

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА**

**ЧЕБОТАРЕВ В. И., ДУМИН А. Н., ХОЛОДОВ В. И.**

# **ПОЛУПРОВОДНИКИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Учебно-методическое пособие  
по основам радиоэлектроники  
для самостоятельной работы студентов  
физических специальностей

ХАРЬКОВ – 2008

УДК 261.375  
ББК 32.844  
Че 34

*Рекомендовано ученым советом радиофизического факультета  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 7 от 27. 08.08)*

Рецензенты:

Зав. отд. космической радиофизики РИ НАН Украины,  
доктор физ.-мат. наук, проф. А. А. Минаