрубкам различной хиральности. Эти контакты не должны содержать дефектов на атомарном уровне.

Электронные свойства нанотрубок можно целенаправленно менять путем их заполнения другими веществами.

Нанотрубки обладают высокими эмиссионными характеристиками. При напряжении в 500 В при комнатной температуре плотность автоэлектронной эмиссии достигает величин 0,1 А/см³.

На основе углеродных нанотрубок разрабатываются ультратонкие дисплейные панели, по своим параметрам превосходящие жидкокристаллические.

Одной из особенностей углеродных нанотрубок является высокое значение диамагнитной восприимчивости. Большая отрицательная магнитная вос-

приимчивость нанотрубок, видимо, обусловлена протеканием электронных токов по окружности нанотрубок. Диамагнетизм усиливается при низких температурах. Однако при применении нанотрубок возникают следующие проблемы. Во-первых, существующие методы получения нанотрубок имеют эмпирический характер. Технологически они не обработаны и поэтому не позволяют получить нанотрубки заданного диаметра и длины заданной хиральности. Вовторых, для практического использования нанотрубок необходимо также решить ряд проблем, связанных с квантованием электрического и магнитного полей, воплотить идеи создания гетероструктур в однослойной нанотрубке.

Разноцветная нанопроволочная нанофотоника

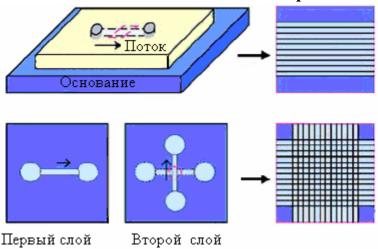


Рис.16. Микроструйное выстраивание нанопроволок

В 2005 году в первом номере первого тома «Small» опубликованы новые данные об исследованиях гарвардских ученых (США) во главе с проф. Ч. Либером по «нанопроволочной нанофотонике». Сегодня в активе этого американо-китайского коллектива целая серия совершенно замечательных «нанопроволочных» изделий. В частности, речь идёт о наносветодиодах, которые получаются, если поперёк нанопро-

волоки из p-Si положить нанопроволоку (НП) из прямозонного полупроводника с электронным типом проводимости. Например, из n-GaN (ΔW =3.36эB), или n-CdS (ΔW =2.42эB), или n-CdS (ΔW =1.70эB), или n-InP (ΔW =1.35эB) и т.д. Авторы преодолели не только сложность получения однородных матриц из пересекающихся нанопроволок, но и не меньшую сложность подключения к ним омических контактов.

Первый биполярный Si-НП транзистор из НП трёх типов $(p, n, u n^+)$ создавали буквально китайским трудом: нужную нанопроволочку приваривали в сканирующем электронном микроскопе к заточенным металлическим макрона-конечникам, а потом уже с использованием оптического микроскопа, держась микроманипуляторами за эти наконечники, почти вслепую, организовывали крест.

Нанопроволоки выкладывают методом микроструи. Если к поверхности окисленной кремниевой пластины прижать пластиковую форму с изготовленными на прижимаемой стороне микроканалами (δ =5-500мкм и длиной от 6 до 20мм), а затем заставить протекать по этим каналам взвесь нанопроволок в этаноле, то проволоки выстроятся по течению как водоросли в ручье. При этом разброс по углу отклонения нанопроволоки от оси канала может быть доведён до 6-7° при скорости потока 8-10мм/с. (рис. 16). Для надёжного крепления на-

нопроволок к подложке поверхность SiO_2 предварительно покрывают самоорганизованным монослоем из триаминопропилтриэтоксисилана (АПТЭС), для чего окунают подложку в миллимолярный раствор АПТЭС в хлороформе на полчаса, а затем нагревают до 110° С в течение 10 минут. Если же требуется, чтобы нанопроволоки не просто вытянулись на подложке параллельно друг другу, а легли упорядоченно, то на подложке методом электронной литографии делают сначала канавки в резисте и АПТЭС клей наносят только в эти канавки. Именно там и выстроятся НП после прокачки над канавками этанольной НП-суспензии (рис. 17). Лёгким поворотом формы второй набор нанопроволок можно наложить на первый под любым заданным углом. Аналогичным образом можно сформировать и третий, и четвертый слои НП и т.д. (рис. 17).

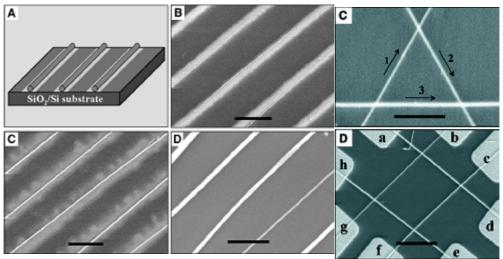


Рис.17. Узоры из нанопроволок, сделанные методом микроструи (длина маркёра - 2 мкм)

Гарвардские кудесники научились легко манипулировать нанопроволоками, что позволяет им изготавливать полевые транзисторы и даже простейшие логические схемы из них. А если «поколдовать» над местами пересечения на-

нопроволок (например, вскрыть над нужным перекрёстком окно в резисте и подержать структуру в одномолярном растворе хлорида тетраэтиламмония минут 10 этого будет достаточно, чтобы пороговое напряжение полевого НП-транзистора возросло с 2 до 5В), то можно делать и дешифраторы адреса. Этим же способом сделаны и наносветодиоды (рис.18 и 19).

Известно, что для ряда целей (например, для передачи информации) светодиод должен не только светить, но

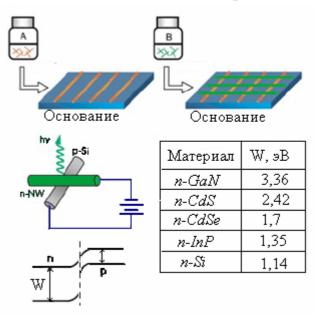


Рис.18. Так изготавливают нанопроволочные разноцветные светодиоды

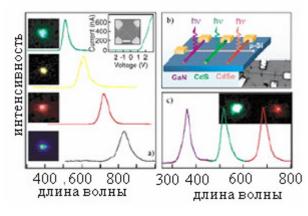


Рис. 19. А так они светят

и мигать (и с достаточно большой частотой для передачи большого объема информации в единицу времени). Реализованная нанопроволочная схема (рис. 20) при сверхмалых размерах исключительно быстродействующая. В семействе полупроводниковых соединений III-V всеми цветами радуги светятся нитриды металлов третьей группы Периодической системы Д. И. Менделеева. И, конечно, гарвардские «нанопроволочники» не могли обойти их

стороной, освоив синтез p-GaN:Mg-HT и сформировав радиальные GaN-InGaNнанопроволочные (сияющие!) гетероструктуры. В руках у них оказалась
bottom-up-технология, позволяющая иметь безграничное количество разных
полупроводниковых «нанокирпичиков» и строить из них и светящиеся, и
считающие актуальные приборы без дорогого процесса эпитаксии.

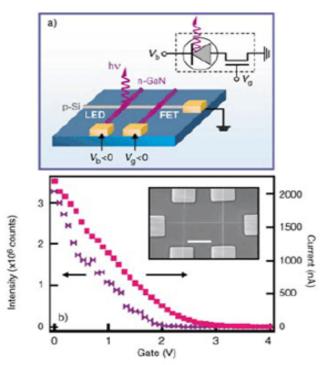


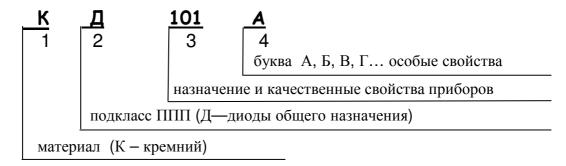
Рис.20. Гигагерцовые «наномигалки» для Bluetooth

Контрольные вопросы.

- 1. Что такое наноэлектроника?
- 2. Что представляет собой одноэлектронный прибор?
- 3. Перечислите, известные вам, аллотропные модификации углерода. Что представляют собой фуллерены?
- 4. Что такое нанотрубки, какими свойствами они обладают?
- 5. Что представляет собой нанопроволочный светодиод?

ЦИФРОБУКВЕННАЯ МАРКИРОВКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Цифробуквенная маркировка полупроводниковых приборов (ППП) состоит из четырех элементов, показанных на следующей схеме:



1 элемент маркировки – буква или цифра, обозначающая исходный материал:

Таблица 1

МАТЕРИАЛ	Германий	Кремний	Арсенид галлия
ППП широкого применения	Γ	К	A
ППП специального назначения	1	2	3

2 элемент маркировки – буква, указывающая класс прибора:

Д – выпрямительные и импульсные диоды, магнитодиоды, термодиоды и др.;

Ц – выпрямительные столбы и блоки;

A – диоды СВЧ;

Б – диоды Ганна;

B – варикапы;

И – туннельные диоды и обращенные туннельные диоды;

 Γ – генераторы шума;

K – стабилизаторы тока;

Л – излучающие оптоэлектронные приборы (светодиоды);

Н – динисторы, неуправляемые тиристоры;

У – тринисторы, управляемые тиристоры;

 \mathbf{O} – оптроны;

С – стабилитроны, стабисторы;

Т – биполярные транзисторы;

 Π – полевые транзисторы.

- **3** элемент маркировки состоит из трех цифр, обозначающих назначение и качественные свойства приборов, а также порядковый номер разработки. Ниже приводятся расшифровка обозначения диодов (табл. 2), стабилитронов (табл.3) и транзисторов (табл.4).
- **4** элемент маркировки буква обозначает классификацию ППП внутри технологического типа по одному или нескольким электрическим параметрам.

Примеры: КД101A, 2Д108A, АИ301A, КСI68A, КНI02, 2У101, ГТ108A, КТ326A, Т116B, КП305E, 2П305B.

Старые обозначения: Д9А, Д220С, МП39А, П210, Т25, ТМ3.

Таблица 2. Условное обозначение третьего элемента полупроводниковых диодов.

таолица 2. 3 словное обозначение третвего элемента полупроводниковых ди	Обозна-
Тип прибора	чение
Выпрямительные диоды:	1011110
малой мощности со средним значением силы тока до 0,3 А	101199
средней мощности со средним значением силы тока от 0,310 А	201299
универсальные с частотой менее 1ГГц	401499
Импульсные диоды с временем восстановления обратного сопротивления,	10111111
HC:	
более 150	501599
от 30 до 150	601699
от 5 до 30	701799
от 1 до 5	801899
менее 1	901999
Выпрямительные столбы:	
малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3 А	101199
средней мощности со средним значением прямого тока 0,310 А	201299
Выпрямительные блоки:	
малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3А	301399
средней мощности со средним значением прямого тока 0,310 А	401499
Диоды СВЧ:	
смесительные	101199
детекторные	201299
усилительные	301399
параметрические	401499
регулирующие	501599
умножительные	601699
генераторные	701799
Варикапы:	
подстроечные	101199
умножительные	201299
Туннельные диоды:	
усилительные	101199
генераторные	201299
переключательные	301399
обращенные	401499
Триодные тиристоры:	
незапираемые малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3А	101199
незапираемые средней мощности со средним значением прямого тока 0,310А	201299
запираемые малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3А	301399
запираемые средней мощности со средним значением прямого тока 0,310 А	401499
симметричные незапираемые малой мощности со средним значением прямого	501599
тока до 0,3А	601699
симметричные незапираемые средней мощности со средним значением прямого	
тока 0,310 А	
Диодные тиристоры:	
малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3А	101199
средней мощности со средним значением прямого тока 0,310 А	201299

Таблица 3. Условное обозначение третьего элемента полупроводниковых стабилитронов.

		<u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>	<u>*</u>	
Напряжение стабилизации, В	Обозначение третьего элемента при мощности стабилитроно Вт			
стаоилизации, в	малой (до 0,3 Вт)	средней (от 0,3 до 5)	большой (более 5)	
До 10	101199	401499	701799	
От 10 до 99	201299	501599	801899	
От 100 до 199	301399	601699	901999	

Таблица 4. Условное обозначение третьего элемента транзисторов.

Частота транзистора, МГц	Обозначение третьего элемента при мощности рассеяния, Вт			
	малой	средней	большой	
	(до 0,3 Вт)	(от 0,3 до 1,5)	(более 1,5)	
Низкая (до 3)	101199	401499	701799	
Средняя (330)	201299	501599	801899	
Высокая (30 и выше)	301399	601699	901999	

Цифробуквенная маркировка ППП по американской системе JEDEK

1-я цифра (число р-п переходов):

- 1 диод;
- **2** транзистор;
- 3 тиристор;

За цифрой следует буква N и серийный номер.

Пример: 1N4148, 2N5551

Цифробуквенная маркировка ППП по европейской системе PRO ELECTRON

1 буква - код материала:

 ${f A}$ – германий; ${f B}$ – кремний; ${f C}$ – арсенид галлия; ${f R}$ – сульфид кадмия; ${f D}$ – антимонид индия.

2 буква - назначение:

 ${\bf A}$ — маломощный диод; ${\bf B}$ — варикап; ${\bf C}$ — маломощный, низкочастотный транзистор; ${\bf C}$ — туннельный диод; ${\bf F}$ — маломощный высокочастотный транзистор; ${\bf G}$ — несколько приборов в одном корпусе; ${\bf H}$ — магнитодиод; ${\bf L}$ — мощный высокочастотный транзистор; ${\bf M}$ — датчик Холла; ${\bf P}$ — фотодиод, фототранзистор; ${\bf Q}$ — светодиод; ${\bf R}$ — маломощный регулирующий или переключающий прибор; ${\bf S}$ — маломощный переключающий транзистор; ${\bf T}$ — мощный регулирующий или переключающий прибор; ${\bf U}$ — мощный переключающий транзистор; ${\bf X}$ — умножительный диод; ${\bf Y}$ — мощный выпрямительный диод; ${\bf Z}$ — стабилитрон.

3 элемент – цифры **100...999** –приборы широкого применения, **Z10...А99** – приборы для промышленной и специальной аппаратуры.

4 и 5 элементы — буквы и цифры: для стабилитронов — допустимое изменение номинального напряжения стабилизации (буква **A** -1%, **B** -2%, **C** -5%, **D** -10%, **E** -15%) и напряжение стабилизации, В (цифра); для выпрямительных диодов — максимальная амплитуда обратного напряжения, В (цифра);

для тиристоров – меньшее из значений максимального напряжения включения или максимальная амплитуда обратного напряжения, В (цифра).

Пример: BC547C, BUZ11, BU508

Также, как и в американской системе, тип диода читается от катода.

Цифробуквенная маркировка ППП по японской системе JIS

Первый элемент - цифра:

 ${f 0}$ – фотодиод, фототранзистор; ${f \hat{1}}$ – диод; ${f 2}$ – транзистор; ${f 3}$ – тиристор.

Второй элемент - буква S (Semiconductor)

Третий элемент - тип прибора:

 ${\bf A}$ — высокочастотный p-n-p транзистор; ${\bf B}$ — низкочастотный p-n-p транзистор; ${\bf C}$ — высокочастотный n-p-n транзистор; ${\bf D}$ — низкочастотный n-p-n транзистор; ${\bf E}$ — диод Есаки; ${\bf F}$ — тиристор; ${\bf G}$ — диод Ганна; ${\bf H}$ — однопереходной транзистор; ${\bf I}$ — полевой транзистор с p-каналом; ${\bf K}$ — полевой транзистор с n-каналом; ${\bf M}$ — симметричный тиристор (семистор); ${\bf Q}$ — светодиод; ${\bf R}$ — выпрямительный диод; ${\bf S}$ — слаботочный диод; ${\bf T}$ — лавинный диод; ${\bf V}$ — варикап; ${\bf Z}$ — стабилитрон.

Четвертый элемент обозначает регистрационный номер, начиная с числа 11.

Пятый элемент - одна или две буквы - обозначает разные параметры для одного типа прибора.

Пример: 2SA273 (A373), 2SD1555H (D1555).

Цифробуквенная маркировка ППП компании NEC

Первый элемент - буква, обозначающая тип прибора:

 ${f AD}$ — лавинно-пролетные диоды; ${f GD}$ — диоды ${f \Gamma}$ анна; ${f GH}$ — смесительные германиевые диоды; ${f H}$ — фототранзисторы; ${f PS}$ — оптопары; ${f RD}$ — стабилитроны; ${f SD}$ — малосигнальные диоды; ${f SE}$ — инфракрасные диоды; ${f SG}$ — светодиоды зеленого цвета свечения; ${f SH}$ — точечно-контактные кремниевые диоды; ${f SM}$ — арсенид-галиевые диоды с барьером Шоттки; ${f SR}$ — светодиоды красного цвета свечения; ${f SV}$ — варакторы; ${f SY}$ — светодиоды желтого цвета свечения; ${f V}$ — новые ППП; ${f VD}$ — варисторы.

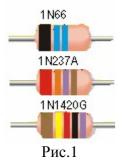
Второй элемент - регистрационный номер

Таблица 5. Диоды и стабилитроны.

Цветовая маркировка по системе JEDEK (США).					
Цвет полосы (точки)	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Черный	0	0	0	0	-
Коричневый	1	1	1	1	Α
Красный	2	2	2	2	В
Оранжевый	3	3	3	3	С
Желтый	4	4	4	4	D
Зеленый	5	5	5	5	E
Голубой	6	6	6	6	F
Фиолетовый	7	7	7	7	G
Серый	8	8	8	8	Н
Белый	9	9	9	9	I

Цветовая маркировка полупроводниковых приборов.

Рассмотрим цветовые маркировки зарубежных производителей. При маркировке диодов по американской системе **JEDEK** первая цифра и буква N опускаются. **Номера из двух цифр** (1N66) обозначаются одной черной полосой и двумя цветными, если в обозначении используется



буква, то она указывается четвертой полосой. **Номера из трех цифр** (1N237..) обозначаются тремя цветными полосами, буква указывается четвертой полосой (рис.1).

Номера из четырех цифр (1N1420...) обозначаются четырьмя цветными полосами и пятой черной, если в обозначении используется буква, то она указывается пятой цветной полосой.

Таблица 6. Цветовая маркировка диодов по европейской системе

$DD \cap$	TT		TAC
PK()	HI	ECTRO	

Цвет полосы	1-й	2-й	3-й	4-й
(точки)	(широкой)	(широкой)	3-и	4-и
Черный	AA	X		0
Коричневый			1	1
Красный	BA	S	2	2
Оранжевый			3	3
Желтый		T	4	4
Зеленый		V	5	5
Голубой		W	6	6
Фиолетовый			7	7
Серый		Y	8	8
Белый		Z	9	9



Цветовая маркировка транзисторов малой мощности осуществляется двумя точками (табл. 7).

Таблица 7. Транзисторы малой мощности

	Two transfer of the same of th				
Точка на	Точка на боку				
точка на	KT502	KT503	KT3102	KT3107	
торце	желтая	белая	зеленая	голубая	
Красная	A	A	A	К	
Желтая	Б	Б	Б	Б	
Зеленая	В	В	В	И	
Голубая	Γ	Γ	Γ	-	
Синяя	Д	Д	Д	В	
Белая	Е	E	Е	-	
Розовая	-	-	-	A	
Бежевая	-	-	-	Γ	
Оранжевая	-	-	-	Д	
Электрик	-	-	-	Е	
Салатная	-	-	-	Ж	
Серая	-	-	-	Л	



Транзисторы КТ814Б, КТ815Б, КТ816Б и КТ817Б иногда маркируются только окрашиванием торцевой поверхности без нанесения буквенно-цифрового кода.

Транзисторы в корпусе КТ-27 могут маркироваться или цифробуквенным кодом, иди кодом, состоящим из геометрических фигур (табл. 8). Транзисторы в корпусе КТ – 27 дополнительно маркируются окрашиванием торца корпуса, противоположного выводам.

Таблица 8. Кодовая маркировка типа транзистора в корпусе КТ-27

	Тип		Тип	
Обозначение	Код	Цв. с торца	Обозначение	Код
КТ814 (А-Г)	4 (A-Γ)	Бежевый	KT646A	•
КТ815 (А-Г)	5 (A-Γ)	Серый	КТ646Б	*
КТ816 (А-Г)	6 (A-Γ)	Синий, роз.	KT972A	
КТ817 (А-Г)	7 (A-Γ)	Серо-зелен.	КТ972Б	_I
КТ683 (А,Б)	8 (A, B)	Фиолетовый	KT973A	
КТ9115(А,Б)	9 (А, Б)	Голубой	КТ973Б	
KT940 (A-B)	40 (A-B)		КУ112	12

Таблица 9. Цветовая и кодовая маркировка типа транзистора в корпусе КТ-26

I av	таолица 9. цветовая и кодовая маркировка типа транзистора в корпусе К1-20				B ROPHYCE ICT-20
Тип				Тип	
Обозн.	Кодирован- ное обозначение	Цветная точка сбоку	Обозн.	Кодированное обозначение	Цветная точка сбоку
KT3117	Белый	-	KT203	4	Тем. красн.
KT3126	□ ○ Зел.		KT208		-
KT3157		-	KT209	•	Cep.
KT3166	T	-	KT313		Оранж.
KT6127	Ц	-	KT326	lacktriangledown	Корич.
KT632	-	Серебр.	KT337		Красн.
KT638	-	Оранж.	KT339	A	Голуб.
КТ645	□ ○ Бел.		KT342		Син.
KT660	Е Син.		KT345		Бежев.
KT680		-	KT350		Сирен.
KT681	l	-	KT351		Тем. желт.
КТ698		-	KT352		Зел.
КП103	4	-	KT363		Роз.
КП364	Α	Табачн.	KT502	•	Желт.
KT368	О Красн.		KT503	•	Бел.
KT399	Б ел.		KT3102		Тем. зел.
KT501] Зелен.		KT3107		Голуб.

Kopnyc KT-26 Kopnyc KT-27

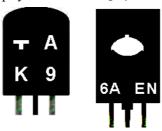


Рис.4

Таблица 10. Маркировка инфракрасных диодов

Диод ИК	Материал корпуса	Маркировка
3Л107А		Цветной поясок
3Л107Б		2 цветных пояска
АЛ108А	Пластмасса	Красная точка
3Л108А		Белая точка
3Л115А		Белая точка
АЛ137А		Белая точка
АЛ402А	M	Красная точка
АЛ402Б	Металлостекло	Зеленая точка
АЛ402В		Синяя точка

Таблица 11. Маркировка отечественных стабилитронов

Стабилитрон	Маркировка на катоде	Маркировка на аноде
KC133A	Голубая кольцевая полоса	Белая кольцевая полоса
KC139A	Голубая кольцевая полоса	Зеленая кольцевая полоса
KC147A	Голубая кольцевая полоса	Серая кольцевая полоса
KC156A	Голубая кольцевая полоса	Оранжевая кольцевая полоса
KC168A	Голубая кольцевая полоса	Красная кольцевая полоса
2С133Б	2 белые точки	
2С139Б	2 черные точки	
2С147Б	2 желтые точки	
2С156Б	2 зеленые точки	
2С168Б	2 голубые точки	
2СМ133Б	Красная точка	
2СМ139Б	Черная точка	

Таблица 12. Маркировка некоторых отечественных светодиодов

Светодиод	Материал корпуса	Цвет свечения	Маркировка	
АЛ102А		Красный	Красная точка	
АЛ102Б			2 красные точки	
АЛ102В	Металлостеклянный	Зеленый	Зеленая точка	
АЛ102Г		Красный	3 красные точки	
АЛ102Д		Зеленый	2 зеленые точки	
АЛ112А		Красный	Красная полоска	
АЛ112Б	Металлопластмассовый		Зеленая полоска	
АЛ112В			Синяя полоска	

Таблица 13. Маркировка некоторых отечественных варикапов

Варикап	Маркировка	Варикап	Маркировка	
KB102	Белая точка	KB122B	Коричневая точка	
KB104	Оранжевая точка	KB123A	Белая полоса	
КВ109А	Белая точка	KB127A	Белая поверхность со стороны выпуклости	
КВ109Б	Красная точка	КВ127Б	Красная поверхность со стороны выпуклости	
KB109B	Зеленая точка	КВ127В	Желтая поверхность со стороны выпуклости	
КВ109Г		КВ127Г	Зеленая поверхность со стороны выпуклости	
KBC111A	Белая точка	KB128	Красная точка	

Таблица 14. Цветовая маркировка некоторых отечественных диодов

Тип	Корпус	Метка у выводов (кольцо или точка)		Рисунок
диода	корпус	анода (+)	катода (-)	-
Д9Б		красное	ı	
Д9В		оранж. или красн. + оранж.	_	
Д9Г		желт. или красн. + желт.	_	
Д9Д		бел. или красн. + бел.	_	
Д9Е	Стеклянный	голуб. или красн. + голуб.	_	— ————————————————————————————————————
Д9Ж	СТСКЛЯННЫИ	зел. или красн. + зел.	_	
Д9И		два желтых кольца	_	
Д9К		два белых кольца	_	
Д9Л		два зеленых кольца	_	
Д9М		два голубых кольца	_	
КД102А		зеленая точка	_	
КД102Б	Пластмассовый, чер-	синяя точка	_	
2Д102А	ный	желтая точка	_	
2Д102Б		оранжевая точка	_	
КД103А	Пластмассовый, чер-	синяя точка или 2 точки: синяя	_	\bigcirc
	ный	и белая или синяя и зеленая		
КД103Б	Пластмассовый, зеленый	желт. точка или 2 точки: жел-	_	
		тая и зеленая или оранжевая и		
	лопын	синяя		

диоды

Диод — электропреобразовательный прибор, содержащий, как правило, один электрический переход и два вывода для подключения к электрической цепи. Электроды называются *анодом* (*p*-область) и *катодом* (*n*-область).

Диоды классифицируются по различным признакам: по характерным геометрическим размерам электрического перехода (плоскостные и точечные), по физическим процессам в переходе (туннельный, лавинно-пролетный и пр.), по методу изготовления переходов (сплавные, диффузионные, эпитаксиальные и т.д.), по характеру преобразования энергии сигнала (светодиод, фотодиод и др.), по исходному материалу изготовления (кремниевые, германиевые, арсенид-галлиевые, селеновые и др.).

В зависимости от назначения и выполняемых функций диоды делят на выпрямительные, импульсные, варикапы, стабилитроны, стабисторы, смесительные, детекторные, переключательные и др.

В качестве **выпрямляющего перехода** в диодах может быть использован электронно–дырочный переход, гетеропереход или контакт между металлом и полупроводником (переход Шоттки).

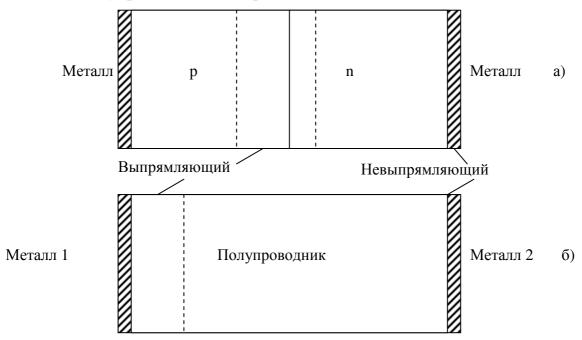


Рис.1. Структуры полупроводниковых диодов.

В диоде с p-n-переходом или с гетеропереходом кроме выпрямляющего перехода имеются два омических перехода, через которые p- и n- области соединены с выводами (рис.1a).

В диоде с выпрямляющим электрическим переходом в виде контакта между металлом и полупроводником всего один омический переход (рис. 1б).

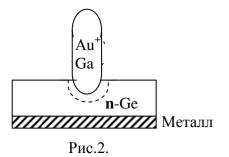
Гетеропереход – переходный слой с диффузионным электрическим полем между двумя различными по химическому составу полупроводниками.

Полупроводник n—типа - полупроводник с донорной примесью. Донорными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с большей, чем у примеси, валентностью (фосфор—(P), сурьма—(Sb), мышьяк—(As)).

Полупроводник p-типа - полупроводник с акцепторной примесью. Акцепторными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с меньшей, чем у примеси, валентностью (бор–(B), алюминий-(Al), галлий-(Ga), индий-(In)).

Вблизи электронно-дырочного перехода образуется двойной слой электрических зарядов, состоящий из отрицательных и положительных ионов примесных атомов (происходит взаимная диффузия носителей зарядов) и образующий область повышенного сопротивления (запирающий слой). Электрическое поле этого слоя препятствует дальнейшей диффузии носителей зарядов.

Омический переход — переход, электрическое сопротивление которого не зависит от направления тока в заданном диапазоне значений токов $(n-n^+, p-p^+)$, металл—полупроводник с равными работами выхода $(n-n^+, p-p^+)$). В зависимости от соотношения линейных размеров перехода и характеристической длины различают плоскостные и точечные диоды.

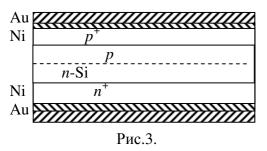


Характеристической длиной диода является наименьшая по значению из двух величин, определяющая его свойства и характеристики: диффузионная длина неосновных носителей в базе или толщина базы (n-область).

В **плоскостных** диодах p-n-переход образован вдоль плоскости контакта p- и n- областей

(линейные размеры, определяющие площадь выпрямляющего перехода оказываются больше характеристической длины). Мощные плоскостные диоды используют в качестве выпрямительных диодов в источниках питания. Они имеют большую плоскость контакта p— и n— областей. Такие диоды являются низкочастотными.

У **микросплавных** диодов переход несколько больший, чем у точечных. На рис. 2 показан микросплавной диод с золотой связкой, который формируется методом микровплавления в кристалл германия тонкой золотой проволочки



с присадкой галлия на конце. Под контактом образуется рекристаллизованный слой германия p—типа.

На рис. 3 изображена структура диффузионного диода. Область p—типа формируется диффузией акцепторной примеси — алюминия в кремниевую пластину n-типа, а n^+ — диффузией в эту же пластину фосфора — донорной приме-

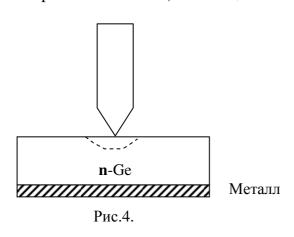
си. Для образования p^+ -области проводится вторая диффузия бора в p-область. Омические контакты с p^+ и n^+ - областями структуры изготавливают химическим осаждением никеля с последующим гальваническим золочением.

Выпрямительные плоскостные низкочастотные диоды обычно исполь-

¹ **Работа выхода** представляет собой энергию, которая затрачивается при возбуждении электронов для их вывода из твердого тела в вакуум. Для различных веществ колеблется в пределах от 1 до 6 эВ.

зуют для выпрямления переменного тока промышленной частоты (50 Гц). В бортовой аппаратуре частота переменного напряжения составляет 400 Гц. Часто выпрямительные низкочастотные диоды применяются при еще больших частотах. Так, в транзисторных преобразователях напряжения частота переменного тока, выпрямляемого диодом, достигает нескольких десятков килогерц.

В точечных диодах (рис. 4) *p-n*—переход образуется в месте контакта торца металлического провода с полупроводником (линейные размеры меньше характеристической длины). Переход образуется в месте заостренной металлической иглы, например из сплава вольфрама и молибдена, с полупроводниковым кристаллом кремния, германия, арсенида галлия. Свойства окружающей среды, чистота поверхности кристалла и механические условия контактирования определяют электрические параметры диода и его вольтамперную характеристику (ВАХ). Слой *p*—типа образуется в кристалле полупроводника в результате термодиффузии акцепторных примесей (индия или алюминия в германий *n*—типа) с конца металлической иглы, возникающей под воздейст-



вием импульсов тока большой амплитуды, пропускаемых через контакт. Линейные размеры перехода соизмеримы с толщиной его обедненной области. Площадь контакта менее 50 мкм^2 , поэтому **ёмкость перехода мала**, прямые токи не превышают десятков миллиампер. Они являются маломощными, но высокочастотными. Область p—типа под контактом геометрически неоднородна, и обычно в ней сосредоточено наибольшее количество дефектов кристал-

лической структуры. Сильное электрическое поле в области контакта способствует появлению значительных токов утечки и генерации.

Из основных справочных параметров выпрямительных диодов необходимо отметить:

- 1) максимально допустимый прямой ток $I_{\text{пр max}}$;
- 2) прямое напряжение на диоде при заданном значении прямого тока $U_{\rm np}$; обычно прямое напряжение на диоде указывается при максимально допустимом прямом токе через диод;
- 3) максимально допустимое обратное напряжение $U_{\rm oбp\ max}$, оно обычно значительно меньше пробивного;
- 4) обратный ток при заданном обратном напряжении $I_{\rm oбp}$; обычно обратный ток указывается при максимально допустимом обратном напряжении;
 - 5) диапазон рабочих температур окружающей среды.

В зависимости от значения максимально допустимого прямого тока выпрямительные диоды подразделяют на диоды малой мощности (прямой ток до 0,3 A), средней мощности (прямой ток от 0,3 до 10 A) и большой мощности

(прямой ток более 10 А).

Первые выпрямительные плоскостные диоды (в 50-е годы) изготавливали из германия. Позже было налажено производство кремниевых выпрямительных плоскостных диодов. В связи с существенными преимуществами кремниевых выпрямительных плоскостных диодов они практически целиком вытеснили германиевые выпрямительные плоскостные диоды из массового производства. В последние годы налажен выпуск выпрямительных плоскостных диодов из арсенида галлия.

Зависимость параметров диода от температуры

Температура влияет как на прямой, так и на обратный токи. Зависимость обратного тока от температуры можно представить в виде:

$$i_{o\delta p}(T) = i_{o\delta p}(T_0) 2^{\frac{\Delta T}{T^*}}, \tag{1}$$

где $i_{oбp}(T_0)$ – обратный ток при температуре (T_0),

 $i_{o\!o\!p}(\,T_{})$ – обратный ток при температуре $T_0+\Delta T$,

 T^* – температура удвоения, т.е. приращение температуры, вызывающее увеличение тока в 2 раза,

В данном случае температура удвоения может учитывать как возрастание теплового тока, так и возрастание тока генерации. Для германиевых диодов можно пренебречь током генерации, а для кремниевых — тепловым током. При T_0 =300К температура удвоения для кремния примерно 5 К, а для германия=7,5 К.

Температура удвоения теплового тока
$$T_0^* = \frac{kT_0^2}{\Delta W} ln 2$$
 . (2)

Температура удвоения тока генерации
$$T_{\Gamma}^* = \frac{2kT_0^2}{\Delta W} ln 2$$
 , (3)

где T_0 – некоторая исходная температура.

Влияние температуры на прямой ток можно определить по формуле

$$i_{np}(T) = I_{00} \exp \frac{qu - \Delta W}{kT} \quad . \tag{4}$$

$$I_{00} = -qS \frac{D_p}{L_p N_d} N_c^2$$
 (5)

 I_{00} – некоторый коэффициент, зависящий от следующих параметров:

q — заряд электрона $1.6\cdot 10^{-19}$ Кл, S — площадь перехода, L — диффузионная длина, N_d — концентрация доноров, N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, D_p — коэффициент диффузии дырок.

В рабочем режиме qu всегда меньше ширины запрещенной зоны, поэтому показатель степени экспоненты отрицателен, и характеристика при увеличении температуры смещается влево. Расчеты показывают, что этот сдвиг составляет примерно 2 мВ/ 0 С.

Параметры электрического режима

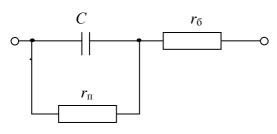
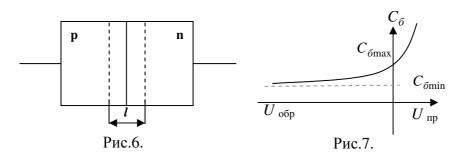


Рис. 5. Эквивалентная схема диода

С учетом сопротивления материала полупроводника r_{δ} , емкости и сопротивления р-п-перехода эквивалентную схему диода можно представить так, как показано на рис. 5.

Емкость C включает в себя барьерную C_{δ} и диффузионную $C_{\partial u \phi}$ емкости и зависит от напряжения на *p-n*-переходе. Сопротивление

 $r_{\rm II}$ – это сопротивление p–n–перехода, которое определяется его вольтамперной характеристикой (BAX), причем сопротивление постоянному току $r_0 = U/I$ и переменному току $r_{\partial} = dU/dI$ различны.

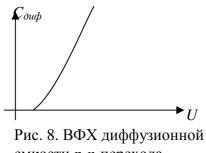


Барьерная ёмкость – ёмкость конденсатора, обкладками которого являются p и n – области, а диэлектриком – обеднённый слой.

$$C_{\text{foap}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{I}$$
.

Диэлектрическая проницаемость различных полупроводниковых материалов: $\varepsilon_{Ge} = 16$; $\varepsilon_{Si} = 14$; $\varepsilon_{GaAs} = 13$.

Барьерная ёмкость является преобладающей при обратных и небольших положительных напряжениях, имеет высокую добротность, поскольку дифференциальное сопротивление велико, на практике бывает от долей $n \kappa \Phi$ до сотен $n\kappa\Phi$, не зависит от частоты, вплоть до 10^{12} Гц, слабо увеличивается с ростом температуры из-за снижения высоты потенциального барьера.



емкости р-п-перехода

Диффузионная ёмкость обусловлена неравновесными (неосновными) носителями в базе.

$$C_{\partial u\phi} = \frac{I \cdot \tau}{\varphi_T},$$

где I - протекающий через p-n-переход ток au - время жизни неосновных носителей в

базе $arphi_T$ - температурный потенциал (kT/e)

Формула справедлива на низких частотах.

На более высоких частотах диффузионная ёмкость стремится к нулю. Ёмкость может достигать значений в несколько $m\kappa\Phi$.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) паразитных емкостей диода приведены на рисунках 7 и 8.

Кремниевые диоды (КДххх, 2Дххх)

Большинство из разнообразных типов кремниевых выпрямительных плоскостных диодов с технологической точки зрения являются диффузионными. Электронно-дырочные переходы таких диодов формируют диффузией алюминия или бора в кристаллы кремния с электропроводностью n-типа и диффузией фосфора в кристаллы кремния с электропроводностью p-типа. Толщина исходных кристаллов кремния составляет 0.2...0.4 мм.

Частотные свойства выпрямительных плоскостных диодов с выпрямляющим переходом в виде *p-n*-перехода, работающих обычно при большом уровне инжекции, определяются процессами накопления и рассасывания неосновных носителей заряда в базе. Поэтому, для улучшения частотных свойств кремниевых плоскостных диодов, в исходные кристаллы кремния проводят диффузию золота, примесь которого создает энергетические уровни рекомбинационных ловушек и уменьшает время жизни неосновных носителей заряда. Такие кремниевые плоскостные диоды иногда называют частотными, подчеркивая тем самым, что они способны работать при повышенных частотах (до 100 кГц).

Для защиты от внешних воздействий и обеспечения хорошего теплоотвода кристалл с *p-n*-переходом монтируют в корпусе. Диоды малой мощности обычно оформляют в пластмассовом корпусе с гибкими внешними выводами, диоды средней мощности — в металлостеклянном корпусе с жесткими внешними

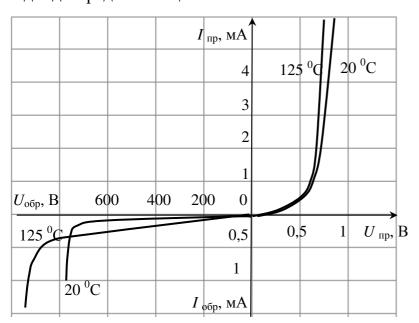


Рис. 9. ВАХ одного из кремниевых выпрямительных диодов при разных температурах окружающей среды

выводами, диоды большой мощности — в металлостеклянном или металлокерамическом корпусе, т. е. со стеклянным или керамическим проходным изолятором.

Электрические свойства. Наибольшую информацию об электрических свойствах выпрямительных диодов можно получить из ВАХ. Вольтамперные характеристики одного из выпрямительных кремниевых плоскостных диодов при разных температурах

окружающей среды приведены на рис. 9.

Максимально допустимые прямые токи кремниевых плоскостных диодов различных типов составляют 0,1...1600 А. Падение напряжения на диодах при этих токах не превышает, обычно, 1,5 В. С увеличением температуры прямое напряжение уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера p-n-перехода и с перераспределением носителей заряда по энергиям.

Обратная ветвь ВАХ кремниевых диодов не имеет участка насыщения обратного тока, так как обратный ток в кремниевых диодах вызван процессом генерации носителей заряда в p-n-переходе. Пробой кремниевых диодов имеет **лавинный характер.** Поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры увеличивается. Для некоторых типов кремниевых диодов при комнатной температуре пробивное напряжение может составлять 1500...2000 В. **Максимально допустимое обратное напряжение** — это напряжение, при котором гарантируется надежная работа диода. Поэтому максимально допустимое обратное напряжение, значение которого указывается в справочниках, значительно меньше пробивного напряжения. Обычно выбирают $U_{\rm ofp\ max} = (0.5...0,8)U_{\rm npo6}$.

Электрический (лавинный) пробой. Под действием высокого напряжения электроны ионизируют атомы. При этом число электронов растет лавинообразно, обратный ток резко возрастает. Лавинный пробой является обратимым, т.е. не разрушает p-n-переход.

Диапазон рабочих температур для кремниевых выпрямительных диодов ограничен значениями —60... +125°С. При низких температурах возникают механические напряжения, которые могут привести к растрескиванию полупроводникового кристалла. Верхний предел диапазона рабочих температур выпрямительных диодов определяется резким ухудшением выпрямления в связи с ростом обратного тока — сказывается тепловая генерация носителей заряда в результате ионизации атомов полупроводника. Таким образом, верхний предел диапазона рабочих температур выпрямительных кремниевых диодов, как и большинства других полупроводниковых приборов, связан с шириной запрещенной зоны исходного материала.

Для преобразования переменного тока в постоянный в схемах с напряжением, превышающим максимально допустимое обратное напряжение отдельного диода, промышленностью выпускаются выпрямительные столбы.

Выпрямительный полупроводниковый столб — это совокупность выпрямительных полупроводниковых диодов, соединенных последовательно и собранных в единую конструкцию, имеющую два вывода. Максимально допустимое обратное напряжение кремниевых выпрямительных столбов составляет несколько киловольт.

Для удобства применения выпрямительных диодов в выпрямителях, собранных по различным мостовым схемам (однофазным, трехфазным), а также в выпрямителях с удвоением напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные полупроводниковые блоки.

Выпрямительный полупроводниковый блок — это полупроводниковый блок, собранный из выпрямительных полупроводниковых диодов, соединенных по определенной электрической схеме и оформленных в единую конструкцию, имеющую более двух выводов.

Второй знак маркировки выпрямительных столбов и блоков – буква Ц. Выпрямительные столбы малой мощности со средним значением прямого тока до 0,3 А **третьим знаком** маркировки имеют три цифры (101...199), а средней мощности со средним значением прямого тока 0,3...10 А - цифры (201...299).

Маломощные выпрямительные блоки маркируются цифрами (301...399), а среднемощные – (401...499).

Германиевые диоды (ГДххх, 1Дххх)

Технология изготовления и конструкция. Первой технологией формирования плоскостных p-n-переходов в массовом производстве полупроводниковых приборов была технология вплавления примесей. Поэтому все германиевые плоскостные диоды — это сплавные диоды старых разработок.

Для создания сплавного p-n-перехода в германиевом монокристалле используют кристаллы германия с электропроводностью n-типа толщиной 0,2...0,4 мм. В качестве акцепторной примеси используют индий, который вплавляют в кристалл германия при температуре $500...550^{\circ}$ С. Площадь перехода определяется необходимым значением максимально допустимого прямого тока диода и максимально допустимой плотностью прямого тока, которая для германиевых p-n-переходов равна 100 A/cm^2 .

Электрические свойства. ВАХ одного из германиевых плоскостных диодов при разных температурах окружающей среды приведены на рис. 10. Основные отличия ВАХ и параметров германиевых и кремниевых выпрямительных плоскостных диодов за-

- ключаются в следующем. 1. Прямое напряжение на германиевом максимально диоде при допустимом прямом токе приблизительно в два раза меньше, чем на кремниевом диоде. Это вызвано меньшей высотой потенбарьера циального p-n-перехода, маниевого что является щественным, но, к сожалению. единственным преимуществом перед кремниевыми выпрямительными диодами.
- 2. Существование тока насыщения при обратном включении германиевого диода, что вызва-

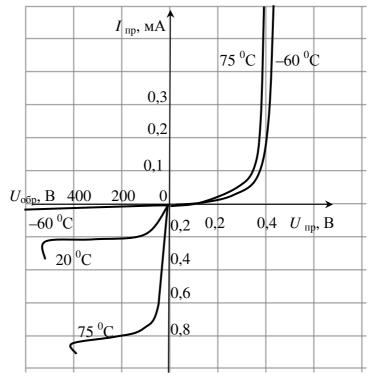


Рис. 10. ВАХ одного из германиевых выпрямительных диодов при разных температурах окружающей среды.

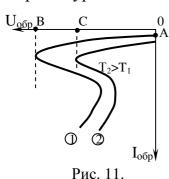
но механизмом образования обратного тока — процессом экстракции неосновных носителей заряда из прилегающих к *p-n*—переходу областей.

- 3. Значительно большая плотность обратного тока в германиевых диодах, так как при прочих равных условиях концентрация неосновных носителей заряда в германии больше на несколько порядков, чем в кремнии.
 - 4. Большие обратные токи через германиевые диоды, в результате чего

пробой германиевых диодов имеет тепловой характер. Поэтому пробивное напряжение германиевых диодов уменьшается с увеличением температуры, а значения этого напряжения меньше пробивных напряжений кремниевых диодов.

Верхний предел диапазона рабочих температур германиевых диодов составляет приблизительно 75°C, что значительно ниже по сравнению с тем же параметром кремниевых диодов.

Существенной особенностью германиевых диодов и их недостатком является то, что они плохо выдерживают даже очень кратковременные импульсные перегрузки при обратном направлении для p-n-перехода. Определяется это механизмом пробоя германиевых диодов — тепловым пробоем, происходящим при шнуровании тока с выделением большой удельной мощности в месте пробоя.



Тепловой пробой. С ростом обратного напряжения рост обратного тока вызывает увеличение температуры, усиление процесса термогенерации, повышение концентрации неосновных носителей и еще более резкий рост обратного тока (рис.11). Подводимая к переходу мощность $P_{\text{под}}$ становится больше отводимой $P_{\text{отв}}$, в результате p-n-переход разрушается и диод выходит из строя. Улучшая условия охлаждения (вентиляцией, применением радиаторов), можно увеличить отводимую

мощность и избежать теплового пробоя. Применение радиаторов позволяет также увеличить прямой ток.

Если сравнить прямые ветви двух диодов, изготовленных **из разных материалов**, с разной шириной запрещенной зоны, то у диода с большей ΔW будет больше высота потенциального барьера. Следовательно, прямой ток через диод из материала с большей ΔW будет меньше при том же прямом напряжении.

С увеличением концентрации примесей высота потенциального барьера будет увеличиваться, а значит, прямой ток при том же прямом напряжении будет меньше.

Арсенид-галлиевые диоды (АДххх, ЗДххх) Все

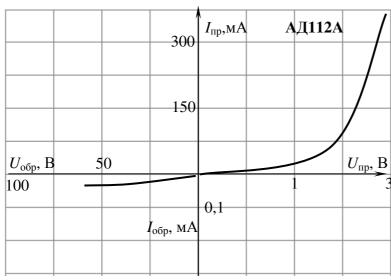


Рис. 12

Bce перечисленные особенности германиевых и кремниевых выпрямительных диодов итоге связаны с различием ширины запрещенной зоны исходных полупроводниковых материалов. Из приведенного сопоставления видвыпрямительные но, что изготовленные диоды, полупроводникового материала с большой шириной запрещенной зоны, обладасущественными ЮТ преимуществами в свойствах и параметрах. Одним из таких материалов является арсенид галлия, ширина запрещенной зоны которого при комнатной температуре $\Delta W = 1,424$ эВ. Параметры первых типов арсенид-галлиевых выпрямительных диодов, выпускаемых промышленностью, еще далеки от оптимально возможных. Так, арсенид-галлиевые диоды типа АД112A (рис.12) рассчитаны на максимально допустимый прямой ток 300 мА при прямом напряжении не более 3 В. Прямое напряжение велико, что является недостатком вообще всех выпрямительных диодов, *p-n*-переходы которых сформированы в материале с большой шириной запрещенной зоны. Максимально допустимое обратное напряжение диодов этой марки — всего 50 В. Низкое значение пробивного напряжения и соответственно максимально допустимого обратного напряжения вызвано большой концентрацией дефектов в области *p-n*-перехода.

Положительными особенностями арсенид-галлиевых выпрямительных диодов являются значительно больший диапазон рабочих температур и лучшие частотные свойства. Верхний предел диапазона рабочих температур арсенид-галлиевых диодов АД 112A составляет 250°С. Арсенид-галлиевые диоды АД110A могут работать в качестве выпрямителей малой мощности до частоты 1 МГц, что обеспечивается малым временем жизни носителей заряда в этом материале. Таким образом, арсенид-галлиевые выпрямительные диоды по своим частотным свойствам выходят за пределы низкочастотного диапазона.

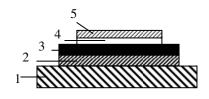


Рис. 13. Структура селеновой выпрямительной пластины: 1-алюминиевое основание, 2-тонкий слой висмута или никеля, нанесенный на протравленное алюминиевое основание, 3-слой селена, 4-слой селенида кадмия, 5-электрод из сплава висмута, кадмия и олова.

Селеновые выпрямители

Селеновые выпрямительные пластины (рис. 13) изготовляют на алюминиевых основаниях, которые являются одним из токосъемных электродов. Затем на основание наносят аморфный селен. Толщина слоя селена составляет 50...60 мкм.

Для создания второго токосъемного электрода на поверхность слоя селена наносят легкоплавкий сплав из висмута, кадмия и олова. При нанесении этого сплава кадмий реагирует с селеном и образуется тонкий слой селенида кадмия. Таким образом, выпрямляющим электрическим переходом в селеновых выпрямителях является гетеропереход между селеном и селенидом кадмия.

В установках для выпрямления переменного тока соединяют ряд селеновых выпрямительных

пластин последовательно для получения более высокого выпрямленного напряжения и параллельно для выпрямления больших токов.

Максимально допустимая плотность тока в прямом направлении для селеновых выпрямителей разных серий не превосходит 100 мА/см², что на три порядка меньше по сравнению с Si и Ge диодами. Именно поэтому для выпрямления больших токов приходится соединять селеновые выпрямительные пластины параллельно даже при наличии пластин большой площади.

Максимальное прямое напряжение на одной селеновой выпрямительной пластине 0,45.. 0,75 В. Но в связи с тем что максимально допустимое обратное напряжение селеновых выпрямительных пластин не превосходит 60 В, для выпрямления необходимо соединять последовательно большое число пластин. При этом прямое напряжение на селеновом выпрямительном столбе возрастает во столько раз, сколько пластин соединено последовательно.

Большая барьерная емкость селеновых выпрямителей при относительно малой допустимой плотности прямого тока ограничивает их применение при повышенных частотах.

Параметры селеновых выпрямителей изменяются со временем как при хранении, так и при работе. Длительное хранение приводит к возрастанию обратного тока. Этот процесс, известный под названием расформовки, вызван диффузией галоидов и некоторым изменением химического состава полупроводника. Расформовка, как правило, процесс обратимый. После подачи на выпрямитель обратного или переменного напряжения обратный ток уменьшается со временем, достигая номинального значения в течение 2...3 мин.

Необратимое возрастание прямого напряжения на селеновых выпрямителях, называемое старением, при хранении незначительно, но ускоряется при эксплуатации. Процесс старения связан с увеличением сопротивления слоя селена вследствие обеднения его галогенными примесями, а также с увеличением сопротивления омического перехода между селеном и алюминиевым электродом. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры, что и определяет верхний предел диапазона рабочих температур селеновых выпрямителей, который составляет для разных серий выпрямителей 75... ... 125°C.

По многим параметрам и свойствам селеновые поликристаллические выпрямители значительно уступают монокристаллическим кремниевым и германиевым выпрямительным диодам. Положительной особенностью селеновых выпрямителей является их способность выдерживать значительные кратковременные перегрузки по току и напряжению и быстро восстанавливать свои свойства после пробоя. Тепловой пробой происходит при шнуровании тока с резким увеличением плотности обратного тока в месте пробоя. Из-за увеличения удельной выделяющейся мощности в месте пробоя происходит расплавление селена, который затем при быстром охлаждении переходит в аморфное состояние. Удельное сопротивление аморфного селена на несколько порядков выше, чем кристаллического. В результате пробитое место выпрямительной пластины оказывается изолированным, происходит «самозалечивание» места пробоя.

Выпрямительный диод — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный (однополярный).

Принцип работы выпрямительных диодов основан на использовании односторонней проводимости (вентильных свойств) электрического перехода для преобразования переменного тока в однополярный пульсирующий.

Такой выпрямитель называется однополупериодным (рис.14). Конденсатор может выполнять функцию сглаживания.

Выпрямитель, пропускающий два периода, называется двуполупериодным выпрямителем (рис.15).

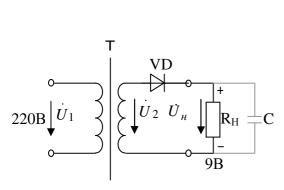
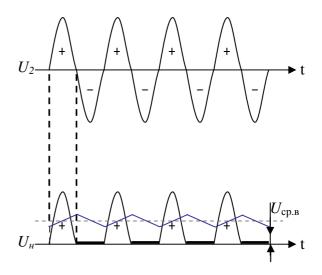


Рис. 14. Однополупериодный выпрямитель



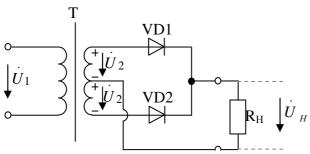
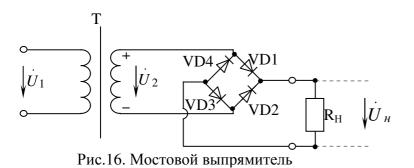


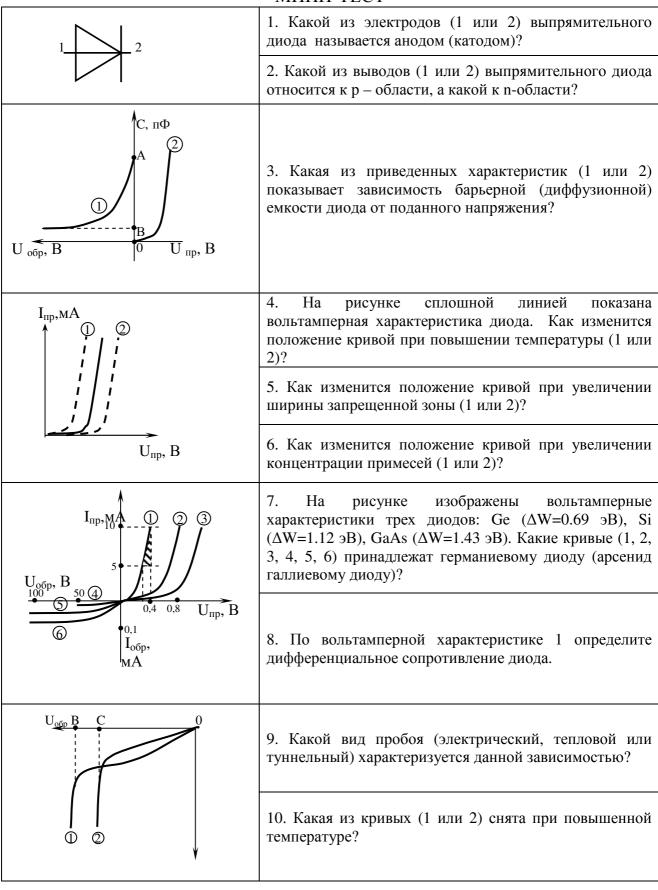
Рис.15. Двуполупериодный выпрямитель



Выпрямительные диоды широко **применяют** в источниках питания, ограничителях выбросов напряжений. Наибольшее использование нашли кремниевые, германиевые диоды, диоды с барьером Шоттки, а в аппаратуре специального назна-

чения и измерительной аппаратуре, работающей в условиях высокой температуры окружающей среды, — селеновые и титановые выпрямители. Промышленность выпускает селеновые выпрямительные столбы с последовательным соединением до 1440 селеновых пластин в единой конструкции (выпрямитель 15ГЕ144ОУ-С). К такому выпрямительному столбу может быть приложено переменное напряжение 40 кВ. Площадь отдельных селеновых выпрямительных пластин, выпускаемых промышленностью, 0,1... 400 см². Параллельное соединение выпрямительных пластин позволяет получить выпрямленный ток до 500 А от одного выпрямительного блока 140ГЖ24Я4У.

МИНИ-ТЕСТ



11. Чем объясняется нелинейность вольтамперной характеристики p-n-перехода?

- 1) Дефектами кристаллической структуры.
- 2) Вентильными свойствами.
- 3) Собственным сопротивлением полупроводника.
- 12. К кристаллу р-типа подключен плюс источника напряжения, к кристаллу п-типа минус. Какие носители заряда обеспечивают прохождение тока через p-n-переход?
 - 1) Основные.
 - 2) Неосновные.
 - 3) Ионы кристаллической решетки.
- 13. На диоде марки Д312 при изменении прямого напряжения от 0,2 до 0,4 В прямой ток увеличивается от 3 до 16 мА. Каково дифференциальное сопротивление этого диода?
 - 1) 15,4 Ом.
 - 2) 12,3 Ом.
 - 3) 1,54 Ом.
- 14. Каково соотношение между прямым R_{np} и обратным сопротивлением $R_{oбp}$ полупроводникового диода?
 - 1) $R_{np} > R_{o\delta p}$
 - 2) $R_{np} < R_{o\delta p}$
 - 3) $R_{np} \approx R_{o\delta p}$
 - 4) $R_{np} \ll R_{o\delta p}$

15. Каково основное достоинство точечного диода?

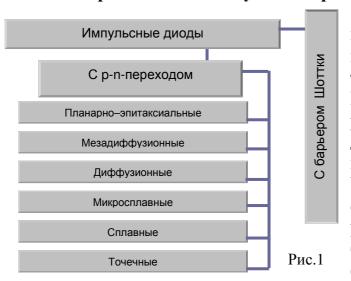
- 1) Малые размеры.
- 2) Простота конструкции.
- 3) Малая емкость *p-n-*перехода.
- 16. С какой целью мощные диоды изготовляют в массивных металлических корпусах?
 - 1) Для повышения прочности.
 - 2) Для лучшего отвода теплоты.
 - 3) Для повышения пробивного напряжения.
 - 17. Какие диоды используют для выпрямления переменного тока?
 - 1) Плоскостные.
 - 2) Точечные.
 - 3) Плоскостные и точечные.

18. Как выбираются выпрямительные диоды?

- 1) По прямому току.
- 2) По обратному напряжению.
- 3) По прямому току и обратному напряжению.
- 19. Преимуществом германиевых выпрямительных диодов перед кремниевыми является
 - 1) Более высокое обратное напряжение;
 - 2) Минимальный обратный ток;
 - 3) Более высокая допустимая температура;
 - 4) Небольшое падение напряжения на переходе при прямом включении.
 - 20. Допустимая температура на переходе германиевых диодов составляет
 - 1) 50 °C;
 - 2) 100 °C;
 - 3) 150 °C;
 - 4) 200 °C.

ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

Импульсный полупроводниковый диод — это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.



Основное назначение импульсных диодов (ИД) — работа в качестве коммутирующих элементов элеквычислительных тронных машин. Кроме того, импульсные диоды широко применяют в радиоэлектронике детектирования высокочастотных сигналов и для других целей. Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции, т. е. относительно большим прямым токам. Поэтому свойства и параметры импульсных

диодов определяются переходными процессами.

При работе ИД от генератора напряжения при переключении диода с прямого направления на обратное в начальный момент времени через диод идет большой обратный ток, ограниченный в основном объемным сопротивлением базы (при идеальном генераторе напряжения). С течением времени накопленные в базе неосновные носители заряда рекомбинируют или уходят из базы через *p-n*-переход, после чего обратный ток уменьшается до своего стационар-

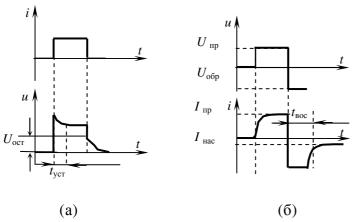


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений импульсного диода при его работе в схемах с генератором напряжения (б) и с генератором тока (а)

ного значения (рис. 26). Переходный процесс, в течение которого обратное сопротивление полупроводникового диода восстанавливается до постоянного значения после быстрого переключения с прямого направления на обратное, называют восстановлением обратного сопротивления диода.

Соответственно, **одним из основных параметров** импульсного диода является *время восстановления обратного*

сопротивления $t_{\rm вос}$, равное интервалу времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения. По значению этого параметра все импульсные диоды подразделяют на шесть групп, характеризующихся временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс, 150...500, 30...150, 5...30, 1...5 и менее 1 нс.

При пропускании импульса тока в прямом направлении через диод наблюдается выброс напряжения в первый момент после включения (рис. 2a). Вызвано это повышенным падением напряжения до тех пор, пока не произойдет накопление неосновных носителей заряда в базе диода в результате инжекции и не уменьшится объемное сопротивление базы. Переходный процесс, в течение которого прямое сопротивление полупроводникового диода устанавливается до постоянного значения после быстрого включения диода в прямом направлении, называют установлением прямого сопротивления диода.

Соответственно следующим специфическим параметром импульсного диода является время установления прямого напряжения диода $t_{\rm уст}$, равное интервалу времени от момента подачи импульса прямого тока на диод (при нулевом начальном напряжении смещения) до достижения заданного значения прямого напряжения на диоде. Значения этих параметров ($t_{\rm вос}$ и $t_{\rm уст}$) зависят от структуры диода, от времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, а также от условий измерения. Одной из первых была разработана конструкция точечного импульсного диода

Точечный p-n-переход в таких диодах может быть сформирован с помощью импульса тока, при прохождении которого выделяющаяся мощность разогревает область полупроводника под точечным контактом, а тип электропроводности этой приконтактной области изменяется из-за внедрения примесных ионов.

В связи с существенными недостатками точечных диодов они практически полностью вытеснены импульсными диодами, производство которых основано на современных производительных и контролируемых методах формирования *p-n*-переходов с использованием планарной технологии, эпитаксиального наращивания, а также ионно-лучевой технологии (рис.1). Основным исходным полупроводниковым материалом при этом служит кремний, а иногда и арсенид галлия.

Для ускорения переходных процессов в кремниевых импульсных диодах и для уменьшения значения времени восстановления обратного сопротивления этих диодов в исходный кремний вводят примесь золота. Эта примесь обеспечивает появление в запрещенной зоне кремния энергетических уровней рекомбинационных ловушек и уменьшение времени жизни неосновных носителей.

При изготовлении планарных импульсных диодов диффузия примесей проводится через отверстия или окна в слое оксида кремния. Площадь p-n-перехода таких диодов может быть сделана достаточно малой, мала будет и барьерная емкость.

Планарная технология дает возможность относительно просто сформировать на одном кристалле много диодных структур. Таким образом делают наборы (сборки или матрицы) импульсных диодов, т. е совокупность импульсных диодов, собранных в единую конструкцию, не соединенных электрически или соединенных по одноименным выводам. Наборы импульсных диодов удобны для применения в установках вычислительной техники, отдельные узлы которых содержат большое число однотипных импульсных диодов.

МИНИ-ТЕСТ

- 1. Импульсные диоды это
 - 1) диоды, отличающиеся высоким быстродействием;
 - 2) диоды, имеющие точечную конструкцию;
 - 3) диоды, изготовленные из германия;
 - 4) диоды, имеющие малую барьерную емкость.
- 2. Для оценки инерционных свойств импульсных диодов используются специфические параметры
 - 1) дифференциальное сопротивление;
 - 2) время восстановления обратного сопротивления $t_{\text{вос}}$;
 - 3) максимальная рабочая температура;
 - 4) максимальное значение обратного напряжения.
- 3. Диод Шоттки, применяемый в импульсных схемах, это
- 1) диод, основой которого является выпрямляющий контакт металла с полупроводником;
 - 2) диод с малой площадью перехода;
 - 3) диод с малой барьерной емкостью;
 - 4) диод с низким обратным напряжением.
- 4. Импульсные диоды обладают специфическими параметрами
 - 1) время пролета носителей через область базы;
 - 2) время установления прямого напряжения t_{vcr} ;
 - 3) время жизни неосновных носителей.

диоды шоттки

Диод Шоттки — это полупроводниковый диод, выпрямительные свойства которого основаны на использовании выпрямляющего электрического перехода между металлом и полупроводником.

На таком переходе высота потенциального барьера для электронов и дырок может существенно отличаться. Поэтому, при включении выпрямляющего перехода Шоттки в прямом направлении, прямой ток возникает благодаря движению основных носителей заряда полупроводника в металл, а носители другого знака (неосновные для полупроводника) практически не могут перейти из металла в полупроводник из-за высокого для них потенциального барьера на переходе.

Таким образом, на основе выпрямляющего перехода Шоттки могут быть созданы выпрямительные, импульсные и сверхвысокочастотные полупроводниковые диоды, отличающиеся от диодов с p-n-переходом лучшими частотными свойствами.

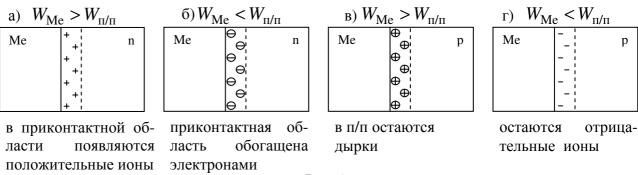
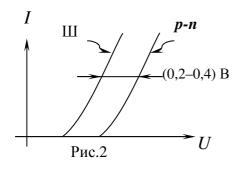


Рис. 1

Физические явления в контакте металла с полупроводником определяются соотношением работ выхода электрона из металла и проводника. Если металл привести в соприкосновение с полупроводником, то электрон будет переходить из материала с меньшей работой выхода к материалу с большей работой выхода, что приведёт к возникновению контактной разности потенциалов.

Переходы на рис. 1б и 1в подчиняются законам Ома (омические контакты – такие контакты находят применение в полупроводниках для подведения металлических выводов к области полупроводника). ВАХ переходов (рис. 1а, г) нелинейны и описываются уравнением Шокли. Переход (рис. 1а, г) – переход Шоттки. В переходе Шоттки отсутствует диффузионная ёмкость. Этот диод ха-



рактеризуется высоким быстродействием и малым падением напряжения ($U_{\rm np}$ <0,6 В). К недостаткам диода следует отнести малое пробивное напряжение и большие обратные токи.

Отличие ВАХ Шоттки от p-n:

- 1) Обратный ток перехода Шоттки больше, чем у p-n-перехода;
 - 2) Прямое падение напряжения

на переходе Шоттки на 0,2-0,4 В меньше;

3) ВАХ перехода Шоттки подчиняется уравнению Шокли в очень широком диапазоне (с очень высокой точностью) токов: 1мА – 10 мА.

Выпрямительные диоды Шоттки.

Выпрямляющий переход Шоттки создают на кристалле полупроводника

с электропроводностью *п*-типа — подвижность электронов больше подвижности дырок. Должна быть большой и концентрация примесей в кристалле полупроводника. Диод Шоттки делают с двухслойной базой (рис. 3). Основная часть кристалла — подложка толщиной около 0,2 мм — содержит большую концентрацию примесей и

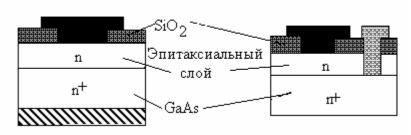


Рис. 3. Варианты структур диодов Шоттки с двухслойной базой

имеет малое удельное сопротивление. Тонкий монокристаллический слой того же самого полупроводника (толщиной в несколько микрометров) с той же электропроводностью n-типа может быть получен на поверхности подложки методом эпитаксиального наращивания. Концентрация доноров в эпитаксиальном слое должна быть значительно меньше, чем концентрация доноров в подложке.

В качестве исходного полупроводникового материала для выпрямительных диодов Шоттки можно использовать кремний или арсенид галлия. Пробивное напряжение диодов Шоттки на основе арсенида галлия низкое, это недостаток для выпрямительных диодов.

Металлический электрод наносят методом испарения в вакууме с последующим осаждением на поверхность эпитаксиального слоя. Выпрямительные

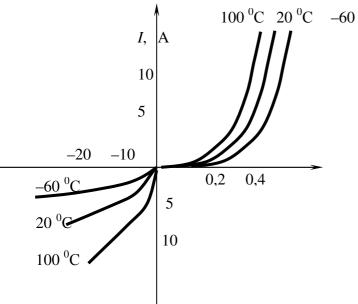


Рис. 4. ВАХ кремниевого диода Шоттки 2Д219 при разных температурах

низкочастотные диоды предпочтительнее изготовлять с p-ппереходом. Выпрямительные диоды Шоттки в области низких частот могут в перспективе иметь преимущество перед диодами с p-п-переходом, связанное с простотой изготовления.

Наибольшие преимущества перед диодами с *p-n*-переходом диоды Шоттки должны иметь при выпрямлении больших токов высокой частоты.

Еще одна особенность диодов Шоттки заключается в идеальности прямой ветви ВАХ.

Диоды Шоттки можно использовать в качестве быстродействующих логариф-мических элементов.

На рис. 4 показаны ВАХ кремниевого диода Шоттки 2Д219, рассчитанного на $I_{\rm пр\ max}$ =10 А. Напряжения $U_{\rm пр}$ на диоде при максимально допустимом прямом токе не более 0.6 В и $U_{\rm обр\ max}$ до 20 В. Эти диоды допускают прохождение импульсов тока длительностью до 10 мс с периодом повторения не менее 10 мин с амплитудой в 25 раз превышающей максимально допустимый прямой ток. Диоды рассчитаны на частоту выпрямляемого тока 0,2 МГц.

Для **импульсных диодов** Шоттки предпочтение отдано GaAs, так как в этом материале время жизни неосновных носителей заряда может быть менее 10^{-9} с. Арсенид галлия пока не удается получить с малой концентрацией дефектов, в результате чего GaAs-диоды имеют относительно малые значения пробивных напряжений, далекие от теоретически возможных. Это является существенным недостатком для выпрямительных диодов, но не столь важно для импульсных диодов, так как большая часть импульсных схем — это низковольтные схемы.

Выпускаемые импульсные диоды Шоттки (ЗА527А, ЗА530Б и др.) предназначены для использования в импульсных схемах пико- и наносекундного диапазона. В отличие от выпрямительных. диодов Шоттки они имеют значительно меньшие площади выпрямляющих переходов. Поэтому общая емкость не превышает 1 пФ даже при нулевом постоянном напряжении смещения.

МИНИ - ТЕСТ

1. Диод Шоттки – это

- 1) полупроводниковый диод с выпрямляющим контактом металл-полупроводник;
 - 2) диод с накоплением заряда;
 - 3) обычный полупроводниковый диод с малой барьерной емкостью;
 - 4) туннельный диод.
 - 2. Выпрямительные диоды Шоттки предпочтительнее делать из
 - 1) кремния;
 - 2) арсенида галлия;
 - 3) германия.
 - 3. Импульсные диоды Шоттки предпочтительнее делать из
 - 1) кремния;
 - 2) арсенида галлия;
 - 3) германия.

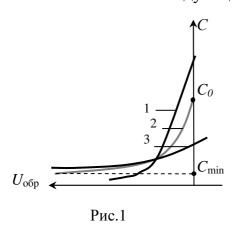
ВАРИКАП

Варикап¹ — это полупроводниковый диод, представляющий собой емкость, управляемую обратным напряжением.

Маркировка варикапов

1 элемент	Буква или цифра, обозначающая исходный материал: 1(Г) – германий, 2(К) – кремний, 3(А) – арсенид-галлий		
	1(1) – германии, 2(K) – кремнии, 3(A) – арсенид-галлии		
2элемент	Буква В		
3 элемент			
• Подстроечные варикапы	101199		
• Умножительные варикапы	201299		

Варикапы применяют в устройствах управления частотой колебательного контура, в параметрических схемах усиления, деления и умножения частоты, в схемах частотной модуляции, управляемых фазовращателях и т.д.



Зависимость емкости от напряжения смещения различна для варикапов, изготовленных методом диффузии или методом вплавления примесей, и определяется профилем легирования базы варикапа, что влияет на вид зависимости C(U): линейно убывающая, экспоненциально убывающая.

На рис.1 кривая 1 — вольт-фарадная характеристика (ВФХ) варикапа, изготовленного по планарно—эпитаксиальной технологии, 2 — сплавного варикапа, 3 — диффузионного варикапа.

В сплавных варикапах с резким *p-n*-переходом зависимость барьерной емкости от напряжения смещения получается более резкая, чем в диффузионных. Связано это с тем, что глубина проникновения электрического поля в материал зависит от удельного сопротивления этого материала. В сплавном варикапе слои базы, прилегающие к переходу, легированы равномерно, а в диффузионном — при удалении от перехода концентрация нескомпенсированных примесей увеличивается, т. е. уменьшается удельное сопротивление.

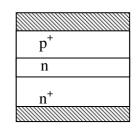


Рис.2. Структура варикапа с малым сопротивлением базы.

ВФХ для сплавных и диффузионных варикапов аппроксимируются выражением

¹ Варикап следует не путать с другими приборами с очень похожими названиями:

Варистор - резистор, сопротивление которого зависит от приложенного к нему напряжения.

Вариконд – нелинейный диэлектрический конденсатор, емкость которого зависит от приложенного напряжения. Изменение емкости происходит за счет изменения диэлектрической проницаемости.

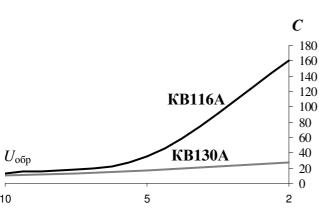


Рис.3. Зависимость емкости варикапа от напряжения для различных варикапов.

$$C = C_0 \left[\frac{\varphi_0}{\varphi_0 - U_{o\delta p}} \right]^m$$

где m — коэффициент нелинейности ВФХ (m=0,5 для сплавных, m=0,3 для диффузионных).

Поэтому для получения еще более резкой зависимости емкости варикапа от напряжения смещения необходимо создавать в базе варикапа аномальное распределение нескомпенсированных примесей с градиентом концентрации другого

знака по сравнению со знаком градиента концентрации в базе диффузионного диода (рис.2.)

Как и в других диодах, сопротивление базы варикапа должно быть по возможности малым. Одновременно для большего пробивного напряжения необходимо большее удельное сопротивление слоев базы, прилегающих к *p-n*-переходу. Таким образом, база варикапа должна состоять из двух слоев (рис. 2). Основная часть базы — подложка — должна быть низкоомной. Тонкий слой базы, прилегающий к переходу, должен быть высокоомным.

Основные параметры

- 1. Емкость варикапа $C_{\rm B}$ емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении. Для различных варикапов емкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад.
 - $2.\ C_{
 m max}$ емкость, измеренная при $U_{
 m min}$.
 - 3. C_{\min} емкость, измеренная при U_{\max} .
- 4. Коэффициент перекрытия по емкости отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений. Значение этого параметра составляет обычно несколько единиц (от 2 до 20).

$$K_c = \frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}}$$

 \mathcal{L} обротность варикапа $Q_{\scriptscriptstyle B}$ — отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения.

Добротность — это величина, обратная тангенсу угла диэлектрических

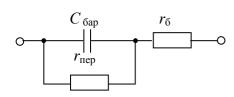


Рис.4. Эквивалентная схема варикапа для широкого диапазона частот

потерь. Добротность варикапов измеряют обычно при тех же напряжениях смещения, что и емкость. Значение добротности — от нескольких десятков до нескольких сотен (20...400).

При **низких частотах** в эквивалентной схеме варикапа можно не учитывать малое сопротивление базы r_{δ} по сравнению с большим емкостным сопротивлением барьерной емкости и большим ак-

тивным сопротивлением перехода. Таким образом, при низких частотах упрощенная эквивалентная схема варикапа представляет собой параллельное соединение барьерной емкости и сопротивления перехода. Для параллельной схемы замещения тангенс угла диэлектрических потерь определяется выражением:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega \cdot r_{\text{nep}}C_{\text{fap}}},$$

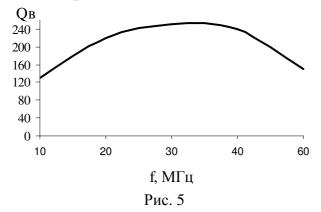
добротность

$$Q_{\text{HY}} = \omega \cdot r_{\text{пер}} C_{\text{бар}} = 2\pi \cdot f \cdot r_{\text{пер}} C_{\text{бар}}.$$

Следовательно, добротность варикапа при низких частотах растет с увеличением частоты, так как изменяется соотношение между реактивной и активной проводимостями варикапа (рис. 5).

Таким образом, варикапы, применяемые на очень **низких частотах**, должны иметь высокие значения произведения дифференциального сопротивления p-n-перехода и барьерной емкости $r_{\rm nep}C_{\rm бар}$. Значение этого произведения не зависит от площади перехода, так как барьерная емкость пропорциональна, а дифференциальное сопротивление обратно пропорционально площади p-n-перехода. Ясно, что дифференциальное сопротивление p-n-перехода будет больше, если значения плотности постоянных обратных токов будут меньше. Поэтому для изготовления **низкочастотных** варикапов целесообразно использовать полупроводниковые материалы с большой шириной запрещенной зоны (**кремний**, арсенид галлия и т. д.).

При высоких частотах в эквивалентной схеме варикапа можно не учи-



тывать большое активное сопротивление перехода по сравнению с малым (при высокой частоте) параллельно включенным емкостным сопротивлением барьерной емкости. Но при этом нельзя пренебрегать сопротивлением базы, которое может оказаться сравнимым с емкостным сопротивлением барьерной емкости. Таким образом, при высоких частотах упрощенная эквивалентная схема

варикапа представляет собой последовательное соединение барьерной емкости и сопротивления базы.

Для последовательной схемы замещения **тангенс угла диэлектрических потерь** определяется выражением:

$$tg\delta = \omega \cdot r_{\delta} \cdot C_{\delta ap} ,$$

добротность

$$Q_{\rm \scriptscriptstyle BH} = \frac{1}{\omega \cdot r_{\rm \scriptscriptstyle O} C_{\rm \scriptscriptstyle Oap}} = \frac{1}{2\pi \cdot f r_{\rm \scriptscriptstyle O} C_{\rm \scriptscriptstyle Oap}}.$$

Следовательно, добротность варикапа при высоких частотах уменьшается с увеличением частоты, так как уменьшается отношение реактивного сопро-

тивления варикапа к сопротивлению потерь (рис.5).

Варикапы в основном применяют на высоких и сверхвысоких частотах. Поэтому определение одного из основных параметров варикапа — добротности — соответствует именно последовательной схеме замещения.

Таким образом, варикапы, применяемые на высоких и сверхвысоких частотах, должны иметь малые значения дифференциального сопротивления базы r_{δ} . В рабочем диапазоне постоянных смещений варикапа, т. е. при обратных напряжениях, сопротивление базы можно считать неизменным. Тогда дифференциальное сопротивление базы, равное ее статическому сопротивлению, для плоскостного варикапа можно определить по формуле

$$r_{\rm G} = \frac{\rho W}{S}$$
,

где W - толщина базы варикапа; S – площадь p-n-перехода.

Из формулы следует, что уменьшить дифференциальное или статическое сопротивление базы варикапа можно путем выбора исходного полупроводникового материала с большой подвижностью носителей заряда (арсенид галлия, германий с электропроводностью *n*-типа и т. д.).

Предельная рабочая температура для германиевых варикапов составляет 50–60 0 C, арсенид–галлиевых – до 150^{0} C.

Рабочий диапазон частот варикапа определяется значениями минимально допустимой добротности Q_{\min}

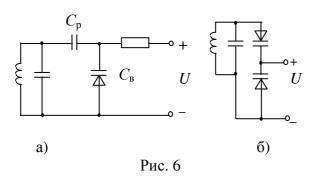
$$\omega_{min} = \frac{1}{Q_{\min} C_{\text{бар}} r_{\text{пер}}}; \quad \omega_{max} = \frac{1}{Q_{\min} C_{\text{бар}} r_{\text{б}}}.$$

Схема включения варикапа показана на рис. 6а.

Емкость разделительная $C_{\rm p}$ разделяет управляемый контур и источник управляющего напряжения и выбирается из условия $C_{\rm p} >> C_{\rm B}$. При этом общая емкость

$$\frac{C_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{B}}}{C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{B}}}$$
 последовательного включения определяется, в основном, емкостью

варикапа $C_{\rm B}$. Недостатком такой схемы является то, что емкость варикапа определяется не только управляющим напряжением, но и высокочастотным напряжением контура. Этот недостаток устраняется в схеме рис. 6 б. Здесь два варикапа включены так, что высокочастотное напряжение контура приложено к ним в разной полярности и на общую емкость не влияет.



МИНИ-ТЕСТ

1) Варикап – это

- 1)полупроводниковый диод, напряжение стабилизации которого меняется в широких пределах;
- 2) полупроводниковый диод, который используется для генерации и усиления электрических колебаний;
- 3) полупроводниковый диод, барьерная емкость которого меняется в широких пределах при изменении приложенного напряжения.
 - 2) Низкочастотные варикапы делают из
 - 1) германия;
 - 2) арсенида галлия.
 - 3) Высокочастотные варикапы делают из
 - 1) германия;
 - 2) кремния.
- 4) Максимальная рабочая температура для германиевых полупроводниковых приборов составляет
 - 1) $+50^{\circ}$ C;
 - $2) + 110^{\circ}C;$
 - $3) + 150^{\circ}C;$
 - $4) +200^{\circ} \text{C}.$
 - 5) В области низких частот добротность варикапа с ростом частоты
 - 1) уменьшается;
 - 2) увеличивается.

СТАБИЛИТРОНЫ И СТАБИСТОРЫ

Полупроводниковый стабилитрон — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо зависит от тока в заданном его диапазоне, который предназначен для стабилизации напряжения.

В маркировке отечественных стабилитронов первая буква (или цифра для приборов специального назначения) обозначает исходный материал. Вторая буква «С» – обозначает подкласс стабилитронов. Следующие цифры указывает мощность стабилитрона и напряжение стабилизации (табл. 1). Последняя буква указывает особенности конструкции или корпуса. Например, маркировка КС 168 А соответствует маломощному стабилитрону (ток менее 0.3 А) с напряжением стабилизации 6.8 В, в металлическом корпусе.

Таблица 1. Условное обозначение третьего элемента полупроводниковых стабилитронов

•	1	<i>J</i> 1 ' '	1
	Обозначение третьего элемента при мощности		
Напряжение	стабилитронов, Вт		
стабилизации, В	малой	средней	большой
	(до 0,3)	(от 0,3 до 5)	(более 5)
До 10	101199	401499	701799
От 10 до 99	201299	501599	801899
От 100 до 199	301399	601699	901999

В стабилитронах может быть либо лавинный, либо туннельный пробой. В связи с тем, что лавинный пробой характерен для диодов, изготовленных из полупроводника с большой шириной запрещенной зоны, исходным материалом для стабилитронов служит кремний.

Низковольтные стабилитроны изготовляют на основе сильнолегированного кремния. Для низковольтных стабилитронов с туннельным пробоем при увеличении концентрации примесей уменьшается толщина p-n-перехода, что и приводит к уменьшению пробивного напряжения и напряже-

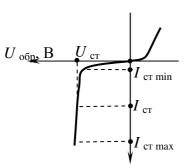


Рис. 1. ВАХ стабилитрона.

ния стабилизации.

Высоковольтные стабилитроны должны иметь большую толщину *p-n*-перехода. Поэтому их делают на основе слаболегированного кремния. Для изготовления высоковольтных стабилитронов с лавинным пробоем в качестве исходного полупроводникового материала необходим высокоомный кремний. Чем больше требуется напряжение стабилизации, тем больше должно быть удельное сопротивление исходного кремния.

Полупроводниковый стабистор — это

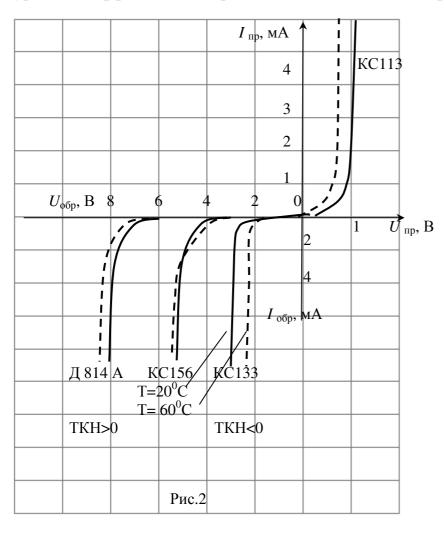
полупроводниковый диод, напряжение на котором в области **прямого смещения** слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения. Основная часть стабисторов — это кремниевые диоды, отличающиеся от обычных выпрямительных диодов тем, что p-n-переходы для стабисторов формируют в низкоомном кремнии.

Основным параметром стабилитронов является напряжение стабилизации $U_{\rm cr}$ — значение напряжения на стабилитроне при прохождении заданного тока стабилизации. Пробивное напряжение диода, а значит, напряжение стабилизации стабилитрона, зависит от толщины p-n-перехода или от удельного сопротивления базы диода. Поэтому разные стабилитроны имеют различные напряжения стабилизации (от 1.5 до 400 В).

Важным параметром стабилитрона является температурный коэффициент напряжения стабилизации α_{cm} — величина, определяемая отношением относительного изменения напряжения стабилизации к изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации:

$$\alpha_{cm} = \frac{1}{U_{cm}} \frac{dU_{cm}}{dT} \bigg|_{I_{cm} = const}$$

Так как температурный коэффициент напряжения стабилизации зависит от температуры, то в справочной литературе приводят значения среднего температурного коэффициента напряжения стабилизации для рабочего диапазона темпе-



ратур. может α_{cm} иметь положительные значения ДЛЯ относительно высоковольтных и отрицательные для низковольтных стабилитронов, что связано с различной температурной зависимостью пробивного напряжения при лавинном и туннельпробое ном p-nперехода. Изменение знака α_{cm} соответствует напряжению стабилизации $U_{cr}=6$ В. В связи с этим в низковольтных стабилитронах напряжением стабилизации менее 6 В, происходит TVHнельный пробой, а

пробивное напряжение при туннельном пробое уменьшается с увеличением температуры (α_{cm} <0). Высоковольтные стабилитроны должны иметь большую толщину *p-n*-перехода. Поэтому их изготавливают на основе слаболегированно-

го кремния. Принцип их действия связан с **лавинным пробоем**, при котором пробивное напряжение растет с увеличением температуры (α_{cm} >0). Среди различных типов стабилитронов большинство с лавинным пробоем.

Одним из способов уменьшения температурного коэффициента напряжения стабилизации, который используют для создания термокомпенсированных **прецизионных** стабилитронов, заключается в последовательном соединении с обратно включенным p-n-переходом стабилитрона дополнительно 1 или 2 стабистора, включенных в прямом направлении. С повышением температуры напряжение на p-n-переходе, включенном в прямом направлении, уменьшается, что компенсирует увеличение напряжения на обратно включенном p-n-переходе при лавинном его пробое.

Количество прямосмещенных стабилитронов зависит от напряжения стабилизации $/6.5 \div 96\,\mathrm{B}/.$

О качестве стабилитрона, т. е. о его способности стабилизировать напряжение при изменении проходящего тока, можно судить по значению дифференциального сопротивления стабилитрона $r_{\rm cr}$ которое определяется отношением приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его малому приращению тока. Так как определенным изменениям тока для лучшей стабилизации должны соответствовать минимальные изменения напряжения, то качество стабилитрона выше, если он имеет меньшее дифференциальное сопротивление. Дифференциальное сопротивление стабилитрона при заданном токе стабилизации

$$r_{\rm cT} = \frac{dU_{\rm cT}}{dI_{\rm cT}} \approx \frac{\Delta U_{\rm cT}}{\Delta I_{\rm cT}} .$$

Диапазон токов, в котором стабилитрон может выполнять функции стабилизации напряжения, устанавливают из следующих соображений. Минимально допустимый ток стабилизации $I_{\rm cr\ min}$ определяется тем, что при малых токах, во-первых, дифференциальное сопротивление оказывается еще большим и, во-вторых, в стабилитронах с лавинным пробоем, из-за неустойчивости процесса ударной ионизации, в начальной стадии возникают шумы. С увеличением тока через стабилитроны процесс ударной ионизации устанавливается и шумы исчезают. Максимально допустимый ток стабилизации $I_{\rm cr\ max}$ определяется допустимой для данного прибора мощностью рассеяния и необходимостью обеспечения заданной надежности работы прибора, т. е. зависит от площади p-n-перехода и от конструкции прибора.

$$I_{\text{ct. max}} = \frac{P_{\text{max}}}{U_{\text{ct}}}$$

Конструктивно стабилитроны оформляют аналогично выпрямительным и другим диодам, т. е. в металлостеклянных, стеклянных и пластмассовых корпусах, а также в бескорпусном виде с защитным покрытием. В зависимости от площади p-n-перехода и конструктивного оформления стабилитроны могут иметь максимально допустимые мощности от десятых долей до 50 Вт.

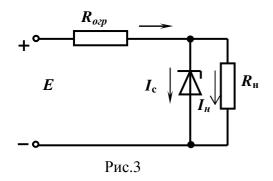
Электронно-дырочные переходы при изготовлении стабилитронов формируют методами вплавления и диффузии примесей.

Эмпирическая зависимость напряжения $U_{\rm проб}$ при туннельном пробое для кремниевого полупроводника имеет следующий вид:

$$U_{\text{проб}} = 200\rho_n + 73\rho_p,$$

где ρ_n , ρ_p - удельные сопротивления n- и p-слоев, выраженные в (Ом·см).

Эмпирическая зависимость напряжения $U_{\rm npo \delta}$ при **лавинном пробое** для кремниевого полупроводника имеет следующий вид:



$$p^+ n$$
 — переход - $U_{\text{проб}} = 96 \rho^{0.78}$, $n^+ p$ — переход - $U_{\text{проб}} = 48 \rho^{0.78}$,

где ρ - удельное сопротивление резкого перехода (Ом·см).

Стабилитрон включается в обратной полярности параллельно нагрузке, последовательно с ним включается ограничительный резистор $R_{\text{огр}}$ (рис. 3).

Уменьшение сопротивления $R_{\text{огр}}$ увеличивает напряжение на нагрузке, но ухудшает стабилизацию.

Параметры схемы выбирают так, чтобы при изменении нагрузки и напряжения источника питания выполнялись неравенства (1) и (2).

$$I_{\text{ct.min}} \le \frac{E_{min} - U_{\text{ct}}}{R_{\text{orp}}} - I_{\text{H. max}}$$
 (1)

$$I_{\text{ct. max}} \ge \frac{E_{max} - U_{\text{ct}}}{R_{\text{orp}}} - I_{\text{H. min}}$$
 (2)

Отличительной особенностью стабисторов по сравнению со стабилитронами **является меньшее напряжение стабилизации, определяемое прямым** падением напряжения на диоде, и составляет примерно 0,7 В. Последовательное соединение двух или трех стабисторов дает возможность получить удвоенное или утроенное значение напряжения стабилизации. Некоторые типы стабисторов представляют собой единый прибор с последовательным соединением отдельных элементов.

Стабисторы имеют отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации, т. е. напряжение на стабисторе при неизменном токе уменьшается с увеличением температуры. В связи с отрицательным температурным коэффициентом напряжения стабилизации и нелинейностью ВАХ, которая обеспечивает стабилизацию напряжения, стабисторы используют для температурной компенсации стабилитронов с положительным температурным коэффициентом напряжения стабилизации. Для этого последовательно со стабилитроном необходимо соединить один или несколько стабисторов.

Максимально допустимое обратное напряжение при переходных процессах обычно не превышает для стабисторов нескольких вольт.

Кроме кремниевых стабисторов промышленность выпускает и селеновые

поликристаллические стабисторы, которые отличаются простотой изготовления, а значит, меньшей стоимостью. Однако селеновые стабисторы имеют меньший гарантированный срок службы (1000 ч) и узкий диапазон рабочих температур (-25...+ 60° C).

КС107, КС113, КС119, D220С – Стабисторы.

D-220 – Импульсный стабилитрон.

Импульсный стабилитрон от обычных стабилитронов отличается повышенным быстродействием и применяется для стабилизации амплитуды импульсов.

Двухсторонний стабилитрон – два импульсных стабилитрона, включенных встречно. Стабилитроны обычно одинаковы, что приводит к симметричной ВАХ. Используются в двухсторонних ограничителях импульсов.

МИНИ-ТЕСТ

1. Стабилитрон – это

- 1) полупроводниковый диод, работающий в режиме электрического пробоя;
- 2) полупроводниковый диод, обладающий высокой концентрацией примесей;
- 3) полупроводниковый диод, имеющий малое значение барьерной емкости;
- 4) полупроводниковый диод, обладающий малым дифференциальным сопротивлением.

2. Стабилитроны изготавливаются из

- 1) германия;
- 2) арсенида галлия;
- 3) кремния;
- 4) кремния и германия.

3. Напряжение стабилизации стабилитрона зависит от

- 1) концентрации примесей в областях диода;
- 2) дифференциального сопротивления диода;
- 3) емкости перехода.

4. Наименьшее напряжение стабилизации стабилитронов составляет

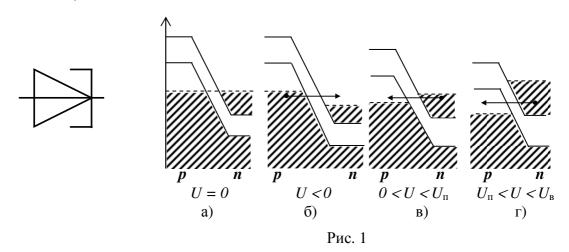
- 1) десятые доли вольт;
- 2) единицы вольт;
- 3) десятки вольт;
- 4) сотни вольт.

5. Максимальное напряжение стабилизации у кремниевого стабилитрона составляет

- 1) единицы вольт;
- 2) десятки вольт;
- 3) сотни вольт;
- 4) тысячи вольт.

ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД

Туннельный диод — полупроводниковый прибор на основе p-n-перехода, образованного **вырожденными** полупроводниками (концентрация примеси $N \approx 10^{20} \ \text{cm}^{-3}$).



Особенности туннельного диода: концентрация примеси в сотни раз больше, чем в выпрямительных диодах; малая толщина перехода (\approx 0,01мкм). В результате даже при малых напряжениях напряженность электрического поля достигает величин порядка 10^6 В/см, а полупроводник становится вырожденным, то есть уровень Ферми заходит в p-области в валентную зону, а в n-области в зону проводимости. Энергетическая диаграмма туннельного диода имеет вид (рис. 1). Занятые электронами уровни, лежащие ниже уровня Ферми, заштрихованы. Из диаграммы видно, что против разрешенных уровней валентной зоны p-области лежат разрешенные уровни зоны проводимости n-области. Это значит, что электроны могут пройти через переход не меняя своей энергии, не преодолевая потенциального барьера. Это явление называется **туннельным эффектом**. Если внешних напряжений к переходу не приложено (U = 0), то прямой и обратный токи взаимно компенсируются, и полный ток равен нулю (рис. 1a).

Если переход включен в обратном направлении (плюсом к n, минусом к p-области), энергетический барьер возрастает (полное напряжение $U_{\Pi}=U+\varphi\kappa$), при этом, против занятых уровней p-области появляются свободные разрешенные уровни зоны проводимости n-области, то есть растет обратный туннельный ток (рис.1б).

Если к переходу приложено прямое напряжение $0 < U < U_{\rm n}$, потенциальный барьер (рис. 1в) снижается, против занятых уровней n-области появляются разрешенные свободные уровни валентной зоны р-области. Появляется туннельный ток. При $U = U_{\rm n}$ все уровни зоны проводимости n-области окажутся против свободных уровней валентной зоны, то есть прямой туннельный ток будет максимальным.

Если прямое напряжение станет больше $U_{\rm II}$, барьер еще понизится (рис.1г) и часть занятых уровней n-области окажется против запрещенной зоны p-области. Туннельный ток будет уменьшаться. При некотором $U=U_{\rm B}$ туннельный ток прекратится.

Под **туннелированием** (туннельным эффектом) понимают преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия меньше высоты барьера.

При туннелировании носители заряда проходят сквозь потенциальный барьер, а не над потенциальном барьером.

Особенностью ВАХ является падающий участок при $U_{\Pi} < U < U_{\text{в}}$, на котором дифференциальное сопротив-

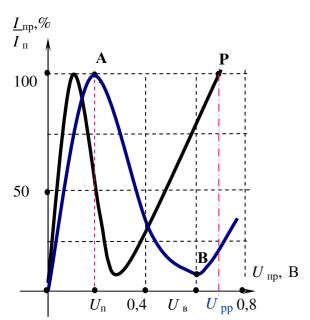


Рис. 2. ВАХ туннельных диодов

ление отрицательно:
$$R_{\partial} = \frac{dU}{dI} < 0$$

Это позволяет использовать туннельные диоды для усиления и генерации переменных токов в диапазоне сверхвысоких частот. Предельная частота туннельных диодов достигает десятков и сотен гигагерц, они отличаются малым потреблением энергии, хорошей радиационной устойчивостью, температурной стабильностью.

Промышленность выпускает туннельные диоды из арсенида галлия и германия (рис.2). Чем больше ширина запрещенной зоны, тем при больших напряжениях наблюдается

отрицательное дифференциальное сопротивление.

Туннельный диод – СВЧ прибор, который работает в сантиметровом диапазоне волн / $\lambda = 1 \div 10$ см/.

Параметры. Туннельные диоды характеризуются специфическими параметрами:

- 1. Пиковый ток I_{Π} прямой ток в точке максимума ВАХ, при котором значение di/du равно нулю. Этот ток различен для туннельных диодов разного назначения. Значение его может составлять от десятых долей миллиампера до сотен миллиампер.
- 2. Ток впадины $I_{\rm B}$ прямой ток в точке минимума ВАХ, при котором значение di/du равно нулю.
- 3. Отношение токов туннельного диода $I_{\rm II}/I_{\rm B}$ отношение пикового тока к току впадины. Для туннельных диодов из арсенида галлия $I_{\rm II}/I_{\rm B} > 10$, для германиевых туннельных диодов $I_{\rm II}/I_{\rm B} = 3...$ 6. Для переключательных диодов это отношение должно быть максимально возможным, оно характеризует различимость двух логических уровней сигнала.
- 4. Напряжение пика $U_{\rm II}$ прямое напряжение, соответствующее пиковому току. Для туннельных диодов из арсенида галлия $U_{\rm II}$ = 100...150 мВ, для германиевых $U_{\rm II}$ = 40...60 мВ.
 - 5. Напряжение впадины $U_{\rm B}$ прямое напряжение, соответствующее току

впадины. У туннельных диодов из арсенида галлия $U_{\text{вGe}}$ =250...300мB, $U_{\text{вGaAs}}$ =400...500мB.

- 6. Напряжение раствора $U_{\rm PP}$ прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому.
- 7. Удельная емкость туннельного диода $C_{\rm д}/I_{\rm n}$ отношение емкости туннельного диода к пиковому току.
- 8. Предельная резистивная частота f_R расчетная частота, на которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из p-n-перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль.
- 9. Резонансная частота туннельного диода f_0 расчетная частота, на которой общее реактивное сопротивление p-n-перехода и индуктивности корпуса туннельного диода обращается в нуль.

С повышением температуры уменьшается ширина запрещенной зоны арсенида галлия и германия Уменьшение ширины запрещенной зоны приводит к уменьшению толщины потенциального барьера, сквозь который туннелируют электроны, при этом вероятность туннелирования растет. Туннельная составляющая тока и, в частности, пиковый ток увеличиваются.

При увеличении температуры изменяется распределение электронов по энергетическим уровням – количество электронов под уровнем Ферми в зоне проводимости n-области уменьшается, так как часть свободных электронов переходит на более высокие энергетические уровни, а уровень Ферми смещается

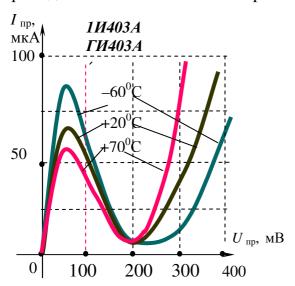


Рис. 3. ВАХ туннельного диода при различных температурах

вниз. Поэтому уменьшается число электронов, которые могут туннелировать из n-области в p-область. Туннельная составляющая прямого тока уменьшается.

Так как эти факторы действуют, так сказать, в разные стороны, то суммарное их влияние, во-первых, должно быть малым, а во-вторых, оно может привести как к увеличению, так и к уменьшению пикового тока туннельного диода с увеличением температуры.

Инжекционная составляющая тока туннельного диода растет с увеличением температуры по двум причинам, имеющим место и в выпрямительных

диодах: уменьшение высоты потенциального барьера и перераспределение носителей заряда по энергетическим уровням. Поэтому у туннельного диода ток впадины растет с увеличением температуры.

Частотные свойства туннельных диодов

Механизм действия туннельных диодов связан с туннелированием электронов сквозь потенциальный барьер. Время, необходимое для завершения этого процесса, составляет $10^{-13}...10^{-14}$ с. Эффекта накопления неосновных носителей в базе туннельных диодов практически нет, так как они используются при

малых напряжениях, соответствующих падающему участку ВАХ (с отрицательным дифференциальным сопротивлением). Поэтому туннельные диоды способны работать на **частотах до сотен гигагерц**, что соответствует миллиметровому диапазону радиоволн. Верхний предел частотного диапазона работы туннельных диодов ограничен лишь паразитными реактивностями – собственной емкостью, основу которой составляет барьерная емкость *p-n*-перехода, и

r₆ r_− L

C _{6ap}

Рис. 4. Эквивалентная схема туннельного диода

индуктивностью выводов и корпуса.

Эквивалентная схема туннельного диода отличается от эквивалентной схемы обычного диода только тем, что здесь вместо активного сопротивления перехода введено отрицательное дифференциальное сопротивление r_{\perp} и учитывается индуктивность выводов L . Индуктивность эквивалентной схемы туннельного диода, кото-

рая определяется в основном индуктивностью внутренних и внешних выводов диода, должна быть по возможности малой. Поэтому внутренние и внешние выводы у туннельных диодов делают не из тонкой проволоки, а из плющенки или в виде мембран, пластин и т. п.

Напомним, что вторым элементом **маркировки** туннельных диодов является буква «**И**», а третьим элементом три цифры — усилительные ТД-(101...199), генераторные ТД-(201...299), переключательные ТД-(301...399).

МИНИ-ТЕСТ

1. Туннельный диод – это диод,

- 1) обладающий высокой концентрацией примесей $(10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3})$;
- 2) обладающий малой толщиной запирающего слоя;
- 3) имеющий малую площадь перехода;
- 4) имеющий малую барьерную емкость.

2. Что определяет отношение $I_{\pi}/I_{\rm B}$?

- 1) Усилительные свойства туннельного диода;
- 2) Переключательные свойства туннельного диода;
- 3) Генераторные свойства туннельного диода.

3. Использование ТД в качестве генератора объясняется

- 1) наличием емкости *p-n-*перехода;
- 2) наличием отрицательного дифференциального сопротивления на участке характеристики;
- 3) наличием малого постоянного сопротивления перехода.

4. Туннельные диоды обладают чрезвычайно малой инерционностью, так как

- 1) имеют малую диффузионную емкость;
- 2) перенос тока осуществляется основными носителями;
- 3) имеют малую толщину *p-n*-перехода;
- 4) имеют малую площадь перехода.

ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ

Обращенным называют диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

При концентрациях примесей в *p*- и *n*-областях диода, меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных выпрямительных диодах, можно получить диод, энергетическая диаграмма которого показана на рис. 1 *а*. Уровень Ферми при такой средней концентрации примесей может быть расположен на потолке валентной зоны *p*-области (точка A) и на дне зоны проводимости *n*-области диода (точка C), т. е. потолок валентной зоны *p*-области и дно зоны проводимости *n*-области при нулевом смещении на диоде находятся на одной высоте по энергетической диаграмме. Обратная ветвь ВАХ обращенного диода аналогична обратной ветви ВАХ туннельного диода, так как при обратных напряжениях происходит туннелирование электронов из валентной зоны *p*-области в зону проводимости *n*-области. Поэтому обратные токи в обращенных диодах оказываются большими при ничтожно малых обратных напряжениях (десятки милливольт).

Прямая ветвь ВАХ обращенного диода аналогична прямой ветви ВАХ обычного выпрямительного диода, так как при прямых напряжениях на обращенном диоде прямой ток может быть образован только в результате инжекции носителей заряда через потенциальный барьер p-n-перехода. Но заметная инжекция может наблюдаться только при прямых напряжениях в несколько десятых долей вольта. При меньших напряжениях прямые токи в обращенных диодах оказываются меньше обратных (рис.1 δ).

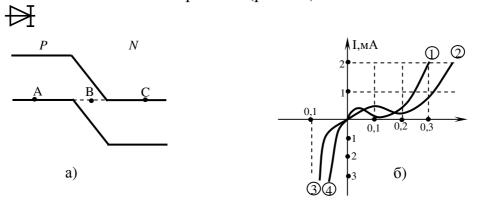


Рис. 1. Энергетическая диаграмма (а) и ВАХ (б) обращенных диодов, выполненных из германия и антимонида галлия.

Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) — прямому включению.

Из принципа действия обращенных диодов ясно, что они, во-первых, способны работать на очень малых сигналах. Во-вторых, должны обладать хорошими частотными свойствами, так как туннелирование — процесс малоинерционный, а эффекта накопления неосновных носителей при малых прямых напряжениях практически нет. Поэтому обращенные диоды можно использовать на СВЧ (до 50 ГГц). В-третьих, из-за относительно большой концентрации примесей в прилегающих к p-n-переходу областях обращенные диоды оказываются мало чувствительными к воздействиям проникающей радиации.

Используются при построении смесителей.

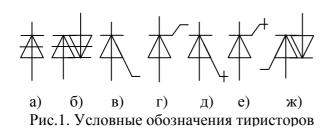
Напомним, что вторым элементом **маркировки** обращенных диодов является буква «И», а третьим элементом три цифры -401...499.

МИНИ-ТЕСТ

На рис. 1б изображены ВАХ диода из германия (ΔW_{Ge} (при 0 K) = 0,746 эВ) и из антимонида галлия (ΔW_{GaSb} (при 0 K) = 0,72 эВ). Какие кривые соответствуют ВАХ германиевого обращенного диода?

- 1) 2и3
- 2) 1 и 4
- 3) 1 и 3
- 4) 2 и 4

ТИРИСТОРЫ



Тиристор - это полупроводниковый прибор с тремя и более *p-n*—переходами, вольтамперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, который используется для переключения. На рис. 1 приведены услов-

ные графические обозначения следующих тиристоров:

- а) диодный тиристор (динистор);
- б) диодный симметричный тиристор;
- в) триодный незапираемый тиристор с управлением по аноду;
- г) триодный незапираемый тиристор с управлением по катоду;
- д) запираемый тринистор с управлением по аноду;
- е) запираемый тринистор с управлением по катоду;

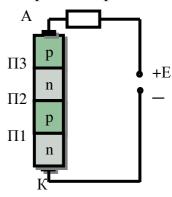


Рис. 2. Структура диодного тиристора.

ж) триодный симметричный незапираемый тиристор с управлением по аноду.

Исходный **полупроводниковый материал** для тиристоров должен иметь большую ширину запрещенной зоны. В массовом производстве тиристоры делают пока только из *кремния*. Ведутся разработки тиристоров из арсенида галлия и других соединений, имеющих большую ширину запрещенной зоны. Основной метод формирования тиристорных структур на основе кремния — последовательная диффузия различных примесей с использованием планарной технологии.

Максимально допустимые токи в открытом состоянии для различных тиристоров имеют значения от 40 мА до 1000 А. При этом напряжение в открытом состоянии обычно не превосходит 2 В.

Структура *диодного тиристора* показана на рисунке 2. Диодный тиристор (динистор) – это тиристор, имеющий два вывода, через которые проходит как основной ток, так и ток управления.

Структура диодного тиристора состоит из четырех областей полупроводника с чередующимся типом электропроводности (рис. 2). Кроме трех выпрямляющих переходов диодный тиристор имеет два омических перехода. Один из омических переходов расположен между крайней n-областью и металлическим электродом, который называют **катодом**. Другой омический переход расположен между крайней p-областью и металлическим электродом, который называют **анодом**. В таком приборе существуют две эмиттерные области — крайние (n- и p-эмиттеры) и две базовые области, примыкающие к среднему переходу (p- и n-базы).

Структуру тиристора можно представить в виде схемы замещения (рис. 3), состоящей из транзисторов T_1 и T_2 типа n-p-n и p-n-p.

База и коллектор транзистора T_1 соединены соответственно с базой и коллектором транзистора T_2 , образуя цепь внутренней положительной обратной связи. Если к аноду тиристора подключить плюс источника питания, а к катоду – минус, то переходы Π_1 и Π_3 будут смещены в прямом, а Π_2 – в обратном направлении. Таким образом, напряжение источника питания окажется приложенным к переходу Π_2 , и ток будет определяться выражением

$$I = \frac{MI_{\kappa 0}}{1 - M\alpha}; I = \frac{MI_{\kappa 0}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} , \qquad (1)$$

где $I_{\kappa 0}$ - обратный ток перехода $\Pi 2$, $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ - суммарный коэффициент передачи тока первого $(p_1 - n_1 - p_2)$ и второго $(n_2 - p_2 - n_1)$ транзисторов (во время переключения несколько превышает 1), M - коэффициент лавинного умножения.

Выражение (1) в неявном виде описывает ВАХ диодного тиристора на "закрытом" участке, поскольку коэффициенты M и α зависят от приложенного напряжения. По мере роста α и M с ростом E, когда значение $M(\alpha_1 + \alpha_2)$ станет равно 1, из уравнения (1) следует, что ток I устремится к ∞ . Это условие и есть условие переключения тиристора из закрытого состояния в открытое.

Напряжение переключения $U_{\text{перекл}}$ составляет у тиристоров от 20–50 В до 1000–2000 В, а ток переключения $I_{\text{перекл}}$ – от долей микроампера до единиц миллиампера (в зависимости от площади).

Таким образом, в состоянии "закрыто" тиристор должен характеризоваться малыми значениями α и M, а в состоянии "открыто" - большими значениями коэффициентов α и M.

Если M – коэффициент ударной ионизации, определяемый как количество носителей, рожденных при лавинном умножении одной частицей, то он описывается эмпирической формулой:

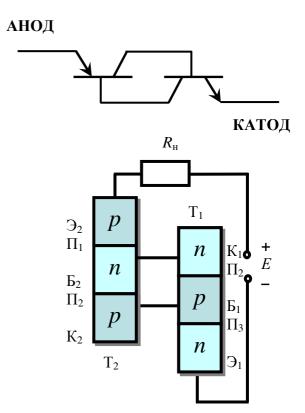


Рис. 3. Схема замещения тиристора

$$M = \frac{I_{\text{BMX}}}{I_{\text{BX}}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{M}}}\right)^n} , \qquad (2)$$

где $U_{\rm M}$ - напряжение лавинного пробоя, а значения коэффициента n для Ge, Si равно соответственно 3 и 5.

На рис. 4 изображена ВАХ динистора.

Участок 1–2. Напряжение на аноде положительно, ток незначителен, то есть тиристор закрыт. Первый участок ВАХ тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ *p-n*—перехода.

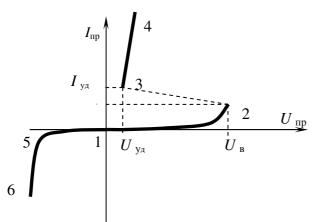


Рис. 4. Вольт–амперная характеристика динистора

Участок 2-3. В точках 2 и 3 дифференциальное сопротивление тиристора равно нулю, а между ними - отрицательно. Это участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением тиристора. Координаты точек 2 и 3 являются параметрами тиристора: $U_{\rm вкл}$ - напряжение включения; $I_{\rm вкл}$ - ток включения; $I_{\rm уд}$ ($I_{\rm выкл}$) - ток удержания (ток выключения); $U_{\rm уд}$ ($U_{\rm выкл}$) - напряжение удержания (напряжение

выключения). *Удерживающий ток* тиристора — это минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Участок 3-4. На этом участке тиристор открыт и ток через него ограничен сопротивлением внешней цепи. Участок соответствует режиму прямой проводимости.

Участок 1-5. На этом участке напряжение на аноде отрицательно. Ток мал. Тиристор закрыт. Участок соответствует режиму обратного запирания.

Участок 5-6. На этом участке наблюдается резкое увеличение тока тиристора при увеличении отрицательного напряжения на аноде, соответствует режиму обратного пробоя.

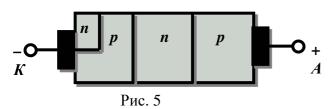
Для переключения триодного тиристора из закрытого состояния в открытое также необходимо накопление неравновесных носителей заряда в базовых областях. В диодном тиристоре при увеличении напряжения на нем до напряжения включения это накопление неравновесных носителей заряда происходит обычно либо из-за увеличения уровня инжекции через эмиттерные переходы, либо из-за ударной ионизации в коллекторном переходе.

Для выключения тиристора при его использовании в качестве токового ключа необходимо каким-либо способом уменьшить ток через тиристор до значения, меньшего тока удержания. Выключить тиристор, подавая какие-либо воздействия на управляющий электрод, в большинстве типов тиристоров невозможно. Однако существуют тиристоры, которые могут быть выключены по управляющему электроду импульсом тока обратного знака. Такие тиристоры называют запираемыми по управляющему электроду.

Диодный тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом

Шунтирование, во-первых, дает возможность создавать тиристоры с большими значениями напряжения включения. Во-вторых, при шунтировании эмиттерного перехода получается более резкая зависимость коэффициента передачи тока от напряжения и от тока. Поэтому тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом будет иметь, так называемую, жесткую характеристи-

ку переключения, т.е. будет переходить из закрытого в открытое состояние каждый раз при одном и том же напряжении включения. Наоборот, при слабой зависимости коэффициента передачи тока от напряжения и от тока пере-



ключение тиристора из закрытого состояния в открытое может происходить при различзначениях напряжения ных включения, т. е. тиристор в этом случае будет иметь так

называемую мягкую характеристику переключения.

Триодные тиристоры

Триодный тиристор (тринистор) — это тиристор, имеющий два основных и один управляющий вывод. Для переключения триодного тиристора из закрытого состояния в открытое также необходимо накопление неравновесных носителей заряда в базовых областях. В триодном тиристоре, имеющем управляющий вывод от одной из базовых областей с омическим переходом между управляющим электродом и базой (рис. 6 а), уровень инжекции через прилегающий к этой базе эмиттерный переход можно увеличить путем подачи положительного по отношению к катоду напряжения на управляющий электрод. Поэтому триодный тиристор можно переключить из закрытого

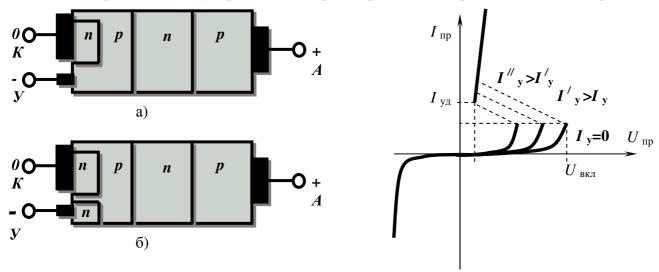


Рис. 6. Схематическое изображение структур триодных тиристоров с омическим личных токах через управляющий электрод. переходом между управляющим электродом и базой (а), с дополнительным р-п - переходом под управляющим электродом (б).

Рис. 7. ВАХ триодного тиристора при раз-

состояния в открытое в необходимый момент времени даже при небольшом анодном напряжении (рис. 7).

Управляющий электрод может быть сделан не только с омическим переходом между электродом и базовой областью, но и с дополнительным p-nпереходом (рис. 6 б). При определенной полярности напряжения на управляющем электроде относительно катода дополнительный переход окажется смещенным в прямом направлении, через него будет происходить инжекция неосновных носителей заряда (для прилегающей базы) с последующим накоплением в другой базовой области. Такой процесс может привести к переключению триодного тиристора в открытое состояние.

Тиристор, у которого управляющий электрод соединен с *n*-областью, ближайшей к катоду, и который переводится в открытое состояние при подаче на управляющий электрод отрицательного по отношению к катоду сигнала, называют тиристором с инжектирующим управляющим электродом n-типа.

Обратные токи таких тиристоров были малы вплоть до пробивного напряжения.

Тиристоры, проводящие в обратном направлении

Тиристор, проводящий в обратном направлении, — это тиристор, который при отрицательном анодном напряжении оказывается открытым в обратном направлении.

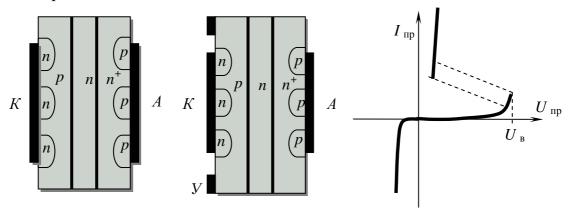


Рис. 8. Структуры диодного и триодного тиристоров, проводящих в обратном направлении, с распределенным шунтированием эмиттерных переходов и ВАХ тиристора, проводящего в обратном направлении.

Тиристоры, проводящие в обратном направлении, могут быть диодными и триодными. Общей особенностью их структуры является шунтирование всех эмиттерных переходов объемными сопротивлениями прилегающих базовых областей (рис. 8). Для уменьшения шунтирующего сопротивления высокоомной базы ее поверхностный слой, прилегающий к эмиттерному переходу, дополнительно легируют соответствующей примесью.

В результате такого шунтирования при обратном напряжении на тиристоре (отрицательный потенциал на аноде) все эмиттерные переходы оказываются закороченными относительно малыми сопротивлениями, а коллекторный переход — смещенным в прямом направлении. Поэтому обратные токи через тиристоры, проводящие в обратном направлении, велики при малых обратных напряжениях (рис. 8).

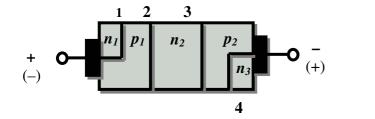
Следствием активного шунтирования всех эмиттерных переходов является также то, что оба коэффициента передачи тока эмиттера транзисторных структур, составляющих тиристор, оказываются малыми. Поэтому, при прямом напряжении на тиристоре основным физическим процессом, приводящим

к накоплению неравновесных носителей заряда в базовых областях и к переключению тиристора из закрытого состояния в открытое, будет ударная ионизация в коллекторном переходе.

Симметричные тиристоры (симисторы)

Симметричный диодный тиристор (диак) — это диодный тиристор, способный переключаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

Симметричный триодный тиристор (триак) — это триодный тиристор, который при подаче сигнала на его управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлениях.



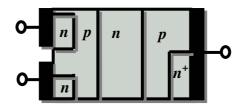
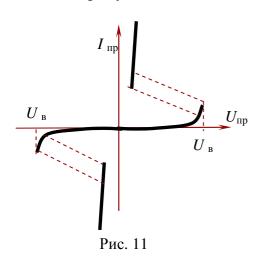


Рис. 9. Структура симметричного тиристора Рис. 10. Структура симметричного тиристора, переключаемого из закрытого состояния в открытое током управляющего электрода любого направления.

Структура симметричного диодного тиристора состоит из пяти областей с чередующимся типом электропроводности, которые образуют четыре p-



n-перехода (рис. 9). Крайние переходы зашунтированы объемными сопротивлениями прилегающих областей с электропроводностью ртипа.

Таким образом, симметричный диодный тиристор можно представить в виде двух диодных тиристоров, включенных встречно и шунтирующих друг друга при разных полярностях приложенного напряжения. Вольтамперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения (рис. 11).

Симметричные триодные тиристоры могут иметь структуру, способную переключаться из закрытого в открытое состояние либо при токе управляющего электрода определенного направления, либо при токе управляющего электрода любого направления (рис. 10). В последнем случае не только основные электроды должны обеспечить шунтирование прилегающих к ним крайних *p-n*-переходов, но и управляющий электрод должен иметь омический переход как с р-областью, так и с дополнительной п-областью. При этих условиях подача различных по знаку потенциалов на управляющий электрод по отношению к расположенному вблизи основному электроду будет либо изменять потенциал p-области, либо обеспечивать инжекцию электронов из дополнительной n-области.

Тиристоры используются для коммутации больших токов. В устройствах связи и автоматики используются тиристоры, имеющие напряжение включения десятки и сотни вольт, остаточное напряжение на включенном приборе 1...2 В, постоянный анодный ток более 10 А при этом ток управления может составлять десятки микроампер. Мощные высоковольтные тиристоры, используемые в энергетических установках, могут коммутировать токи до 1000 А при напряжениях до 100 кВ. Единственная область, в которой тиристоры продемонстрировали высокую конкурентоспособность - это мощные токовые ключи различного назначения, в качестве которых они сейчас успешно и широко используются.

Способы управления тиристорами Включение тиристоров

- 1. Включение тиристора путем медленного увеличения напряжения между основными электродами до напряжения включения $U_{\rm вкл}$.
 - 2. Включение тиристора с помощью тока управления.
- 3. Включение тиристора путем быстрого увеличения напряжения между основными электродами.
- 4. Включение тиристора путем освещения кристалла с тиристорной структурой.

Выключение тиристоров

- 1. Выключение тиристора путем уменьшения тока в цепи основных электродов до значения, меньшего удерживающего тока, или путем разрыва цепи основных электродов. Второй способ выключения применяется, когда время выключения тиристора не влияет на работу той или иной схемы.
- 2. Выключение тиристора путем изменения полярности анодного напряжения.
- 3. Выключение тиристора с помощью тока управляющего электрода. Существуют тиристоры, запираемые и незапираемые по управляющему электроду. Запираемый тиристор это тиристор, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот при подаче на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности. $I_{\text{эmax}}$ наибольшее значение основного тока, до которого допускается запирание тиристора по управляющему электроду. При использовании в мощных устройствах запираемые тиристоры обладают преимуществами перед транзисторами, поскольку тиристоры способны выдерживать значительно большие напряжения в закрытом состоянии.

Напомним, что второй знак при **маркировке тиристоров** – это буква «**H**», обозначающая динисторы и неуправляемые тиристоры, например, КНІ02, и буква «У», обозначающая тринисторы и управляемые тиристоры.

МИНИ-ТЕСТ

1. Тиристор – это полупроводниковый прибор

- 1) с тремя или более p-n-переходами, на вольт-амперной характеристики которого есть участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
- 2) с двумя переходами, работающий в импульсном режиме;
- 3) работающий в режиме лавинного умножения.

2. Сопротивление тиристора в закрытом состоянии

- 1) велико;
- 2) мало;
- 3) равно 0.

3. Сопротивление тиристора в открытом состоянии

- 1) велико;
- 2) мало;
- 3) равно 0.

4. Тринистор – это тиристор,

- 1) работающий при двух полярностях напряжения на приборе;
- 2) имеющий управляющий электрод;
- 3) имеющий четыре перехода.

5. Симистор – это тиристор,

- 1) который может проводить ток в двух направлениях;
- 2) работающий в импульсном режиме;
- 3) имеющий два управляющих электрода.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Биполярный транзистор (**БПТ**) — это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами (эмиттерным и коллекторным) и тремя (или более) выводами, пригодный для усиления мощности электрических сигналов. В БПТ физические процессы оп-

Б — К *p-n-p* Э *n-p-n*Рис. 1 ределяются движением носителей обоих знаков – основных и неосновных, что отражено в их названии.

Различают два вида биполярных транзисторов, которые содержат три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости: *p-n-p* или *n-p-n* (рис. 1).

Область транзистора, расположенную между p-n-переходами, называют **базой**. Область транзистора, инжектирующую носители в базу, называют **эмиттером**. Экстраги-

рующая носители из базы область называется коллектором.

Особенности устройства транзистора: концентрация примеси в эмиттере больше, чем в базе и коллекторе (обозначают n^+ –p–n); площадь коллекторного перехода больше, чем эмиттерного; толщина базы $\mathbf{w_6}$ меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда $L_{\rm D}$.

Таблица 1

Режим	Состояние переходов		
	Эмиттерный	Коллекторный	
Активный	открыт	закрыт	
Насыщения	открыт	открыт	
Отсечки	закрыт	закрыт	
Инверсный	закрыт	открыт	

Каждый из *p-n*—переходов может быть смещен либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора (табл.1).

В активном режиме транзисторы ра-

ботают в аналоговых, в частности, в усилительных схемах. В этом режиме эмиттерный переход транзистора находится под прямым напряжением, а коллекторный переход под обратным, поэтому токи транзистора сильно зависят от напряжения на эмиттере и почти не зависят от напряжения на коллекторе. Увеличение прямого входного напряжения снижает потенциальный барьер и вызывает переход дырок из эмиттера в базу, где они становятся неосновными носителями заряда. Концентрация дырок в базе вблизи границы эмиттерного перехода становится гораздо больше, чем у границы коллекторного перехода. Возникает диффузия дырок к границе коллекторного перехода, где они попадают под действие ускоряющего электрического поля и втягиваются из базы в коллектор, а затем рекомбинируют с электронами, привлекаемыми из внешней цепи. Уход дырок из эмиттера сопровождается уходом электронов во внешнюю цепь. Концентрация дырок и электронов в эмиттере поддерживается их генерацией. Ток эмиттера обусловлен генерацией дырок в эмиттере, ток коллектора обусловлен рекомбинацией дырок в коллекторе. Ток коллектора несколько меньше тока эмиттера из-за рекомбинации части дырок в базе. С увеличением обратного напряжения на коллекторном переходе увеличивается

толщина запирающего слоя, в основном за счет базы, поэтому существенно уменьшается ее толщина – происходит модуляция толщины базы коллекторным напряжением, известное под названием эффекта Эрли. Учитывая, что база имеет малую толщину, возможен эффект смыкания –база как отдельная область исчезает, коллекторный переход смыкается с эмиттерным, и транзистор перестает работать.

Ток эмиттера содержит дырочную $I_{\ni p}$ и электронную $I_{\ni n}$ составляющие, причем дырочная составляющая равна току диффузии дырок из эмиттера в базу $I_{\ni p}$. Составляющая $I_{\ni p}$ связана с полным током эмиттера соотношением:

$$I_{\ni p} = \gamma \cdot I_{\ni} = \gamma \cdot (I_{\ni n} + I_{\ni p} + I_{\ni pek}),$$

где γ – коэффициент инжекции эмиттера, $I_{\mathrm{Эрек}}$ – ток рекомбинации носителей в эмиттерном переходе.

Коэффициент инжекции показывает, какую часть составляет полезный ток инжекции электронов из эмиттера в базу в полном токе эмиттера.

Ток коллектора содержит две составляющие – ток дырок, вышедших из эмиттера, и ток неосновных носителей заряда – электронов, переходящих из коллектора в базу. Составляющие дырочного тока связаны соотношением:

$$I_{\mathrm{Kp}} = \chi \cdot I_{\mathrm{3p}}$$

где χ – коэффициент переноса.

Коэффициент переноса показывает, какая часть электронов, инжектируемых из эмиттера в базу, достигает коллекторного перехода; он тем ближе к единице, чем меньше электронов рекомбинирует в базе при их движении к коллектору.

Ток базы возникает в результате частичной рекомбинации дырок с электронами базы и он очень незначительный, т.к. $I_6 = I_9 - I_{\rm K}$, а $I_{\rm K} \approx I_9$

В режиме отсечки на оба *p-n*-перехода подаются обратные напряжения. Через переходы текут обратные токи, основными составляющими которых являются токи генерации, которые определяются физическими процессами в переходах и не зависят от распределения неосновных носителей в базе, эмиттере и коллекторе. Так как площадь и толщина коллекторного перехода больше, чем эмиттерного, то $I_{\kappa 0} << I_{30}$. В этом режиме нельзя получить управление токами.

Для **режима насыщения** характерна двусторонняя инжекция неосновных носителей через эмиттерный и коллекторный переходы, включенные в прямом направлении. При этом каждый переход не только инжектирует неосновные носители в базу, но и собирает подходящие к его границе носители, инжектированные в базу соседним переходом. В режиме насыщения при том же токе эмиттера ток базы больше, чем в активном режиме, т.к. он имеет дополнительные слагаемые, связанные с инжекцией дырок из базы в коллектор и рекомбинацией электронов, инжектированных из коллектора в базу. Следовательно, $I_6 > (1-\alpha)I_3$ или $\beta I_6 > I_{\rm K}$. Последнее выражение определяет условие существования режима насыщения в схеме с ОЭ.

Режимы отсечки и насыщения совместно используются в импульсных или цифровых схемах.

В инверсном режиме открытым является коллекторный переход, а закрытым – эмиттерный. Эмиттер и коллектор меняются местами, но т.к. их площади различны, то коэффициент усиления в этом режиме меньше, чем в активном режиме. Инверсный режим редко используется в схемах на дискретных транзисторах, применяется для интегральных схем.

Различают **три схемы включения** транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). **Общим** называют электрод, который связан как с входной, так и выходной цепями и относительно которого измеряют и задают напряжения. Для обозначения напряжений, подаваемых на электроды транзистора, используются двойные индексы. Первый индекс идентифицирует электрод, на который подается напряжение, измеряемое относительно общего электрода, обозначаемого вторым индексом.

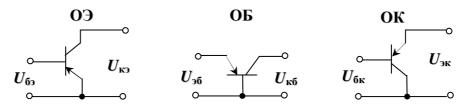


Рис. 2. Схемы включения *p-n-p* транзистора

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным влиянием их друг на друга. Для рассмотрения свойств и параметров биполярного транзистора принято пользоваться его статическими характеристиками, которые зависят от схемы включения. Различают входные ($I_1 = f(U_1)_{U_2=const}$), выходные ($I_2 = f(U_2)_{I_1=const}$), передаточные ($I_2 = f(I_1)_{U_2=const}$) статические характеристики, а также характеристики обратной связи ($U_1 = f(U_2)_{I_1=const}$). На рис. 3 и 4 изображены семейства входных и выходных характеристик для схем включения транзистора с ОБ и ОЭ. Входная характеристика, снятая при $U_2 = 0$ представляет собой обычную характеристику p-n-перехода, включенного в прямом направлении. Важно отметить нелинейный характер входной характеристики до компенсации потенциального барьера и линейный характер после его компенсации. Следует обратить внимание на то, что выходные характеристики для p-n-p-транзисторов принято изображать в положительных осях координат, хотя напряжение на коллекторе отрицательное и ток коллектора обратный.

Статические (по постоянному току) и дифференциальные (по переменному току) параметры БПТ определяются по экспериментальным данным или по системам входных и выходных характеристик (графоаналитический метод). Использование графиков позволяет определить параметры в любой точке.

Статические параметры определяются координатами рабочей точки. Так, например, по характеристикам, **входное сопротивление** в точке A рассчитывается как $R_{0\text{вх}}^{\quad A} = U_1^{\quad A}/I_1^{\quad A}$.

С точки зрения взаимодействия транзистора с внешними цепями его можно рассматривать как четырехполюсник, связь между входными и выходными токами и напряжениями представляется нелинейными функциями: $U_1 = f_1(I_1, U_2)$, $I_2 = f_2(I_1, U_2)$. Дифференциалы от этих функций можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} dU_{1} = \frac{\partial U_{1}}{\partial I_{1}} dI_{1} + \frac{\partial U_{1}}{\partial U_{2}} dU_{2} = h_{11} dI_{1} + h_{12} dU_{2}, \\ dI_{2} = \frac{\partial I_{2}}{\partial I_{1}} dI_{1} + \frac{\partial I_{2}}{\partial U_{2}} dU_{2} = h_{21} dI_{1} + h_{22} dU_{2}, \end{cases}$$

где h_{ik} — частные производные соответствующих величин, выражения для которых можно получить из системы уравнений, полагая поочередно одно из слагаемых равным нулю, т.е. моделировать режим короткого замыкания (КЗ) в выходной цепи и режим холостого хода (XX) во входной по переменному току.

На низких частотах, h-параметры являются действительными величинами и представляют собой дифференциальные параметры, которые можно легко определить по статическим характеристикам прибора. Малые переменные составляющие ($\partial U, \partial I$), которыми они определяются, на линейном участке характеристики можно рассматривать как малые приращения ($\Delta U, \Delta I$).

Отметим, что для различных схем включения биполярного транзистора, h-параметры будут различны. Поэтому их принято помечать буквами «э», «б» и «к», соответственно для схем с ОЭ, ОБ и ОК.

Рассмотрим более подробно алгоритм определения h-параметров.

Для того чтобы в рабочей точке* определить параметр h_{11} (входное сопротивление при КЗ выходной цепи) на характеристике, снятой при $U_2=const$, строят характеристический треугольник (рис.3), располагая рабочую точку в середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения напряжения ΔU_1 и тока ΔI_1 . Приращения тока и напряжения дают разности между координатами выбранных точек. Входное сопротивление рассчитывается по формуле (1), приведенной ниже.

Для определения параметра h_{12} (коэффициента обратной связи по напряжению при XX во входной цепи) надо располагать двумя входными характеристиками, снятыми при различных напряжениях U_2 . Через рабочую точку проводят горизонтальную линию ($I_1 = const$). Разность входных

^{*} Рабочая точка — точка на статической характеристике, которая однозначно определяется постоянным напряжением (напряжением смещения) на эмиттерном и коллекторном переходах при отсутствии сигнала.

напряжений в точках пересечения характеристик с этой прямой дает приращение ΔU_1 , а разность напряжений, при которых сняты входные характеристики, дает приращение ΔU_2 (рис. 4). Этот параметр определяется по формуле (2).

Для определения параметра h_{22} (выходной проводимости при XX во входной цепи) на выходной характеристике, снятой при $I_1 = const$, строят характеристический треугольник (рис. 3), располагая рабочую точку на середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения ΔU_2 и ΔI_2 . Выходная проводимость определяется по формуле (3).

Для определения параметра h_{21} (коэффициента передачи по току при КЗ выходной цепи) на выходных характеристиках проводят вертикальную линию $(U_2=const\,)$. Разность значений токов в точках пересечения характеристик и вертикальной линии дает приращение ΔI_2 , а разность значений токов, при которых сняты выходные характеристики, дает приращение ΔI_1 (рис. 4). Коэффициент передачи определяется по формуле (4).

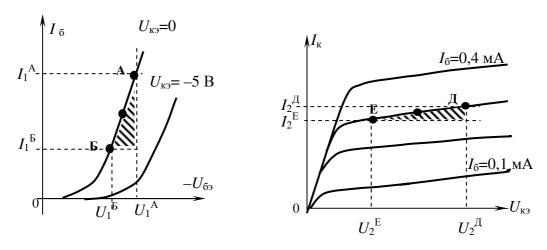


Рис. 3. Входные и выходные характеристики для схемы с ОЭ. Графоаналитический расчет дифференциальных параметров: входного сопротивления (h_{113}) и выходной проводимости (h_{223})

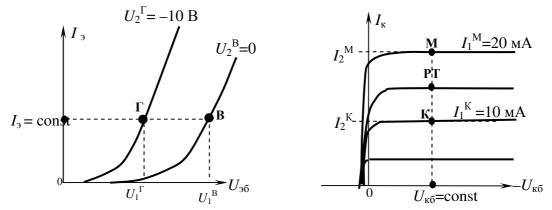


Рис. 4. Входные и выходные характеристики для схемы с ОБ. Графоаналитический расчет дифференциальных параметров: коэффициента обратной связи по напряжению (h_{126}) и коэффициента передачи по току (h_{216})

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \bigg|_{U_2 = const} = \frac{U_1^A - U_1^B}{I_1^A - I_1^B} \bigg|_{U_2 = 0} \tag{1}$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \bigg|_{I_1 = const} = \frac{U_1^B - U_1^\Gamma}{U_2^B - U_2^\Gamma} \bigg|_{I_1 = I_3 = const}$$
 (2)

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \bigg|_{I_1 = const} = \frac{I_2^{\mathcal{I}} - I_2^{\mathcal{E}}}{U_2^{\mathcal{I}} - U_2^{\mathcal{E}}} \bigg|_{I_1 = 0,3 \text{ MA}}$$
(3)

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \bigg|_{U_2 = const} = \frac{I_2^M - I_2^K}{I_1^M - I_1^K} \bigg|_{U_2 = U_{K\bar{0}} = const}$$
(4)

Зная коэффициент прямой передачи по току $h_{21}\{\alpha,\beta,K\}$ для одной из схем включения биполярного транзистора, а также соотношение токов в БПТ $I_9=I_6+I_{\rm K}$ можно определить коэффициент передачи для любой другой схемы включения.

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}; \quad K = \beta + 1.$$
 (5)

Коэффициент усиления по току в схеме с ОБ связан с коэффициентом инжекции и коэффициентом переноса следующим соотношением:

$$\alpha = \gamma \cdot \chi$$
.

С увеличением **температуры** электронам валентной зоны полупроводников сообщается дополнительная энергия и увеличивается количество электронов, которые переходят из валентной зоны в зону проводимости. Кроме того, увеличивается подвижность носителей заряда, что также влияет на характеристики транзистора. Числовые значения всех *h*-параметров как в схеме с ОБ, так и в схеме с ОЭ возрастают, хотя стабильность параметров в схеме с ОБ гораздо выше. В схеме с ОЭ с повышением температуры гораздо больше изменяются токи коллектора, поэтому выходные характеристики перемещаются вверх.

Систему h-параметров обычно используют на низких частотах, когда пренебрежимо малы емкостные составляющие токов. Необходимые для измерения параметров режимы КЗ и XX для переменной составляющей тока могут быть осуществлены на этих частотах сравнительно просто.

Для описания высокочастотных свойтв транзисторов используется система Y-параметров, которые определяются в режиме K3 для переменной составляющей тока на противоположной стороне четырехполюсника: на входе $(U_1=0)$ для Y_{22} и Y_{12} , на выходе $(U_2=0)$ для Y_{11} и Y_{21} . Токи в этой системе считают функциями напряжений: $I_1=f(U_1,U_2)$ и $I_2=f(U_1,U_2)$. Все Y-параметры представляют собой комплексные проводимости, например, входная

проводимость определяется:
$$Y_{11} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\bigg|_{\dot{U}_2=const} = \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1}\bigg|_{\dot{U}_2=const}$$
 и т.д.

Ограниченное применение находит система Z-параметров, которые определяются в режиме XX для переменной составляющей тока на противоположной стороне четырехполюсника: на входе (I_1 =0) для Z_{22} и Z_{12} , на выходе (I_2 =0) для Z_{11} и Z_{21} . В этой системе токи считают независимыми переменными: $U_1 = f(I_1, I_2)$ и $U_2 = f(I_1, I_2)$. Все Z-параметры представляют собой комплексные сопротивления, например, входное сопротивление

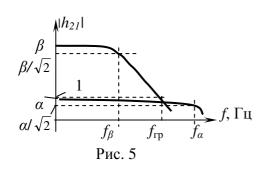
определяется:
$$Z_{11} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\bigg|_{\dot{I}_2=const} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}\bigg|_{\dot{I}_2=const}$$
 и т.д.

Сравнительная характеристика параметров транзистора в различных схемах включения

Схема	ОБ	ОЭ	ОК
K_i	$-(\alpha \leq 1)$	+(β)	+ (\beta + 1)
K_u	+	+	- (<1)
K_p	+	+	+
$Z_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}}$	Низкое ≈ 50 Ом	Промежуточное ≈ 1 кОм	Высокое ≈ 300кОм
$Z_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Высокое ≈ 1МОм	Промежуточное ≈ 50 кОм	Низкое ≈ 300Ом
Ψ*	_	+	_
ψ^* - инверсия фазы между входным и выходным токами			

Работа транзистора на высоких частотах

Качество транзисторов характеризуется их способностью усиливать мощность входных сигналов. На высоких частотах наблюдается уменьшение K_p



- коэффициента усиления по мощности, обусловленное увеличением проводимости цепи внутренней обратной связи. Максимальная частота усиления (частота, на которой коэффициент усиления по мощности равен единице т.е. $K_p = 1$) определяется по формуле:

$$f_{\text{max}} = \sqrt{f_{\text{пр}}/8\pi R_{\text{o}}C_{\text{кo}}},$$

то есть, для определения максимальной частоты усиления необходимо знать **предельную частоту** [частоту, на которой модуль коэффициента передачи по току уменьшается в $\sqrt{2}$ раз (или на 3 дБ)] и величину постоянной времени коллекторной цепи $\tau_{\kappa} = R_{\rm o} C_{\rm ko}$, обычно приводимую в справочных данных. Предельная частота усиления по току в схеме с ОЭ во много раз меньше, чем в схеме с ОБ (рис. 5): $f_{\beta} << f_{\alpha}$. Причем, друг от друга они зависят следующим образом:

$$f_{\beta}=(1-\alpha)f_{\alpha},\ f_{\alpha}=(\beta+1)f_{\beta}.$$

Кроме этого, предельная частота в схеме с ОБ зависит от ширины базы $\boldsymbol{w_6}$:

$$f_{\alpha} = D_n / (\pi \cdot W_0^2),$$

где D_n – коэффициент диффузии электронов. Отсюда следует, что для улучшения частотных свойств необходимо, чтобы база транзистора была узкой.

При увеличении частоты входного сигнала параметры БПТ становятся комплексными величинами, возникает сдвиг фаз между входным и выходным токами, коэффициент передачи по току уменьшается:

$$K_i = K_0 / [1 + j(f/f_{\rm mp})],$$

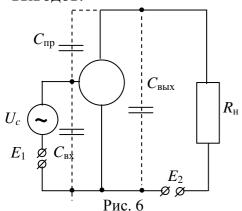
где K_0 -коэффициент передачи по току на низких частотах, j-мнимая единица.

Модуль комплексного коэффициента передачи по току определяется как $|\dot{K}_i| = K_0 / \sqrt{1 + (|f|^2 / f_{\rm np}^2)}$.

Сдвиг фаз (задержка) выходного тока относительно входного равен: φ = -arctg ($f/f_{\rm mp}$).

В схеме с ОЭ транзистор обладает усилительными свойствами вплоть до некоторой частоты, на которой коэффициент усиления по току оказывается равным единице ($\beta = 1$). Эту частоту называют **граничной частотой**.

Ухудшение свойств БПТ на высоких частотах обусловлено, главным образом, временем, которое требуется носителям для их продвижения от эмиттера к коллектору, инерционностью носителей, и, в несколько меньшей мере, шунтирующим действием емкостей p-n-переходов и индуктивностью выводов.



На рис. 6 показаны: $C_{\rm BX}$ — входная емкость, шунтирующая источник сигнала; $C_{\rm Bыx}$ — выходная емкость, шунтирующая нагрузку; $C_{\rm пр}$ — проходная емкость, создающая обратную связь между выходной и входной цепями. С ростом частоты емкостное сопротивление $X_{\rm c}$ =1/ ω C уменьшается, шунтирующее действие $C_{\rm BX}$ и $C_{\rm Bыx}$ усиливается. Обратная связь через проходную емкость $C_{\rm пр}$ может привести к самовозбуждению. Поскольку емкостное сопротивление коллекторного перехода (КП)

много больше емкостного сопротивления эмиттерного перехода (ЭП), то емкость $C_{K\Pi}$ начинает сказываться на более низких частотах, чем емкость $C_{9\Pi}$. Через $C_{K\Pi}$ часть энергии в сыхода попадает обратно на вход, создавая обратную связь. Чем меньше сопротивление этой емкости, тем силнее обратная связь. На высоких частотах коэффициент обратной связи $h_{21} = i\omega \tau_{\kappa}$.

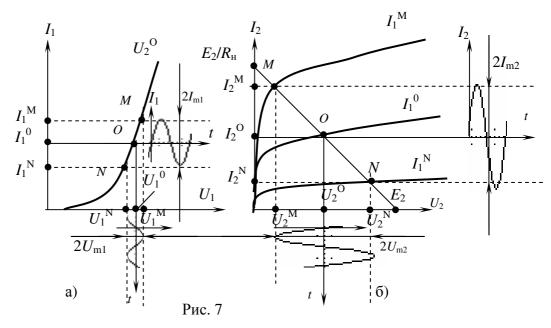
Как видно из рис. 5 схема с ОЭ более чувствительна к повышению частоты, нежели схема с ОБ.

Для уменьшения времени пробега носителей заряда в базе предельно уменьшают толщину базы, изготовливают транзисторы из материалов с большой подвижностью носителей зарядов. Для уменьшения $C_{\rm KII}$ уменьшают площадь КП, увеличивают толщину запирающего слоя.

Работа транзистора с нагрузкой в выходной цепи

При снятии характеристик прибор работает без нагрузки и без источника переменного тока. В реальных условиях во входной цепи есть источник сигнала, а в выходной цепи есть нагрузка (рис.6). Транзистор в этом случае является посредником между источником сигнала и потребителем, обеспечивая необходимую мощность.

Целью графического анализа усилительного режима является наглядное представление процессов в режиме усиления электрических сигналов. Обычно, для расчета задано напряжение источника питания в выходной цепи E_2 , величина сопротивления нагрузки $R_{\rm H}$, параметры рабочей точки (U_1^0 или I_1^0) и амплитуда входного сигнала ($U_{\rm 1m}$, $I_{\rm 1m}$). Сопротивление нагрузки, в общем случае, является комплексным. Рассмотрим случай, когда сопротивление нагрузки чисто активное. При этом справедливо следующее соотношение: $E_2 = U_2 + I_2 R_{\rm H}$. Таким образом, выходной ток линейно зависит от выходного напряжения.



Графически это можно изобразить в виде прямой линии, которая называется нагрузочной прямой. Нагрузочная прямая наносится на семейство выходных характеристик, как показано на рис. 7б. Из рисунка видно, что нагрузочная прямая отсекает на осях отрезки: $U_2=E_2$ при $I_2=0$ и $I_2=E_2/R_{\rm H}$ при $U_2=0$. Рабочая точка находится на пересечении нагрузочной прямой с той характеристикой, которая снята при заданном входном токе $I_1^{\ 0}$. Опустив из рабочей точки перпендикуляры на оси, находим постоянную составляющую выходного тока $I_2^{\ 0}$ и постоянную составляющую выходного напряжения $U_2^{\ 0}$.

По входной характеристике (рис. 7а) находим постоянную составляющую входного тока I_1^0 и входного напряжения U_1^0 .

Полагая входной сигнал синусоидальным, строим временные зависимости токов и напряжений: на входных характеристиках сигнал входного тока с амплитудой $I_{\rm m1}$ и соответствующий ему сигнал входного напряжения с амплитудой $U_{\rm m1}$. Зная пределы изменения входного тока, находим на выходных

характеристиках амплитуды переменных составляющих тока $I_{\rm m2}$ и напряжения $U_{\rm m2}$. Вследствие нелинейных искажений, положительная и отрицательная полуволны токов и напряжений могут быть не одинаковы, поэтому амплитуды находят как средние за период:

$$I_{\text{m2}} = \frac{I_2^M - I_2^N}{2}$$
, $U_{\text{m2}} = \frac{U_2^N - U_2^M}{2}$, $U_{\text{m1}} = \frac{U_1^M - U_1^N}{2}$.

Зная амплитудные значения, можно найти следующие параметры: –коэффициенты усиления по току, по напряжению, по мощности:

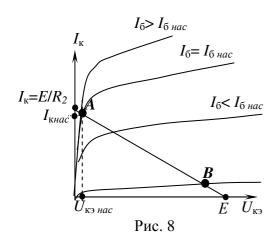
$$K_i = \frac{I_{\text{m2}}}{I_{\text{m1}}}, K_u = \frac{U_{\text{m2}}}{U_{\text{m1}}}, K_p = K_u \cdot K_i;$$

-мощность полезного сигнала на входе P_1 , активную (полезную) мощность на выходе P_2 ; мощность P_0 , потребляемую от источника питания E_2 , мощность, рассеиваемую на выходном электроде прибора P_{20} :

$$P_1 = \frac{I_{\text{m1}}U_{\text{m1}}}{2}, P_2 = \frac{I_{\text{m2}}U_{\text{m2}}}{2} = \frac{I_{\text{m2}}^2R}{2}, P_0 = I_{20} \cdot E_2, P_{20} = I_{20} \cdot U_{20}.$$

Работа транзистора в импульсном режиме

При работе транзистора в импульсных схемах различают режимы малого и большого сигналов. При подаче на базу импульсов малой величины транзистор работает в активном режиме. В этом случае происходит усиление сигналов и соблюдается линейная зависимость между напряжениями



выходного и входного сигналов. Такой режим характерен, например, для усиления телевизионных сигналов. транзистора в режиме больших импульсных сигналов (ключевой режим) характерна для цифровых интегральных схем. случае, он может находиться либо закрытом состоянии (в режиме отсечки), либо в открытом (в режиме насыщения). Качество работы электронного оценивается скоростью переключения, т.е. временем перехода из одного состояния в другое.

Время включения транзистора состоит из времени задержки, требующегося на заряд барьерных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов, а также времени нарастания тока, в течение которого происходит накопление избыточных зарядов: $t_{вкл} = t_{3д} + t_{hp}$.

Время выключения зависит от времени рассасывания избыточного заряда и времени спада импульса: $t_{\text{выкл}} = t_{\text{pac}} + t_{\text{cn}}$.

Из рис. 8 видно, что если $I_6 < I_{\text{бнас}}$, то точка пересечения нагрузочной линии с выходной характеристикой располагается правее и режим глубокого насыщения не наступает. Если же $I_6 > I_{\text{бнас}}$, то после наступления глубокого насыщения положение точки A не изменяется и дальнейший рост тока коллектора прекращается, а база продолжает заполняться электронами.

Одним из параметров импульсного режима является коэффициент насыщения $K_{\rm \, hac} = I_{\rm \, 0}/I_{\rm \, 6 hac}$.

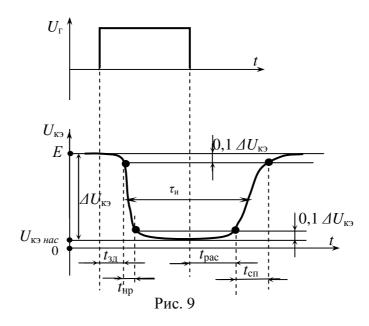
Другими параметрами транзистора в импульсном режиме (рис.9) являются:

 $\tau_{\text{и}}$ - длительность импульса (по уровню 0,5 $\cdot \Delta U_{\text{кэ}}$);

 $t_{\rm 3J}$ — время задержки выходного импульса (от переднего фронта входного импульса до уровня $0,1\cdot\Delta U_{\rm K3}$);

 $t_{\rm hp}$ – время нарастания переднего фронта (от уровня $0,1\cdot\varDelta U_{\rm K3}$ до $0,9\cdot\varDelta U_{\rm K3}$); $t_{\rm pac}$ – время рассасывания заряда (от заднего фронта до момента $0,9\cdot\varDelta U_{\rm K3}$); $t_{\rm cn}$ – время спада выходного импульса (от $0,9\cdot\varDelta U_{\rm K3}$ до до уровня $0,1\cdot\varDelta U_{\rm K3}$); $U_{\rm K3}$ нас – напряжение насыщения;

 $\Delta U_{\mbox{\tiny K9}}$ – амплитуда импульса коллекторного напряжения.



МИНИ-ТЕСТ

1. Транзистором биполярным называется

- 1) полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p-nпереходами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями
 инжекции и экстракции неосновных носителей заряда;
- 2) трехслойный полупроводниковый прибор с двумя выводами;
- 3) структура *p-n-p-n*;
- 4) структура *n-p-n-p*.

2. Режим работы биполярного транзистора "насыщение"

- 1) режим, когда оба перехода закрыты;
- 2) режим, когда оба перехода открыты;
- 3) переход коллектор-база закрыт, переход эмиттер-база открыт.

3. Режим «отсечки» биполярного транзистора

- 1) режим, когда оба перехода закрыты;
- 2) режим, когда оба перехода открыты;
- 3) переход эмиттерный закрыт, а коллекторный открыт.

4. Активный режим работы биполярного транзистора – это

- 1) режим, при котором закрыты оба перехода;
- 2) режим, при котором открыты оба перехода;
- 3) переход эмиттер-база открыт, а переход коллектор-база закрыт.

5. Толщина базы биполярного транзистора w_6

1)
$$w_6 \ll L_D$$
; 2) $w_6 > L_D$; 3) $w_6 = L_D$; 4) $w_6 >> L_D$.

6. Инжекция носителей в биполярном транзисторе типа *p-n-p*, это

- 1) перемещение дырок из эмиттера в базу;
- 2) перемещение дырок из базы в эмиттер;
- 3) перемещение дырок из базы в коллектор.

7. Экстракция дырок в биполярном транзисторе типа р-п-р, это

- 1) перемещение дырок из базы в эмиттер;
- 2) перемещение дырок из базы в коллектор;
- 3) перемещение дырок из коллектора в базу.

8. При отсутствии инжекции $I_9 = 0$, в цепи коллектора ток равен

1)
$$I_K = 0$$
; 2) $I_K = I_{KE0}$; 3) $I_K = I_E$.

9. Наименьшее входное сопротивление имеет схема включения биполярного транзистора

- 1) с общим эмиттером;
- 2) с общей базой;
- 3) с общим коллектором.

10. Токи в цепях биполярного транзистора связаны между собой

1)
$$I_{\mathfrak{I}} = I_K - I_B$$
; 2) $I_{\mathfrak{I}} = I_K + I_B$; 3) $I_{\mathfrak{I}} = I_B - I_K$.

11. Модуляция толщины базы биполярного транзистора – это

- 1) изменение толщины базы при изменении напряжения на коллекторе;
- 2) изменение толщины базы при изменении напряжения на эмиттере;
- 3) изменение толщины эмиттера при изменении коллекторного напряжения;
- 4) изменение толщины коллектора при изменении напряжения на эмиттере.

12. На переходе эмиттер-база определяющую роль играет емкость

- 1) диффузионная;
- 2) дрейфовая;
- 3) диффузионная и дрейфовая.

13. На переходе коллектор-база определяющую роль играет емкость

- 1) диффузионная;
- 2) дрейфовая;
- 3) обе емкости.

14. Коэффициент передачи тока эмиттера в схеме ОБ

1)
$$\alpha = \frac{I_{\Im}}{I_K}$$
; 2) $\alpha = \frac{I_K}{I_{\Im}}$; 3) $\alpha = \frac{I_K}{I_B}$; 4) $\alpha = \frac{I_{\Im}}{I_B}$.

15. Коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с ОБ

1)
$$\alpha = 1$$
; 2) $\alpha > 1$; 3) $\alpha < 1$.

16. Коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ

1)
$$\beta = 1$$
; 2) $\beta < 1$; 3) $\beta >> 1$; 4) $\beta << 1$.

17. Коэффициенты α и β у биполярного транзистора связаны между собой соотношением

1)
$$\alpha = \beta$$
; 2) $\alpha = \frac{\beta}{1-\beta}$; 3) $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$.

18. Для определения параметров биполярного транзистора наиболее применима система

- 1) У-параметров;
- 2) Z-параметров;
- 3) *H*–параметров;
- 4) все три системы.

19. Н-параметры биполярного транзистора имеют недостатки

- 1) H-параметры зависят от схемы включения биполярного транзистора;
- 2) *H*-параметры имеют малые значения;
- 3) Н-параметры имеют большие значения;
- 4) измерение H-параметров затруднительно.

20. Коэффициент обратной связи по напряжению μ характеризует

- 1) влияние напряжения коллектора на эмиттерный переход в связи с модуляцией толщины базы;
 - 2) влияние напряжения эмиттерного перехода на коллекторный переход;
 - 3) влияние напряжения коллектора на ток эмиттера;
 - 4) влияние напряжения эмиттера на ток коллектора.

21. Квазистатический режим работы биполярного транзистора – это

- 1) режим работы биполярного транзистора с нагрузкой;
- 2) режим работы биполярного транзистора с нагрузкой и в таком диапазоне частот, где не сказывается влияние реактивных элементов биполярного транзистора;
- 3) режим работы биполярного транзистора без нагрузки.

22. Основное уравнение квазистатического режима работы биполярного транзистора

$$1)E_K = U_K + I_K R_H; 2)U_K = E_K + I_K R_H; 3)I_K = \frac{E_K}{R_H}; 4)U_K = E_K.$$

23. Длительность переднего фронта импульса при работе биполярного транзистора в импульсном режиме определяется

- 1) временем пролета носителей через базу, накопления заряда в базе;
- 2) емкостью коллекторного перехода;
- 3) падением напряжения на сопротивлении базы.

24. Длительность заднего фронта импульса при работе биполярного транзистора в импульсном режиме определяется

- 1) временем рассасывания избыточного заряда в области базы;
- 2) временем перезаряда емкости эмиттерного перехода;
- 3) временем перезаряда емкости коллекторного перехода.

25. На ухудшение усилительных свойств биполярного транзистора на высоких частотах оказывают влияние

- 1) емкость эмиттерного перехода;
- 2) емкость коллекторного перехода;
- 3) емкость коллекторного перехода и инерционность перемещения носителей через область базы.

26. На усилительные свойства биполярного транзистора сильнее влияет емкость

- 1) эмиттерного перехода;
- 2) коллекторного перехода;
- 3) оба перехода влияют одинаково.

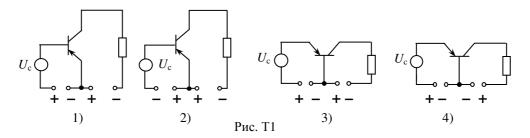
27. Лучшими частотными свойствами обладает схема

- 1) с общей базой;
- 2) с общим эмиттером;
- 3) частотные свойства не зависят от схемы включения биполярного транзистора.
- 28. При включении биполярного транзистора по схеме с общей базой коэффициент усиления по току равен 0,95. Чему равен коэффициент усиления по току биполярного транзистора, если его включить по схеме с общим эмиттером.
 - 1) 0,95.
 - 2) 0,05.
 - 3) 19.
 - 4) 20.

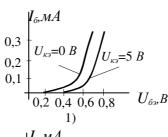
29. При какой схеме включения транзистора коэффициент усиления по мощности меньше или равен единице?

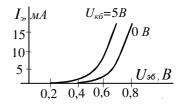
- 1) С общей базой.
- 2) С общим эмиттером.
- 3) С общим коллектором.
- 4) Во всех указанных случаях он больше единицы.

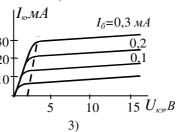
30. Укажите на рисунке Т1 схему включения биполярного транзистора с общей базой в активном режиме.



- 31. На рис. Т1 укажите схему с общим эмиттером в режиме отсечки.
- 32. На рис. Т1 укажите схему с общим эмиттером в активном режиме.
- 33. На рис.Т1 укажите схему с общей базой в режиме насыщения.
- **34.** Укажите на рисунке **T2** выходные характеристики биполярного транзистора 0,3 для схемы с общим эмит- 0,2 тером.
- 35. На рисунке T2 укажите входные характеристики для схемы с общей базой.
- 36. На рисунке Т2 укажите выходные характеристики для схемы с общей базой.
- 37. На рисунке Т2 укажите входные характеристики для схемы с общим эмиттером.







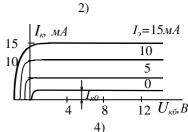


Рис. Т2

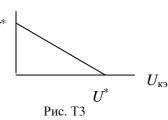
38. Укажите выражение для параметра h_{21} .

1)
$$\frac{U_{m69}}{I_{m6}}\Big|_{U_{mK9}=0}$$
; 2) $\frac{\Delta U_{69}}{\Delta U_{K9}}\Big|_{I_{6=const}}$; 3) $\frac{I_{mK}}{I_{m6}}\Big|_{U_{mK9}=0}$; 4) $\frac{I_{mK}}{U_{mK9}}\Big|_{I_{m6}=0}$.

- 39. В формулах задания 38 укажите выражение для параметра h_{22} .
- 40. В формулах задания 38 укажите выражение для параметра h_{12} .
- 41. В формулах задания 2.9 укажите выражение для параметра h_{11} .

42. В транзисторе коэффициент передачи тока базы β =110. Чему равен коэффициент передачи тока эмиттера?

- 1) 0,975;2) 0,99;3) 0,96; 4) 1.
- 43. Транзистор включен по схеме с ОЭ. Напряжение питания в цепи коллектора E=10 В, сопротивление нагрузки R=200 Ом. Чему равна величина I^* ?



- 44. Из данных задачи 43 определите величину U^* .
- 45. В биполярном транзисторе ток эмиттера 100 мА, ток базы 2 мА. Чему равен ток коллектора?
 - 1) 200 mA, 2) 50 mA, 3) 98 mA, 4) 102 mA.

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Общие сведения о полевых транзисторах

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем. ПТ имеют очень большое входное сопротивление, т.е. входной ток у них практически отсутствует. Электроды полевого транзистора называются: исток, сток, затвор. Сток, исток и соединяющий их канал — это области полупроводника одного типа проводимости. Сток и исток обычно являются сильнолегированными областями, канал — слаболегированным тонким слоем, расположенным вблизи поверхности полупроводника. Проводящий канал может иметь электропроводность как n—, так и p—типа.

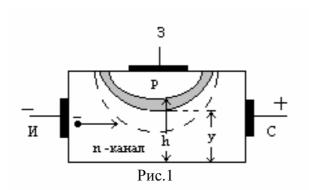
Выделяют два основных типа полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляющим переходом (в качестве перехода может быть p-n-переход, гетеропереход или переход Шоттки);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (со встроенным или индуцированным каналом). У них затвор выполнен в виде металлической пленки, изолирован от канала тонким слоем диэлектрика (SiO₂), поэтому их называют МДП-транзисторами («МДП» расшифровывается металл-диэлектрикполупроводник).

Общий принцип работы всех полевых транзисторов сводится к тому, что изменение напряжения между затвором и истоком приводит к изменению сопротивления канала. В результате ток в цепи стока управляется не входным током (как в биполярных транзисторах), а входным напряжением (электрическим полем).

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом

Рассмотрим устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа (рис.1).



В центральной части канала создается p-n-переход. От истока, стока и затвора сделаны омические (невыпрямляющие) контакты с выводами.

В канале n—типа основные носители — электроны. Чтобы электроны двигались в канале от истока к стоку, на сток подается положительный потенциал относительно истока. Тогда в цепи стока возникает ток стока I_c . Чтобы входное сопротивление было большим,

на управляющий p–n–переход между затвором и истоком всегда подается обратное напряжение, т.е. U_{3u} <0. Принцип работы сводится к тому, что при увеличении обратного напряжения затвора толщина запирающего слоя p–n–перехода Δ растет, ширина канала y уменьшается, соответственно увеличивается сопротивление канала R_{κ} и уменьшается ток стока.

Таким образом, меняя напряжение $U_{3\mu}$, можно управлять током стока $I_{\rm c.}$ Напомним, что ток затвора практически отсутствует (он равен обратному току запертого p-n-перехода). Из рис.1 видно, что y=h- Δ . Ширина p-n-перехода равна:

$$\Delta = a \sqrt{arphi_{\scriptscriptstyle K} + U_{\scriptscriptstyle 3M}}$$
 , где $a = \sqrt{\frac{2 arepsilon arepsilon_0 (N_{\scriptscriptstyle \partial} + N_{\scriptscriptstyle a})}{q N_{\scriptscriptstyle \partial} N_{\scriptscriptstyle a}}}$.

При некотором напряжении $U_{3u} = U_{\text{пор}}$ (пороговое напряжение, иногда его называют напряжением отсечки или напряжением запирания) канал перекрывается, т.е. y = 0. Тогда:

$$\Delta_{\max} = h = a \sqrt{\varphi_{\kappa} + U_{\text{nop}}} \approx a \sqrt{U_{\text{nop}}}.$$

Отсюда следует, что ширина канала равна:

$$y = h \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_{\kappa} + U_{3H}}{U_{\text{nop}}}} \right). \tag{1}$$

Максимальная ширина канала будет при U_{3u} =0:

$$y_0 = h \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_{\kappa}}{U_{\text{nop}}}} \right). \tag{2}$$

Сопротивление канала при этом минимальное, равное $R_{\text{ко.}}$ При подаче напряжения на затвор сопротивление канала увеличивается:

$$R_{\kappa} = \frac{R_{\kappa o}}{1 - \sqrt{\frac{U_{3H}}{U_{\text{пор}}}}}.$$
(3)

Во всех предыдущих рассуждениях мы полагали, что напряжение на управляющем p-n-переходе везде одинаково и равно U_{3u} . На самом деле, при протекании тока в канале будет падение напряжения, которое суммируется с напряжением U_{3u} , и эта сумма определяет ширину p-n-перехода. В результате канал заострен в сторону стока. Со стороны стока ширина канала:

$$y_c = h \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_{\kappa} + U_{3H} + U_{CH}}{U_{\text{nop}}}} \right). \tag{4}$$

Напряжение $U_{\text{си}}$, при котором канал со стороны стока перекрывается, называется напряжением насыщения:

$$U_{\text{Hac}} = U_{\text{пор}} - U_{\text{3H}} - \varphi_{\kappa}. \tag{5}$$

Следует отметить, что технология изготовления полевого транзистора предусматривает расположение электродов с одной стороны подложки, поэтому на практике структура рассмотренного транзистора имеет вид, показанный на рис.2. Нижняя p-область — это подложка. Косой штриховкой показаны p-n-переходы. Для полевых транзисторов используют два вида статических характеристик: **стокозатворные** (характеристики прямой передачи для схемы с об-

щим истоком) $I_c = f(U_{\rm 3H})\big|_{U_{\rm CH}=const}$ и **стоковые** (выходные для схемы с общим истоком) $I_c = f(U_{\rm CH})\big|_{U_{\rm 2H}=const}$

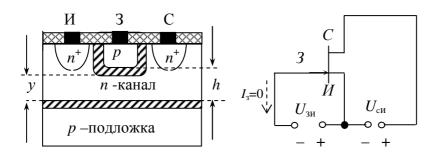


Рис. 2.

Стокозатворные характеристики аппроксимируют выражением:

$$I_{\rm c} = I_{\rm cmax} (1 - U_{\rm 3H} / U_{\rm orc})^2$$
 (6)

Стоко–затворные и стоковые характеристики полевого транзистора с управляющим p–n–переходом с n-каналом показаны на рис. 3. Начальный (крутой) участок стоковых характеристик при $U_{\rm cu} < U_{\rm наc}$, позволяет использовать полевой транзистор как переменный резистор, сопротивление которого регулируется напряжением затвора. Для работы в усилительном и ключевом режиме используется пологий участок при $U_{\rm cu} > U_{\rm нac}$ (правее штриховой линии на рис.3).

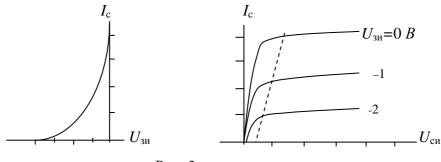


Рис. 3.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом и каналом p-типа имеет затвор n-типа. Основные носители в канале — дырки, соответственно меняется полярность всех напряжений. Структура и схема включения такого транзистора показаны на рис. 4, а характеристики на рис. 5.

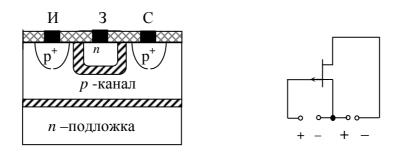
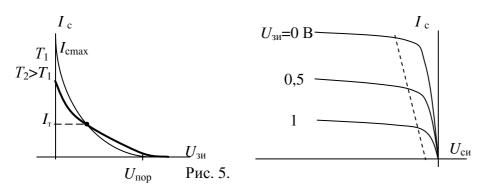
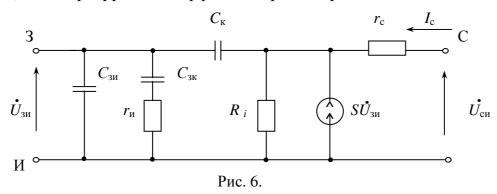


Рис. 4.



Зависимость характеристик **от температуры** у полевых транзисторов меньше, чем у биполярных, причем существует термостабильная точка на стокозатворной характеристике. Ток стока в этой точке $I_{\scriptscriptstyle T}$ не зависит от температуры (рис. 5)—температурный коэффициент равен нулю.



Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рис. 6. В этой эквивалентной схеме учтены емкости затвор—исток, затвор—сток, затвор—канал; сопротивления областей стока $r_{\rm c}$ и истока $r_{\rm u}$. Управляемый генератор тока $SU_{\rm 3u}$ учитывает влияние напряжения затвора на ток стока. Параметры — крутизна S, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ — применительно к полевому транзистору можно записать так:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{3u}} \bigg|_{U_{cu} = const},\tag{7}$$

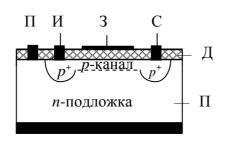
$$R_i = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_c} \bigg|_{U_{3u} = const}, \tag{8}$$

$$\mu = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta U_{3u}} \bigg|_{I_c = const},\tag{9}$$

$$\mu = SR_i. \tag{10}$$

МДП - транзистор с индуцированным каналом

МДП-транзистор имеет структуру металл-диэлектрик-полупроводник. Главная его особенность: металлический затвор отделен от полупроводникового канала диэлектриком (обычно двуокись кремния). Таким образом, затвор и входная цепь полностью изолированы от выходной цепи. Структура и схема включения МДП-транзистора с индуцированным p-каналом показаны на рис. 7.



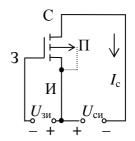


Рис. 7.

На подложке n-типа созданы две области p^+ с высокой концентрацией дырок — это сток и исток, от них сделаны металлические невыпрямляющие контакты-выводы. Затвор — металлическая пленка, изолированная от остальной структуры диэлектриком. Если $U_{\rm 3u}$ =0, между стоком и истоком канала нет. При подаче на затвор отрицательного напряжения $U_{\rm 3u}$ <0 неосновные носители подложки — дырки подтягиваются электрическим полем вверх. Концентрация дырок в тонком слое под диэлектриком сильно увеличивается, т.е. между стоком и истоком создается (индуцируется) проводящий p-канал. Для этого нужно, чтобы напряжение затвора (отрицательное) было по абсолютной величине больше некоторой величины, называемой пороговым напряжением $U_{\rm пор}$. Характеристики МДП-транзистора показаны на рис.8.

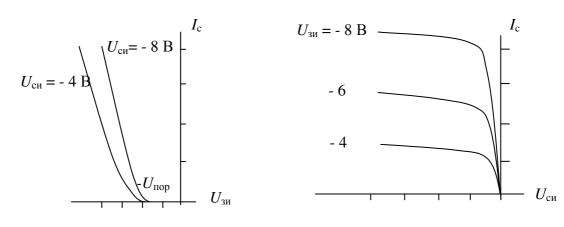
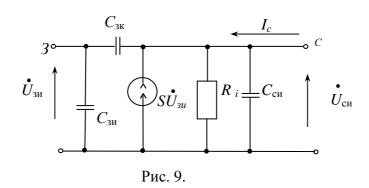


Рис. 8.

Напряжение насыщения $U_{\text{нас}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}$. На пологом участке ток стока равен $I_{\text{с}} = \beta (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})^2$. Здесь β – конструкционный параметр транзистора.

Эквивалентная схема МДП-транзистора может быть представлена в виде рис. 9. Она учитывает влияние входной емкости затвор-исток, проходной емкости затвор-сток и выходной емкости сток-подложка, которые ограничивают



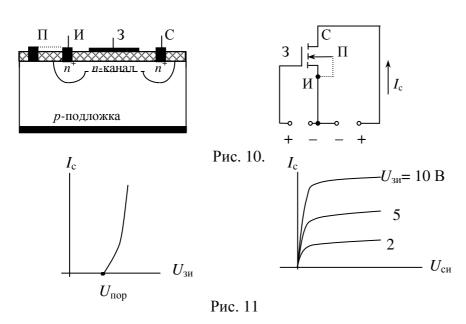
5

частотный диапазон. Схема на рис. 9 предполагает, что подложка соединяется с выводом истока. Частотные свойства МДП-транзистора оценивают параметром f_s или $f_{\rm rp}$. Предельная частота крутизны f_s — это частота, на которой крутизна уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Граничная частота $f_{\rm rp}$ — это частота, на которой модуль коэффициента усиления по напряжению становится равным единице.

$$f_{\rm rp} \approx f_{\rm s} \cdot C_{\rm 3K} / C_{\rm BMX} = S/(2\pi C_{\rm BMX})$$

МДП-транзистор с индуцированным n-каналом показан на рис.10. Он имеет подложку p-типа. Основные носители подложки — дырки. При подаче на затвор положительного напряжения $U_{3u} > 0$ между стоком и истоком индуцируется n-канал (электроны из подложки подтягиваются вверх).

Характеристики МДП-транзистора с индуцированным n-каналом показаны на рис.11.



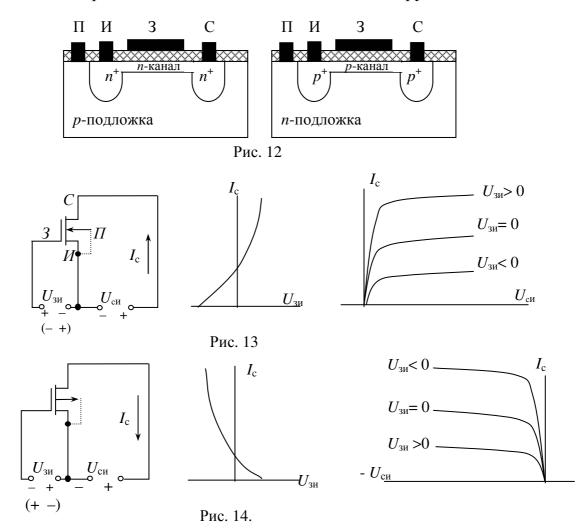
МДП-транзистор со встроенным каналом

МДП-транзистор со встроенным каналом отличается тем, что канал изготавливается технологически, т.е. введением примеси в процессе изготовления транзистора (рис. 12). Таким образом, при нулевом напряжении затвора канал существует и транзистор может работать в двух режимах: обеднения и обогащения. Если это n-канал, то при положительном напряжении затвора канал обогащается носителями (электронами), и ток стока растет. При U_{3u} <0 поле отталкивает электроны из канала в подложку. Канал обедняется носителями, сопротивление канала растет, ток стока уменьшается.

Схема включения МДП-транзистора **со встроенным каналом** *n*-типа и его характеристики показаны на рис. 13.

МДП транзистор **со встроенным** *p*-каналом работает при отрицательном напряжении стока. Носителями в канале являются «дырки». При положительном напряжении затвора канал обедняется носителями, при $U_{\rm 3u}$ <0 канал обогащается. Схема включения и характеристики показаны на рис. 14.

Схемы включения всех полевых транзисторов показаны в этом разделе в статическом режиме, без источника сигнала и без нагрузки с общим истоком.



В таблице 1 показана полярность напряжений для разных типов полевых транзисторов.

Полевой транзистор может быть включен также по схеме с общим затвором и общим стоком (табл.1).

Таблица 1

Тип транзистора	Канал	Подложка	$U_{\scriptscriptstyle 3 extsf{H}}$	$U_{ m cu}$	$U_{\scriptscriptstyle \Pi extsf{ iny IM}}$	$U_{ m orc} \ U_{ m nop}$
с <i>p-n-</i> переходом	p	n	>0	<0	≥0	>0
	n	p	<0	>0	≤0	<0
МДП с индуцированным каналом	p	n	<0	<0	≥0	<0
	n	p	>0	>0	≤0	>0
МДП со встроенным каналом	p	n	>0 и <0	<0	≥0	>0
	n	p	>0 и <0	>0	≤0	<0

МИНИ-ТЕСТ

1. Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор

- 1) усилительные свойства которого обусловлены потоком неосновных носителей, инжектированных в область базы;
- 2) усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем;
- 3) используемый для выпрямления тока.

2. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом состоит из областей

- 1) сток, затвор, исток, канал;
- 2) эмиттер, база, коллектор;
- 3) сток, база, исток, затвор.

3. На затвор полевого транзистора с управляющим p-n-переходом подается напряжение

- 1) открывающее p-n-переход между затвором и каналом;
- 2) запирающее p-n-переход между затвором и каналом;
- 3) двух знаков отпирающее или запирающее.

4. Ток в цепи стока полевого транзистора с управляющим p-n-переходом определяется

- 1) напряжением на затворе;
- 2) напряжением на стоке;
- 3) напряжением на стоке и затворе.

5. Напряжение отсечки $U_{\it 3M\,\rm orc}$ полевого транзистора с управляющим $\it p-n-$ переходом – это напряжение при котором

1)
$$I_{C \text{ otc}} = 0$$
;

2)
$$I_{\text{C orc}} = \frac{1}{2} I_{C};$$

$$3)I_{\text{Corc}} = \frac{I_C}{\sqrt{2}}.$$

6. Уменьшить ток стока до нуля в полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом возможно

- 1) с помощью напряжения $U_{\it CU}$;
- 2) с помощью напряжения U_{3H} ;
- 3) с помощью напряжений $U_{\it 3H}$ и $U_{\it CH}$.

7. Канал полевого транзистора с управляющим p-n-переходом имеет наибольшую ширину

1) при
$$U_{3U} = 0$$
;

2) при
$$U_{3H} = \frac{1}{2} U_{3H \text{ orc}};$$

3) при
$$U_{3U} = U_{3U \text{ отс}}$$
.

8. Для полевого т	оанзистора с управляющим <i>p–n–</i> переходом	рассматри-
ваются семейства	карактеристик	

- 1) $I_C = f_1(U_{3H}), I_C = f_2(U_{CH});$
- 2) $I_3 = f_1(U_{CM}), I_C = f_2(U_{3M});$
- 3) $I_C = f_1(U_{3C}), I_3 = f_2(U_{3C}).$

9. По каналу полевого транзистора протекает ток

- 1) ток основных носителей;
- 2) ток неосновных носителей;
- 3) ток основных и неосновных носителей.

10. Усилительные свойства полевых транзисторов с управляющим p-n- переходом определяются параметрами

- 1) α , β , R_{ex} ;
- 2) S, R_i, μ ;
- $3)\alpha$, S, μ ;
- $4)\beta$, R_{ex} , μ .

11. На затвор МДП-транзистора со встроенным n-каналом подается напряжение

- 1) $U_{3H} > 0$;
- 2) $U_{3u} < 0$;
- 3) $U_{3H} > 0$ или $U_{3H} < 0$.

12. Режим работы МДП-транзисторов со встроенным \emph{p} —каналом при $U_{\it 3H}>0\,$ называется

- 1) режим обогащения;
- 2) режим обеднения;
- 3) активный режим.

13.Режим работы МДП-транзисторов со встроенным $\emph{n}-$ каналом при $U_{\it 3H}>0$ называется

- 1) режим обогащения;
- 2) режим обеднения;
- 3) активный режим.

14. Напряжение, при котором возникает индуцированный канал в подложке *p*-типа или *n*-типа называется

- 1) напряжением отсечки;
- 2) пороговым напряжением;
- 3) напряжением смещения.

18. Укажите условное обозначение МДП-транзистора с индуцированным p-каналом.

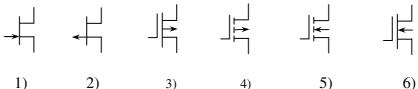
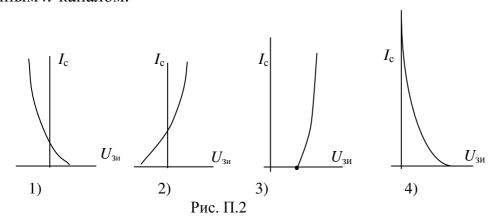
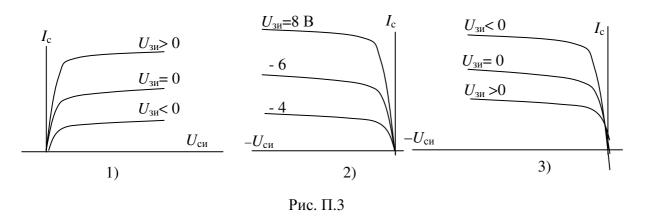


Рис. П.1

- 19. На рисунке Π .1 укажите условное обозначение МДП-транзистора со встроенным p-каналом.
- 20. На рисунке П.1 укажите условное обозначение полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и n-каналом .
- 21. Укажите стокозатворную характеристику МДП–транзистора с индуцированным n-каналом.



- 22. На рисунке Π .2 укажите характеристику полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и p-каналом.
- 23. На рисунке Π .2 укажите характеристику полевого транзистора со встроенным n-каналом.
- 24. Укажите выходную характеристику МДП–транзистора со встроенным n-каналом.



25.Укажите на рис. П.3 выходную характеристику МДП–транзистора с индуцированным p-каналом.

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Основные недостатки аппаратуры, выполненной на дискретных элементах:

- низкая надежность, обусловленная множеством паяных соединений;
- большие габариты и вес аппаратуры;
- слабые возможности автоматизации производства РЭА;
- трудность получения одинаковых параметров электронных приборов.

Стремление избавиться от этих недостатков привело к появлению и развитию микроэлектроники.

Микроэлектроника – это область электроники, которая занимается разработкой и применением интегральных схем (ИС) и аппаратуры на основе ИС.

Интегральная схема — это конструктивно законченное изделие, выполняющее определенную функцию (усиление, генерацию, логическую операцию и др.). ИС отличается большой плотностью упаковки элементов в единице объема. При изготовлении ИС используется групповой метод производства, при котором на одной подложке одновременно изготавливается множество однотипных элементов или целых микросхем, что позволяет получить изделия с одинаковыми параметрами.

Интегральные схемы классифицируются:

- по конструктивно-технологическому исполнению на монолитные (на полевых, КМОП, биполярных транзисторах), гибридные (толстопленочные и тонкопленочные) и прочие (керамические, пленочные и др.);
- по степени интеграции K МИС (малые), СИС (средние), БИС (большие), СБИС (сверхбольшие), УБИС (ультрабольшие)

$$K = \lg N$$
,

где N — число элементов в микросхеме;

сложность микросхемы характеризуется также *плотностью упаковки*, т.е. числом элементов в единице объема или на единице площади кристалла;

- по функциональному назначению на аналоговые (усилители, детекторы, генераторы, фильтры, модуляторы и пр.), цифровые (логические, запоминающие устройства, триггеры, регистры и пр.), вычислительные устройства (микропроцессорные комплекты, устройства обработки), источники вторичного питания (преобразователи, выпрямители, стабилизаторы и пр.), многофункциональные устройства (матрицы, коммутаторы, наборы элементов и пр.), фоточувствительные ПЗС–устройства (матричные, линейные и пр.), базовые матричные кристаллы;
- по применяемости в аппаратуре на ИС общего применения и специального назначения;
- по конструктивному исполнению на корпусные и бескорпусные;
- по способу изоляции между элементами на схемы с диэлектрической изоляцией, изоляцией p-n-переходом, комбинированной, МДП-технологией и др.

СИСТЕМА ЦИФРОБУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ИС

К

$$\frac{1}{1}$$
 $\frac{55}{3}$
 $\frac{1}{5}$
 $\frac{1}{6}$
 $\frac{1}{1}$
 $\frac{1}{2}$
 $\frac{1}{3}$
 $\frac{118}{4}$
 $\frac{118}{5}$
 $\frac{118}{6}$

 Рис. 1

Маркировка ИС состоит из шести элементов, например, как показано на рис. 1

Первый элемент (буква «К») – показывает, что микросхема предназначена для устройств широкого применения (ИС специального назначения этой буквой не маркируются). Микросхемы, предназначенные для экспорта, перед буквой «К» имеют букву «Э».

- 2) Второй элемент это характеристика материала и типа корпуса:
- А пластмассовый планарный корпус;
- E металлополимерный корпус с параллельным двухрядным расположением выводов;
 - И стеклокерамический планарный корпус;
- M металлокерамический, керамический или стеклокерамический корпус с параллельным двухрядным расположением выводов;
 - Н кристаллоноситель (безвыводной);
- P пластмассовый корпус с параллельным двухрядным расположением выводов;
 - С стеклокерамический корпус с двухрядным расположением выводов;
 - Φ микрокорпус.

Бескорпусные ИС характеризуются буквой Б (перед номером серии), а в конце условного обозначения через дефис вводится цифра, характеризующая модификацию конструктивного исполнения: 1 — с гибкими выводами; 2 — с ленточными выводами, в том числе на полиамидной пленке; 3 — с жесткими выводами; 4 — неразделенные на общей пластине; 5 — разделенные без потери ориентировки; 6 — с контактными площадками без выводов (кристалл).

- 3) **Третий элемент** (одна цифра) указывает группу ИС по конструктивно- технологическому признаку:
 - 1, 5, 7 полупроводниковые;
 - 2, 4, 6, 8 гибридные;
 - 3 прочие (пленочные, керамические, вакуумные).
- 4) **Четвертый элемент** (две или три цифры) определяет порядковый номер разработки серии.
- 5) **Пятый элемент** (две буквы) обозначают функциональное назначение микросхемы. В зависимости от выполняемых функций микросхемы подразделяются на подгруппы (генераторы, триггеры, усилители и пр.) и виды. Классификация некоторых микросхем по функциональному назначению приведена в табл. 1.

6) **Шестой элемент** – порядковый номер разработки в конкретной серии. Следующие затем буквы от А до Я указывают на разбраковку (допуск на разброс) по электрическим параметрам.

Таблица 1. Буквенные обозначения функциональных подгрупп микросхем

Обозн.	Наименование	Обозн.	Наименование
	Генераторы		Триггеры
ΓΓ	прямоугольных сигналов	TB	JK – триггер
ГС	синусоидальных сигналов	ΤЛ	триггер Шмитта
ГМ	шума	TM	D- триггер
		TT	Т- триггер
	Логические элементы		Фильтры
ЛА	И-НЕ	ΦВ	верхних частот
ЛЛ	ИЛИ-НЕ	ΦЕ	полосовые
ЛН	HE	ΦН	нижних частот
ЛБ	и-не/или-не	ФР	режекторные
	Преобразователи		Усилители
ПА	цифро-аналоговые	УД	операционные
ПМ	мощности	УЕ	повторители
ПН	напряжения	УИ	импульсные
ПС	частоты	УН	низкой частоты
ПУ	уровня	УС	дифференциальные
ПФ	фазы	УВ	высокой частоты
	Вторичные ист. питания		Элементы АЛУ
EB	выпрямители	ИР	регистры
EM	преобразователи	ИМ	сумматоры
EH	стабилизаторы U	ИЕ	счетчики
ET	стабилизаторы I	ИД	дешифраторы

За рубежом существуют различные системы кодирования ИС, действующие как в международном масштабе, так и внутри отдельных стран или фирм.

В европейских странах система кодирования ИС аналогична системе, принятой для кодирования дискретных полупроводниковых приборов, и используется фирмами различных стран (Англии, Бельгии, Италии, Испании, Нидерландов, Швеции, Франции, ФРГ и др.). Основные принципы кодирования системы, по которой обозначения присваиваются международной организацией Association International Pro Electron, приводятся ниже. Код состоит из трех

Рис.2

букв, за которыми следует серийный номер, например:

1) **Первая буква** для одиночных схем отражает принцип преобразования сигнала в схеме:

S – цифровое;

Т – аналоговое;

V – смешанное (аналого-цифровое).

2) **Вторая буква** не имеет специального значения (выбирается фирмой-изготовителем), за исключением буквы H, которой обозначаются гибридные схемы. Для серий (семейств) цифровых схем первые две буквы (FA, FB, FC, FD, FE, FF, FJ, FI, FL, FQ, FT, FY, FZ, GA, GB, GD, GF, GM, GT, GX, GY, GZ, HB, HC) отражают схемотехнологические особенности, например:

FY – ЭСЛ-серия;

FD, GD – МОП-схемы;

FQ – ДТЛ-схемы;

GA – маломощные ТТЛ-схемы;

FL, GF – стандартные ТТЛ-схемы;

GJ – быстродействующие ТТЛ-схемы;

GM – маломощные с диодами Шоттки ТТЛ-схемы;

НВ – комплиментарные МОП-схемы серии 4000 А;

НС – комплиментарные МОП-схемы серии 4500 В.

3) **Третья буква** обозначает диапазон рабочих температур или, как исключение, другую важную характеристику:

А – температурный диапазон не нормирован

B -от 0 до +70 °C; E -от -25 до +85 °C

 $C - \text{ от -55 до +125}^{\circ}C; D - \text{ от -25 до +70}^{\circ}C;$

F – от -40 до +85°C; G – от -55 до +85°C.

Затем следует серийный номер, состоящий минимум из четырех цифр. Если он состоит менее чем из четырех цифр, то число цифр увеличивается до четырех добавлением нулей перед ними. Кроме того, за цифрами может следовать буква для обозначения варианта (разновидности) основного типа. Типы корпусов могут обозначаться одной или двумя буквами.

При изучении элементов полупроводниковых ИС и способов изоляции между ними необходимо обратить внимание на несколько особенностей:

- между элементами и общей подложкой есть электрическая связь;
- все элементы производятся в едином технологическом процессе, что определяет корреляцию параметров элементов и ограничения по их номиналам;
- существует возможность реализовать элементы, не имеющие аналогов в дискретной электронике (многоэмиттерный, многоколлекторный транзистор и др.);
 - отсутствуют элементы катушки индуктивности и трансформаторы;
- в полупроводниковых ИС на МДП–структурах изоляция между элементами не требуется.

Основу биполярных полупроводниковых ИС составляют n+-p-n-транзисторы. Параметры и характеристики пассивных элементов полупроводниковых ИС существенно отличаются от соответствующих параметров и характеристик дискретных резисторов и конденсаторов. Параметры диодов зависят от схемы включения транзистора в качестве диода.

Важным преимуществом МДП ИС по сравнению с биполярными ИС является упрощение технологии изготовления (соответственно больший процент выхода годных изделии и меньшая стоимость). МДП активные элементы зани-

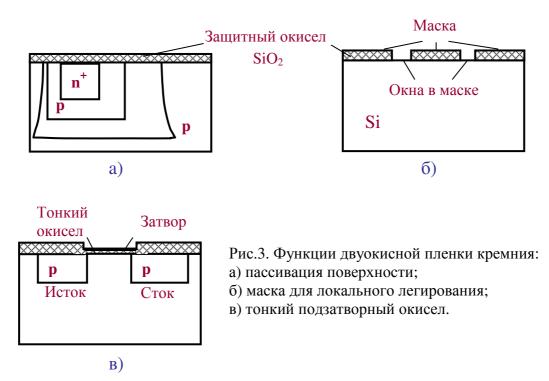
мают значительно меньшую площадь на подложке и позволяют реализовать ИС с очень высокой степенью интеграции при малой потребляемой мощности.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

К базовым физико-химическим процессам создания микроэлектронных структур относятся: литография, эпитаксия, легирование, травление, металлизация.

В результате всех этих процессов кремниевая пластина трансформируется во множество отдельных ИС, каждая из которых содержит миллионы транзисторных структур.

Oкисление поверхности полупроводника. Пленка двуокиси кремния SiO_2 является хорошим диэлектриком, поэтому широко применяется для защиты кристалла и для изоляции выводов (рис. 3а), в качестве маски, сквозь отверстия которой осуществляется локальная диффузия примеси для создания областей с различными типами проводимости (рис. 3б).



Фотолитография — процесс фотопечати, который используется для формирования заданного рисунка топологии ИС, расположения и конфигурации отверстий, которые затем будут изготовлены в окисной плёнке. На поверхность окисла наносится тонкий слой светочувствительного материала — фоторезиста. На фоторезист укладывается фотошаблон (стеклянная пластина с рисунком). После экспонирования и проявления засвеченные участки позитивного фоторезиста (или незасвеченные негативного) легко удаляются. Через полученные окна протравливаются отверстия нужной конфигурации в окисной пленке, через которые можно вводить донорные и акцепторные примеси для создания *п*- и *p*-областей внутри кристалла.

В последнее время в технологии ИС широкое применение находят методы элионной технологии, то есть методы, в которых используют действие

электронных, ионных и рентгеновских остросфокусированных пучков. Использование в элионной технологии излучений с более короткими длинами волн, чем у монохроматического светового излучения, позволяет увеличить разрешающую способность. Электронно-лучевая фотолитография находит все более широкое применение при изготовлении БИС.

Диффузия примесей – процесс легирования полупроводника донорами или акцепторами в заданной концентрации и на нужную глубину.

Кроме диффузии применяется *ионное легирование*. Атомы примеси ионизируются, затем ионный пучок ускоряется и фокусируется подобно тому, как это делается в электронно-лучевых трубках. Недостатком метода является использование специальных вакуумных камер и высоких напряжений (сотни киловольт). Достоинство – хорошая производительность при высокой точности, что особенно важно при изготовлении больших интегральных схем (БИС).

Эпитаксия — процесс выращивания на подложке монокристаллической пленки, повторяющей кристаллическую структуру подложки. Обычно эпитаксия осуществляется продуванием водорода над поверхностью подложки при высокой температуре (1200°С). При этом происходит реакция $SiCl_4 + 2H_2 \rightarrow Si + 4HCl$, и атомы кремния проникают в узлы кристаллической решетки подложки. В качестве донорных примесей вводят фосфин PH_3 или арсин AsH_3 , а в качестве акцепторной примеси — диборан B_2H_6 . Это процесс газового легирования.

Нанесение тонких пленок. Пленочная технология используется для создания контактных площадок, проводников и пленочных пассивных элементов. Тонкими считаются пленки толщиной менее 1 мкм. Пленки должны иметь необходимые электрические свойства и обладать хорошей адгезией к подложке. Процесс нанесения пленок проходит в вакуумной камере, при этом возможны несколько разновидностей процесса: термическое, ионно—плазменное напыления и электрохимическое осаждение.

Термическое испарение осуществляется при нагреве и испарении вещества из твердой или жидкой фазы с последующим осаждением на подложку.

Термическое испарение в вакууме основано на свойстве металлов и некоторых других материалов в условиях глубокого вакуума перемещаться прямолинейно и оседать на поверхности, расположенной на пути их движения. Осаждаемый материал нагревается до тех пор, пока давление его паров не превысит давление остаточных газов. При этом происходит испарение материала и конденсация его на поверхности подложки с образованием пленки. На качество пленок значительное влияние оказывает величина остаточного давления в рабочем пространстве, которая характеризуется средней длиной свободного пробега остаточных газов. Длиной свободного пробега называется расстояние, проходимое молекулой между двумя последовательными столкновениями. Длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна давлению газа. Температура, при которой напыляемый материал переходит в парообразное состояние, не вызывает перегрева обрабатываемых изделий, так как в условиях глубокого вакуума резко понижена температура испарения материала.

Достоинства метода – быстрота нанесения и чистота полученных пленок; недостаток – плохая повторяемость параметров пленки.

Ионное распыление происходит в камере, заполненной разреженным инертным газом при наличии электрического поля, напрямую воздействующего на распыляемый материал. Этот метод называют также катодным из-за подключения распыляемой мишени к отрицательному катоду.

Сущность ионно-плазменного (катодного) распыления заключается в том, что мишень из материала, который надо распылить, бомбардируется быстрыми частицами (обычно ионами газа), в результате чего с ее поверхности выбиваются атомы, осаждающиеся на расположенную вблизи подложку. Источником ионов может служить плазма тлеющего разряда, возникающая в среде инертного газа или смеси газов. Эффективность распыления должна зависеть от количества и энергии ионов, бомбардирующих поверхность мишени, а свойства осаждаемых (конденсируемых) пленок зависят от сложного комплекса физико-химических процессов взаимодействия распыленных частиц с плазмой и поверхностью конденсации.

Достоинства метода – хорошая воспроизводимость параметров пленки.

Химическое осаждение из газовой или жидкой фазы позволяет получать пленки в широком диапазоне толщин. Сущность метода создания пленок с помощью газофазных реакций состоит в том, что в результате химического процесса, протекающего в газовой фазе, образуется твердый продукт реакции, который оседает на подложку в виде пленки. Химическое осаждение протекает при атмосферном давлении в отличие от других методов, для которых требуется пониженное давление. Этим методом можно наносить пленки очень многих материалов, включая окислы, сульфиды, карбиды. Такие пленки обычно имеют достаточно низкий уровень загрязнения; кроме того, можно регулировать концентрацию примесей в газе. Недостаток метода — трудность контроля и управления процессом нанесения пленок. К достоинствам же следует отнести возможность получения пленок практически любых материалов при условиях, обеспечивающих их высокую чистоту, производительность и автоматизацию процессов.

Достоинства химического осаждения – простота и технологичность пропесса.

Для получения тонкопленочных элементов используют **проводящие, резистивные и диэлектрические пленки.**

Проводящие пленки применяют для контактных площадок коммутационных дорожек, обкладок конденсаторов и индуктивностей. Их выполняют из различных материалов.

Это: **алюминий** — применяют для коммутационных дорожек, обкладок конденсаторов и контактных площадок; **медь** — применяют для коммутационных дорожек, контактных площадок и индуктивностей; **золото** — применяют для коммутационных дорожек, контактных площадок или обкладок; **никель** — применяют в основном в качестве защитного материала.

Резистивные пленки. Основными параметрами резистивных пленок являются сопротивление электрическому току и температурный коэффициент со-

противления (ТКС). Для получения малых значений ТКС резисторы должны иметь толщину пленок не менее 0,01 мкм.

Диэлектрические пленки применяют для изготовления конденсаторов, межслойной изоляции и общей защиты схемы от внешних воздействий. Выбор материала для диэлектрических пленок определяется условиями их применения и производства. Это такие материалы, как моноокись кремния, окись алюминия. Также изготавливают алюмосиликатные и стеклянные пленки, из двуокиси титана, из халькогенидных стекол, окиси тантала.

Нанесение толстых пленок. Толстые пленки (>1 мкм) наносят продавливанием проводящих или резистивных паст через трафарет с последующим высушиванием и выжиганием. Технология толстых пленок достаточно проста, но точность воспроизведения размеров и параметров пассивных элементов не превышает 20...30%.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Все элементы полупроводниковых микросхем выполнены полностью в глубине кристалла на основе структур биполярных n^+ -p-n- или МДП — транзисторов. На поверхности создаются контактные площадки и межсоединения. Локальной диффузией примесей создают внутри кристалла области с проводимостью p- или n-типа. Чередующиеся области с различной проводимостью и p-n-переходы между ними образуют активные (диоды и транзисторы) и пассивные элементы (резисторы и конденсаторы). Металлизация осуществляется локальным напылением плёнок низкоомного проводникового материала. Чаще всего это алюминий. Фрагмент полупроводниковой микросхемы, содержащей транзистор, резистор и конденсатор, показан на рис. 4.

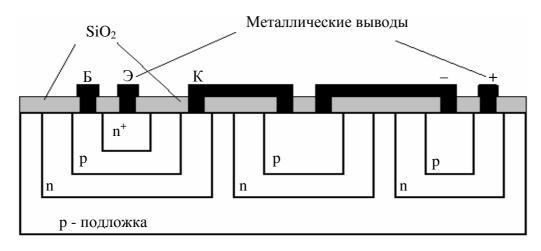


Рис.4

В качестве резистора здесь используется сопротивление базовой *р*области транзистора, а в качестве конденсатора – барьерная емкость перехода база-коллектор. На одной кремниевой пластине одновременно создаются десятки одинаковых микросхем. После скрайбирования (разрезания на отдельные кристаллы) каждая микросхема устанавливается в корпус с выводами. Такая групповая технология позволяет получать микросхемы с идентичными пара-

метрами. По сравнению с гибридными полупроводниковые микросхемы имеют большую плотность упаковки, но требуют при изготовлении сложного оборудования, которое окупается только при серийном производстве. При изготовлении микросхем используется **планарная технология**, при которой все выводы оказываются сверху, поэтому путь электронов от активной области коллектора к выводу удлиняется. В результате, сопротивление коллектора у интегрального транзистора больше, чем у дискретного, что ухудшает параметры (в частности, ограничивает частотный диапазон). Другая особенность обусловлена тем, что интегральный транзистор создается на общей подложке с другими элементами микросхемы. Это приводит к тому, что помимо основного *п-р-п*-транзистора появляется паразитный *р-п-р*-транзистор. Из рис. 4 видно, что эмиттером паразитного является база основного (*p*-область); базой паразитного – коллектор основного транзистора; коллектором паразитного – подложка.

В интегральной микроэлектронике существует возможность реализации элементов, не имеющих аналогов в дискретной электронике, например **много-эмиттерный транзистор** (рис.5).

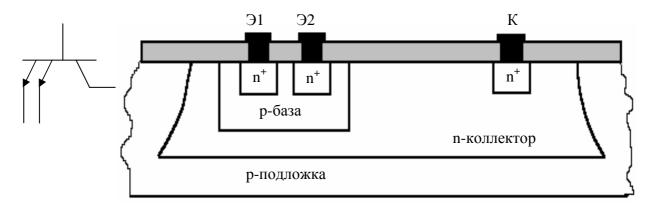


Рис. 5

В общей базовой области расположены несколько эмиттеров. Базовая робласть имеет отросток, в конце которого сделан вывод базы, находящийся близко выводу коллектора. Сопротивление базового отрост-К ка $R_6 = 150...300$ Ом, поэтому *p-n*-переход между коллектором и основной областью базы соединяется с выводом базы через сопротивление, а *p-n-*переход между коллектором и отростком базы подключен непосредственно к выводу базы. Такая особенность топологии многоэмиттерного транзистора уменьшает инверсный коэффициент передачи, что оказывается полезным при использовании таких транзисторов в логических схемах. В остальном, многоэмиттерный транзистор подобен сборке из нескольких обычных транзисторов, у которых все коллекторы соединяются в одной точке схемы, все базы – в другой, а эмиттеры имеют отдельные выводы.

Активные элементы полупроводниковых микросхем Транзистор с диодом Шоттки

Диодом Шоттки (ДШ) называют диод, образованный контактом металлполупроводник. При определенном соотношении работ выхода металла и полупроводника такой контакт

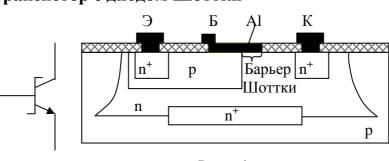


Рис. 6

является выпрямляющим. Вольтамперная характеристика ДШ сдвинута по оси напряжений влево, т.е. он открывается при напряжении приблизительно 0,2 В, что на 0,36 В меньше напряжения на открытом кремниевом *p-n*-переходе.

Структура и условное обозначение транзистора с барьером Шоттки показаны на рис.6.

Транзисторы с диодом Шоттки применяются в цифровых интегральных схемах.

Транзисторы р-п-р

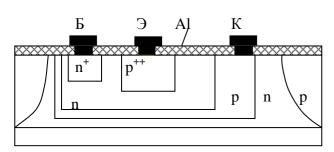


Рис. 7. Вертикальный *p-n-p*-транзистор

Обычно в микросхемах используются *n-p-n*-транзисторы, но иногда возникает необходимость разместить в одной подложке *n-p-n*-и *p-n-p*-структуры. В этих случаях применяют *вертикальные* или *горизонтальные p-n-p*-транзисторы.

Недостатками горизонтальной структуры являются: низкая гранич-

ная частота f_{ep} = 10...30 МГц; коэффициент усиления по току — до 50, причем инверсный и нормальный коэффициент усиления оказываются близкими по значениям; сравнительно большая толщина базы — в 5...7 раз больше, чем у вертикальных транзисторов.

Диоды полупроводниковых микросхем

По технологическим соображениям в качестве диодов в полупроводниковых микросхемах используют p-n-переходы транзисторных структур: эмиттерный или коллекторный, а так же их сочетание.

Пять возможных вариантов диодного включения транзисторов и их параметры приведены в таблице 2. Так как концентрация примесей (а значит и носителей) больше в эмиттерном переходе и площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного, поэтому параметры схем различны. Из таблицы видно, что в схемах, где работает эмиттерный переход, напряжение пробоя не превышает 5...7 В, а у диодов на основе коллекторного перехода – 30...50 В.

Обратный ток наименьший у диодов на основе эмиттерного перехода. В быстродействующих цифровых микросхемах целесообразно использовать диод по схеме $U_{K\!B}=0$. В этой схеме заряд накапливается только в базе, поэтому время восстановления обратного тока (т.е. время переключения диода из открытого в закрытое состояние) минимально.

Таблица 2

					raosiniqa 2
Схема					
Признак схемы	$U_{K\!S}=0$	$I_{\kappa} = 0$	$U_{E} = 0$	$I_9 = 0$	$U_{K\Im}=0$
Работающий переход	Е–Ә	Е–Ә	Б–К	Б–К	Б–Э Б–К
Прямое напряжение, В	0,50,6	0,50,6	0,60,7	0,60,7	0,50,6
Напряжение пробоя, В	57	57	30–50	30–50	57
Барьерная емкость, пФ	0,5	0,5	0,7	0,7	1,2
Время восстановления, нс	10	50	50	75	100

Эти же схемы можно использовать для изготовления **стабилитронов.** Если необходимы напряжения 5–10 В, то используют обратное включение диода $I_{\rm K}=0$ в режиме пробоя, если требуются напряжения 3–5 В, то применяют обратное включение диода $U_{E\Im}=0$, используя эффект смыкания (с ростом напряжения на коллекторе ширина коллекторного перехода расширяется настолько, что ширина базы уменьшается до нуля, переходы транзистора смыкаются, ток беспрепятственно проходит из эмиттера в коллектор, наступает пробой). Для изготовления **стабисторов** можно использовать схему $U_{KE}=0$.

Полевые транзисторы

Совместное изготовление МДП – и биполярных транзисторов на одном кристалле, в едином технологическом цикле возможно, но является специальным случаем. Как правило, эти ИС разрабатываются и изготавливаются раздельно. Главную роль в микроэлектронике играют МДП – транзисторы. Они не нуждаются в изоляции, это способствует лучшему использованию площади

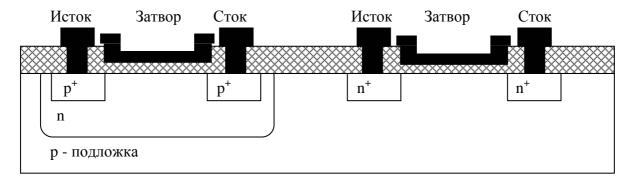


Рис. 8. Комплиментарные МОП – транзисторы

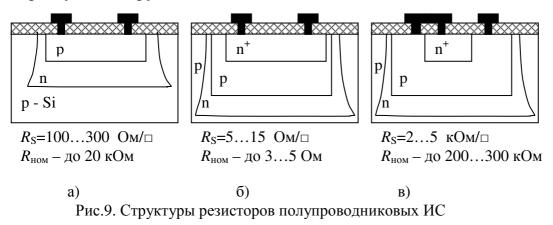
кристалла, т.е. повышению степени интеграции. Их структура внешне не отличается от структуры дискретных вариантов. Технология их изготовления намного проще, это обеспечивает меньший брак и меньшую стоимость. Быстродействие интегрального транзистора в несколько раз выше, чем дискретного (меньше паразитные емкости), но уступает биполярному транзистору.

В комплиментарных МОП (КМОП) — транзисторных ИС на одном и том же кристалле необходимо изготовлять транзисторы обоих типов: с n- и p-каналом, что приводит к увеличению числа технологических операций. Схемы, построенные на этих элементах обладают высокой помехоустойчивостью. Их широко применяют для построения цифровых ИС, например, логических элементов. Принцип действия заключается в том, что при одновременной подаче на затворы этих транзисторов уровня логической единицы, n-канальный транзистор открывается, а p-канальный закрывается. В зависимости от схемы, на выходе обеспечивается требующийся уровень напряжения. Для этих схем характерна малая потребляемая мощность.

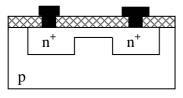
Пассивные элементы полупроводниковых микросхем Диффузионный резистор

В микросхемах на биполярных транзисторах используют диффузионные резисторы, получаемые локальной диффузией примесей. При этом роль резистора играет один из слоев транзисторной структуры, например, базовый слой (рис. 9 а).

Удельное поверхностное сопротивление базового слоя R_s =100...300 Ом/ \square . Поэтому типичное значение максимального сопротивления достигает 20 кОм. Это значение можно повысить в 2–3 раза, используя не полосковую, а зиг-загообразную конструкцию.



Для получения резисторов с малыми номиналами сопротивлений используют низкоомный эмиттерный слой с R_s =5...15 Ом/ \square , что дает возможность получить номинальные сопротивления до 3...5 Ом (рис. 9 б). Если необходимые сопротивления превышают 50–60 кОм, можно использовать пинчрезисторы, у которых удельное сопротивление слоя составляет 2–5 кОм. Максимальное сопротивление может достигать 200–300 кОм даже при простейшей полосковой конфигурации (рис. 9 в).



 R_{S} =10...20 кОм/ \square $R_{\text{ном}}$ – до10⁵ ...10⁶ кОм Рис. 10

МДП-резистор

В схемах на полевых транзисторах в качестве резистора используется сопротивление канала МДП–структуры. Металлическая пленка, выполняющая роль затвора, может отсутствовать. Максимальное сопротивление МДП–резисторов – $10^5...10^6$ Ом (рис.10).

Диффузионный конденсатор

В интегральных схемах роль конденсаторов играют обратносмещенные p-n-переходы, выполненные на основе транзисторной структуры в едином технологическом процессе.

В биполярных транзисторных структурах в конструкции транзистора используется один из переходов: «эмиттер—база» (рис. 11б), «база—коллектор» (рис. 11а), «коллектор подложка». Эти переходы формируются диффузией, поэтому их называют диффузионными. Параметрами диффузионного конденсатора являются удельная емкость C_0 , максимальная емкость C_{\max} , допустимое отклонение от номинала, температурный коэффициент емкости (ТКЕ), напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$, добротность Q. Достоинство диффузионного конденсатора — технологическая совместимость с биполярными транзисторами; недостаток — необходимость одногодируются римения. Их можно использовать в канестве

 технологическая совместимость с биполярными транзисторами; недостаток – необходимость однополярного включения. Их можно использовать в качестве переменного конденсатора.

Таблица 3

Тип конденсатора	C_0 , п Φ /мм 2	$C_{ m max}$, пФ	Допуск, %	ТКЕ, %/градус	$U_{\rm npoo}$, B	Q
Переход БК	150	300	20	-0,1	50	50100
Переход БЭ	1000	1200	20	-0,1	7	120
Переход КП	190–260					
МДП	300	500	25	0,02	20	200

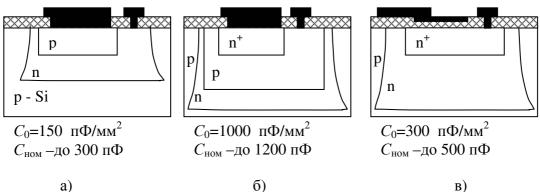


Рис.11. Структуры конденсаторов полупроводниковых ИС

МДП-конденсатор

 $M\!\!\!/\!\!\!/\Pi$ -конденсаторы отличаются лучшими электрическими свойствами. Нижней обкладкой служит эмиттерный n^+ -слой, верхней — пленка алюминия, слоем диэлектрика — диоксид кремния толщиной 0,05–0,1 мкм (рис. 11 в). Емкость такого конденсатора не зависит от приложенного напряжения.

Преимуществом МДП-конденсаторов перед диффузионными является возможность работы при любой полярности напряжения. Добротность МДП-конденсаторов превосходит добротность конденсаторов, выполненных на биполярных транзисторах.

Изоляция элементов

Диэлектрическая изоляция. Все элементы полупроводниковой микросхемы находятся внутри одного кристалла, поэтому они должны быть изолированы друг от друга. Самый естественный способ – изоляция диэлектриком, ко-

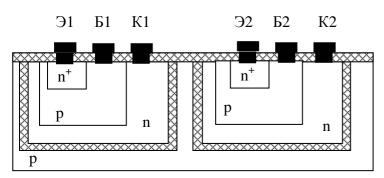


Рис.12. Изоляция элементов с помощью диэлектрика.

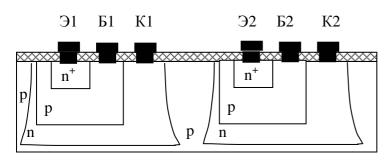


Рис.13. Изоляция элементов *p-n*-переходом.

гда каждый элемент размещается в отдельном диэлектрическом кармане (рис. 12). Необходимость создания карманов усложняет технологию, поэтому, несмотря на хорошую изоляцию, такой способ применяется редко.

Изоляция *р-п*-переходом показана на рис. 13. Предполагается, что на подложке всегда самый низкий потенциал, поэтому *р-п*-переходы между коллекторными областями и подложкой всегда закрыты. Изоляция элементов друг от друга осуществляется запертыми *р-п*-переходами. Качество изоляции в этой структуре хуже,

чем в предыдущей, но технологические преимущества обусловили ее широкое применение. Лучшими характеристиками обладает изоляция p-n-переходом со скрытым n⁺-слоем. Скрытый n⁺-слой уменьшает сопротивление коллектора, что является преимуществом планарно-эпитаксиальной структуры.

Комбинированная изоляция между транзисторами показана на рис. 14 Этот метод является основным в современных микросхемах на биполярных транзисторах. Он сочетает изоляцию диэлектриком (диоксидом кремния) и *p-n*-переходом, смещенным в обратном направлении. Является основным при производстве БИС и СБИС.

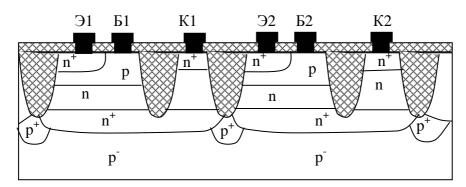


Рис.14. Комбинированная изоляция между элементами.

ГИБРИДНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Гибридная микросхема выполнена на диэлектрической (стеклянной или керамической) подложке. В качестве пассивных элементов используются пленочные резисторы и конденсаторы, а в качестве активных — дискретные бескорпусные навесные транзисторы и диоды (рис.15). Пленочный резистор выполнен в виде пленки из резистивного материала с металлическими контактными площадками на концах. Конденсатор представляет собой три последовательно нанесенные пленки: металл, диэлектрик, металл. В качестве диэлектрика часто применяется диоксид кремния.

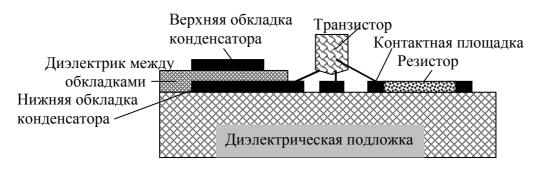


Рис. 15

Плотность упаковки элементов получается меньше, чем у полупроводниковых микросхем, но технология проще и дешевле, что позволяет изготавливать микросхемы частного применения в лабораторных условиях.

Пассивные элементы гибридных микросхем Пленочные резисторы

Пленочный резистор выполнен в виде пленки из резистивного материала с металлическими контактными площадками на концах (рис. 16а). На рис. 16б показаны линейные размеры резистивного слоя.

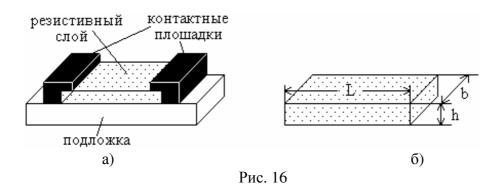
Сопротивление резистора определяется формулой:

$$R = \rho_V \frac{L}{S},\tag{1}$$

где ρ_V – объемное удельное сопротивление, L – длина, S – площадь поперечного сечения.

При заданной технологии глубина h является величиной постоянной, поэтому (1) можно записать в виде:

$$R = \rho_S K_{\Phi}. \tag{2}$$



Здесь $\rho_S = \frac{\rho_V}{h}$ – удельное поверхностное сопротивление слоя, измеряе-

мое в Омах на квадрат (Ом/ \square); $K_{\phi} = \frac{L}{b}$ — коэффициент формы, численно равный числу квадратов на поверхности резистивного слоя, где b — ширина резистора. Заметим, что это не число квадратных миллиметров или сантиметров, а минимальное число квадратов, которое можно разместить на поверхности слоя.

Удельное поверхностное сопротивление слоя тонких пленок для некоторых материалов дано в табл. 4.

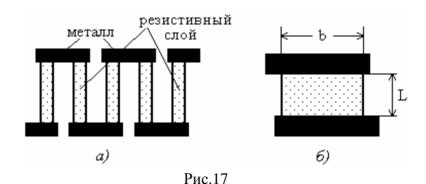
Таблица 4

Материал	Удельное поверхностное сопротивление $ ho_S$,Ом/ \Box	Диапазон значений, Ом
Нихром	300	5030 000
Сплав МЛТ-3М	500	5050 000
Кермет	300010 000	100010 000 000
Тантал	20100	10010 000
Сплав РС-3001	10002000	100100000

При расчете топологии резисторов выбирают материал, затем определяют коэффициент формы $K_{\phi}=\frac{R}{\rho_S}$. Если $1 < K_{\phi} < 10$, то форма резистора прямоугольная. Выбирая ширину резистора b, находят длину $L=K_{\phi}b$. При этом ширина должна быть не менее минимально допустимой по технологии.

Если $K_{\Phi} > 10$, то резистор выполняется в форме *меандра* или в виде нескольких прямоугольных отрезков, соединенных последовательно перемычками из проводящих пленок, как показано на рис. 17а.

Когда K_{Φ} <1, т.е. L < b , то форма резистора соответствует рис. 17б. Значения K_{Φ} < 0,1 и K_{Φ} > 50 не рекомендуются.



Пленочные конденсаторы

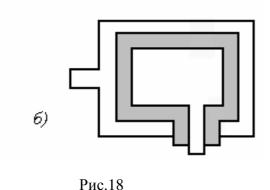


Структура (разрез) пленочного конденсатора и его топология показаны на рис. 18а и 18б.

В качестве диэлектрика используют материалы, обеспечивающие достаточную удельную емкость C_0 . Некоторые из них приведены в табл. 5.

Емкость плоского конденсатора равна:





где \mathcal{E} — диэлектрическая проницаемость, \mathcal{E}_0 — электрическая постоянная, S — площадь фигуры перекрытия верхней и нижней обкладок, d — толщина диэлектрика. При заданной толщине и заданном материале диэлектрика эту формулу можно записать так:

$$C = C_0 S = C_0 \cdot L \cdot b . \tag{4}$$

Таблица 5

Материал	C_0 , п Φ /мм 2	$C_{ m max}$, пФ	Добротность Q
SiO_2	60	1500	200
Al ₂ O ₃	1500	40000	30
Ta_2O_5	4000	100000	30

При заданной емкости расчет топологии сводится к выбору диэлектрика и нахождению площади верхней пластины. Диэлектрик должен выступать за край верхней обкладки на 100...200 мкм.

При малой потребной емкости конденсатор выполняется в виде двух пересекающихся проводников, разделенных диэлектриком.

Кроме пленочных конденсаторов, в гибридных микросхемах часто используют миниатюрные навесные конденсаторы.

Активные элементы гибридных микросхем

В качестве навесных компонентов используются бескорпусные диоды, транзисторы и полупроводниковые ИС, которые по способу установки в микросхему разделяются на две группы: приборы с гибкими выводами и приборы с жесткими выводами. Простейшим вариантом бескорпусного транзистора является кристалл, полученный после скрайбирования, к трем контактным площадкам которого присоединены тонкие проволочные выводы (диаметром 25 мкм и длиной 0,6-5 мм) и который защищен от внешней среды каплей эпоксидной смолы, обволакивающей кристалл со всех сторон. Такой транзистор приклеивается к подложке тех пленочных элементов, с которыми он должен быть соединен, после чего проволочные выводы транзистора методом термокомпрессии присоединяются к соответствующим контактным площадкам на подложке.

В современных ИС используются активные компоненты с жесткими выводами: с балочными или сферическими. Сферические выводы выполняются из золота, меди, сплавов и могут иметь форму шарика, цилиндра или усеченного конуса. На диэлектрической подложке делают контактные столбики высотой 10-15 мкм и диаметром 150-200 мкм, расположенные в точном соответствии с расположением шариков на кристалле кремния. Соединение шариков со столбиками осуществляется методом перевернутого монтажа: кристалл транзистора переворачивается «вверх ногами», то есть шариками вниз, и накладывается шариками на столбики подложки. Сочетая давление на кристалл с повышением температуры (то есть, в сущности, используя термокомпрессию), обеспечивают прочное соединение шариков со столбиками. Как видим, метод перевернутого монтажа – групповой: за одну операцию получается все три необходимые соединения. Количество соединений при таком монтаже вдвое меньше, чем при проволочном, а транзистор не требует специального места на подложке. Главная трудность состоит в совмещении шариков со столбиками, поскольку кристалл при наложении перевернут «вверх ногами» и закрывает от оператора места соединения.

МИНИ-ТЕСТ

1. Интегральная схема (микросхема) – это

- 1) схема, включающая в свой состав биполярные транзисторы и пассивные элементы;
- 2) микроэлектронное изделие, выполняющее функцию преобразования сигнала и имеющее высокую плотность электрически соединенных элементов в едином объеме;
- 3) совокупность навесных активных элементов.

2. По функциональному назначению интегральные схемы подразделяются на

- 1) аналоговые и цифровые;
- 2) усилительные и импульсные;
- 3) генераторные и переключающие.

3. Полупроводниковая интегральная микросхема – это микросхема

- 1) в состав которой входят полупроводниковые приборы;
- 2) в которой все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника;
- 3) пассивные элементы которой выполнены на подложке, а активные припаяны.

4. Основой для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем является

- 1) кремний;
- 2) германий;
- 3) арсенид галлия;
- 4) керамика.

5. Эпитаксия – это технологический процесс

- 1) наращивания монокристаллических слоев на полупроводниковую подложку;
- 2) внедрения примесей в полупроводниковый материал;
- 3) искусственного окисления кремния.

6. Термическое окисление – это

- 1) процесс наращивания монокристаллических слоев на полупроводниковую подложку;
- 2) окисление кремния с целью получения пленки двуокиси кремния;
- 3) введение необходимых примесей в монокристаллический полупроводник.

7. Фотолитография – это

- 1) процесс получения требуемой конфигурации в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковых или диэлектрических подложек;
- 2) введение необходимых примесей в монокристаллический полупроводник;
- 3) растворение полупроводникового материала с помощью жидкостного или сухого травителя.

8. Легирование - это

- 1) растворение полупроводникового материала с помощью растворителя;
- 2) окисление кремния с помощью создания защитной пленки двуокиси кремния;
- 3) операция введения необходимых примесей в монокристаллический полупроводник.

9. Изоляция интегрального *n-p-n* транзистора *p- n-*переходом –

- 1) состояние, когда потенциал подложки транзистора будет наименьшим из потенциалов точек структуры;
- 2) состояние, когда n-p-n транзистор создается внутри объема полупроводника, изолированного от других частей микросхемы пленкой двуокиси кремния;
- 3) замена полупроводниковой подложки на сапфировую.

10. Интегральный *п-р-п* – транзистор это биполярный транзистор

- 1) интегральных полупроводниковых микросхем;
- 2) с высоким коэффициентом β ;
- 3) с большим количеством эмиттеров;
- 4) большим количеством коллекторов.

11. Недостаток интегральных биполярных *n-p-n*- транзисторов

- 1) большая площадь, занимаемая им в микросхеме;
- 2) появление в его структуре паразитного *p-n-p*—транзистора;
- 3) появление в его структуре паразитной емкости $C_{K\!\Pi}$ коллектор-подложка.

12. Интегральный транзистор с барьером Шоттки предназначен для

- 1) улучшения быстродействия биполярного транзистора;
- 2) увеличение допустимого напряжения на коллекторном переходе;
- 3) уменьшение емкости перехода коллектор-база.

13. Многоэмиттерный транзистор

- 1) совокупность транзисторов с соединенными базами и соединенными коллекторами;
- 2) транзистор, имеющий до 8 эмиттеров;
- 3) совокупность транзисторов с соединенными эмитттерами.

14. Интегральные диоды полупроводниковых интегральных схем – это диоды

- 1) изготавливаемые специально в структуре полупроводника;
- 2) создаваемые на основе структуры интегральных транзисторов;
- 3) Шоттки.

15. Использование интегральных биполярных транзисторов в качестве диодов возможно в

- 1) двух вариантах;
- 2) трех вариантах;
- 3) четырех вариантах;
- 4) пяти вариантах.

16. Технология изготовления активных элементов интегральных микросхем сложнее

- 1) при использовании биполярных транзисторов;
- 2) при использовании полевых транзисторов;
- 3) одинакова.

17. Диффузионные резисторы интегральных микросхем изготовляются

- 1) одновременно с изготовлением коллекторной области;
- 2) одновременно с изготовлением эмиттерной области;
- 3) одновременно с изготовлением эмиттерной или базовой области.

18. Диффузионные конденсаторы интегральных микросхем – это конденсаторы, для формирования которых используется

- 1) коллекторный переход ИС
- 2) эмиттерный переход ИС;
- 3) любой переход интегральных микросхем.

19. Гибридные интегральные микросхемы – это

- 1) полупроводниковые схемы;
- 2) микросхемы, все элементы которых изготовлены в виде пленок.
- 3) микросхемы, пассивные элементы которых изготовлены в виде пленок, а активные элементы навесные.

20. Подложки гибридных интегральных схем служат

- 1) для размещения в их объеме активных и пассивных элементов;
- 2) диэлектрическим и механическим основанием для пленочных и навесных элементов и для теплоотвода;
- 3) для придания жесткости конструкции интегральной микросхемы.

21. В качестве тонкопленочных резисторов интегральных ИС используются

- 1) полоски металла, сплава металлов, кермет (смесь частиц металла и диэлектрика);
- 2) полоски металла;
- 3) полоски сплава металла;
- 4) полоски кермета.

22. Диэлектрическим слоем тонкопленочных конденсаторов служит

- 1) окислы полупроводниковых материалов;
- 2) окись железа;
- 3) окись алюминия.

23. Обкладки тонкопленочных конденсаторов изготавливаются

- 1) из золота;
- 2) из серебра;
- 3) из алюминия.

24. Невозможно изготовить в структуре полупроводниковой ИС

- 1) резистор;
- 2) конденсатор;
- 3) индуктивность.

	25.	В виде	пленок ги	бридных и	интегральны	х микросхем	и изготавливаютс
--	-----	--------	-----------	-----------	-------------	-------------	------------------

- 1) резисторы, индуктивности;
- 2) резисторы;
- 3) индуктивности.

26. Полевые транзисторы интегральных микросхем могут использоваться в качестве

- 1) усилителей и переменных резисторов;
- 2) усилителей;
- 3) переменных резисторов.

27. На основе эмиттерной области биполярных транзисторов ИС изготавливают резисторы

- 1) 3÷100 Ом;
- 2) 100÷150 Ом;
- 3) 150÷200 Ом;
- 4) 200÷250 Ом.

28. Максимальное сопротивление пинч-резисторов составляет

- 1) 50÷100 Ом;
- 2) 100÷150 Ом;
- 3) 150÷200 Ом;
- 4) 200÷300 Om.

29. Оптимальными вариантами использования биполярных транзисторов в качестве диодов в интегральных микросхемах является соединение биполярного транзистора

- 1) $U_{\kappa 0} = 0$, $I_{\kappa} = 0$;
- 2) $U_{96}=0$, $I_{9}=0$;
- 3) $I_9=0$, $U_{9K}=0$.

30. В качестве стабилитрона в полупроводниковых интегральных микросхемах используется вариант соединения биполярного транзистора

- 1) I_{κ} =0;
- 2) I_9 =0;
- 3) $U_{9K}=0$;
- 4) $U_{96}=0$.

31. Даны условные обозначения микросхем. Укажите микросхему широкого применения, гибридную, цифровую.

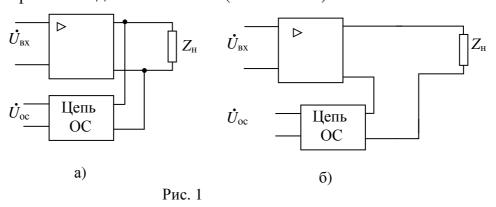
- 1) 140УД1А;
- 2) К217ЛБ1;
- 3) К155ЛА7;
- 4) К237УН1.

АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Аналоговые интегральные схемы предназначены для преобразования сигналов, заданных в виде непрерывной функции. Номенклатура аналоговых ИС включает различные генераторы сигналов, усилители, детекторы, модуляторы и пр. Особое внимание с точки зрения идеологии микроэлектроники заслуживают дифференциальные и операционные усилители. В некотором смысле операционный усилитель является элементной базой для аналоговых преобразователей, кроме этого, он имеет внешние цепи для выполнения некоторых линейных и нелинейных операций.

Основы теории обратной связи

Обратная связь (ОС)— это передача части мощности сигнала с выхода усилителя (или другого устройства) на вход. Паразитная ОС приводит к нежелательным последствиям, специально созданная ОС призвана улучшить характеристики и параметры устройства. *Положительная* ОС (ПОС) отличается тем, что напряжение ОС поступает на вход синфазно с входным сигналом (складывается с ним). При *отрицательной* ОС (ООС) напряжение ОС подаётся на вход в противофазе с входным сигналом (вычитается).



Если цепь ОС подключена к выходу параллельно, получается OC по напряжению (рис.1a), если последовательно, то получается OC по току (рис.1б). Возможна также комбинированная OC.

По способу подачи напряжения ОС на вход различают: *последовательную* (рис. 2a), *параллельную* (рис. 2б) и *комбинированную* ОС.

Параллельная обратная связь сильнее влияет на работу усилителя при большом внутреннем сопротивлении источника сигнала, а последовательная—при малом.

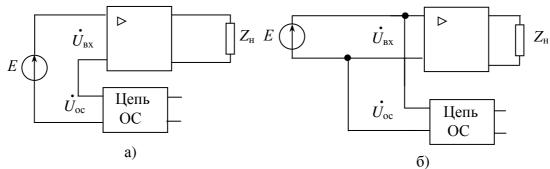


Рис.2

В усилителях обычно используют ООС. Если коэффициент обратной связи зависит от частоты, то ОС называется *частотно-зависимой*.

Рассмотрим влияние OC на коэффициент передачи по напряжению на примере последовательной OC по напряжению.

B случае Π OC по напряжению коэффициент передачи цепи OC равен $\beta = U_{
m oc}/U_{
m вых}$, коэффициент передачи усилителя без обратной связи $K = U_{
m выx}/U_{
m вx}$. Тогда коэффициент передачи усилителя с учётом OC равен:

$$K_{\rm oc} = \frac{U_{\rm BbIX}}{U_{\rm BbIX} - U_{\rm oc}} = \frac{K}{1 - K\beta}.$$
 (1)

Выражение справедливо и для других видов ОС, нужно только учесть, что для параллельной ОС по напряжению $\beta = Z_{_{\Gamma}}/Z_{_{\rm oc}}$, для последовательной ОС по току $\beta = Z_{_{\rm oc}}/Z_{_{\rm H}}$, для параллельной ОС по току значение $\beta = Z_{_{\Gamma}}Z_{_{\rm oc_1}}/(Z_{_{\rm H}}Z_{_{\rm oc_2}})$. Здесь $Z_{_{\rm oc_1}}$ — часть сопротивления ОС, с которой снимается напряжение ОС, а $Z_{_{\rm oc_2}}$ — та часть сопротивления ОС, через которую напряжение ОС поступает на вход усилителя.

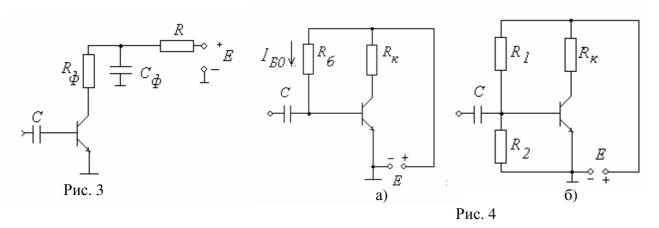
В общем случае коэффициент передачи величина комплексная. Можно показать, что его модуль с учетом ОС определяется выражением:

$$|K_{\rm oc}| = \frac{|K|}{\sqrt{1 - 2|K\beta|Cos\varphi + |K\beta|^2}},\tag{2}$$

где φ — суммарный сдвиг фаз самого усилителя и петли обратной связи. Заметим, что при наличии ПОС, в знаменателе (1) будет разность, т.е. $K_{oc}>K$, т.о. ПОС увеличивает коэффициент усиления усилителя.

<u>В случае ООС</u> в знаменателе будет сумма, т.е. ООС уменьшает усиление. Несмотря на это, именно ООС применяется в усилителях, ибо она позволяет улучшить параметры усилителя, в частности, скорректировать амплитудночастотную и амплитудно-фазовую характеристики, уменьшить искажения сигнала, увеличить устойчивость к самовозбуждению.

Схемы питания усилительных каскадов



Для нормальной работы каскада необходимо подать питание в выходную цепь, а для выбора рабочей точки на характеристике усилительного прибора нужно подать напряжение смещения на вход.

Питание выходных цепей осуществляется либо непосредственно от источника постоянного напряжения, либо через развязывающие фильтры, как показано на рис. 3.

Простейший способ подачи напряжения смещения показан на рис. 4а (схема с фиксированным током базы). Сопротивление R_6 много больше сопротивления участка база-эмиттер, при открытом эмиттерном переходе, поэтому ток базы $I_{E0} \cong E/R_6$. Этот ток создает напряжение смещения на базе. Такой способ подачи смещения применим только в каскадах, работающих без отсечки тока.

Схема с фиксированным напряжением база-эмиттер (рис. 4б) обеспечи-

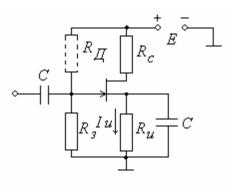
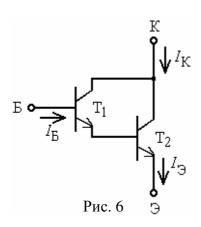


Рис. 5

вает смещение $U_{69} \approx E \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. Сопротивление делителя тока выбирается так, чтобы ток через R_2 был в несколько раз больше тока базы.

В схемах на полевых транзисторах сопротивление между затвором и истоком весьма велико, что позволяет получать смещение за счёт протекания тока истока через резистор R_u (рис. 5) и подавать его на затвор через большое сопротивление R_3 . Используют также схему с делителем напряжения R_3 , $R_{\it J}$.

Составные транзисторы



Составной транзистор (пара Дарлингтона) представляет собой соединение двух транзисторов, показанное на рис. 6.

Из рисунка видно, что ток базы второго транзистора равен току эмиттера первого:

$$I_{B2} = I_{\exists 1} = (B_1 + 1)I_B. (3)$$

Здесь B_1 – коэффициент передачи по току первого транзистора. Суммарный ток коллектора двух транзисторов равен:

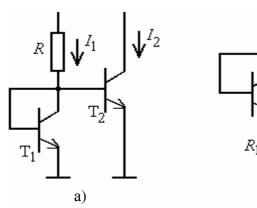
$$I_K = B_1 I_B + B_2 I_{21}. (4)$$

Общий коэффициент передачи по току найдем как отношение тока коллектора I_K к току базы:

$$B = \frac{I_K}{I_E} = B_1 + B_2 + B_1 B_2 \approx B_1 B_2. \tag{5}$$

Отсюда видно, что составной транзистор можно рассматривать как один транзистор с большим коэффициентом усиления по току, который реально достигает нескольких тысяч.

Источники тока



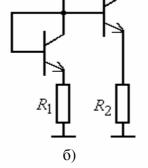


Рис. 7

В реальных схемах генераторы заданного тока реализуются в виде стабилизаторов тока. В аналоговых интегральных микросхемах распространены стабилизаторы, называемые отражателями тока. Вариант отражателя показан на рис. 7а.

Из рис. 7а видно, что транзистор T_1 работает в диодном включении, поэтому его ток эмиттера равен току коллектора

 I_1 . Переход база-эмиттер второго транзистора подключен параллельно эмиттерному переходу первого, т.е.

$$U_{B31} = U_{B32} = \varphi_T \ln \frac{I_3}{I_0}, \tag{6}$$

где φ_T – тепловой потенциал (26 мВ при T=300 К), I_0 – тепловой ток эмиттерного перехода. Следовательно, $I_{\ni 2}=I_1$ или, пренебрегая током базы второго транзистора, $I_1=I_2$. Таким образом, получаем ток второй ветви, равный или, при неидентичных транзисторах, пропорциональный току первой ветви.

В схеме рис.76

$$I_1 R_1 + U_{B \ni 1} = I_2 R_2 + U_{B \ni 2}. (7)$$

Тогда

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2} \,. \tag{8}$$

Основные показатели и характеристики усилительных устройств

Задача усилительного устройства (УУ) – получить на выходе (на нагрузке) сигнал с большей мощностью, чем входной сигнал, но повторяющий закон изменения входного сигнала.

Математически усиление— это умножение амплитуды тока, напряжения и мощности на постоянную величину K, называемую коэффициентом усиления или коэффициентом передачи:

$$U_{\text{BbIX}} = KU_{\text{BX}} \tag{9}$$

Физически процесс усиления— это преобразование постоянной мощности источника питания в мощность переменного тока в соответствии с законом изменения входного сигнала.

Обязательными элементами УУ являются усилительный электронный прибор (транзистор биполярный, транзистор полевой, и др.), источники питания, нагрузка и источник входного сигнала.

Классификация усилителей возможна по следующим признакам:

- по виду усиливаемых сигналов существуют аналоговые и импульсные усилители;
- по частотному признаку усилители сигналов низкой (звуковой) частоты, усилители высокой частоты, узкополосные и широкополосные;
- по назначению различают усилители мощности, тока и напряжения (которые тоже усиливают мощность сигнала);
- по виду усилительных элементов (на биполярных транзисторах, на полевых транзисторах), причем усилители на транзисторах могут быть как в дискретном, так и в интегральном исполнении.

Для оценки и сравнения YY используют следующие параметры.

 $K_O \ni \phi \phi u u u e h m b$ по напряжению $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ и по мощности $K_P = P_{\text{выx}}/P_{\text{вх}}$, измеряемые на некоторой частоте. Коэффициент передачи часто измеряется в децибелах ($20 \lg K_L$, $20 \lg K_U$ и $10 \lg K_P$).

Иногда интересуются сквозным коэффициентом передачи $K^* = U_{\text{вых}}/E$, где $E - \Im \Box C$ источника сигнала.

Коэффициент передачи зависит от частоты и является величиной комплексной:

$$\dot{K}(\omega) = K(\omega) \exp[j\varphi(\omega)]. \tag{10}$$

Нормированной амплитудно-частотной характеристикой (AЧX) называют зависимость

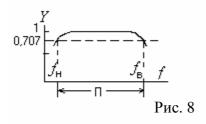
$$Y = K(f)/K, \tag{11}$$

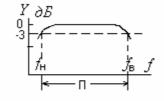
где K — максимальный коэффициент передачи на какой-либо частоте. Неравное усиление на разных частотах приводит к частотным искажениям, которые оценивают коэффициентом частотных искажений

$$M = K / K(\omega) = 1 / Y. \tag{12}$$

Величины Y и M обычно измеряют в децибелах.

Полосой пропускания усилителя называют полосу частот $\Pi = f_{\mathfrak{g}} - f_{\mathfrak{g}}$ (рис.8), на границах которой значения Y уменьшаются в $\sqrt{2}$ раз (на 3 дБ).





Фазочастотные (фазовые) искажения возникают по причине различных фазовых сдвигов для разных частот спектра. Чтобы не было фазовых искажений, ФЧХ должна быть линейной (штриховая линия на рис. 9). Фазовая харак-

теристика реального усилителя имеет вид, как на рисунке 9.

Для оценки коэффициента полезного действия (КПД) используют элек-

Рис. 9

трический КПД η и полный КПД η_n : $\eta = P_{\text{вых}}/P_0$; $\eta_n = P_{\text{вых}}/P_{\text{общ}}$, где P_0 — мощность, потребляемая от источника питания в выходной цепи, $P_{\text{общ}}$ — полная потребляемая мощность от всех источников питания.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик электронных

приборов и проявляются в искажении формы синусоидальных сигналов за счёт появления гармоник и комбинационных частот типа $nf_i \pm mf_k$. Уровень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (коэффициентом гармоник):

$$k_{z} = \sqrt{\frac{U_{2}^{2} + U_{3}^{2} + U_{4}^{2}}{U_{1}}} 100\% \quad , \tag{13}$$

где $U_{\rm i}$ – амплитуды i-тых гармоник. Иногда пользуются понятием затухание нелинейности

$$a_{\varepsilon}[дБ]=20 \lg(1/k_{\varepsilon}) \tag{14}$$

Каскады предварительного усиления

Назначение каскадов предварительного усиления— увеличить амплитуду

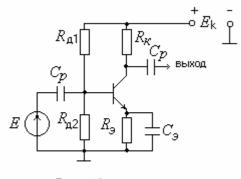


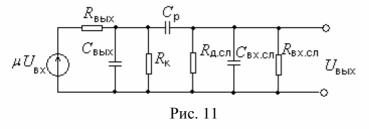
Рис. 10

напряжения входного сигнала до значения, достаточного для работы мощного выходного каскада. При этом все виды искажений должны оставаться в допустимых пределах. Этим условиям лучше всего удовлетворяет транзисторный каскад по схеме с общим эмиттером.

Принципиальная схема транзисторного каскада показана на рис.10. Разделительные ёмкости $C_{\rm p}$ не пропускают постоянный ток к генератору входного сигнала и ко входу сле-

дующего каскада. Резисторы в цепях базы $R_{\scriptscriptstyle \rm J}$ и эмиттера $R_{\scriptscriptstyle \rm S}$ являются элементами подачи смещения на базу транзистора, а резистор R_{κ} представляет собой нагрузку по постоянному току. Эквивалентная схема каскада показана на рис. 11, где $C_{\rm вx.c.}$ и $R_{\rm вx.c.}$ – входная ёмкость и входное сопротивление следующего каскада.

На средних частотах ёмкостное сопротивление разделительного конденсатора достаточно мало, а сопротивление параллельно включенных входной



и выходной ёмкостей достаточно велико и их влиянием можно пренебречь. Тогда эквивалентная схема примет вид, как на рис.12, где R_{\sim} – общее сопротивление параллельно включенных R_{κ} , $R_{\text{вх.сл}}$ и $R_{\rm \tiny II.CJI}$.

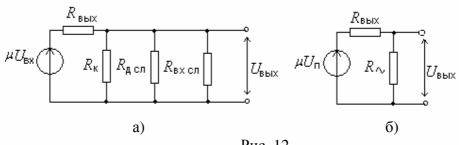


Рис. 12

Коэффициент передач на средних частотах: $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{nv}}} = \mu U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{~}}}{R_{\text{nuv}} + R_{\text{~}}}$.

Учитывая, что μ = $SR_{\text{вых}}$, и $R_{\text{вых}}$ >> R_{\sim} , получим:

$$K = SR_{\sim} = R_{\sim} \frac{h_{219}}{h_{119}}. (15)$$

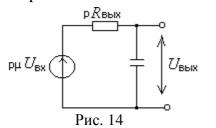
Таким образом, коэффициент усиления прямо пропорционален параметру h_{21} транзистора и обратно пропорционален входному сопротивлению транзистора. Коэффициент передачи транзисторного каскада неизбежно уменьшается из-за малого значения входного сопротивления следующего каскада $R_{\rm вx,cn}$ и, следовательно, малого R_{\sim}

На нижних частотах можно пренебречь влиянием $C_{\text{вых}}$ и $C_{\text{вх.сл}}$, тогда эквивалентную схему можно представить как показано на рис. 13, где $R_{\rm H} = R_{\rm J} R_{\rm BX,CJ} / (R_{\rm J} + R_{\rm BX,CJ})$. На основании теоремы об эквивалентном генераторе схему рис. 13а можно привести к виду рис. 13б, где $p=R_{\rm K}$ /($R_{\rm K}+R_{\rm BMX}$). откуда следует выражение для коэффициента передачи на низких частотах:

$$K_{HY} = \frac{\mu \cdot pR_{H}}{pR_{BMX} + R_{H} - jX_{Cp}}.$$

$$\mu U_{BX} \qquad \qquad P_{HX} \qquad$$

Коэффициент частотных искажений на низких частотах определяется выражением:

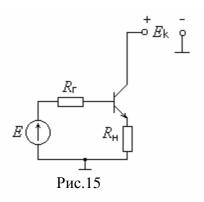


$$M_{\rm H^{ ext{H}^{ ext{H}^{ ext{H}^{ ext{H}^{ ext{H}^{ ext{H}^{ ext{}}}}}}} = 1 - rac{jX_{
m cp}}{pR_{
m BЫX} + R_{
m H}}$$
. (17)
Модуль коэффициента частотных искаже-

$$M_{\text{HY}} = \sqrt{1 + \left[\frac{1}{\omega C_{\text{p}}(pR_{\text{BMX}} + R_{\text{H}})}\right]^2}.$$
 (18)

Таким образом, коэффициент частотных искажений на НЧ обратно пропорционален ёмкости разделительного конденсатора.

На высоких частотах можно пренебречь ёмкостью разделительного конденсатора, а параллельно соединённые ёмкости и сопротивления объединить: $C=C_{\text{вых}}+C_{\text{вх.сл}}$ и $R=(R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3)/(R_1R_2R_3)$. Тогда эквивалентная схема примет вид рис. 14, где $p=R/(R+R_{\text{вых}})$. Отсюда получим выражения для коэффициента передачи и коэффициента частотных искажений:



$$\dot{K}_{\text{BH}} = \frac{\mu \cdot p(-jX_c)}{(pR_{\text{BMX}} - jX_{c0})},$$
 (19)

$$M_{_{\rm RH}} = 1 + j\omega \cdot CpR_{_{\rm RHY}}. \tag{20}$$

Модуль коэффициента частотных искажений:

$$M_{_{\rm BH}} = \sqrt{1 + (\omega \cdot CpR_{_{\rm BHX}})^2} . \tag{21}$$

Из (21) видно, что частотные искажения обусловлены шунтирующим действием выходной ёмкости данного транзистора и входной ёмкости следующего каскада.

Повторители напряжения

В схеме (рис. 15) нагрузка включается в цепь эмиттера, поэтому схема не даёт усиления по напряжению. Коэффициент передачи по напряжению в принципе меньше единицы, но близок к ней, а фаза выходного напряжения совпадает с фазой входного, поэтому такой каскад называют повторителем напряжения (эмиттерным повторителем). Входное и выходное сопротивления каскада соответственно равны

$$R_{\text{BX}} = h_{113} + (1 + h_{213})R_{\text{H}},\tag{22}$$

$$R_{\text{BMX}} = (R_{\Gamma} + h_{119})/(1 + h_{229}). \tag{23}$$

Большое входное и малое выходное сопротивления облегчают согласование с выходом предыдущего каскадов и с низкоомной нагрузкой. Это обуславливает применение эмиттерного повторителя в качестве согласующего каскада.

Оконечные каскады

Задача оконечного каскада: обеспечить на заданном сопротивлении нагрузки необходимую мощность сигнала при минимальных искажениях и максимальном КПД. При мощностях в сотни ватт и более в качестве усилительного элемента используются электронные лампы, при меньших мощностях—дискретные и интегральные транзисторы. При очень малых мощностях приме-

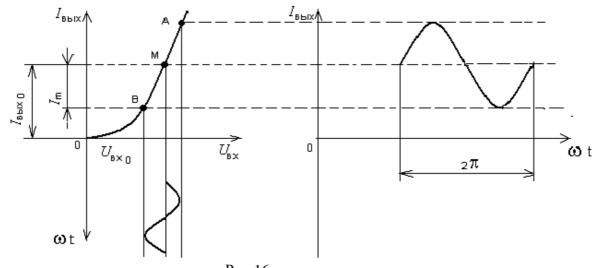
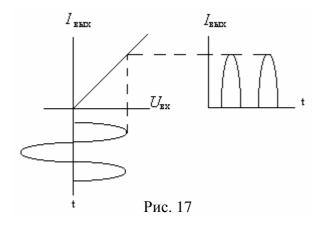


Рис.16



няется режим A (рис.16), обеспечивающий минимальные нелинейные искажения, но в таком режиме получается очень низкий КПД. В режиме A КПД каскада равен

$$\eta = \frac{P_{\sim}}{P_0} = \frac{U_{m\text{Bых}} I_{m\text{Bыx}}}{2I_{0\text{Bыx}} E} \le 0.25.$$
(24)

При включении активной нагрузки через трансформатор $U_{m \text{ вых}} \approx E$ и КПД может

приближаться к 40%.

При сравнительно больших мощностях применяют режимы В или АВ.

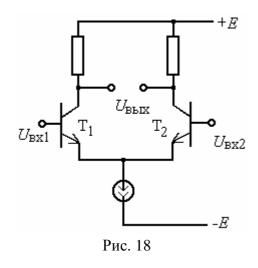
Режим B отличается таким выбором рабочей точки, при котором ток в выходной цепи существует в течение половины периода (рис.17). Половина времени существования тока (в угловом измерении) называется углом отсечки. В режиме B угол отсечки $\theta = \pi/2$.

Амплитуда первой гармоники $I_{m \text{ вых}} = I_{\text{max}}/2$, а среднее значение $I_{0 \text{ вых}} = I_{\text{max}}/\pi$, поэтому КПД в режиме B равен

$$\eta = \frac{\pi}{4} \frac{U_{m \text{ BMX}}}{E} \le 78,5\% \ . \tag{25}$$

Таким образом, режим B энергетически более выгоден, но приводит к большим нелинейным искажениям. Этот недостаток устраняется при использовании режима B в двухтактных каскадах.

В режиме AB угол отсечки $\theta > \pi/2$, что позволяет получить КПД 50...60% при меньших, чем в режиме B, искажениях.



Дифференциальные усилители

Простейшая схема дифференциального усилителя показана на рис. 18. Главная особенность схемы — ее симметрия. Интегральная технология позволяет получить одинаковые параметры транзисторов T_1 и T_2 и пары резисторов. Генератор тока обеспечивает постоянство тока в общей части эмиттерной цепи, поэтому потенциал эмиттера $U_{\mathcal{F}} = const$, т.е. можно считать, что эмиттеры для переменной составляющей заземлены.

Возможны два способа подачи входного сигнала. На рис. 19а показан вариант *синфазного* подключения входного сигнала, когда прираще-

ния напряжений на входах синфазны и равны: $\Delta U_{\rm Bx1} = \Delta U_{\rm Bx2}$. При этом коллекторные токи транзисторов изменяются одинаково (синфазно), напряжения на коллекторах равны, а выходное напряжение:

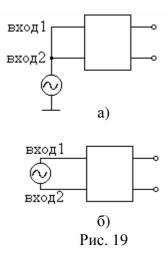
$$U_{\text{BMX}} = U_{\text{K31}} - U_{\text{K32}} = 0, \ \Delta U_{\text{BMX}} = \Delta U_{\text{K31}} - \Delta U_{\text{K32}} = 0,$$

т.е. синфазный сигнал дифференциальным усилителем подавляется.

На рис.19б показано *дифференциальное* включение входного сигнала. Сигналы на входах равны по величине и противофазны. Увеличение тока коллектора одного из транзисторов сопровождается равным по величине уменьшением тока другого транзистора. Соответственно, напряжения на коллекторах меняются противофазно, потому выходное напряжение равно:

$$U_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}} = \Delta U_{\scriptscriptstyle \mathrm{K}\ni2} - (-\Delta U_{\scriptscriptstyle \mathrm{K}\ni1}) = 2\Delta U_{\scriptscriptstyle \mathrm{K}\ni} = -KU_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}}$$
.

Здесь K — коэффициент усиления дифференциального сигнала. Таким образом, дифференциальный сигнал усиливается, а синфазный подавляется. Это весьма полезное свойство дифференциального усилителя, ибо сигнал всегда подключается дифференциально, а



помехи разного рода наводятся на оба входа одинаково, т.е. оказываются подключенными синфазно и подавляются.

До появления микроэлектроники схема дифференциального усилителя была известна, но ее применение ограничивалось неидентичностью ветвей, которая сводила на нет преимущества дифференциального усилителя и вызывала дрейф нуля в измерительных приборах на основе этой схемы.

В реальных микросхемах дифференциальных усилителей сохраняется некоторая неидентичность ветвей, потому синфазный сигнал подавляется не полностью. Коэффициент подавления синфазного сигнала — это отношение коэффициентов усиления дифференциального и синфазного сигналов, выраженное в децибелах:

$$K_{II} = 20 lg \left| \frac{K}{K_{\rm c}} \right|. \tag{26}$$

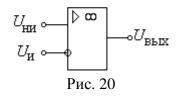
Дифференциальные усилители широко применяются в аналоговой схемотехнике, в частности, в качестве входных каскадов операционных усилителей.

Операционные усилители

Условные обозначения *операционного усилителя* (ОУ) показаны на рис.20; первое (в виде треугольника) обозначает ОУ вообще, второе предпочтительно в тех случаях, когда нужно указать номера всех выводов.

ОУ имеет два входа и один выход. Входы называются «инвертирую-

$$U_{\text{HM}} \circ U_{\text{H}} \circ U_{\text{Bbix}}$$



щий» и «неинвертирующий». Инвертирующий вход обозначен кружком или знаком минус. Название его говорит о том, что выходной сигнал противофазен сигналу, поданному на этот вход. Структурная схема ОУ показана на рис. 21.

Входным напряжением ОУ будем считать разность потенциалов между входами $U_{_{\mathrm{BX}}} = U_{_{\mathrm{HI}}} - U_{_{\mathrm{II}}}$.

Основные свойства идеального операционного усилителя:



Рис. 21

• выходное сопротивление равно нулю:

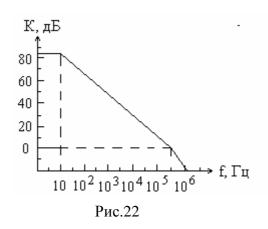
$$R_{\rm BMX} = 0; (27)$$

• входное сопротивление – бесконечно:

$$R_{\rm BX} = \infty, \ I_{\rm BX} = 0; \tag{28}$$

• коэффициент усиления бесконечно большой:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ни}} - U_{\text{и}}} = \infty . \tag{29}$$



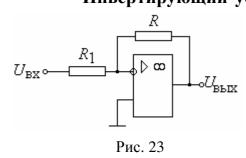
В реальном ОУ коэффициент усиления может достигать $K = 10^4...10^6$, входное сопротивление $R_{\rm BX} > 1$ МОм, коэффициент подавления синфазного сигнала $K_{II} > 60$ дБ. Типичная частотная характеристика ОУ при разомкнутой обратной связи показана на рис. 22.

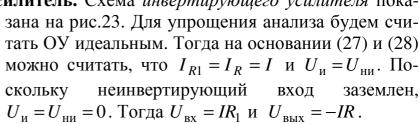
Для повышения устойчивости усиления (т.е. для предотвращения самовозбуждения) осуществляют частотную коррекцию с помощью внешних навесных элементов. Парамет-

ры операционного усилителя позволяют построить на его основе множество схем, выполняющих различные операции. Этим и объясняется его название и широкое применение. ОУ является основой аналоговой схемотехники.

Далее будут рассмотрены некоторые схемы на основе ОУ.

Инвертирующий усилитель. Схема *инвертирующего усилителя* пока-





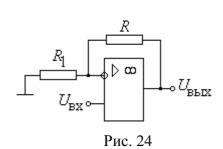
Знак минус поставлен с учетом того, что напряжения на инвертирующем входе и на выходе противофазны. Тогда коэффициент передачи инвертирующего усилителя равен:

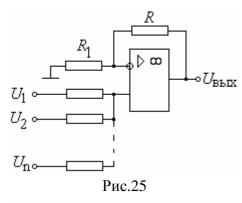
$$K = \frac{U_{\text{BMX}}}{U_{\text{BX}}} = -\frac{R}{R_1} \,. \tag{30}$$

Неинвертирующий усилитель. Схема *не- инвертирующего усилителя* показана на рис. 24.

Полагая ОУ идеальным, запишем:

$$I = I_{R1} = I_R, \; U_{_{\mathrm{BX}}} = IR_1; \; U_{_{\mathrm{BMX}}} = I(R + R_1).$$





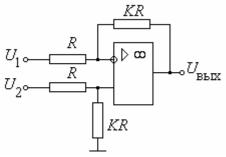


Рис.26

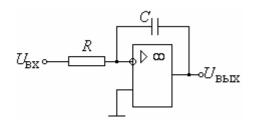
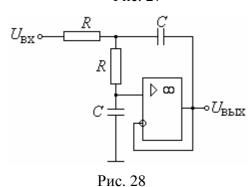
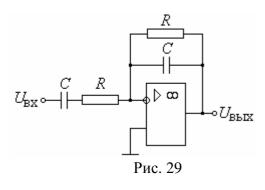


Рис. 27





Отсюда:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R}{R_1}.$$
 (31)

Если в этой схеме сделать R=0, $R_1 = \infty$, получится повторитель с K = 1.

Сумматор неинвертирующий. Схема *сумматора неинвертирующего* показана на рис. 25. Можно показать, что выходное напряжение пропорционально сумме входных напряжений:

$$U_{\text{BMX}} = \frac{(U_1 + U_2 + U_n)\left(1 + \frac{R}{R_1}\right)}{n}.$$
 (32)

Подбором сопротивлений R и R_1 можно

получить сумму $U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^{n} U_{i}$, а при неравных

входных сопротивлениях – взвешенную сумму.

Вычитающее устройство показано на рис. 26. Здесь выходное напряжение пропорционально разности:

$$U_{\text{BMX}} = K(U_1 - U_2). \tag{33}$$

Интегрирующий усилитель. *Интегрирующий усилитель* (рис. 27) получим, включая емкость в цепь обратной связи. Выходное напряжение будет пропорционально интегралу входного:

$$U_{\text{BbIX}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{BX}} dt \,. \tag{34}$$

Дифференцирующий усилитель получим, меняя местами R и C в схеме рис. 27. Тогда выходное напряжение будет пропорционально производной входного:

$$U_{\text{BbIX}} = -RC \frac{dU_{\text{BX}}}{dt}.$$
 (35)

Фильтр нижних частот показан на рис.28. Коэффициент передачи фильтра равен:

$$K = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}, f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$
 (36)

Полосовой фильтр. Схема полосового

фильтра показана на рис. 29.

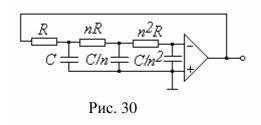
Коэффициент передачи фильтра:

$$K = \frac{F}{1+F^2},$$
 (37)
где $F = \frac{f}{f_0}, \ f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$

Аналоговый компаратор позволяет сравнивать два напряжения. ОУ работает в качестве компаратора, если цепь обратной связи разомкнута, а сравниваемые напряжения U_1 и U_2 подаются на инвертирующий и неинвертирующий входы. Выходное напряжение равно:

$$U_{\scriptscriptstyle
m BЫX} = E_{
m max}$$
 , при $U_1 > U_2$,
$$U_{\scriptscriptstyle
m BЫX} = E_{
m min}$$
 , при $U_1 < U_2$,

где E_{max} и E_{min} – уровни напряжения, определяющие два устойчивых состоя-



ния схемы.

В микроэлектронике часто используют автогенераторы на операционных усилителях (ОУ). Возможная схема такого генератора показана на рис. 30.

Рассмотренные примеры не исчерпывают всего многообразия возможных применений ОУ.

Особенности многокаскадных усилителей

Обычно усилители содержат несколько каскадов, т.е. являются многокаскадными. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_n. \tag{38}$$

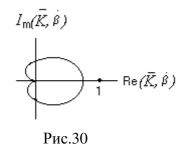
(Если коэффициенты рассчитываются в децибелах, то общий коэффициент равен сумме коэффициентов отдельных каскадов).

Сдвиг фаз, вносимый многокаскадным усилителем, равен суммарному сдвигу фаз отдельных каскадов:

$$\varphi_{\text{обш}} = \varphi_l + \varphi_2 + \ldots + \varphi_n. \tag{39}$$

Коэффициент частотных искажений равен произведению соответствующих коэффициентов отдельных каскадов:

$$M_{\text{общ}} = M_1 M_2 M_n.$$
 (40)



Соответственно, коэффициент частотных искажений, выраженный в децибелах, равен сумме коэффициентов частотных искажений в децибелах.

Коэффициент нелинейных искажений многокаскадного усилителя определяется, в основном, нелинейными искажениями, вносимыми оконечным каскадом.

Шумовые свойства многокаскадного усилителя определяются, прежде всего, шумами первого каскада.

Особого внимания заслуживает вопрос устойчивости усилителя с отрицательной обратной связью. Коэффициент передачи с учётом обратной связи равен K_{oc} = $K/(1-K\beta)$. Если $K\beta$ стремится к единице, то K_{oc} стремится к нулю. Физически это означает, что усилитель теряет устойчивость и самовозбуждается (превращается в генератор). Для того, чтобы не было самовозбуждения, должно выполняться условие:

$$K\beta < 1$$
 при $\varphi = 0$ или $\varphi = 2\pi n$, (41)

где φ — суммарный сдвиг фаз усилителя и петли обратной связи. Это условие называется балансом фаз. Баланс фаз определяет те частоты, на которых обратная связь становится положительной. Коэффициентом устойчивости называют значение глубины обратной связи $K_y = 1 - K\beta$ на частоте баланса фаз, т.е. частоте, где $\varphi = 0$ или $2n\pi$. Обычно считают приемлемым $K_y \ge 0,5...0,8$. Условие (41) в более общей форме называется критерием Найквиста и требует, чтобы амплитудно-фазовая характеристика усиления во всей области частот от 0 до ∞ не охватывала точку с координатой +1 на вещественной оси (рис.30).

МИНИ-ТЕСТ

1.Операционным называется усилитель электрических сигналов для выполнения операций

- 1) сложения;
- 2) вычитания;
- 3) умножения;
- 4) сложения, вычитания и умножения.

2. Операционные усилители используются для построения схем

- 1) генераторов;
- 2) схем телевизионной развертки;
- 3) стабилизаторов напряжения и тока;
- 4) генераторов, схем телевизионной развертки и стабилизаторов напряжения и тока.

3. Операционные усилители обладают

- 1) малым входным и большим выходным сопротивлением;
- 2) малым выходным и большим входным сопротивлением;
- 3) большим входным и малым выходным сопротивлением;
- 4) малым входным и выходным сопротивлением.

4. Операционный усилитель имеет

- 1) два входа и два выхода;
- 2) один вход и один выход;
- 3) два выхода и один вход;
- 4) два входа и один выход.

5. Операционный усилитель имеет большое входное сопротивление, так как на его входе включен

- 1) эмиттерный повторитель;
- 2) каскад на составном транзисторе;

- 3) двухтактный каскад;
- 4) дифференциальный каскад.

6. Схема сдвига уровня в ОУ предназначена для

- 1) коррекции частотной характеристики усилителя;
- 2) обеспечения нулевого постоянного напряжения в нагрузке при $U_{_{\mathrm{BX}}}=0$;
- 3) повышение выходной мощности;
- 4) повышения степени согласования с нагрузкой.

7. На вход ОУ можно подавать сигналы от

- 1) только от одного источника;
- 2) только от симметричного источника;
- 3) только от двух отдельных источников;
- 4) симметричного и двух отдельных источников.

8. Инвертор – это усилитель

- 1) не изменяющий фазы входного сигнала;
- 2) изменяющий фазу входного сигнала;
- 3) повышающий величину входного сопротивления;
- 4) повышающий величину выходного сопротивления.

9. В практике сигнал на вход ОУ подают

- 1) только на неинвертирующий вход;
- 2) только на инвертирующий вход;
- 3) на инвертирующий и неинвертирующий входы одновременно;
- 4) на неинвертирующий вход, а инвертирующий вход используют для введения ООС.

10. Коэффициент усиления ОУ

- 1) не более 100;
- 2) 100-1000;
- 3) менее 100;
- 4) более 1000.

11. Дифференциальный усилитель – это усилитель

- 1) усиливающий только синфазный сигнал;
- 2) усиливающий только разностный сигнал;
- 3) одновременно усиливающий суммарный и разностный сигнал;
- 4) не усиливает ни синфазный, ни разностный сигнал.

12. Дифференциальный сигнал – это

- 1) два входных сигнала одинаковых по уровню и по фазе;
- 2) два входных сигнала не одинаковых по уровню, но одинаковых по фазе;
- 3) два входных сигнала одинаковых по уровню и противоположных по фазе;
- 4) один сигнал, подаваемый одновременно на оба входа усилителя.

13. Токовое зеркало – это устройство для

1) повышения выходного тока ОУ;

- 2) выравнивания уровней входного и выходного токов ОУ;
- 3) управление выходным током ОУ, изменяя его входной ток;
- 4) стабилизации выходного тока.

14. Стабилизатор тока – это устройство для

- 1) повышения стабильности выходного тока ОУ при изменении нагрузки и входного напряжения;
- 2) повышения стабильности входного тока ОУ при изменении входного напряжения;
- 3) повышение коэффициента усиления синфазного сигнала;
- 4) коррекции частотной характеристики.

15. Динамическая нагрузка в дифференциальном усилителе

- 1) увеличивает сопротивление постоянному току и уменьшает переменному;
- 2) уменьшает постоянному и увеличивает переменному;
- 3) увеличивает одновременно постоянному и переменному токам;
- 4) уменьшает одновременно постоянному и переменному токам.

16. Качество дифференциального усилителя оценивается

- 1) только коэффициентом усиления разностного входного сигнала;
- 2) только коэффициентом усиления синфазного сигнала;
- 3) только коэффициентом подавления синфазного сигнала;
- 4) одновременно величиной всех трех коэффициентов.

17. Суммирующий ОУ позволяет складывать сигналы

- 1) только с одинаоквыми масштабными коэффициентами;
- 2) только с разными масштабными коэффициентами
- 3) как с одинаковыми, так и с разными масштабными коэффициентами;
- 4) подаваемые одновременно на оба входа ОУ.

18. Вычитающий ОУ усиливает

- 1) только при подаче входных сигналов одновременно на входы усилителя;
- 2) только при подаче синфазного сигнала на оба входа;
- 3) только при подаче двух одинаковых по уровню и по фазе сигналов;
- 4) только при подаче сигналов с разными масштабными коэффициентами.

19. При работе ОУ в линейном режиме напряжение на его выходе

- 1) возрастает с увеличением напряжения \hat{U}_{+} на прямом входе;
- 2) возрастает с увеличением напряжения U_{+} на прямом входе и напряжении U_{-} на инвертирующем;
- 3) возрастает с увеличением напряжения U_{+} на прямом входе и уменьшением напряжения U_{-} на инвертирующем;
- 4) одновременное уменьшение напряжения U_{+} на прямом входе и U_{-} на инвертирующем.

20. Выходной каскад ОУ должен обеспечивать

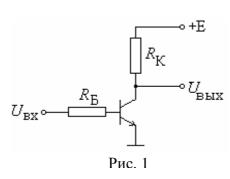
- 1) только высокую нагрузочную способность;
- 2) только малый уровень искажений;
- 3) только широкий динамический диапазон;

4) одновременно высокую нагрузочную способность, широкий дин мический диапазон и малый уровень искажений.	a-

ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

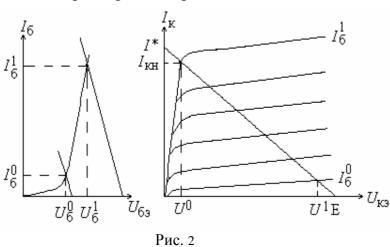
Ключ на биполярном транзисторе

Цифровыми интегральными схемами (ЦИС) называют микросхемы, ра-



ботающие с цифровыми сигналами. Обычно используется *двоичный код*, т.е. сигнал может принимать одно из двух значений, условно называемых «0» и «1». Мы будем рассматривать *положительную логику*, т.е. считать, что логическому нулю соответствует низкий, а логической единице — высокий уровень напряжения. Основа большинства ЦИС — *транзисторный ключ*.

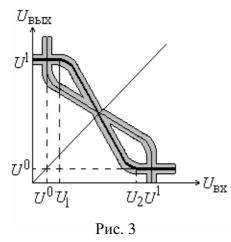
На рис.1 показана простейшая схема ключа на биполярном транзисторе. Пусть на вход подаются прямоугольные импульсы, т.е. чередование уровней логического нуля U^0 и логической единицы U^1 . Построив нагрузочные прямые на входной характеристике и на семействе выходных характеристик (рис.2), найдем значения U^0 и U^1 на входе и на выходе.



Из рис. 2 видно, что ток коллектора в режиме насыщения $I_{\text{кн}} \approx I^* = \frac{E}{R_{\text{к}}}$. Вследствие

падения напряжения на сопротивлении R_{δ} напряжения U_{δ}^{0} и U_{δ}^{1} меньше логических уровней на входе. Обычно R_{κ} и R_{δ} подбирают так, чтобы логические уровни на входе и на выходе были одинаковыми. При

 $U_{\rm BX} = U^0$ транзистор закрыт, ток коллектора мал, но напряжение на выходе соответствует уровню логической единицы и приближается к напряжению питания E. При $U_{\rm BX} = U^1$ транзистор открыт и насыщен, а выходное напряжение



 $U = U^0$. Это значит, что транзисторный ключ инвертирует логические сигналы, т.е. является инвертором. Это хорошо видно на *передаточной характеристике*, показанной на рис. 3.

Прямая передаточная характеристика показывает зависимость выходного напряжения от входного, на рисунке она показана жирной линией. Обратная зависимость $U_{\rm BX} = f(U_{\rm Bыx})$, показанная на том же графике и в том же масштабе, называется обращенной передаточной характеристикой. Обращенная характеристика откладывается в зеркаль-

ном отображении относительно вертикальной оси и поворачивается на 90°. Ко-

ординаты точек пересечения прямой и обращенной характеристик позволяют найти логические уровни U^0 и U^{-1} . Точкам изгиба соответствуют **пороговые напряжения** U_1 и U_2 . Помехоустойчивость ключа по отношению к статическим помехам определяется уровнями напряжения помех $U_{II}^{10} = U_1 - U^0$ и $U_{II}^{01} = U^1 - U_2$, способными вызвать ложное переключение из состояния логической единицы в состояние нуля и наоборот. Очевидно, чем больше расстояние между прямой и обращенной характеристиками, тем выше помехоустойчивость. Более полно помехоустойчивость определяется отношением $K_{II}^{01} = \frac{U_{II}^{01}}{\Delta U}$ и $K_{II}^{10} = \frac{U_{II}^{01}}{\Delta U}$, где $\Delta U = U^0 - U^1$ — размах логического сигнала. С учетом разброса параметров передаточная характеристика может быть задана не линией, а в виде зоны, что показано на рис. 3 серым цветом. Чем шире эта зона, тем хуже

Параметры цифровых интегральных схем

- 1. Логические уровни U^{0} и U^{1} и размах логического сигнала ΔU .
- 2. Уровни статической помехи U_{\varPi}^{01} и U_{\varPi}^{10} и коэффициент помехоустойчивости K_{\varPi} .
- 3. *Нагрузочная способность* (коэффициент разветвления по выходу) *п* –число однотипных ЦИС, которые можно подключить к выходу данной ЦИС. Чем выше нагрузочная способность, тем меньшее число логических элементов (ЛЭ) необходимо для построения сложной ЦИС.
- 4. *Коэффициент объединения по входу m* число однотипных ЦИС, которые можно подключить ко входу.
- 5. Среднее время задержки распространения $t_{3cp} = \frac{t_3^{01} + t_3^{10}}{2}$ характеризует быстродействие ЦИС и измеряется в наносекундах, t_3^{01} , t_3^{10} времена задержки распространения сигнала при переходе напряжения на выходе от U^0 к U^1 и наоборот.
- 6. Средняя потребляемая мощность $P_{cp} = \frac{P^0 + P^1}{2}$, где P^0 и P^1 мощность, потребляемая от источника питания в состоянии логического нуля и логической единицы соответственно.
- 7. $Pабота переключения <math>A = P_{cp} t_3$. Чем больше степень интеграции, тем меньшей удается сделать работу переключения.

помехоустойчивость.

Классификация логических элементов

Логические элементы классифицируют, прежде всего, по выполняемым функциям. Различные логические выражения могут принимать одно из двух значений: «истинно» или «ложно». Для обозначения истинности или ложности используют символы 1 и 0. Все возможные логические функции любого числа логических переменных можно образовать с помощью трех операций: логического отрицания (инверсии, операции НЕ), логического сложения (дизъюнкции, операции ИЛИ) и логического умножения (конъюнкции, операции И).

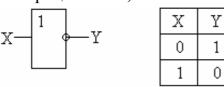


Рис. 4

Операция НЕ (инверсия) состоит в том, что входная переменная принимает на выходе инверсное значение. Суть логической операции удобно представлять в виде таблицы истинности, в которой X – входная величина, Y – выходная. Для операции НЕ таблица истинности имеет

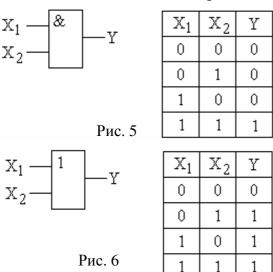
вид, приведенный на рис. 4.

В виде формулы операция НЕ записывается так:

1

$$Y = \overline{X}$$
.

Верхняя черта здесь обозначает отрицание и читается как «У равно не X». Логический элемент HE имеет только один вход и один выход и обозначается так, как показано на рис.4.



Операция И (логическое умножение, конъюнкция): $Y = X_1 X_2$.

Таблица истинности и условное обозначение элемента U показаны на рис.5.

Элемент U имеет **не менее двух** входов и один выход.

Операция ИЛИ (логическое сложение, дизъюнкция): $Y = X_1 + X_2$.

Таблица истинности и условное обозначение элемента ИЛИ показаны на рис. 6.

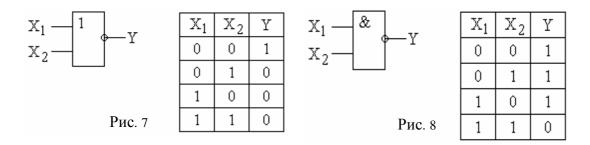
Логические элементы реализуют одну или несколько из перечисленных функций. Наибольшее распространение получи-

ли элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ. Операции ИЛИ-НЕ и И-НЕ являются логически полными: имея набор только элементов И-НЕ либо ИЛИ-НЕ, можно выполнить любую логическую операцию.

Операция ИЛИ–
$$HE: Y = \overline{X_1 + X_2}$$
.

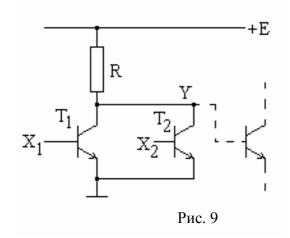
Таблица истинности и условное обозначение элемента ИЛИ-НЕ показаны на рис.7.

Операция И–НЕ: $Y = \overline{X_1 X_2}$. Таблица истинности и условное обозначение элемента *И–НЕ* показаны на рис.8.



СХЕМОТЕХНИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Транзисторная логика с непосредственными связями (НСТЛ). Схема показана на рис.9. Если на оба входа подан низкий уровень напряжения, т.е. $X_1 = X_2 = 0$, то оба транзистора закрыты, токи коллекторов малы, напряжение на



выходе схемы почти равно напряжению питания $U_{\rm K} \approx E$, т.е. Y=1. Если хотя бы на одном из входов будет высокий уровень напряжения (например, X_1 =1), то один из транзисторов открыт и насыщен, ток коллектора $I_{\rm KH} \approx I^* = \frac{E}{R}$, на коллекторе низкое остаточ-

R, на коллекторе низкое остато R ное напряжение, т.е. Y=0. Таким образом, схема НСТЛ выполняет операцию ИЛИ–HE. Достоинство схемы — простота и хорошее быстродействие. Напомним, что эмиттер-

ный переход кремниевого транзистора открывается при U_{69} = 0,6 В. Поскольку входные сигналы подаются непосредственно на базы, размах логического сигнала $\Delta U = 0.6$ В.

На рис. 9 пунктиром показан вход следующей схемы, являющийся нагрузкой для данной схемы. Большим недостатком НСТЛ является то, что при небольшом разбросе входных характеристик транзисторов ток нагрузки распределяется неравномерно. Это снижает надежность работы таких схем.

Схема РТЛ (транзисторная логика с резистивной связью) отличается от НСТЛ только наличием резисторов в базовых цепях (рис.10). В схемах РТЛ не сказывается разброс входных характеристик, размах входного сигнала увеличивается до 1,5...2 В, но резко уменьшается быстродействие, т. к. увеличивается время нарастания. Чтобы увеличить быстродействие, пытались применить схему РЕТЛ (резистивно-емкостная транзисторная логика), т.е. параллельно базовым резисторам подключить конденсаторы, как показано на рис.10 пунктиром. Во время переключения конденсаторы закорачивают резисторы, что уменьшает длительность переднего фронта импульса. Однако конденсаторы занимают большую площадь на подложке, что ведет к уменьшению степени интеграции. Кроме того, всем схемам с коллекторной связью присущ общий недостаток —

зависимость уровня логической единицы U^1 от числа нагрузок. Чем больше однотипных микросхем подключено к выходу, тем больший ток течет через резистор R в базовые цепи нагрузок, и тем меньше становится выходное напряжение $U_{\rm вых} = U^1 = E - IR$. Нагрузочная способность этих схем мала (n < 4). Все эти недостатки привели к отказу от схем с коллекторной связью и в современных микросхемах они не применяются.

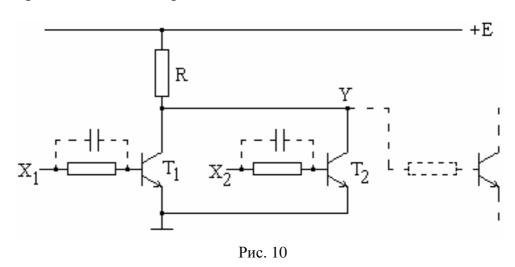
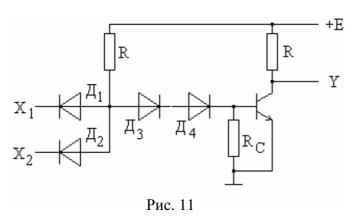


Схема ДТЛ (диодно-транзисторной логики) показана на рис. 11. Если на оба входа подан высокий положительный потенциал ($X_1 = X_2 = 1$), то входные диоды будут закрыты, ток от плюса источника питания потечет через Д₃ и Д₄ в базу транзистора. Транзистор переходит в режим насыщения; при этом напряжение коллектора уменьшается до величины остаточного напряжения $U_{\text{вых}} = E - I_{\text{кн}} R$, т.е. Y = 0.

Если хотя бы на одном входе низкий уровень (например, $X_1 = 0$), то входные диоды открыты и ток течет от плюса источника в коллектор предше-



ствующей схемы. Поскольку на открытом диоде падает $U^* = 0,6...0,7$ В, на базе транзистора с учетом диодов Д₃ и Д₄ будет отрицательный потенциал:

$$U_{69} = U^* - 2U^* = -U^* = -(0,6...0,7) \text{ B}.$$

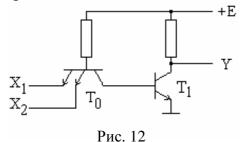
Транзистор закрыт, напряжение коллектора почти равно напряжению питания E. Таким образом, схема ДТЛ выполняет логическую операцию U–HE. Размах логического

сигнала $\Delta U \approx E$ и практически не зависит от нагрузки, т.к. ток нагрузки втекает в коллектор через диоды последующей схемы. Нагрузочная способность ДТЛ n=10, время задержки $t_3 = 10...15$ нс. Недостаток — много диодов, которые зани-

мают большую площадь на подложке (напомним: диоды – это транзисторы в диодном включении).

ТТЛ (**транзисторно-транзисторная логика**). Схема ТТЛ с простым инвертором показана на рис.12.

Сравнение рис. 11 и 12 показывает, что ТТЛ принципиально не отличается от ДТЛ. В качестве входных диодов используются эмиттерные переходы, а роль диода смещения выполняет коллекторный переход многоэмиттерного



транзистора. Транзистор T_1 так же, как в схеме ДТЛ, является инвертором. Схема выполняет логическую операцию U–HE. В отличие от ДТЛ вместо двух диодов смещения используется только один коллекторный переход, поэтому в закрытом состоянии транзистора T_1 на его базе будет не отрицательный, а нулевой потенциал, что незна-

чительно снижает помехоустойчивость. В реальных схемах вместо T_1 применяется сложный инвертор, компенсирующий этот недостаток. Иногда в сложном инверторе используют транзисторы с диодом Шоттки, что заметно повышает быстродействие. Такие схемы сокращенно называют ТТЛШ.

Многоэмиттерный транзистор занимает гораздо меньшую площадь, чем соответствующее количество диодов. Нагрузочная способность n>10, время задержки $t_3=3...10\,$ нс. Схемы ТТЛ и ТТЛШ широко используются в микроэлектронике. В качестве примеров можно назвать отечественные серии К155 (ТТЛ) и К555 (ТТЛШ) и соответствующие зарубежные аналоги SN74 и SN74LS.

Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ). Принципиальная схема показана на рис.13. Транзистор T_3 совместно с любым из входных транзисторов образуют переключатель тока. Схема переключателя тока аналогична схеме дифференциального усилителя, но на базу T_3 подано постоянное напряжение смещения U_0 , при котором T_3 открыт и находится в активном режиме. Ток коллекто-

ра в активном режиме равен $I_{\kappa} = \alpha I_{\Im} = \alpha I_{0} \exp\left(\frac{U_{69}}{\varphi_{T}}\right)$, т.е. сильно зависит от на-

пряжения U_{69} . Если на базе T_1 (или T_2) напряжение $U_{69}=U_0$, ток, текущий через R_0 , распределяется поровну между T_1 и T_3 . Если же напряжение на базе входного транзистора немного (на 0,1...0,15 В) выше или ниже U_0 , весь ток переключается соответственно в T_1 (T_2) или в T_3 . Потенциалы точек A и B при этом всегда противофазны. Эмиттерные повторители на транзисторах T_4 и T_5 обеспечивают согласование входных и выходных уровней последующего и предыдущего логических элементов. Напомним, что на открытом эмиттерном переходе падение напряжения $U^*=0,6$ В (при $T=300^\circ$ К). Если T_1 и T_2 закрыты, напряжение $U_A\approx E$ и на выходе эмиттерного повторителя T_5 уровень логической единицы $U^1=E-U^*$. Полагая, что на коллекторе открытого транзистора напряжение $U_K=U_{69}=U^*$ (граница между активным режимом и насытора напряжение $U_K=U_{69}=U^*$ (граница между активным режимом и насытора

щением), найдем уровень логического нуля: $U^0 = U^1 - U^* = E - 2U^*$. Размах логического сигнала равен $\Delta U = U^1 - U^0 \approx 0,7\,\mathrm{B}$. Поскольку транзисторы работают в активном режиме, схемы ЭСЛ обеспечивают малое время задержки $t_3 = 0,7...3\,\mathrm{Hc}$. Как видно из схемы, на одном из выходов выполняется логическая операция $U\Pi U$, а на другом – $U\Pi U$ –HE. Обычно в схемах ЭСЛ заземляется плюс источника питания.

Логические элементы с инжекционным питанием (И²Л)

Транзисторные логические элементы с инжекционным питанием (ТЛИП) называют также инжекционной интегральной логикой, откуда и воз-

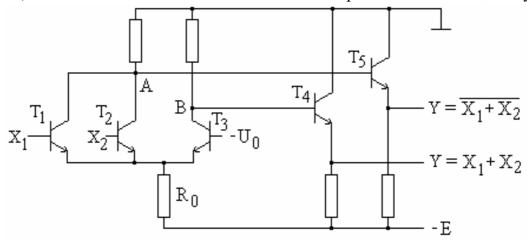
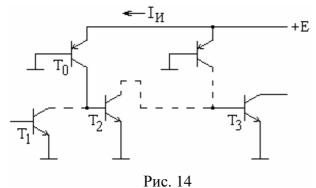


Рис. 13

никло нелепое, но общепринятое сокращение $И^2 Л$. Элементы ТЛИП в дискретном исполнении неизвестны, весьма специфичная схемотехника и технология

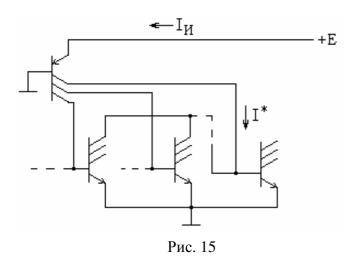


ТЛИП реализуются в больших интегральных схемах (БИС). Принцип работы ТЛИП поясняется рис. 14.

Транзисторы T_0 и T_2 — это простейший клапан (инвертор) с инжекционным питанием, а T_1 и T_3 относятся к предыдущей и последующей схемам. Транзистор T_0 с проводимостью p-n-p выполняет роль генератора тока, питающего цепь базы n-p-n-транзистора T_2 . Ток

 I_{II} создается инжекцией дырок из эмиттера p-n-p-транзистора, поэтому называется mоком uнжекции, а сам эмиттер называют uнжектором. Питание схемы через инжектор (т.е. без резисторов в цепи питания) позволяет существенно уменьшить напряжение питания. Из рис. 14 видно, что напряжение питания равно падению напряжения на инжекторном переходе $E = U^* \approx 0.6B$. По некоторым причинам в реальных схемах E = 1...1.5 В. Пусть на входе (на базе T_2) низкий потенциал (T_1 открыт). Тогда ток коллектора транзистора T_0 , равный αI_{II} , замыкается через T_1 и не течет в базу T_2 . Транзистор T_2 закрыт и на выходе инвертора (на базе T_3) будет высокий потенциал, т.е. выполняется логиче-

ская операция HE. Обычно параллельно соединяются несколько инверторов, тогда реализуется логическая операция ИЛИ-HE.



В схеме рис. 14 базы всех p-n-p-транзисторов заземлены, а эмиттеры подключены к шине +Е, поэтому в реальной схеме ТЛИП вместо нескольких p-n-p-транзисторов используют один многоколлекторный p-n-p-транзистор. Для развязки выходов, подключаемых к отдельным нагрузкам, n-p-n-транзисторы тоже делают многоколлекторными. В результате схема приобретает вид рис.15.

Каждый из коллекторных токов p-n-p-транзистора равен:

$$I^* = \frac{\alpha I_{M}}{n} \approx \frac{I_{M}}{n}$$
.

Конструктивно-технологическое своеобразие ТЛИП состоит в высокой степени интеграции. Это достигается тем, что примыкающая к подложке n-область выполняет роль и базы p-n-p-транзистора и эмиттеров всех n-p-n-транзисторов; базой n-p-n- и коллектором p-n-p-транзисторов является общая p-область. Разрез структуры ТЛИП показан на рис. 16.

Достоинствами ТЛИП являются: низкое напряжение питания; малая потребляемая мощность; высокая плотность упаковки; не нужны диэлектрические карманы и разделительная диффузия.

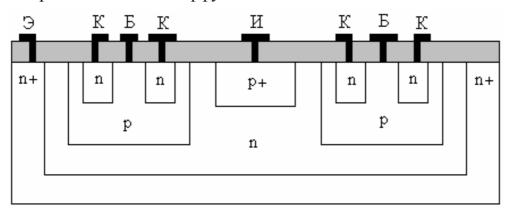


Рис. 16

Логические элементы на МДП-транзисторах

Ключ на МДП–транзисторах можно выполнить с резистивной нагрузкой, подобно ключу на биполярных транзисторах, но технологически целесообразнее применять так называемую динамическую нагрузку. Схема ключа показана на рис. 17. В качестве сопротивления нагрузки используется нагрузочный МДП–транзистор, затвор которого соединяется с истоком, т.е. $U_{3и2} = U_{cu2}$.

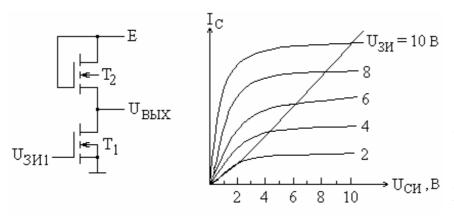


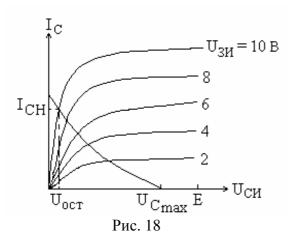
Рис. 17

Из рис. 17 видно, что точки, соответствующие равным напряжениям стока и затвора, образуют линию, которая является вольтамперной характеристикой нагрузочного транзистора. На рис. 18 показано, как нанести линию нагрузки на семейство стоковых ха-

рактеристик активного транзистора T_1 . Нагрузочный транзистор T_2 работает на пологом участке стоковой характеристики, поэтому его вольтамперную характеристику запишем в виде:

$$I_{\rm c} = 0.5b(U_{\rm cu2} - U_{02})^2$$

где b – удельная крутизна транзистора, U_{02} – напряжение отсечки нагрузочного



транзистора. Если на входе низкий уровень $U_{\rm 3ul} < U_{\rm 01}$, то нижний транзистор закрыт и ток стока равен нулю. Тогда на выходе ключа будет максимальное напряжение:

$$U_{\text{вых max}} = U_{\text{си1}} = E - U_{02}$$
.

Если на вход подан высокий уровень напряжения $U_{\rm cul}>U_{01}$, то ${\rm T_1}$ открыт, его сопротивление мало и все напряжение питания падает на верхнем транзисторе. Ток стока насыщения:

$$I_{\rm CM} = 0.5b(E - U_{02})^2$$
.

Выходное напряжение при этом будет минимальным (остаточное напряжение). При обычных значениях параметров транзисторов остаточное напряжение составляет 50...150 мВ.

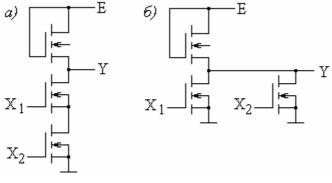


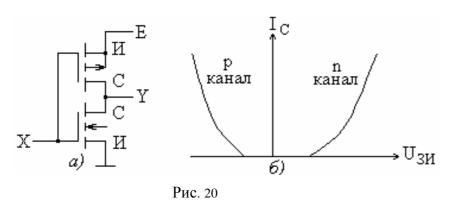
Рис. 19

При последовательном соединении нескольких активных транзисторов получим логический элемент U–HE (рис.19а). Параллельное соединение активных транзисторов позволяет выполнить логическую операцию UЛU–HE (рис. 19б). Наиболее часто используют логические схемы на МДП–транзисторах с индуцированным n-каналом.

Поскольку входной ток МДП-транзистора практически равен нулю, логические уровни не зависят от нагрузки. Нагрузочная способность ограничива-

ется только влиянием емкостей затвор-исток, т.е. уменьшением быстродействия.

Логические элементы на комплементарных МДП - транзисторах (КМДП)



Ключ КМДП (рис. 20а) состоит из пары транзисторов с различной проводимостью канала, при этом затворы *р*-канального и *п*-канального транзисторов соединены вместе. На рис. 20б показаны характеристики прямой передачи транзисто-

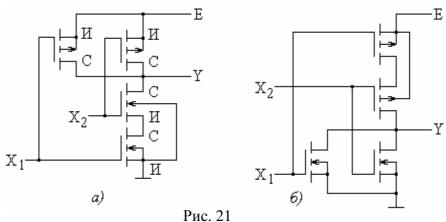
ров с индуцированным p-каналом и с индуцированным n-каналом.

Допустим, на вход подано положительное напряжение, превышающее пороговое. Тогда нижний транзистор открыт. Это же напряжение относительно общей шины приложено к затвору верхнего транзистора, но его исток соединен с плюсом источника питания, поэтому напряжение затвор-исток верхнего (p-канального) транзистора будет меньше порогового и верхний транзистор закрыт. На выходе будет очень низкое остаточное напряжение, т.е. Y=0. Поскольку верхний транзистор закрыт, тока практически нет, энергия от источника питания не потребляется. Если X = 0, т.е. на входе низкое напряжение, то нижний (n-канальный) транзистор закрыт. На затворе верхнего (p-канального) транзистора будет большое отрицательное (относительно истока) напряжение, верхний транзистор открыт. Выходное напряжение почти равно напряжению питания E, что соответствует состоянию логической единицы на выходе Y = I.

Таким образом, ключ КМДП отлично справляется с ролью инвертора, размах логического сигнала почти равен напряжению питания, но при любом логическом состоянии ток равен нулю, ибо один из транзисторов закрыт. Эта особенность схем КМДП — весьма малая потребляемая мощность — является большим достоинством по сравнению с ранее рассмотренными логическими элементами.

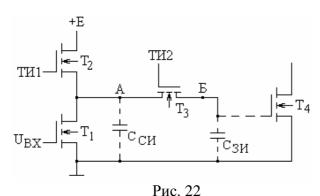
Для выполнения операции U–HE используется схема рис. 21а, в которой несколько нижних n-канальных транзисторов соединяются последовательно, а такое же число верхних p-канальных — параллельно.

Элемент *ИЛИ–НЕ* получается при параллельном соединении нижних и последовательном верхних транзисторов (рис.21б). В этом можно убедиться, рассматривая все возможные комбинации входных логических сигналов. Эти схемы сохраняют упомянутое преимущество ключей КМДП.



Динамическая логика на МДП-транзисторах

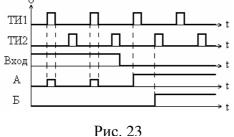
В схемах динамической логики на МДП-транзисторах (ДМДП) выход-



ная емкость $C_{\rm cu}$ логического транзистора и входная емкость $C_{\scriptscriptstyle 3 \text{И}}$ следующего транзистора используются для хранения информации. Это возможно потому, что разряд емкости через большое входное сопротивление следующего МДПпроисходит транзистора достаточно медленно. Схема инвертора ДМДП показана на рис. 22.

На затворы Т2 и Т3 подаются последовательности тактовых импульсов, причем ТИ1 и ТИ2 сдвинуты по фазе. При наличии тактового импульса ТИ1 пара транзисторов T_1 и T_2 работает как обычный инвертор, т.е. в точке А будет либо небольшое остаточное напряжение, либо напряжение $U_A = E$. В промежутке между импульсами ТИ1 транзистор Т2 закрыт, мощность от источника питания не потребляется, но соответствующий уровень напряжения в точке A сохраняется емкостью $C_{\rm cu}$.

Некоторое различие уровней логического нуля при наличии или отсутствии импульса ТИ1 устраняется ключом Т₃. При приходе импульса ТИ2 ключ



открывается и на выходе, т.е. на емкости C_{30} сле-→ t дующего логического элемента устанавливается * t напряжение $U^0=0$ либо $U^1=E$. Схемы ДМДП обеспечивают выигрыш в потребляемой мощности, определяемый скважностью импульсов. Работа схемы ДМДП иллюстрируется рисунком 23.

Сравнение параметров основных типов интегральных логических схем

Каждый из рассмотренных типов логических схем имеет свои достоинства и недостатки. Обобщенным параметром является средняя работа переключения $A_{cp} = P_{cp} t_3$. При заданной работе переключения хорошее быстродействие связано с большой потребляемой мощностью и наоборот. Параметры некоторых серий цифровых ИС представлены в табл.1.

Таблина.1

						тиолиции
Серия и	E, B	ΔU , B	U_{Π} ,B	t_3 HC	$P_{\rm cp}$, м ${ m B}{ m T}$	Коэф. раз-
тип логики	,	_0,5	- 117	.,	Cp ⁷	ветвления – n
К500, ТЛЭС	-2	0,67	0,125	2,9	45	15
К155, ТТЛ	5	2	0,4	22	27	10
555, ТТЛШ	5	2,2	0,5	20	7,5	10
H^2 Л	0,7	0,6	0,05	0100	0,010,1	5
К501, р-МДП	-27	8,5	1	>200	200	30
К564, КМДП	315	E-0,01	1,5	80	0,0001	>100

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТРИГГЕРЫ

Классификация триггеров

В отличие от рассмотренных комбинационных логических схем, триггеры обладают памятью. Последующее состояние триггера определяется не только комбинацией входных сигналов, но и предыдущим состоянием.

По функциональным возможностям различают: триггеры с раздельной установкой нуля и единицы (RS-триггеры); триггеры задержки (D-триггеры); триггеры со счётным входом (T-триггеры); универсальные триггеры (JK-триггеры).

По способу приема информации различают: асинхронные, которые меняют своё состояние при изменении входных информационных сигналов; синхронные или тактируемые, которые меняют своё состояние в соответствии с входными сигналами, но только при поступления синхроимпульса. Синхронные могут быть статическими, они управляются уровнями потенциалов или динамическими, которые реагируют на фронты синхроимпульсов (на перепады уровней).

RS-триггеры

Условное обозначение *RS*-триггера показано на рис.24. Вход S (set) – вход установки триггера в состояние единицы. Вход R (reset) – вход установки в состояние нуля. Триггер имеет два выхода – прямой Q и инверсный \overline{Q} . Принцип работы соответствует таблице истинности, показанной на рис.14.1.

В таблице Q^{n+1} и Q^n обозначены последующее и предыдущее состояния триггера. Работу триггера можно описать также уравнением

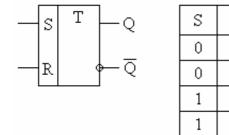


Рис. 24

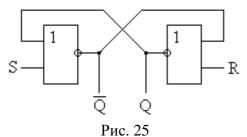
$$Q^{n+1} = S + \overline{R}Q^n. \tag{1}$$

Из таблицы и уравнения (1) видно, что при S=1, R=0 триггер установится в состояние Q=1; при R=1, S=0 состояние на прямом выходе Q=0; при S=R=0 триггер сохраняет предыдущее состояние. Комбинация S=R=1 является запрещенной, так как приводит к неопределенности: триггер мо-

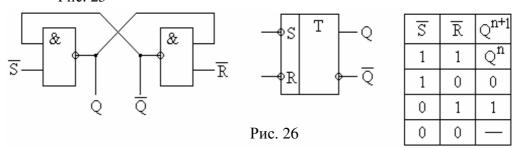
жет случайно принимать любое из двух состояний.

1

RS-триггер можно построить на двух элементах ИЛИ-НЕ, соединяя их



как показано на рис. 25. Другой вариант - RS-триггер на двух элементах V-HE показан на рис. 26. На вход такого триггера нужно подавать инвертированные сигналы \overline{S} и \overline{R} либо дополнить схему инверторами на входах. Запрещенным состоянием является $\overline{S} = \overline{R} = 0$.

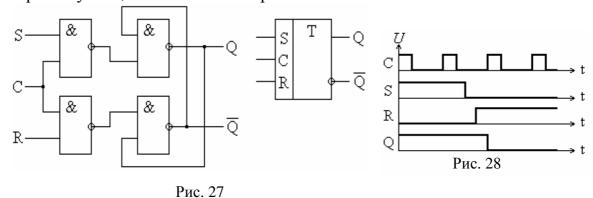


Тактируемый триггер (*RST*-триггер)

RST-триггер образуется при дополнении RS-триггера двумя элементами U–HE (рис. 27). Буквой «C» обозначен вход тактирующих импульсов. Состояние на выходе определяется формулой:

$$Q^{n+1} = CS + \overline{RC} Q^n. (2)$$

При отсутствии тактового импульса (C=0) триггер не реагирует на сигналы по входам S и R. Срабатывание триггера происходит при поступлении синхроимпульса, как показано на рис.28.



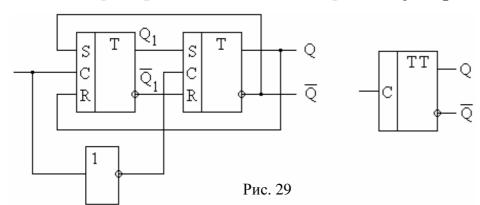
Триггер со счётным входом (Т-триггер)

T-триггер является двухступенчатым и состоит из двух RST-триггеров и одного инвертора. Структура и условное обозначение показаны на рис. 29.

Состояние на выходе определяется формулой:

$$Q^{n+1} = CQ^n + \overline{C}\overline{Q}^n. (3)$$

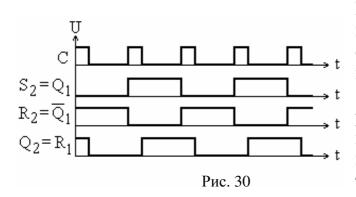
Т-триггер имеет один вход C, причём $C_1 = \overline{C}_2$. Если $C_1 = 0$ и $C_2 = 1$, то



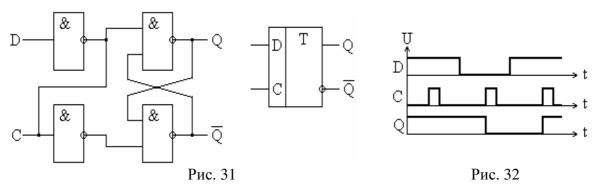
 $S_1 = \overline{Q}$ и $R_1 = Q$. Первый триггер (ведущий) подготовлен к срабатыванию, но не сработает до те пор, пока $C_1 = 0$. При приходе тактового импульса $C_1 = 1$, но $C_2 = 0$. Ведущий

триггер срабатывает (меняет своё состояние), но ведомый (второй) сохраняет своё состояние до окончания тактового импульса и срабатывает по окончании тактового импульса. В результате *Т*-триггер срабатывает от каждого приходящего импульса, в момент его окончания, т.е. реагирует на задний фронт каждого входного импульса.

В англоязычной литературе вместо терминов «ведущий» и «ведомый» используют «master» (хозяин) и «slave» (раб), откуда и название MS-триггер.



Важно заметить, что T-триггер используется для счета числа импульсов. Он делит частоту повторения импульсов на два, поэтому цепочка T-триггеров является основой для реализации делителей частоты повторения импульсов и счетчиков импульсов. Временная диаграмма работы T-триггера показана на рис.30.



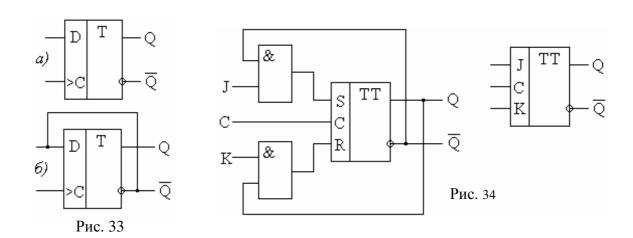
Триггер задержки (*D*-триггер)

Структура и условное обозначение *D*-триггера показаны на рис. 31.

Анализ работы схемы D-триггера показывает, что сигнал на выходе повторяет сигнал на информационном входе D, но с задержкой до прихода синхроимпульса (рис.32). Название D-триггера — от английского «delay» (задержка). Состояние на выходе определяется формулой:

$$Q^{n+1} = CD + \overline{C} Q^n . (4)$$

Динамический D-триггер строится на основе трёх RS-триггеров. Условное обозначение динамического D-триггера, срабатывающего от переднего фронта (перепада 01) показано на рис. 33а. Такие динамические D-триггеры часто используют в качестве T-триггеров, для этого их подключают как показано на рис. 33б.



Универсальный ЈК-триггер

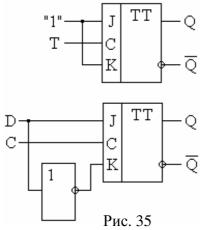
Структура и условное обозначение JK-триггера показаны на рис.34. Принцип работы JK-триггера соответствует формуле (5) и таблице 2.

$$Q^{n+1} = J\overline{Q}^n + \overline{K}Q^n. (5)$$

Таблица 2

C^n	J^n	K^n	Q^{n+1}	Режим
0	любое	любое	Q^n	хранения
1	0	0	Q^n	хранения
1	1	0	1	установки «1»
1	0	1	0	установки «0»
1	1	1	\overline{Q}^n	переключения

При C=0 триггер не реагирует на сигналы по входам J и K и сохраняет предыдущее состояние. При C=1 триггер работает как RS-триггер, но в отличие



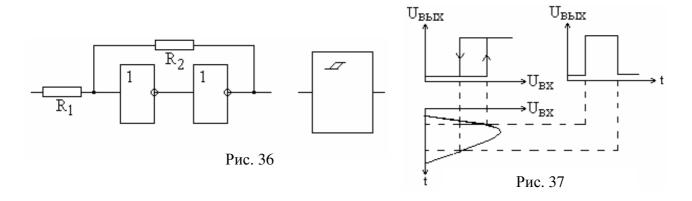
от него не имеет запрещенного состояния: при C=J=K=1 происходит переключение, т.е. триггер меняет своё состояние на противоположное. JK-триггер является универсальным. Он может использоваться в качестве RS-триггера, D-триггера, T-триггера при соответствующем включении (рис.35).

Триггер Шмитта

Триггер Шмитта можно построить на двух инверторах. Структура и условное обозначение показаны на рис. 36.

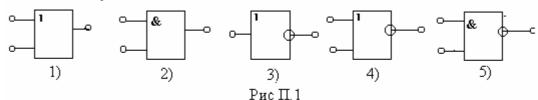
В отличие от ранее рассмотренных триггеров

триггер Шмитта не обладает памятью. Его передаточная характеристика (рис.37) имеет вид петли гистерезиса с двумя пороговыми напряжениями $U_{\Pi 1}$ и $U_{\Pi 2}$. Ширина петли гистерезиса $\Delta U_{\Gamma} = (U^1 - U^0) \frac{R_1}{R_2}$, где U^1 и U^0 – логические уровни на выходе. Триггер Шмитта используется для формирования прямоугольных импульсов из напряжения любой формы, как показано на рис.37.

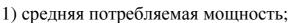


МИНИ-ТЕСТ

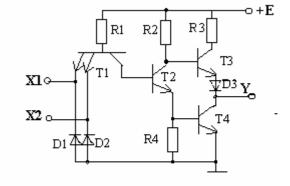
1.Укажите условное обозначение логического элемента 2 ИЛИ-НЕ.



- 2.Найдите по передаточной характеристике значение (рис.П.2) уровня логической единицы.
- 3. Найдите по передаточной характеристике (рис. П.2) перепад логических уровней.
- 4. Укажите параметр, зная который можно оценить быстродействие логического элемента.



- 2) средняя работа переключения;
- 3) среднее время задержки распространения.
- 5. Укажите параметр, зная который можно оценить экономичность логического элемента.
 - 1) средняя потребляемая мощность;
 - 2) средняя работа переключения;
 - 3) среднее время задержки распространения.
- 6. Для схемы на рис. П.3 определите операцию, которую выполняет логический элемент.
 - 1) И-НЕ;
 - 2) ИЛИ-НЕ;
 - 3) ИЛИ;
 - 4) И.
- 7. На входы схемы (рис. П.3) подаются сигналы X1=0 и X2=0. В каком состоянии оказываются эмиттерные переходы транзистора T1?



Ивых,В

5 4

3

2

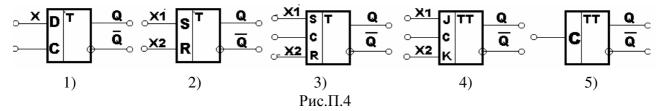
n

Рис.П.2

Рис. П.3

- 1) в открытом (прямое включение);
- 2) в закрытом (обратное включение).
- 8. На входы схемы (рис. П.3) подаются сигналы X1=1 и X2=0. В каком состоянии оказываются транзисторы Т2 и Т4?
 - 1) в открытом (прямое включение);
 - 2) в закрытом (обратное включение).
- 9. На входы схемы (рис. П.3) подаются сигналы X1=1 и X2=1. В каком состоянии оказывается транзистор Т3?
 - 1) в открытом (прямое включение);
 - 2) в закрытом (обратное включение).

- 10. В цифровых микросхемах используются различные базовые логические элементы. Укажите, какой из них является самым быстродействующим.
 - TTЛ;
 - 2) ДТЛ;
 - 3) ЭСЛ;
 - 4) МДП-логика;
 - 5) КМДП-логика;
 - 6) И²Л.
- 11.Укажите на рис. П.4. условное обозначение синхронного RSTтриггера.



- 12. Какие триггеры на рис.П.4 относятся к двухтактным?
- 1) 1, 2, 3;
- 2) 4, 5;
- 3) 3, 4.
- 13. Какой из триггеров на рис.П.4. называется триггером задержки?
- 14. Какой из триггеров на рис.П.4. называется асинхронным?
- 15. На универсальный ЈК-триггер поданы сигналы X1=1, X2=1. Каким образом сработает триггер при приходе синхроимпульса?
 - 1) Переключится в состояние логической единицы;
 - 2) Переключится в состояние логического нуля;
 - 3) Проинвертирует предыдущее состояние;
 - 4) Сохранит предыдущее состояние.

ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Современные методы обработки информации непрерывно усложняются и не могут быть реализованы в рамках существующих микроэлектронных систем. Проблема может быть решена путем применения приборов функциональной электроники. Отличительной чертой приборов функциональной электроники являются несхематические принципы их построения.

Традиционная схемотехническая ячейка (будь это логическая ячейка или ячейка памяти) состоит из большого количества статических неоднородностей. Под статической неоднородностью понимают локальную область на поверхности или в объеме среды с отличными от ее окружения свойствами, создаваемую в результате строго определенных технологических процессов. Совокупность состояния таких статических неоднородностей позволяет генерировать, управлять или хранить информацию. Деградация статической неоднородности немедленно приводит к потерям или сбоям в процессе обработки информации. Это и есть схемотехническая микроэлектроника, или электроника статических неоднородностей. В этом случае устройства обработки и хранения информации реализуются на определенных схемотехнических решениях.

В конце 70-х гг. минувшего столетия возникла идея использовать динамические неоднородности в процессах обработки и хранения информации. Динамическая неоднородность (ДН) представляет собой локальный объем на поверхности или внутри среды с отличными от ее окружения свойствами, которая не имеет внутри себя статических неоднородностей и генерируется в результате определенных физико-химических процессов. Динамическая неоднородность может быть локализирована или перемещаться по рабочему объему континуальной среды в результате взаимодействия с различными физическими полями или динамическими неоднородностями такой же или другой физической природы. В процессе перемещения динамической неоднородности может осуществляться, например, перенос информации. Деградация динамической неоднородности не приводит, как правило, к потерям или сбоям в процессах

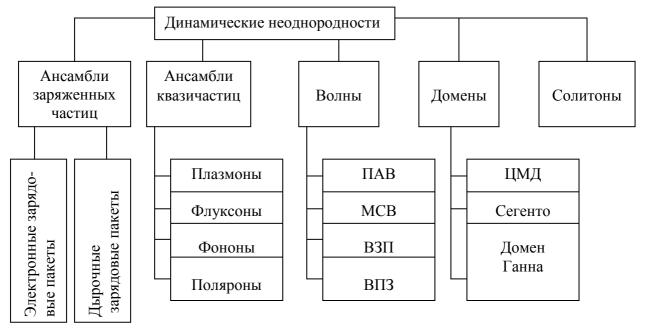


Рис. 1

обработки информации.

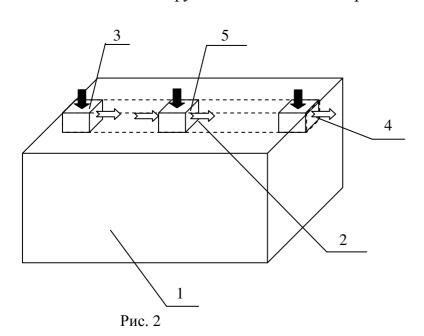
Известно большое количество динамических неоднородностей различной физической природы. Это ансамбли заряженных частиц и квазичастиц (зарядовые пакеты, флуксоны и т.п.), домены (электрические домены, домены Ганна, цилиндрические магнитные домены (ЦМД) и т.п.), динамические неоднородности волновой природы (поверхностные акустические волны (ПАВ), магнитные статические волны (МСВ)) и т.д. (рис.1).

Таким образом, функциональная электроника представляет собой область интегральной электроники, в которой изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных средах в совокупности с физическими полями, а также создаются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для обработки, генерации и хранения информации.

Анализируя приборы функциональной электроники, можно выделить общие элементы, характерные для всех конструкций (рис. 2). Это, прежде всего континуальная среда 1, в которой можно создать как статические, так и динамические неоднородности. Среда может находиться в любом агрегатном состоянии, однако, в основном используется твердое тело. По своим физикохимическим свойствам среда должна быть однородной на всем тракте распространения информационного сигнала - динамической неоднородности 2. Генератором ДН 2 служит статическая неоднородность 3. Считывание и вывод информации из канала осуществляет детектор - статическая неоднородность 4. Как правило, детектор и генератор ДН используют прямой и обратный физические эффекты. Управление сигналом, ввод в него нужной информации, ее направленный перенос, регулирование скорости передачи осуществляется статической неоднородностью 5.

Размер ДН зависит от ее физической природы и может иметь характерное значение от долей микрона (домены, зарядовые пакеты) до размера атомов (спиновые устройства).

В изделиях функциональной электроники перенос информации, как пра-



вило, осуществляется в континуальной среде, а не в линиях межсоединений. Они выполняют функции вспомогательных связей.

В зависимости от типа используемой ДН, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают направления в функциональной электронике, например: функциональная акустоэлектроника, функциональная магнито-

электроника, функциональная оптоэлектроника, функциональная диэлектрическая электроника, молекулярная электроника и т.п.

Функциональная акустоэлектроника

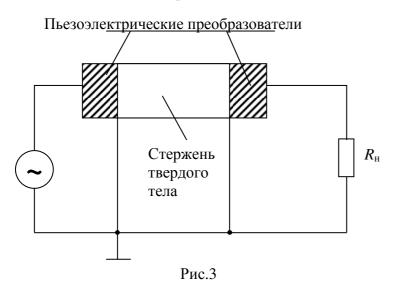
Функциональная акустоэлектроника - это направление функциональной электроники, в котором исследуются акустоэлектронные эффекты и явления в различных твердых континуальных средах (пьезоэлектриках, пьезополупроводниках, сложных слоистых средах), а также возможность создания изделий электронной техники для обработки, передачи, хранения информации с использованием ДН акустической и/или акустоэлектронной, акустооптической природы.

К акустоэлектронным явлениям и эффектам относятся:

- генерация, распространение, преобразование и детектирование объемных и поверхностных акустических волн (ПАВ);
 - преобразование электрического сигнала в акустический и обратно;
 - электронное поглощение и усиление акустических волн;
 - акустоэлектронные и акустомагнитные эффекты, акустопроводимость;
- нелинейные акустоэлектронные явления: генерация гармоник, параметрическое и супергетеродинное усиление звука, акустоэлектронные домены;
- взаимодействие света и звука в твердых телах, дифракция, модуляция и сканирование света звуком.

В акустоэлектронных устройствах используются явления, обусловленные механическими колебаниями твердого тела. В этих устройствах электрические сигналы преобразуются в (механические) акустические путем использования обратного пьезоэффекта, суть которого состоит в изменении размеров твердого тела при приложении к нему электрического поля. Если электрическое поле изменяется с частотой f, то в твердом теле возникают акустические колебания, скорость распространения которых равна $v_{\rm ak} = 10^5$ см/с. Для преобразования акустических колебаний в электрические используется прямой пьезоэффект, при котором под воздействием механических колебаний на поверхности твердого тела образуются электрические заряды с противоположными знаками.

На этом принципе основано действие ультразвуковой линии задержки



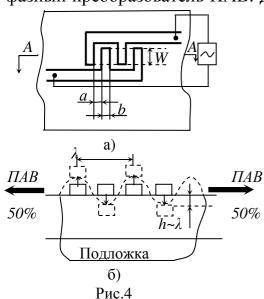
(рис. 3). При подаче на вход радиоимпульса с частотой f в стержне возникает акустическая волна, которая за время $\tau=1/v_{\rm ak}$ достигает выходного преобразователя, преобразующего акустический сигнал в электрический. Изменяя длину стержня, можно регулировать длительность задержки радиоимпульса.

В однородной среде со свободной плоской поверхностью существуют поверхностные

акустические волны (ПАВ). По вектору поляризации волн ПАВ бывают двух типов: для вертикальной поляризации характерно расположение вектора колебательного смещения частицы среды в перпендикулярной границе плоскости; для горизонтальной поляризации вектор смещения частицы среды параллелен границе и перпендикулярен направлению распространения волны.

В германии, кремнии и металлах акустоэлектрический эффект незначителен. Зато он гораздо сильнее выражен в пьезополупроводниках, к которым относятся, к примеру, сульфид кадмия CdS, сульфид цинка ZnS, антимонид индия InSb, арсенид галлия GaAs и некоторые другие вещества. При интенсивности звука 1 Вт/см² ЭДС достигает нескольких вольт на один сантиметр расстояния между электродами.

Возбуждение динамических неоднородностей в виде акустической волны в пьезоэлектрике осуществляется с помощью вложенных друг в друга групп электродов. Данная система электродов получила название встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Другое название такой системы электродов - двухфазный преобразователь ПАВ. Две группы чередующихся электродов соедине-



ны шинами, которые в свою очередь подключены к источнику напряжения. Топология ВШП показана на рис. 4а, а на рис. 4б - схема возникновения акустических волн (сечение АА).

При подаче на ВШП напряжения каждая пара электродов возбуждает поверхностную акустическую волну. Если период преобразователя (a+b) равен длине ПАВ, то возникает явление акустического синхронизма. Волны, возбуждаемые каждой парой электродов, имеют одинаковую фазу, и происходит их когерентное сложение.

Суммирование происходит за счет локальных деформаций, образующихся под промежутками между электродами. Образовавшаяся деформация начинает перемещаться в оба направления и достигает следующих промежутков как раз в тот момент, когда полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и вызовет деформацию под своими электродами.

Чем больше штырей содержит преобразователь, тем больше усиление ПАВ.

Преобразователь является частотно-избирательным элементом. Его АЧХ имеет максимум на так называемой частоте синхронизации или центральной (рабочей) частоте, которая определяется выражением: $f_0 = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2(\,a+b\,)} = \frac{V}{d} \ ,$

$$f_0 = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2(a+b)} = \frac{V}{d} ,$$

где d = 2(a + b) — период геометрической структуры электродов.

Большое значение имеет топологический размер W или апертура, определяющая степень перекрытия ВШП. Обычно выбирают значение апертуры $W \sim 100\lambda$. Апертура определяет форму импульсного отклика ВШП. Конструктивно ВШП выполняются в виде тонкопленочных металлических электродов (Au, Al). Толщина электродов h определяется технологией и обычно h < a.

Исследовано несколько способов управления прохождением динамических неоднородностей по тракту передачи информации. Так, если используется только ПАВ, то для управления можно использовать интерференцию, дифракцию, отражение, преломление и т.д. Можно варьировать параметры звукопровода, изменяя такие характеристики процесса распределения, как скорость ПАВ, дисперсию, удельное затухание.

Наиболее распространенным методом является управление акустическим трактом путем изменения топологии его элементов. Эти элементы позволяют сформировать каналы распространения ПАВ. К таким элементам относится многополосковый ответвитель (МПО), который конструктивно выполняется в виде системы пленочных металлических электродов, нанесенных на подложку. С помощью МПО можно переизлучать энергию из одного канала в другой, раздваивать акустический канал, разворачивать волновой фронт в обратном направлении.

Управление осуществляется также изменением граничных условий распространения ПАВ или изменением электрофизических свойств материала звукопровода.

Детектирование динамических неоднородностей является физическим процессом, обратным их генерации. Детектор ПАВ представляет собой ВШП.

Детектирование можно осуществить, управляя топологией электродов или электрофизическими свойствами подложки.

В табл. 1 приведена классификация устройств функциональной акустоэлектроники.

Таблица 1

Изделия функциональной акустоэлектроники															
Линейные										Нели	инейн	ные			
Линии з	задерх	кки		ойства ч й селеки	а час- Генера- К		Кон- воль- веры		Пам	иять		Эурье цессо			
Однократной задержки Многоотводные	Дисперсионные	Регулируемые	Трансверсальные полосовые фильтры	ПАВ-резонаторы	Дисперсионные фильтры	На ПАВ-резонаторах	На линиях задержки		Корреляторы	Устройства свертки	A3Y	Экзотические АЗУ	Резонансные	Интерференционные	ЛЧМ - преобразования

Линии задержки (ЛЗ) предназначены для временной задержки сигналов без заметных их искажений. Линии задержки на ПАВ обычно вносят затухания 0,5-1,5 дБ. Верхняя частота, на которой работают такие линии, достигает 2 ГГц. Относительная полоса пропускания может быть весьма различной: от долей процента до 100%. Длительность задержки в зависимости от расстояния между ВШП и от конструкции составляет единицы-сотни микросекунд. Задержка может быть фиксированной или регулируемой. На торцы звукопровода обычно наносят звукопоглощающие покрытия, чтобы уменьшить отражение волн.

Динамический диапазон линий задержки 80-120 дБ. Для хорошей работы линии задержки важна температурная стабильность её параметров. Температурный коэффициент задержки (ТКЗ), близкий к нулю, получают, либо применяя специальный материал для звукопровода (например, кремний с примесями фосфора), либо делая звукопровод из двух частей, имеющих ТКЗ разного знака, что создает взаимную компенсацию. Для увеличения времени задержки путь волны делают в виде ломанной линии, либо соединяют последовательно несколько линий задержки (многоотводные ЛЗ). Регулируемые линии задержки имеют несколько ВШП, расположенных на разных расстояниях. Включая тот или иной ВШП, можно изменять время задержки.

Устройства частотной селекции представляют собой процессоры, предназначенные для выделения необходимых сигналов на фоне шумов и помех. К ним относятся фильтры, резонаторы и т.д.

 Φ ильтры на ПАВ по природе функционирования являются полосовыми со средней частотой, зависящей от размера поверхностных штырей. Изменяя количество штырей, можно изменять полосу пропускания фильтра $\Delta f = f_0/N$, где N – число пар штырей.

Для повышения избирательности иногда применяют каскадное включение нескольких фильтров. Размеры электродов у фильтров на частоты 1-2 ГГц. составляют единицы микрометров и менее. Подобные микрофильтры изготавливаются методами фото-, рентгеновской или электронно-лучевой литографии.

Фильтры на ПАВ имеют коммерческое применение на частотах от 30 МГц до 3 ГГц.

Кварцевый резонатор представляет собой своеобразный конденсатор, между обкладками которого расположена кварцевая пластина. При подаче на обкладки переменного напряжения в пластине возбуждаются объемные акустические волны, которые вызывают ее попеременное сжатие и расширение с некоторой частотой, определяемой размерами кварца, возникает механический резонанс, при котором резко возрастает амплитуда механических колебаний, что ведет к уменьшению электрического сопротивления резонатора, т.е. резонатор ведет себя как колебательный контур, состоящий из индуктивности и емкости, несмотря на то, что в объеме кварцевой пластины нельзя выделить какие-либо локальные области, соответствующие индуктивности и емкости. В отличие от *LC*-контуров, резонаторы обладают более высокой добротностью, не термочувствительны и очень компактны.

В новом поколении сотовой телефонии IMT-2000 предполагается осуществить разделение доступа с помощью акустоэлектронного конвольвера. *Конвольвер* это шестиполюсник, формирующий свертку двух сигналов: входного и опорного, используя нелинейные свойства среды распространения упругих волн.

Акустическое запоминающее устройство (АЗУ) предназначено для запоминания сигналов, например, в процессе их корреляционной обработки. Операция записи информации осуществляется путем нелинейного взаимодействия акустической несущей волны с опорной акустической или электрической волной.

Aкустоэлектронные Фурье-процессоры (АЭФП) представляют собой аналоговые преобразователи для вычисления дискретного и непрерывного преобразования Фурье.

Заметим, что АЭФП выполняют операции, которые можно отнести к функциям высшего порядка.

Перечислим основные из них:

- · синтез частот в диапазоне 500 МГц с малым временем переключения при смене частот;
 - демодуляция частотно-манипулированных сигналов;
 - программируемая согласованная фильтрация;
 - преобразование временного масштаба;
 - · нелинейная обработка сигналов для детального исследования;
 - интегральные преобразования Гильберта, Меплина, Френеля, Лапласа.

Полупроводниковая функциональная электроника

Основным типом динамических неоднородностей здесь являются ансамбли заряженных частиц или зарядовые пакеты, сформированные из электронов или дырок.

Особый интерес представляют приборы с зарядовой связью - ПЗСструктуры. Это интегральные полупроводниковые приборы, в основе работы которых лежит принцип создания, передачи и хранения локализованного зарядового пакета в потенциальных ямах, образуемых в полупроводнике под действием внешнего электрического поля.

Элементарная ячейка ПЗС представляет собой матрицу близко расположенных друг к другу МОП-конденсаторов. Соответствующие последовательности тактовых импульсов на затворах такой матрицы смещают ее отдельные МОП-конденсаторы в режим глубокого обеднения, так что зарядовые пакеты могут храниться под электродами матрицы и контролируемым образом перемещаться вдоль поверхности кристалла, перетекая из под одних электродов матрицы к соседним электродам.

Рассмотрим принцип действия ПЗС на примере трехтактной схемы сдвигового регистра, которую можно представить как структуру МДП-транзистора со многими затворами (рис. 5). Этот прибор состоит из трех секций.

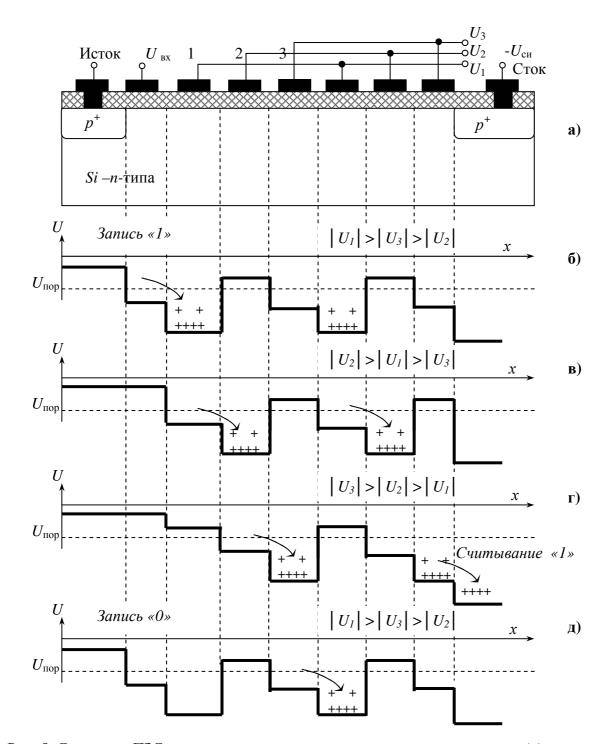


Рис. 5. Структура ПЗС с трехтактным питанием затворов секции переноса (\mathbf{a}) и пояснение принципа действия ($\mathbf{6}$, $\mathbf{8}$, \mathbf{r} , $\mathbf{д}$):

- **б** запись логической единицы путем инжекции пакета дырок в потенциальную яму под первым затвором секции переноса,
- **в** перенос информационного заряда пакета дырок в последующие потенциальные ямы при изменении потенциалов на электродах затвора,
- ${\bf r}$ считывание логической единицы на выходе прибора при экстракции дырок из потенциальной ямы в ${\bf p}^+$ -область стока,

Первая — входная секция — включает в себя исток с p^+ - областью под ним и входной затвор, выполняющий роль ключа для управления движением дырок из диффузионной p^+ - области истока в первую потенциальную яму.

Вторая – секция переноса – состоит из ряда затворов, управляющих потенциалом на границе кремний – диоксид кремния. Эти затворы соединены между собой через два. Напряжения на затворах секции переноса имеют вид импульсов различной амплитуды, которые сменяют друг друга циклической перестановкой (рис. 5 б...д). При таком изменении напряжения на затворах потенциальные ямы перемещаются к выходу прибора, увлекая за собой пакеты носителей заряда – дырок.

Третья — выходная секция — включает в себя p-n-переход стока. Этот переход смещен в обратном направлении и предназначен для экстракции дырок из подходящих к нему потенциальных ям (рис. 5 г).

Пусть на входной затвор подано напряжение, достаточное для образования проводящего канала под входным затвором $|U_{\rm Bx}|>|U_{\rm nop}|$. Если при этом на первом затворе секции переноса существует достаточно большое отрицательное напряжение, то дырки будут выходить из истока, проходить по каналу под входным затвором и накапливаться в потенциальной яме под первым затвором. Напряжение на входном затворе снимается к началу следующего такта изменения напряжений на затворах секции переноса. Поэтому проводящий канал под входным затвором исчезает. Так происходит запись информации (например, логической единицы), которой соответствует некоторый заряд дырок, накопленных в потенциальной яме под первым затвором в результате инжекции из истока.

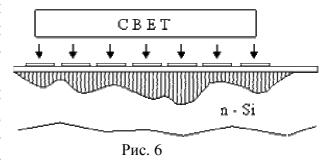
После смены напряжений на затворах секции переноса самое отрицательное напряжение будет на втором затворе, поэтому пакет дырок передвинется в потенциальную яму под вторым затвором секции переноса (рис. 5в). При следующих тактах изменения напряжения на затворах секции переноса будет происходить дальнейшее продвижение пакета дырок к выходной секции (рис. 5 г, д). Если в потенциальных ямах, подходящих к *p-n*-переходу стока, нет носителей заряда — дырок, то не будет и изменения тока в цепи стока. И только в том случае, когда потенциальная яма, содержащая дырки, подойдет к переходу стоку, произойдет экстракция этих дырок и в цепи стока пройдет импульс тока или изменится напряжение на стоке (рис. 5 г). Для записи информации, соответствующей логическому нулю, на входной затвор отрицательное напряжение не подается. В потенциальной яме под первым затвором оказывается относительно небольшой заряд дырок, связанный либо с тепловой генерацией носителей заряда, либо с неполным опустошением ямы на предыдущих тактах работы прибора.

Расстояние между электродами должно быть минимальным, чтобы зарядовые пакеты перетекали без потерь.

Оптический способ ввода информации в ПЗС. Оптический ввод информации реализуется в преобразователях «свет — электрический сигнал». Такие преобразователи используется в видеокамерах и цифровых фотоаппаратах. На электродах задан отрицательный потенциал: $V_1 = V_2 \dots V_n < 0$, электроды прозрачны для света.

Свет производит генерацию электронно-дырочных пар. Электроны ухо-

дят, дырки остаются под отрицательным потенциалом электродов. Накапливаемый положительный объемный заряд пропорционален числу поглощаемых квантов, т.е. пропорционален интенсивности света и продолжительности экспозиции. Отметим, что при конструировании конкретных микроэлектронных устройств на ПЗС (в зависимости от их назначения) применяются



различные схемы организации тактового питания и взаимного расположения затворов.

Широкое практическое применение получили фоточувствительные ПЗС-приборы (ФПЗС) (см. тему 10). Существует также фоточувствительный прибор с зарядовой инжекцией (ФПЗИ), в котором перемещение зарядового пакета происходит внутри фоточувствительного элемента с последующей инжекцией в подложку или в область стока заряда. Такие структуры имеют следующие достоинства: практическое отсутствие потерь передачи; возможность использования в качестве фоточувствительных элементов фотодиодов, имеющих большую по сравнению с МДП-структурами чувствительность; возможность организации произвольной выборки любого элемента или группы элементов.

Цифровые ПЗС предназначены для обработки сигналов в виде дискретных функций, и их можно разделить на структуры для арифметико-логической обработки информации и структуры для хранения информации - запоминающие устройства.

В цифровые ПЗС можно включить регистры сдвига, логические и арифметические устройства, запоминающие устройства. В них информация представляется двумя уровнями зарядов, локализованных в потенциальной яме под затвором. Состояние логической единицы определяется максимальным зарядовым пакетом в яме, состояние логического нуля - отсутствием заряда или величиной фонового заряда. Следует заметить, что цифровые устройства ПЗС являются устройствами динамического типа, так как необходима регенерация информации.

Функциональная магнитоэлектроника

Функциональная магнитоэлектроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором магнитоэлектронные эффекты и явления в континуальных магнитоупорядоченных средах используются для создания приборов и устройств обработки и хранения информации.

Магнитное упорядочение заключается в существовании определенной закономерности расположения элементарных магнитных моментов атомов, ионов, электронов. Простейшие типы магнитного упорядочивания наблюдается в ферри- и ферромагнетиках.

В континуальных магнитоупорядоченных средах можно возбудить несколько видов физических носителей информационного сигнала - динамиче-

ских неоднородностей: цилиндрические магнитные домены (ЦМД), вертикальные блоховские линии (ВБЛ), объемные и поверхностные магнитостатические волны.

В магнитоупорядоченных средах можно возбудить динамические неоднородности в виде магнонов, представляющих квант колебаний спиновых волн, магнитные вихри (флуксоны) и др.

В качестве динамических неоднородностей в последнее время успешно применяются *цилиндрические магнитные домены* (ЦМД), представляющие собой изолированные, однородно намагниченные подвижные области в ферроили ферримагнетиках. ЦМД имеют форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположно направлению намагниченности магнетика.

ЦМД возникают при определенных условиях в тонких монокристаллических, предварительно намагниченных пленках ферритов, обладающих сильной одноосной перпендикулярной анизотропией. Изолированный домен существует в определенном интервале значений внешнего поля: $H_{min} < H_{BH} < H_{max}$, где H_{min} - поле, при котором ЦМД растягивается в полосовой домен, H_{max} - поле, при котором ЦМД схлопывается – коллапсирует.

Наиболее оптимальной средой для создания ЦМД являются монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ), выращенные на намагниченных подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ).

ЦМД как носитель информационного сигнала обладает следующими уникальными свойствами:

- неограниченно долго сохраняется в системе до, во время, и после взаимодействия;
 - свободно перемещается в двух измерениях;
 - сохраняется при отключении питания;
 - управляемо зарождается или коллапсирует;

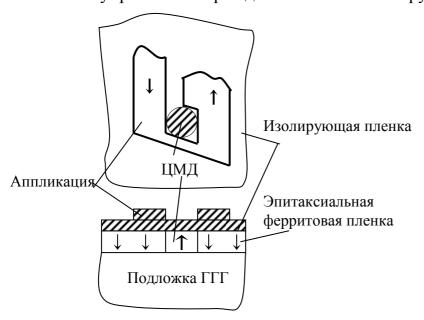


Рис. 7. Генерация доменов с помощью петли тока

- реплицируется, делясь на две части и восстанавливая первоначальную форму и размер;
- визуально и электрически регистрируется;
- дипольно взаимодействует с другими соответствующими ЦМД.

Наиболее широкое применение ЦМД нашли в устройствах памяти, позволяющих получить высокую плотность записи информации, малую потребляемую мощность, высокое быстродействие, низкую стоимость.

Отсутствие движущихся носителей позволяет ЗУ на ЦМД использовать в бортовых системах.

Повышение плотности записи информации в устройствах на ЦМД-доменах может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра домена. На доменах диаметром ~ 1 мкм созданы ЗУ с плотностью записи $\sim 10^8$ бит/см 2 . Разрабатываются устройства с субмикронными размерами доменов.

Генерация и управление ЦМД осуществляется с помощью структур из пленки пермаллоя (Ni:Fe). Данные структуры принято называть *аппликациями*. Для генерации доменов используется аппликация в виде петли, по которой протекает ток (рис. 7).

При подаче импульса тока возникает электромагнитное поле, превосходящее значение рабочего поля и имеющее противоположный знак. Под аппликацией пленка локально перемагничивается и образуется домен. Петля имеет размер, соизмеримый с доменом.

По своей природе ЦМД имеет магнитное поле, которое, взаимодействуя с внешним полем, создает силы, перемещающие домен в направлении минимальной интенсивности внешнего поля. Другими словами, домен перемещается в таком направлении, в котором его энергия будет минимальной. Доменопередвигающая структура (ДПС) состоит из периодически повторяющихся аппликаций из пермаллоя. Намагничивание аппликаций осуществляется внешним вращающимся магнитным полем.

Выбирая форму аппликаций, их топологию, направление управляющего поля можно добиться поступательного движения ЦМД по любому, предварительно заданному, направлению. Считывание информации сводится к выявлению динамических неоднородностей, несущих логические "0" (нет домена) и "1" (есть домен) и осуществляется в устройстве, называемом детектором. В серийных ЗУ на ЦМД применяют магниторезистивные детекторы, которые отличаются высокой надежностью, хорошей термостабильностью, широким частотным диапазоном, простотой реализации. Сигнал с детектора усиливается микросхемой.

Перспективными устройствами для обработки сигналов в гигагерцевом диапазоне являются линии задержки (ЛЗ) на магнитостатических волнах (МСВ).

Конструктивно ЛЗ на МСВ реализуется на многослойной структуре, состоящей из сапфировой (Al_2O_3) подложки, тонкого слоя континуальной среды из железоиттриевого граната (ЖИГ) и ГГГ.

На входной микрополосковый преобразователь поступает сигнал, который возбуждает МСВ, несущие с задержкой информацию на выходной микрополосковый преобразователь.

Величина задержки сигнала зависит от направления приложенного поля: при направлении поля по оси Z задержка сигнала возрастает с частотой, при приложении поля вдоль оси X - задержка убывает с частотой, и, наконец, при направлении магнитного поля вдоль оси Y, генерируются МСВ, аналогичные ПАВ.

МИНИ-ТЕСТ

1. Функциональные микросхемы могут выполняться на основе

- 1) только полупроводников;
- 2) только сверхпроводников;
- 3) материалов с фотопроводящими свойствами;
- 4) полупроводников, сверхпроводников, сегнетодиэлектриков.

2. Поверхностно-акустические волны распространяются

- 1) только на свободной поверхности твердого тела;
- 2) только вдоль границы твердого тела с другой средой;
- 3) только внутри звукопровода;
- 4) по свободной поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другой средой.

3. Поверхностно-акустические волны ультразвукового диапазона применяются

- 1) только для изготовления полосовых фильтров;
- 2) только для изготовления резонаторов;
- 3) только для изготовления фазовращателей;
- 4) для изготовления фазовращателей, резонаторов, полосовых фильтров.

4. В радиотехнических системах обработки информации ПЗС используется при разработке

- 1) устройств спектрального анализа;
- 2) линий задержек;
- 3) фильтров различных типов;
- 4) линий задержек, устройств спектрального анализа, фильтров.

5. Основными элементами ПЗС являются однотипные

- 1) МДП-резисторы;
- 2) МДП-конденсаторы;
- 3) МДП-транзисторы;
- 4) МДП-транзисторы и резисторы.

6. Основными элементами ПЗС являются

- 1) подложка p-типа из высокоомного кремния;
- 2) полоска затворов из алюминия;
- 3) диэлектрик из диоксида кремния;
- 4) подложка, диэлектрик, полоска затворов, пленочные проводники.

7. Принцип действия ПЗС основан на

- 1) накоплении зарядовых пакетов;
- 2) хранении зарядовых пакетов;
- 3) накоплении, хранении и перемещении зарядовых пакетов;
- 4) на перемещении зарядовых пакетов.

8. ПЗС называется трехкратным так как он имеет

- 1) одну управляемую шину и два зарядовых пакета;
- 2) две управляющих шины и один зарядовый пакет;
- 3) три управляющих шины;
- 3) три зарядовых пакета.

9. При воздействии более сильного внешнего магнитного поля домены должны

- 1) уменьшаются;
- 2) увеличиваются;
- 3) не изменяются;
- 4) исчезают совсем.

10. Устройством для создания цилиндрических магнитных доменов является

- 1) проволочная петля с током, нанесенная на поверхность основной магнитной пленки;
- 2) диэлектрическая тонкая пленка, нанесенная на поверхность основной магнитной пленки;
- 3) перфорированная металлическая поверхность, нанесенная на поверхность магнитной пленки;
- 4) перфорированная магнитная пленка, нанесенная на поверхность магнитной пленки.

11. В запоминающих устройствах цифре "1" соответствует

- 1) отсутствие цилиндрических магнитных доменов;
- 2) наличие цилиндрических магнитных доменов;
- 3) образование новых цилиндрических магнитных доменов;
- 4) началу записи информации.

12. В запоминающих устройствах цифре "0" соответствует

- 1) отсутствие цилиндрических магнитных доменов;
- 2) наличие цилиндрических магнитных доменов;
- 3) началу перемещения цилиндрических магнитных доменов в нужном направлении;
- 4) началу считывания информации.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Оптоэлектроника - раздел электроники, изучающий эффекты взаимодействия оптического излучения с электронами в веществах (главным образом в твердых телах) и методы создания приборов и устройств, использующих эти эффекты для получения, преобразования, передачи, хранения и отображения информации.

В широком смысле **оптоэлектронное устройство** определяется как прибор, излучающий или преобразующий электромагнитное излучение в видимой, инфракрасной (ИК) или ультрафиолетовой (УФ) областях, или использующий подобное излучение для внутреннего взаимодействия его элементов.

Оптоэлектронные полупроводниковые приборы (ОПП) делят на излучатели, приемники излучения, оптопары и оптоэлектронные ИМС (табл.1).

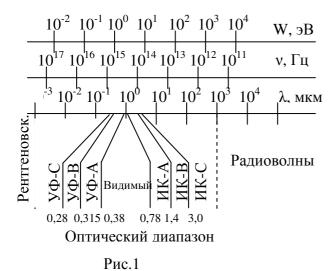
Таблица 1

	Ωπτος πονεπομικέο μο πνημοροπικέορι το πριβορί τ																
	Оптоэлектронные полупроводниковые приборы																
Полупроводниковые					Полупроводниковые Оптопары					Опто-							
			ИЗЈ	пучател	И	пр	ием	ини	ки и	злу	чен	ИЯ			- ··· F -		элек-
I	Неко	огег	ентн	ные	Когерентные												тронные
		_	ател		излучатели												инте-
	1																граль-
				И													ные
				ел								ИИ					схемы
	0			излучатели	ИЯ							радиации					
	(СИД)			II	с							ИΠ					
Ē	C)Ы						связью	pa					
(ИКД)				исцентные пленочные	3ek						3Я3	ίей)PI		
	диоды	Ic.		HH	ла							ПО	Ю		Tag	ры	
) JTE		ıdc		ен	51e						30Ĭ	кан	ıaţ	ľ	оптопары	Па	
диоды	ие	ат	ľ	ісп пе	OBI (a _N				Ιq		101	НИ	гоі	ıpı	ОП	оптопары	
	ЩС	ИK	зне	ини и п	ик зид	Ю		19	lop	ΙЧС	зарядовой	[od	оптопары	ЭПС	Ie	ОП	
HP	так	индикаторы	экраны	MIZ IE I	и в	rop	T	HT	исл	тој		1 П		пт)HE	ые	
ac	Пу			JIKO)BO	ИС	Щ	Ме	H3]	ИС	ı c	1KI	ЭНБ	e 0	roţ	нд	
Инфракрасные	Светоизлучающие	Знаковые	Шкалы и	Электролюминисцентные порошковые и пленочные	Полупроводниковые лазеры с различными видами возбуждения	Фоторезисторы	Фотодиоды	Фотоэлементы	Фототранзисторы	Фототиристоры	Приборы с	Приемники проникающей	Резисторные	Диодные оптопары	Транзисторные	Тиристорные	
pb;	TO	KO	ал	KT OII	IyI Jir	rog	101	[O3	гол	гол	160	ıeı	ИС	ЭДЕ	H3	ис	
THC	Be	на	Пк)ле top	lor a3.	рοл	ροл	ρου	рοл	рол	Ipi	Ipi	e3	Įис	pa	ди	
I		\mathfrak{C}	Ι	7.)	I d	Ď	Ď	Ď	ď	ď	I	I	F	Į		T	

Основными параметрами ОПП являются: частота колебаний [Герц], длина волны [нанометр или Ангстрем (1Å=0,1 нм)], световой поток Φ [люмен], сила света I [кандела], светимость M [люмен/м 2], освещенность E [люкс], яркость излучения (кандела/м 2) и пр.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Полупроводниковые излучатели — ОПП, преобразующие электрическую энергию в энергию электромагнитного излучения (ЭМИ). Многие излучатели могут излучать только некогерентные электромагнитные колебания (светоизлучающий диод (СИД), знаковые индикаторы, шкалы, экраны, инфракрасные излучающие диоды). Когерентные излучатели — полупроводниковые лазеры с различными видами возбуждения. Они могут излучать электромагнитные волны (ЭМВ) с определенной амплитудой, частотой, фазой, направле-



нием распространения и поляризацией, что и соответствует понятию когерентности.

Светом называют видимое человеческим глазом электромагнитное изучение с длинами волн от 380 до 780 нм, являющееся частью диапазона оптического излучения. Оптическим диапазоном спектра электромагнитных колебаний принято считать диапазон колебаний с диной волны от 1 мм до 1 нм (рис. 1). Оптический диапазон замечателен тем, что именно в

нем наиболее отчетливо проявляется корпускулярно-волновой дуализм; энергия фотона и соответствующая ей частота колебаний и длина волны связаны соотношением:

$$\lambda [MKM] = 3 \cdot 10^{14} / \nu [\Gamma \mu] = 1,234 / \Delta W [9B]$$

Светоизлучающие диоды и инфракрасные излучающие диоды

Основным элементом полупроводникового излучателя является инжекционный светоизлучающий диод (СИД), который представляет собой полупроводниковый кристалл с одним p-n-переходом (или гетеропереходом), непосредственно преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

Излучение светодиодов и инфракрасных диодов (ИКД) вызвано само-

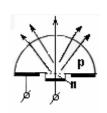


Рис. 2. Инжекционный светодиод

произвольной рекомбинацией носителей заряда при прохождении прямого тока через выпрямляющий переход. Рекомбинация носителей заряда может происходить как в самом переходе, так и в прилегающих к переходу областях структуры. Чтобы кванты энергии — фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть более 1,7 эВ. При меньшей ширине запрещенной зоны кванты энергии, освобождающихся при рекомбинации носи-

телей заряда, соответствуют инфракрасной области излучения. Таким образом, разница между СИД и ИКД заключается только в отличии исходного полупроводникового материала. Лучшим внутренним квантовым выходом (отношением излученных фотонов к числу рекомбинировавших пар носителей) обладают соединения $GaAs_{1-x}P_x$ с x=0...0,45 (ΔW до 1,977 эВ).

Основным методом формирования p-n-перехода при создании СИД на основе арсенида галлия, фосфида галлия, твердых растворов этих соединений $GaAs_{1-x}P_x$ и др. является метод **эпитаксиального наращивания**. Обычно это жидкофазная эпитаксия, иногда эпитаксия из газовой фазы. Для формирования

p-n-перехода в карбиде кремния (SiC) используют метод диффузии примесей, а иногда и метод эпитаксиального наращивания. Особенностью карбида кремния отметим его **политипизм**, т.е. существование нескольких кристаллических модификаций, отличающихся шириной запрещенной зоны (от 2,39 до 3,33 эВ). Получаются высокостабильные излучатели, но сложна технология изготовления и внутренний квантовый выход невысок. Наибольшей шириной запрещенной зоны обладает нитрид галлия GaN –3,5эВ. Энергии фотонов, которые могут быть возбуждены в данном материале, перекрывают всю видимую область спектра. Однако, этот материал, независимо от метода получения, обладает электропроводностью n-типа. Поэтому для получения излучения при рекомбинации неравновесных носителей заряда используется переход в виде перехода Шоттки на контакте металла с нитридом галлия.

Даже при высоком внутреннем квантовом выходе внешний квантовый выход излучателя оказывается меньшим из-за поглощения фотонов в полупроводнике до выхода их в окружающее пространство и из-за потерь при полном внутреннем отражении фотонов, падающих на границу раздела полупроводника и окружающей атмосферы под углом, превышающим критический угол полного внутреннего отражения (ϕ ≤17°). Таким образом, из полупроводникового излучателя, имеющего простейшую плоскую структуру, в окружающее пространство выходит только часть фотонов. Внешний квантовый выход удается увеличить при использовании более сложных конструкций излучателя со структурой в виде полусферического кристалла полупроводника или плоской структуры с прозрачным полусферическим покрытием. Все излучатели с полусферической структурой имеют на порядок выше внешний квантовый выход,

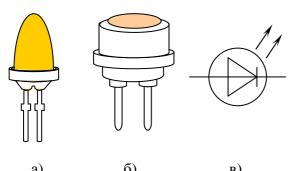


Рис.3. Светодиоды АЛ 307 (а) и АЛ 112 (б). Условное обозначение светодиода (в).

чем излучатели с плоской конструкцией (рис. 3).

Арсенид-галлиевые СИД – красного цвета свечения, фосфиды галлия и индия дают желто и желтозеленое свечение, карбид-кремниевые – красно-оранжевое и желтое свечение.

Параметры некоторых светодиодов на основе различных полупроводников приведены в табл. 2.

Таблица 2

Цвет свече- ния	Длина волны, мкм	Материал полупроводни- ка	Напряжение питания, В (при 10 мА)	Мощность излучения, мкВт (при токе 10 мА)
Зеленый	0,565	<i>Ga–P</i>	2.2-2,4	1,5–8,0
Желтый	0,583	Ga-P-As	2,0-2.2	3,0–8,0
Оранжвый	0,635	Ga-P-As	2,0-2.2	5,0–10,0
Красный	0,655	Ga–As–P	1,6–1,8	1,0–2,0
ИК	0,900	Ga–As	1,3–1,5	100,0–500,0

Полупроводниковый знаковый индикатор – прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления информации в виде знаков, организованный в один или несколько разрядов (рис. 4 и 5). В полупроводниковых излучателях используются две основные конфигурации высвечиваемых элементов:

1) Семисегментная; структура знакового индикатора состоит из семи излучающих элементов и децимальной точки, т.е. 8 переходов в одном монокристалле полупроводника, излучающих свет при прохождении тока в прямом направлении. Различные комбинации излучающих элементов, обеспечиваемые внешней коммутацией, позволяют воспроизвести цифры от 0 до 9 и некоторые буквы.

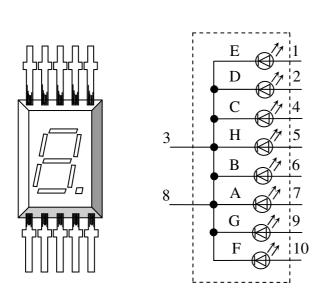


Рис.4. Индикатор АЛЗ04Г

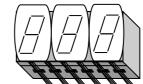


Рис.5. Индикатор АЛС 330

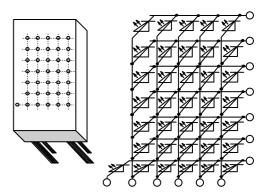


Рис. 6. Индикатор АЛ 306А

2) **Матричная** с числом точек 36 (7 рядов по 5 точек, в каждом ряду плюс 1 точка), воспроизводящая все цифры, буквы и знаки (универсальный цифробуквенный индикатор). Иногда их называют полупроводниковыми экранами, например, АЛ 306A (рис.6).

Параметры излучателей как элементов электрической схемы определяются вольт-амперной характеристикой (BAX). Различия прямых ветвей BAX

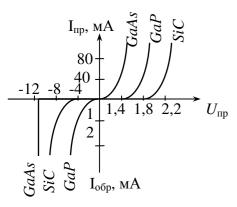


Рис. 7

светодиодов из различных материалов вызваны, главным образом, различием в ширине запрещенной зоны (рис. 7). Прямые напряжения находятся в достаточно узком диапазоне 1,2-2,5 В. У большинства светодиодов уровни предельных обратных напряжений также невелики - в пределах 2,5-5 В, поэтому в цепь питания светодиода необходимо, как правило, включать ограничительное сопротивление.

Для работы на переменном токе выпускаются диодные сборки, в которых два диода

включены встречно-параллельно. В этом варианте каждый диод работает только полпериода синусоидального цикла. При этом важно не забыть, что ограничительное сопротивление в цепи питания диода не должно допустить повышенных обратных напряжений на запертом диоде.

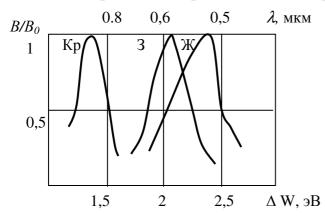


Рис.8. Спектральные характеристики излучателей

Выпускаются также диодные сборки, дающие световой поток с изменяемым цветом свечения. В таких сборках объединяются два диода с разным цветом свечения (как правило, зеленый и красный), что позволяет излучать не только тот или иной основной цвет, но и промежуточные (например, желто-зеленый, желтый, оранжевый). Пока не созданы диоды с интенсивным свечением синего цвета, равным по яркости зеленому и красному, иначе на таких

диодных сборках можно было бы создавать полноцветные светодиодные табло и экраны.

Для того чтобы высветить тот или иной символ, необходимо управлять свечением (или гашением) каждого элемента. С этой целью питание на отдельные элементы светодиодных линеек и матриц подается в мультиплексном режиме. При этом если в сборке общее число элементов равно *m*, то каждый из элементов работает как бы в мигающем режиме, зажигаясь на 1/*m* времени цикла обегания всех элементов. Если частота циклов мультиплексирования выше 10-15 Гц, то, по закону Тальбота, мигающие элементы кажутся светящимися постоянно, но с меньшей яркостью (яркость может быть повышена путем пропускания через светодиод большего тока).

Выпускаемые в различных исполнениях светодиодные линейки и матрицы нашли применение в полиграфических сканирующих и записывающих устройствах. В сканерах они используются в качестве линейных осветителей. В записывающих головках рекордеров, имиджсеттеров, цифровых печатных машин светодиодные линейки и матрицы осуществляют запись информации на светочувствительный материал - фотопленку, фоторезисторную пленку, электрографический цилиндр и т.п.

Основными характеристиками являются:

• *яркость излучения*, единицей измерения служит кандела на квадратный метр (кд/м²) – яркость источника излучения, каждый квадратный метр излучающей поверхности которого имеет в данном направлении силу света, равную одной канделе.

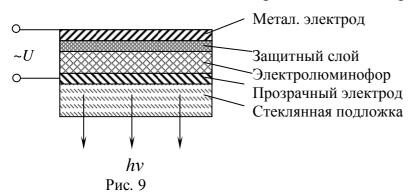
Для ИКД вместо этой характеристики используют – полную мощность излучения в ваттах при определенном прямом токе.

• *спектральная характеристика* – зависимость мощности излучения от длины волны электромагнитных колебаний (рис.8).

Электролюминесцентные излучатели.

Электролюминесцентные излучатели (ЭЛИ) бывают порошковые и пленочные.

Люминесценция – электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Для



возникновения люминесценции атомы полупроводника возбуждаются электрическим полем.

Порошковый ЭЛИ (рис. 9) представляет собой многослойную структуру, состоящую из стеклянной подложки, на которую последовательно наносят про-

водящий прозрачный электрод из оксида олова, индия, кадмия, слой электролюминофора, защитный диэлектрический слой в виде лакового покрытия или тонкого слоя диоксида кремния и второго электрода. Сульфид цинка — один из наиболее распространенных люминофоров, он для получения яркого свечения активируется примесями меди, марганца и пр. Под действием приложенного напряжения происходит ионизация примесных атомов электролюминофора. После возбуждения поверхностных слоев зерен электролюминофора происходит процесс высвечивания электролюминофора — рекомбинация носителей заряда с выделением избыточной энергии в виде квантов света. Цвет свечения определяется шириной запрещенной зоны электролюминофора.

Электролюминисцентные пленочные излучатели отличаются от порошковых тем, что между двумя электродами в них находится однородная поликристаллическая пленка электролюминофора, созданная термическим испарением с последующим осаждением в вакууме. Они могут работать и на постоянном токе. Возбуждение электролюминофора, т.е. создание неравновесного состояния поверхностных слоев отдельных кристаллов электролюминофора, происходит из-за инжекции носителей через потенциальные барьеры и на поверхности отдельных, контактирующих между собой кристаллов электролюминофора и из-за инжекции из электродов. При рекомбинации инжектированных носителей избыточная энергия может выделяться в виде квантов света. Пленочные излучатели уступают по экономичности и сроку службы порошковым. Недостатком всех электролюминесцентных излучателей является большой разброс параметров.

Полупроводниковые лазеры

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, область науки и техники, охватывающая исследования принципов действия, конструирование и применение генераторов, усилителей, преобразователей частоты электромагнитного излучения, действие которых основано на вынужденном излучении или на нелинейном взаимодействии излучения с веществом. К устройствам квантовой электроники относятся квантовые усилители сверхвысокой частоты, лазеры, квантовые стан-

дарты частоты, квантовые магнитометры, лазерные гироскопы и др. Наш курс предполагает рассмотрение только полупроводниковых лазеров.

В полупроводниковых лазерах излучение, как и в светоизлучающих диодах, порождается рекомбинацией электронов и дырок. Однако эта рекомбинация оказывается не самопроизвольной, а вынужденной (стимулированной электромагнитным взаимодействием). Излучение при вынужденной рекомбинации получается когерентным (синхронное и синфазное излучение атомов). В лазерах когерентное излучение получается вследствие перехода электронов с нижнего края зоны проводимости на верхний край валентной зоны. Для усиления света и получения когерентного излучения необходимо, чтобы число возбужденных атомов было больше числа атомов, находящихся в основном, невозбужденном состоянии. Другими словами, должна быть так называемая инверсия населенности энергетических уровней. В отличие от состояния, когда атомы не возбуждены и электроны находятся на основных орбитах (на более низких уровнях), необходимо в большинстве атомов "переселить" электроны на более удаленные от ядра орбиты (на более высокие уровни), т. е. возбудить большинство атомов. Конечно, чтобы усиление света происходило в течение необходимого промежутка времени, надо все это время сохранять инвертированное состояние вещества, т. е. все время должно быть большое количество

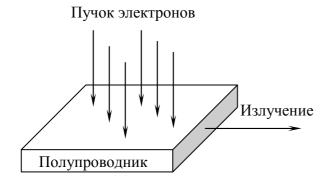


Рис. 10. Поперечная накачка электронным пучком

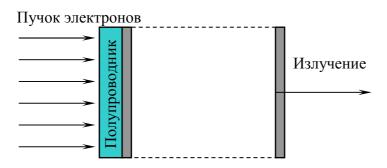


Рис. 11. Продольная накачка электронным пучком

возбужденных атомов. Для этого и надо к данному веществу, называемому активной средой или рабочим веществом, подводить тем или иным способом энергию, вызывающую возбуждение атомов. Такой процесс называется накачкой.

Существует два типа полупроводниковых лазеров. Первый имеет пластину беспримесного полупроводника, в котором накачка производится пучком быстрых электронов с энергией 50-100 кэВ. Возможна также оптическая накачка. В качестве полупроводников используются арсенид галлия *GaAs*, сульфид кадмия *CdS* или селенид кадмия *CdSe*. Накачка электронным

пучком вызывает сильный нагрев полупроводника, отчего лазерное излучение ухудшается. Поэтому такие лазеры нуждаются в хорошем охлаждении. Например, лазер на арсениде галлия принято охлаждать до температуры 80 К.

Накачка электронным пучком может быть поперечной (рис. 10) или продольной (рис. 11). При поперечной накачке две противоположные грани полупроводникового кристалла отполированы и играют роль зеркал оптического ре-

зонатора. В случае продольной накачки применяются внешние зеркала. При продольной накачке значительно улучшается охлаждение полупроводника. Пример такого лазера - лазер на сульфиде кадмия, генерирующий излучение с длиной волны 0,49 мкм и имеющий КПД около 25%.

Второй тип полупроводникового лазера — так называемый **инжекционный лазер.** В нем имеется p-n-переход (рис. 12), образованный двумя вырожденными примесными полупроводниками, у которых концентрация донорных и акцепторных примесей составляет 10^{18} - 10^{19} см⁻³. Грани, перпендикулярные плоскости p-n-перехода, отполированы и служат в качестве зеркал оптического

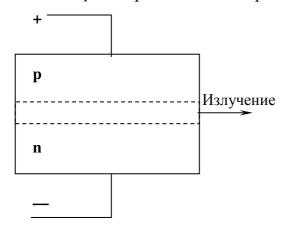


Рис. 12. Принцип устройства инжекционного лазера

резонатора. На такой лазер подается прямое напряжение, под действием копотенциальный торого понижается барьер в *p-n*-переходе и происходит инжекция электронов и дырок. В области интенсивная перехода начинается рекомбинация носителей заряда, которой электроны переходят из зоны валентную проводимости В возникает лазерное излучение. Для применяют инжекционных лазеров образом арсенид главным галлия. Излучение имеет длину волны 0,8-0,9 мкм, КПД довольно высок - 50-60%.

Миниатюрные инжекционные лазеры с линейными размерами полупроводников около 1 мм дают мощность излучения в непрерывном режиме до 10 мВт, а в импульсном режиме могут иметь мощность до 100 Вт. Получение больших мощностей требует сильного охлаждения. Следует отметить, что в

устройстве лазеров имеется много различных особенностей. Оптический резонатор лишь в простейшем случае составлен из двух плоскопараллельных зеркал. Применяются и более сложные конструкции резонаторов, с другой формой зеркал.

В состав многих лазеров входят дополнительные устройства для управления излучением, расположенные либо внутри резонатора, либо вне его. С помощью этих устройств отклоняется и фокусируется лазерный луч, изменяются различные параметры излучения. Длина волны у разных лазеров может составлять 0,1-100 мкм. При импульсном излучении длительность



Рис.13. Лазерный диод ML1XX17

импульсов бывает в пределах от 10^{-3} до 10^{-12} с. Импульсы могут быть одиночными или следовать с частотой повторения до нескольких гигагерц. Достижимая мощность составляет 10^9 Вт для наносекундных импульсов и 10^{12} Вт для сверхкоротких пикосекундных импульсов.

Таблица 3

Марка лазера и его вид	Длина волны излучения, мкм	Активное вещество	Мощность (энергия) излучения	Режим работы
ЛГН-222 (газ.)	0,6328	He-Ne	55,0 мВт	Непрер.
Сигнал (газ.)	0,3371	Ar	1000 Bt	Импул.
Прометей (газ.)	10,6	CO-N-He	50 Вт	Непрер.
ГОР-0,2 (тверд.)	0,6943	Рубин	0,2 Дж	Импул.
H2A2 (полупр.)	0,85	Ga–As	3,0/0,1 BT	Импул. непрер.
ПКГ (полупр.)	0,85	Ga–As	4,0 BT	Импул.

Лазерные диоды используются в записывающих головках, лазерных принтерах, цифровых печатных машинах, а также в оптических линиях связи.

Оптические среды и эффекты в них

В оптоэлектронных устройствах оптические информационные сигналы распространяются, как правило, в специальных средах - для защиты сигналов от помех, придачи им желательного направления распространения и, при необходимости, управления - например, в режиме «пропустить-отклонить». Для управления световым потоком используются различные оптические элементы: линзы, призмы, отражатели и дефлекторы (зеркала), фильтры, модуляторы, а

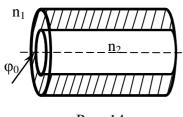


Рис. 14

также слои жидких кристаллов, тонкие магнитные пленки, меняющие свою прозрачность под действием магнитного поля и др. Направление светового потока по криволинейной траектории осуществляется с помощью элементов волоконной оптики — световодов (рис.14), действие которых основано на эффекте полного внутреннего отражения света, открытого Джоном Тиндалем,

возникает на границе двух оптических прозрачных сред, когда наклонно падающий световой поток из среды с большим показателем преломления достигает границы раздела со средой с меньшим показателем преломления. При некотором угле падения, называемом предельным, луч уже не проходит в соседнюю среду, а распространяется по границе раздела. Дальнейшее увеличение угла падения приводит к полному внутреннему отражению. Если световой поток будет поступать в оптическую среду под углом, большим, чем предельный, то свет, не выходя из данной среды, будет распространяться вдоль и внутри нее, до противоположного конца, где может быть установлен приемник излучения. На этом принципе основано действие световодов.

Меньшие потери в световодах достигаются при работе излучателей на длинах волн инфракрасной области спектра (0,9; 1,2; 1,5 нм). С этой точки зрения для оптических линий связи больше подходят в качестве источников сигнала инфракрасные диоды и полупроводниковые лазеры этой зоны спектра.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Полупроводниковый приемник излучения – ОПП, чувствительный к ЭМИ видимой, инфракрасной и (или) ультрафиолетовой области спектра или преобразующий энергию ЭМИ непосредственно в электрическую энергию. К

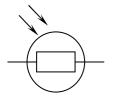


Рис. 15

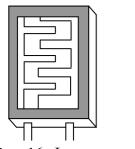
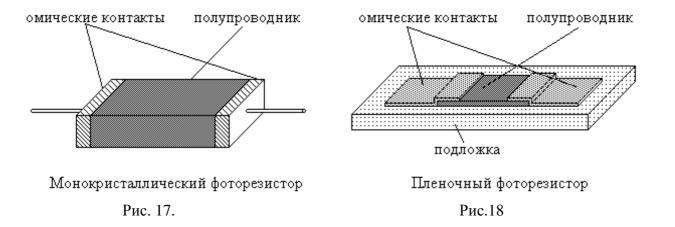


Рис. 16. Фоторезистор СФ2-2

приемникам относятся фоторезисторы, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы и фототиристоры, фотоумножители, приборы с зарядовой связью, приемники проникающей радиации и корпускулярнопреобразовательные приборы.

Фоторезистор (рис.15) - полупроводниковый элемент, изменяющий свое электрическое сопротивление под действием внешнего излучения. Его принцип действия основан на внутреннем фотоэффекте в полупроводниках. Фоторезистор представляет собой слой (или пленку) полупроводникового материала на подложке (или без нее) с нанесенными на него электродами, посредством которых прибор подключается к электрической цепи (рис. 17 и 18). Под действием потока излучения, падающего на рабочую поверхность фоторезистора, его внут-



реннее сопротивление уменьшается вследствие генерации пар свободных носителей заряда (электронов и дырок), за счет чего увеличивается электропроводность полупроводника.

В качестве фоточувствительного материала в отечественных фоторезисторах широкого применения используются сульфиды и селениды кадмия и свинца (*CdS*, *PbS*, *CdSe*, *PbSe*). Материалы на основе кадмия чувствительны к излучениям в видимой и ближней инфракрасной областях, а на основе свинца на длинах волн 1-5 мкм. Представление о параметрах и характеристиках фоторезисторов, выпускаемых отечественной промышленностью, можно получить, ознакомившись с данными табл. 1.

Вольтамперные характеристики ΦP представляют собой зависимости светового тока при неизменном световом потоке от приложенного к ΦP напряжению (рис.19).

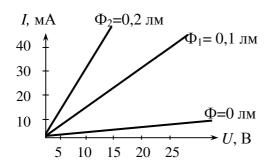


Рис. 19. ВАХ фоторезистора

Спектральная характеристика фоторезистора — это зависимость фототока от длины волны падающего на фоторезистор света (рис. 20).

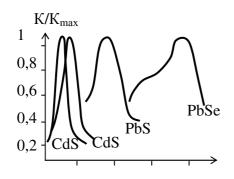
Фоторезисторы – сравнительно низкочастотные приборы. Частотные характеристики фоторезисторов показаны на рис. 21.

Световая или люкс-амперная характеристика фоторезистора представляет собой зависимость фототока $I_{\phi} = I_{\rm cb} - I_{\rm тем}$ от

освещенности, или от падающего на ФР светового потока. Она линейна при небольших световых потоках, что соответствует закону Столетова, установившего, что число электронов, освобожденных светом за 1 с (т.е. ток), прямо пропорционально световому потоку при неизменном его спектральном составе:

$$I = S\Phi$$
 или $I = SE$

где I - фототок, Φ - световой поток, S - коэффициент пропорциональности, называемый чувствительностью фотоприемника, E - освещенность.



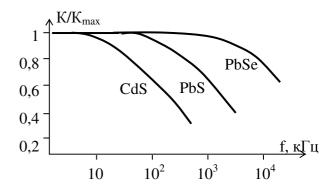


Рис. 20. Спектральные характеристики ФР Рис. 21. Частотная характеристика ФР

Фоторезистор ведет себя как омическое сопротивление, т.е. его сопротивление не зависит ни от приложенного напряжения, ни от его знака.

При малых значениях освещенности сопротивление фоторезистора существенно зависит от температуры. Столь же заметным недостатком фоторезисторов при малых освещенностях является инерционность - при освещенности менее 1 лк время установления нового значения может составлять несколько секунд. Достоинством фоторезисторов является высокая чувствительность. К положительным характеристикам фоторезистора следует отнести возможность

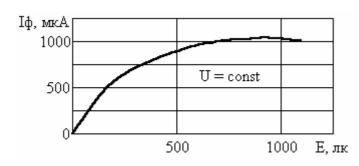


Рис. 22. Световая характеристика ФР

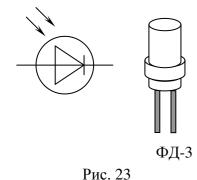
создания рабочих поверхностей приемника различной площади и протяженности, что позволяет использовать их в качестве элемента управления довольно значительными токами и в качестве датчиков перемещений объектов контроля в диапазоне нескольких миллиметров (например, в системах слежения за

положением края бумажного полотна в рулонных печатных машинах).

Темновое сопротивление — это сопротивление фоторезистора в отсутствии освещения. Его принято определять через 30 с после затемнения ФР, предварительно находившегося под освещенностью 200 лк.

	_	- 4
l a	олин	a 4
ı a	CHINIL	ат

Фоторезистор	Материал	Темновое R _т сопротивление, МОм	R _T /R _{CB} He Mehee	Темновой ток, мкА	Ток (при E = 200 лк), мА
ФСК-0	CdS	1	140	15	15
СФ2-1	CdS	15	1000	1	1
ФПФ7-1	CdS	6	50	6	0,3
ФСД-1	CdSe	2	150	10	1,5
СФ3-2	CdSe	5	500	1	0,5
ФСА-4	PbS	0,04	1,2	Сведений нет	Сведений нет
СФ4-3Д	PbSe	0,2	Сведений нет	Сведений нет	Сведений нет



Фотодиод (рис. 23)- фоточувствительный полупроводниковый диод с *р-п*-переходом (между двумя типами полупроводника или между полупроводником и металлом). При освещении *р-п*-перехода в нем возникают электронно-дырочные пары. Направление тока носителей совпадает с направлением обратного тока перехода (рис. 24), т.е. с ростом освещенности возрастает обратный ток фотодиода. Обратные токи практически не зависят от приложенного напряжения.

Фотодиод может работать в двух режимах - фотодиодном и фотогенераторном. В **фотодиодном** режиме прибор подключается к источнику питания,

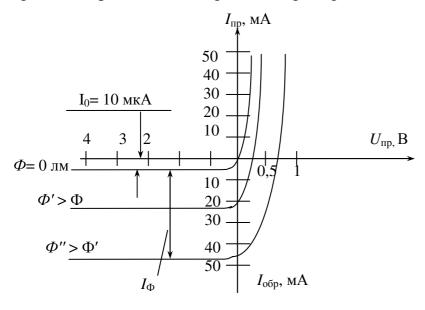


Рис. 24

при этом на анод должен подаваться «-», а на катод «+». Этому режиму соответствуют зависимости в III квадранте вольтамперной характеристики. Зависимости, приведенные в IV квадранте, фотогенераотражают торный режим работы, когда фотодиод может использоваться без точника питания, так как сам становится источником фотоЭДС, генерируя (под действием света) но-

сители зарядов - свободные электроны. Благодаря этому фотодиод пригоден для получения электроэнергии (один фотодиод способен генерировать напря-

жение в диапазоне 0 - 0,4 В в зависимости от тока нагрузки, как правило, микроамперного).

Материалом для изготовления фотодиодов часто служат германий и кремний. Спектральная чувствительность германиевых фотодиодов находится в диапазоне 0,5-1,7 мкм (с максимумом на длине волны 1,2-1,65 мкм), а кремниевых - между 0,6-1 мкм (максимум на длине волны 0,8-0,95 мкм). ФД выполняют также на основе переходов металл- полупроводник, и гетероперехода. Спектральная характеристика этих диодов шире, чем у обычных (на p-n-переходах).

Фотодиоды обладают большим быстродействием (особенно в фотодиодном режиме), чем фотосопротивления - они обычно способны реагировать на сигналы частотой до 10 МГц. Фотодиоды с p-i-n-переходом (введение области i повышает быстродействие) способны работать с высокочастотными сигналами порядка 1 ГГц (рис. 25 б).

Характеристики некоторых отечественных фотодиодов приведены в табл. 5. Таблица 5

Фотодиод	Материал	Темновой ток, мкА	Максимальная спектральная чувствительность, мкм	Рабочее напряже- ние, В	Интегральная чувствитель- ность, мА/лм
ФД-8К	Si	1,0	0,85-0,92	20	0,000006
ФД-27К	Si	1,0	0,80-0,95	20	0,0000075
ФД-256	Si	0,005	0,75-0,90	10	6,0
ФД-1	Ge	30,0	1,50–1,60	20	30,0
ФД-7Г	Ge	8,0	1,50–1,55	10	10,0

Благодаря простоте и миниатюрности конструкции, широкому спектру чувствительности, высокому быстродействию, возможности автономного (собственного) питания и вариантности схем включения фотодиоды нашли широкое промышленное применение в качестве датчиков положения, счета продукции, световых барьеров, высокочастотных преобразователей световых сигналов в электрические (в оптических линиях связи) и т.п.

Можно заметить, что вольтамперные характеристики фотодиода ничем не отличаются от выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой. Это не случайно. Характеристики фотодиода при $\Phi = 0$ и характеристики транзистора при $I_3 = 0$ – это характеристики запертого p-n-перехода (в транзисторе – коллекторного перехода).

При $I_3 \neq 0$ в базе биполярного транзистора растет концентрация неосновных носителей и соответственно растет ток коллектора (обратный ток коллекторного перехода). Разница же только в том, что в транзисторе концентрация неосновных носителей в базе растет за счет инжекции их из эмиттера, а в фотодиоде — за счет генерации носителей под действием света.

Интегральная чувствительность фотодиода может иметь значения 15 – 20 мА/лм. Максимум спектральной характеристики кремниевых фотодиодов приходится на длину волны около 1 мкм, для германиевых ≈1,4 мкм. Гораздо большую чувствительность имеют фототранзисторы и фототиристоры, в которых световой поток проникает к базе и коллекторному переходу.

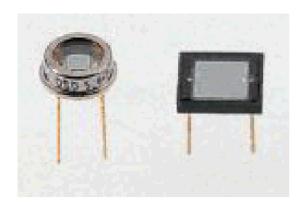




Рис. 25. Фотодиоды улатрафиолетовой области серии OSD фирмы CENTRONIC (a), *p-i-n*-фотодиод SHF 202 (б)

Фотодиодные линейки и матрицы. Многоэлементные фотодиодные приемники предназначены для преобразования двумерной (распределенной по

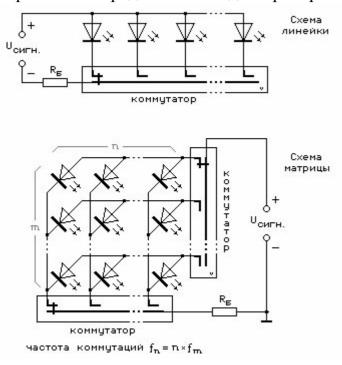


Рис. 26

площади) оптической информации от изображения в одномерную временную последовательность электрических сигналов. Они выпускаются в виде линеек и матриц. В линейках фотодиоды расположены в ряд (строку, линию) с равномерным небольшим шагом, а матричные представляют собой набор таких линеек (рис. 26). Параметры некоторых многоэлементных твердотельных фотодиодов приведены в табл. 6. Развертка изображения осуществляется последовательным считыванием сигналов каждого из фотодиодов линейки, а в матричном варианте - путем поочередного опроса каждой линейки (и каждого фотодиода в линейке). В линейке одни элек-

троды, например аноды фотодиодов, объединены в одну шину, а другие, в данном случае - катоды, выведены на коммутатор (например, на транзисторных ключах). Коммутатор подключает каждый фотодиод к измерительной цепи, которая в простейшем случае может включать в себя источник питания и сопротивление нагрузки. В электронике режим последовательного опроса состояний большого числа элементов и передачи их на один вход называется мультиплексным (а устройство, организующее такой опрос, - мультиплексором).

В матричном варианте фотодиоды подключаются одним электродом к горизонтальной шине (те же аноды), а другим - к вертикальной (катоды). Шины, в свою очередь, также подключены к коммутаторам (мультиплексорам), ко-

торые, как и в случае с линейкой, включают последовательно каждый из фотодиодов в измерительную цепь.

В результате организованного мультиплексирования последовательное подключение вертикальных шин образует развертку по строке (линии, ряду), а переход с одного горизонтального ряда на следующий - развертку по кадру. Так, на выходе схемы образуется последовательность импульсов (видеосигнал), амплитуда которых соответствует освещенности того или иного элемента матрицы.

Фотодиодные линейки и матрицы используются в современных спектрофотометрах, сканерах и других устройствах ввода оптической информации.

Таблица 6

Шифр прибора	Область спектральной чувствительности, мкм	Основная область применения	
S1651	0,40–1,06	Дисководы оптических дисков	
S1671	0,40–1,06	Датчики позиционирования	
S2311	0,19–1,10	Многоканальные спектрофотометры,	
S2312	0,19–1,00	1 1 1	
S2313	0,19–1,05	анализаторы цвета, оптического спектра	

Фотоэлемент - полупроводниковый фотодиод, оптимизированный для прямого преобразования излучения Солнца в электрическую энергию. Для их обозначения часто используются также термины «солнечные элементы», «солнечные батареи». Солнечные элементы работают только в фотогенераторном режиме, функционально выступая в качестве электрических источников питания.

Рабочая площадка отдельного фотоэлемента может достигать площади в несколько квадратных сантиметров, а множество фотоэлементов, объединенных в батареи или панели, могут иметь (как, например, на космических станциях) площадь, измеряемую в квадратных метрах, вырабатывать напряжение в десятки вольт и давать ток в сотни ампер. Общеизвестно применение фотоэлементов в качестве датчиков освещенности в люксметрах и экспонометрах (для фотоаппаратов, копировальных рам и т.п.).

Часто в качестве базового фоточувствительного материала в фотоэлементах используется селен или кремний. Параметры некоторых отечественных селеновых фотоэлементов представлены в табл. 7.

Таблица 7

Фотоэлемент	Площадь фоточувстви- тельной площадки, см ²	Фототок, мкА	Освещенность при измерении фототока, лк
Ф-32С	4,6	6	105
Ф-36С	2,85	40	250
Ф-42С	6,4	6	22
Ф-54С	27,0	110	100
Ф-54С	27,0	550	500

Вследствие больших площадей фоточувствительных поверхностей фотоэлементы обладают существенной инерционностью и поэтому применяются как фотоприемники лишь для контроля сравнительно медленно меняющихся световых потоков (или освещенности), например, в плейтсканерах.

Фототранзисторы (ФТ) (рис. 27) представляют собой тип дискретных опто-электронных фотоприемников, наиболее характерными чертами которого являются наличие механизма встроенного усиления (отсюда высокая фоточувствительность) и схемотехниче-

ская гибкость, обусловленная наличием третьего (правда, не всегда выводимого), управляющего электрода.

Рис.27. В корпусе имеется прозрачное окно, через которое свет попадает в область базы. Обычно его включают по схеме с ОЭ.

Питающее напряжение включается таким образом, что коллекторный переход закрыт, а эмиттерный – открыт. Под воздействием света в базе генерируются электроны и дырки. Накопление в базе неравновесных основных носителей заряда понижает высоту потенциальных барьеров эмиттерного и коллекторного

переходов, в связи с чем, увеличивается инжекция дырок из эмиттера в базу. Соответственно возрастает и ток коллектора. Результирующий ток коллектора при освещении приблизительно равен

$$I'_{\Phi} \cong h_{219} \cdot I_{\Phi}$$
.

Частотный диапазон ФТ выше чем ФР. Недостатком биполярных ФТ является высокий уровень собственных шумов, поэтому лучшими параметрами облада-

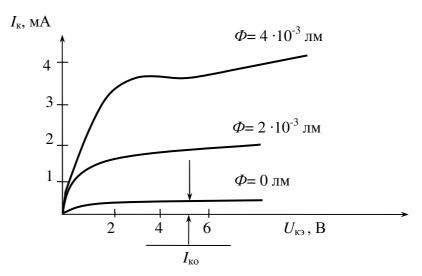


Рис. 28. ВАХ фототранзистора

ют ΦT на полевых транзисторах. ΦT уступают $\Phi Д$ по быстродействию, но за счет усиления сигнала имеют высокую чувствительность.

Фототранзисторы, у которых базовый электрод вообще не выведен, иногда называют двойным фотодиодом. Такие транзисторы обладают наибольшей чувствительностью. Однако наличие вывода базы у биполярных фототранзисторов позволяет использовать не только оптическое, но и электрическое управление фототранзистором, осуществлять компенсацию посторонних внешних воздействий.

Чувствительность фототранзистора значительно выше, чем у фотодиода, за счет внутреннего усиления (коэффициент усиления K_y обычно равен 50-200). Еще большее усиление может быть получено в составном фототранзисторе (K_y = 1000 - 10000). В то же время фототранзисторам присуща заметная инерционность (табл. 8), что ограничивает область их применения в основном устройст-

вами автоматики и управления силовыми цепями. Фототранзисторы применяют в качестве аналоговых и ключевых приемников излучения, а также в оптопарах.

Сравнение параметров фотоприемников различных типов, используемых в оптронах Таблица 8

Фотоприемник	Коэффициент передачи, %	Полоса частот, МГц
Фотодиод	0,1	0–10
Фототранзистор	30	0-0,3
Составной фототранзистор	300	0-0,03

Спектральная чувствительность у фототранзисторов такая же, как у соответствующих фотодиодов. Область применения фототранзисторов схожа с областью применения фотодиодов, с учетом их меньшего быстродействия и большего коэффициента передачи, например, при слабых световых сигналах, при больших (в сравнении с фотодиодом) расстояниях между источником света и фотоприемником. Параметры некоторых отечественных фототранзисторов приведены в табл. 9. В табл. 10 приведены параметры SMD –фототранзистора.

Таблица 9

				Макси-		
Фототранзи-	Разме- ры эле- мента,	Темно- вой ток, мкА, не	Рабочее напряже- ние, В	мальная спек- тральная	Инте- гральная чувстви-	Импульсная постоянная времения с
	MM ²	более	нис, Б	чувстви- тельность, мкм	тельность, мкА/лк	ни, с
ФТ-1К	2,8	3	5	0,8-0,9	0,4	0,00008
ΦΤ-2Γ	1,0	500	12–24	1,5–1,6	2,0	0,00001
ФТ-3	3,0	60	5-10	1,5–1,55	1,0	0,0001
ФТГ-5	3,0	50	5-10	1,5–1,55	1,0	0,00002
КТФ109А	2,0	Сведе- ний нет	5	0,83	0,25 А/Вт	Сведений нет

Таблица 10

Наименование	$U_{ m iny extit{npo6}\ max}$	$U_{\kappa_{2}}$ в режиме насыщения	Темновой ток	Пик спек- тральной чувствит.	Постоянная времени
SMD - ΦT					
BPT-HP133	5,0 B	0,5 B	0,1 мкА	945 нм	15 мкс

Фототиристор - это тиристор, который включается воздействием светового потока. При освещении фототиристора в полупроводнике генерируются носители заряда обоих знаков (электроны и дырки), что приводит к увеличению тока через тиристор на величину фототока.

Фототиристор имеет четырехслойную p-n-p-n-структуру, которую, как и в обычном тиристоре, можно представить в виде комбинации двух транзисторов, имеющих положительную обратную связь по току. Переход фототиристора

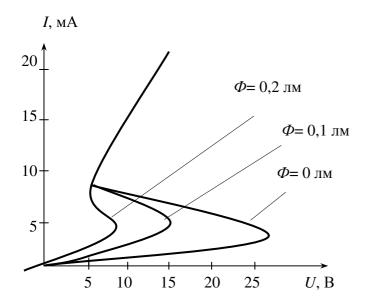


Рис. 28. ВАХ фототиристора

под действием светового управляющего сигнала из закрытого состояния в открытое осуществляется при достижении уровня тока срабатывания $I_{\rm cp}$ скачком после преодоления определенного потенциального барьера. Напряжение включения уменьшается с увеличением освещенности.

Основное достоинство фототиристоров - способность переключать значительные токи и напряжения слабыми световыми сигналами - используется в устройствах «силовой» оптоэлектроники, та-

ких, как системы управления исполнительными механизмами, выпрямителями и преобразователями. Как и фототранзисторы, фототиристоры часто применяются совместно с подобранными по характеристикам излучателями, в виде оптопар.

Фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС) - это фотоприемник, воспринимающий изображение, осуществляющий его разложение на элементарные фрагменты, поэлементное электронное считывание (сканирование) и формирование на выходе видеосигнала, адекватного изображению. ФПЗС, являющийся многоэлементным фотоприемником, выпускается в матричном или линейном виде, достигая в наиболее современных образцах нескольких тысяч элементов для линеек и нескольких миллионов - для матриц. Характеристики некоторых отечественных ФПЗС приведены в табл. 11.

Для ФПЗС существенна близость расположения элементов друг к другу, расстояния между ними измеряются единицами микрометров, что приводит к частичному перекрытию электрических полей соседних элементов и к возникновению собственно явления переноса заряда из одного элемента в другой (явление зарядовой связи).

ФПЗС представляет собой микросхему на полупроводниковом кристалле (кремний), поверхность которого покрыта слоем (0,1 мкм) диэлектрика (окись кремния), а на этот слой нанесены прозрачные электроды (алюминий или поликремний). Размеры электродов измеряются единицами микрометров, а расстояния между ними составляют менее 1-2 мкм. Строка от строки отделяются узкими областями так называемой стоп-канальной диффузии.

Элементарная ячейка ФПЗС представляет собой миниатюрный МОПконденсатор (аббревиатурой МОП принято обозначать микросхемы, изготовленные по технологии металл-окисел-полупроводник), способный удерживать заряд, пропорциональный падающему на элемент световому потоку.

Время хранения заряда невелико -1-100 мс (может измениться освещенность участка, электроны могут рекомбинировать с дырками или притянуться другим электрическим полем - «рассосаться» и т.п., но при высоких частотах опроса эти процессы не успевают реализоваться).

Вследствие близости электродов зарядовый пакет может быть передвинут под соседний электрод, если потенциал там окажется выше и, следовательно, потенциальная яма глубже. Чередуя разность потенциалов на соседних электродах определенным образом, можно передвинуть сформированный под действием света зарядовый пакет вдоль линейки или вдоль строки в матрице и «снять» его с последнего элемента ряда. Временная последовательность зарядовых пакетов, переданная по элементам строки на ее выход, образует видеосигнал. В случае матричного ФПЗС видеосигналы отдельных рядов, передаваясь последовательно один за другим, образуют видеосигнал кадра изображения.

Наиболее широкое применение в полиграфии ПЗС-фотоприемники нашли в разнообразных сканерах (ручных, листовых, планшетных), цифровых фотоаппаратах и других устройствах оцифровки изображений (слайд-сканерах и т.п.).

Таблица 11

Тип прибора	Диапазон спектральной чувствительности, мкм	Вольтовая чувствительность, мВ/лк	Частота опроса, МГц
ФПЗС1Л	0,5–0,1	3,0	Сведений нет
ФПЗСЗМ	0,4–1,0	30,0	Сведений нет
1200ЦЛ1	0,5–1,0	2,4	0,05–3
1200ЦЛ2	0,36–1,0	8,0	0,1–3
1200ЦМ2А	0,5–1,0	10,0	Сведений нет

ОПТОПАРЫ И ОПТРОНЫ

Оптопара представляет собой оптоэлектронный прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь, т.е. связь входа с выходом осуществляется с помощью световых сигналов, и обеспечена электрическая изоляция - (гальваническая) развязка входа и выхода. Понятие «оптрон» трактуется в литературе несколько шире, чем оптопара (слово «оптопара» само по себе несет уже некоторое ограничение - пара, т.е. всего два элемента, хотя, как правило, есть еще оптическая среда, да и в одном корпусе зачастую размещается не одна пара элементов). Исторически термин «оптрон» получил изначально право на существование, но вскоре выяснилось, что одна из американских фирм была зарегистрирована под названием

«Optron», и поэтому международные организации не рекомендуют применять то же слово для названия прибора, чтобы не переносить имя этой фирмы на изделия других производителей. Более того, МЭК (Международная электротехническая комиссия) предложила даже термин transoptor, однако он не прижился. Так или иначе, но сегодня у нас официально (в справочниках, технической документации) применяют термин «оптопара», распространяя его и на приборы с более чем двумя элементами.

В качестве одного элемента оптопары – **излучателя** могут быть использованы ИКД, СИД, электролюминесцентный порошковый или пленочный излучатель, а также полупроводниковый лазер. Обычно применяют инфракрасный излучающий диод, который отличается от СИД и ЭЛИ большим КПД, а также простотой структуры и управления.

Классифицировать оптопары принято по типу **фотоприемников** - резисторные, диодные, транзисторные, тиристорные и т.д.

Спектральные характеристики приемника и излучателя должны, по возможности, совпадать.

Оптической средой распространения сигнала от излучателя к приемнику применяют волоконные световоды.

Входной характеристикой оптрона является ВАХ используемого излучателя (например, СИД или ИКД), а выходной – ВАХ фотоприемника.

Резисторные оптопары. В резисторных оптопарах (рис. 29) источником является излучающий диод либо миниатюрная лампа накаливания, а приемником служит фоторезистор, чаще всего на базе селенида кадмия.

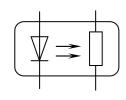


Рис. 29

Свойства фоторезисторов не зависят от полярности питающего напряжения, поэтому выход резисторной оптопары можно подключить к цепи переменного тока, что иногда имеет существенное значение для схем управления оборудованием в цеховых условиях. Помимо функций гальванической развязки оптопары могут выполнять функции разветвления сигнала на несколько независимых друг от друга каналов.

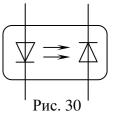
Однако оптопара может быть не только передатчиком сигнала, но и служить его первоисточником, выполняя функцию датчика информации. Пример такого рода представляет так называемая оптопара с открытым оптическим каналом. В данном случае свет от источника через рабочее окно в корпусе прибора испускается во внешнюю среду, где, отразившись от специально устанавливаемого отражателя (вогнутого зеркала), возвращается в корпус оптрона и падает на два фоторезистора, которые имеют общую точку и могут электрически составлять одну половину измерительного моста (другая половина составляется из двух постоянных сопротивлений). Конструктивно фотосопротивления расположены в линию, поэтому если между оптопарой и зеркалом поместить какой-либо плоский объект, например край листа бумаги, то можно очень точно следить за его перемещением вдоль этой линии.

Диодные оптопары. В диодных оптопарах (рис.30) фотоприемником служит фотодиод на основе кремния, а источником является инфракрасный ди-

од, излучающий на длине волны около 1 мкм. Поскольку фотодиоды могут работать как в диодном, так и фотогенераторном режиме, то выходная цепь при необходимости может работать автономно - без источника питания (например,

подавать сигнал непосредственно на измерительную головку, скажем, стрелочный микроамперметр или милливольтметр).

Диодный оптрон АОД134AC представляет набор из двух оптопар в одном корпусе, что создает определенные удобства при реализации на них гальванических развязок в электротехнической аппаратуре.



Транзисторные оптопары. Типовой источник в транзисторных оптопарах - инфракрасный диод, а фотоприемником служит, как пра-

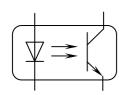


Рис. 31

вило, кремниевый (*n-p-n*) одинарный или составной транзистор (рис. 31). Характерные примеры схем транзисторных оптопар и графических зависимостей, связывающих выход со входом, приведены на рис. Коэффициент передачи по току у транзисторной оптопары 3ОТ138 (A, Б) намного превышает (50-250%) возможности диодных оптопар. Это позволяет усилить слабый токовый сигнал в самой микросхеме оптопары, не рискуя «забить» его шумами и помехами при передаче по сигнальному кабелю. Еще большего усиления добиваются при использовании составных фототранзисторов, как, например, в оптопаре АОТ126 (A, Б). Но, как говорят, медаль имеет две стороны. Повышение коэффициен-

та передачи за счет усиления на транзисторе снижает быстродействие, так как

новый элемент привносит свою инерционность за счет межэлектродных емкостей.

Диодным оптопарам отдается предпочтение в компьютерных каналах связи, где быстродействие - один из определяющих параметров, а сам сигнальный импульс достаточно чист и уверенно воспринимаем. Транзисторные оптопары более применимы к аналоговым сигналам, а то и используются в виде датчиков, как, например, оптопары с открытым оптическим каналом AOT146 (отражательного типа) или AOT151A (щелевого типа).

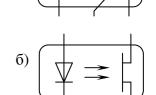


Рис. 32

Датчики на базе оптопар отражательного типа, имея источник инфракрасного излучения, хорошо работают в условиях повышенной запыленности (например, бумажной пыли в печатных машинах). Оптопары щелевого типа часто используются в качестве концевых выключателей (например, в принтерах, сканерах), когда, скажем, каретка доходит до крайнего положения и необходимо остановить движение или осуществить реверс. При этом заслонка или «флажок», связанный с кареткой, входит в щель оптопары, прерывая световой поток и сообщая тем самым о достижении крайнего положения. Следует отметить универсальность однопереходного фототранзистора (рис. 32 а). Он может быть использован не только как переключающийся прибор, но и как ФД, ФР, ФЭ.

Тиристорные оптопары. В отличие от транзисторных тиристорные оптопары позволяют усиливать информационный сигнал не только по току, но и по мощности, поскольку приспособлены для работы при напряжениях на входе и выходе, отличающихся на порядки - на входе сигнал уровня 5 В (компьютер-

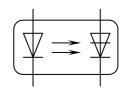


Рис. 33. Динисторный оптрон

ный) превращается на выходе в 220 В переменного тока. Такая тиристорная оптопара в свою очередь может использоваться для управления тиристорами на десятки киловольт или сотни ампер (например, в энергетических сетях). Пример обозначения тиристорной оптопары - АОУ115Д

Обобщим полученную информацию. Усиление или преобразование входного электрического сигнала в оптопарах происходит следующим образом: изменение входного тока сопрово-

оптопарах происходит следующим образом: изменение входного тока сопровождается изменением мощности его излучения и изменением потока фотонов, падающих на фотоприемный элемент оптопары. При изменении облучения фотоприемного элемента происходит либо изменение сопротивления ФР, либо изменение обратного тока ФД, либо появление фото-ЭДС при работе ФД в режиме фотоэлемента, либо усиление фототока в ФТ, либо переключение из закрытого состояния в открытое фототиристора или однопереходного фототранзистора.

На основе оптронов возможно формирование обучаемой системы восприятия и распознования образов – **персептрона**.

Оптоэлектронные ИС – ИС, содержащая ту или иную оптопару. В зависимости от необходимого быстродействия обработки аналоговых или логических сигналов, от необходимой мощности на выходе и от других требований в качестве фотоприемного элемента применяют различные приборы. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Так ФД может обладать большим быстродействием, но его коэффициент усиления фототока не превышает единицы. Поэтому всегда между выходом оптопары и исполняющим устройством есть согласующая электронная схема. При современном уровне интегральной технологии введение такой согласующей схемы в интегральном исполнении, объединенной с оптопарой в едином корпусе не представляет принципиальной сложности. Но благодаря наличию оптической связи ОИС обладают рядом достоинств: идеальной гальванической развязкой, помехозащищенностью оптических каналов связи, возможность параллельной обработки информации, т.к. можно использовать варьирование интенсивности, поляризации, фазы колебаний, направления, возможность выдачи выходной информации.

Таблица 14

		1 аолица 14
АОД130А	* * *	Диодная оптопара
AOT170		Сдвоенная оптопара Дарлингтона для переменного сигнала
AOT166A		Высокочувствительная транзисторная оптопара для переменного сигнала
KP249KH8A		Сдвоенная транзисторная оптопара для переменного сигнала
AOT178A		Сдвоенная транзисторная оптопара с высокой помехо- устойчивостью
AOT162A		Высоковольтная оптопара Дарлингтона с выводом базы
AOT165A		Сдвоенная оптопара с транзистором Дарлингтона высокочувствительная
АОТ174А-Д	* * * * * * * * * * * * * * * * * * *	Транзисторная оптопара с нормированным коэффици- ентом передачи

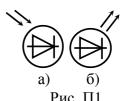
МИНИ-ТЕСТ

1. Какова природа светового излучения?

- 1. Волновая;
- 2. Квантовая;
- 3. Двойственная: квантово-волновая.

2. От чего зависит энергия кванта излучения (фотона)?

- 1. От спектрального состава излучения;
- 2. От частоты излучения;
- 3. От интенсивности светового потока.
- 3. Каждому из перечисленных диодов укажите соответствующее условное обозначение, приведенное на рис.4:



1) светодиод; 2) фотодиод.

Ответ: 1)_____;2)_____.

- 4. В каком направлении следует включать светодиод?
- 1. В прямом;
- 2. В обратном.
- **5.** В каком направлении смещаются *p-n*-переходы в полупроводниковом индикаторе?
- 1. В прямом;
- 2. В обратном.
- 6. Какие преобразования энергии происходят в инжекционном светодиоде?
- 1. Электрическая в энергию некогерентного светового излучения;
- 2. Электрическая в световую световая в электрическую;
- 3. Световая в электрическую.
- 7. Какая конструкция индикатора позволяет воспроизводить все буквы алфавита?
- 1. Матричная;
- 2. Семисегментная;
- 3. Восьмиэлементная;
- 8. На рис. П2 изображены ВАХ светодиодов, выполненных из: *GaAs, GaP, SiC*. Укажите № кривой, соответствующей *GaAs* светодиоду.

диоду. $(\Delta W_{GaAs} = 1.43 \text{ эВ}, \Delta W_{GaP} = 2.26 \text{ эВ}, \Delta W_{SiC} = 2.39 \text{эВ})$

- Кривая 1
- 2. Кривая 2
- 3. Кривая 3

I, мА, 1 2 3 10 1 2 3 U, В Рис. П2

9. Какой из перечисленных приборов включается в обратном направлении?

- 1. Инфракрасный диод;
- 2. Светодиод;
- 3. Фотодиод;

10. Оптоэлектронный прибор – это устройство

- 1. для преобразования электрического сигнала в оптический;
- 2. для преобразования оптического сигнала в электрический;
- 3. для преобразования электрического сигнала в оптический и обратно;
- 4. усиления оптических сигналов.

11. Какие приборы используются в оптронной паре в качестве излучателей?

- 1. Фототиристоры; 2. Фототранзисторы; 3. Инфракрасные диоды;
- 4. Лазерный диод; 5. Светоизлучающий диод.

Ответы:			

12. Какая из приведенных маркировок обозначает диодный оптрон? 1. AOД201A1 2. AOТ128 3. AЛС330

13. Из указанных сравнительных характеристик фототиристора и обычного тиристора выбрать неправильную.

- 1. Вольт-амперная характеристика фототиристора подобна характеристике обычного тиристора.
- 2. Роль тока управления I_{y} обычного тиристора в фототиристоре играет световой поток Φ .
- 3.В обоих тиристорах имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.
- 4. В фототиристоре в отличие от обычного тиристора отсутствует обратная ветвь вольт-амперной характеристики с отрицательным напряжением на аноде.
- 5.В фототиристоре в отличие от обычного тиристора цепь управления изолирована от анодного напряжения.

14. Указать неправильное утверждение.

- 1. Оптрон прибор, содержащий источник и приемник излучения, помещенные в один корпус.
- 2. Оптрон элемент связи, информация в котором передается оптически.
- 3. В оптроне достигается гальваническая развязка входной и выходной цепей.
- 4. Источником излучения в оптроне является светодиод.
- 5. Свойства оптрона не зависят от приемника излучения.

15. В перечисленных свойствах оптронов указать несоответствующее действительности.

- 1. Фоторезисторный и фототранзисторный оптроны имеют небольшое быстродействие.
- 2. Фотодиодный оптрон обладает высоким быстродействием.
- 3. Фототиристорный оптрон коммутирует силовые цепи с напряжением 1300 В и током 300 А.
- 4. У фотодиодного оптрона коэффициент передачи по току больше, чем у фототранзисторного.
- 5. У фотодиодного оптрона коэффициент передачи по току меньше, чем у фототранзисторного.

16. На рис. ПЗ изображены условные обозначения различных оптронов. Каждой из перечисленных оптопар укажите соответствующее условное обозначение.

1) диодная; 2) тиристорная; 3) резисторная.

Ответы: 1___; 2____; 3____.

17. На рис. ПЗ (е) изображен оптрон

- 1) на составных биполярных транзисторах;
- 2) на однопереходном транзисторе;
- 3) на тринисторе.

18. Сколько р-п-переходов в приборе, изображенном на рис. ПЗ (г)?

- 1) два;
- 2) три;
- 3) четыре.

19. Какие превращения энергии происходят в фототранзисторе?

- 1. Электрическая в энергию некогерентного светового излучения;
- 2. Электрическая в световую световая в электрическую;
- 3. Световая в электрическую.

20. На рис. П4 изображены вольт-амперные характеристики различных фотоприемников. Каждому из перечисленных фотоприемников укажите соответствующую ВАХ.

1) Фототиристор; 2) Фототранзистор; 3) Фоторезистор.

Ответы: 1 ; 2 ; 3 ...

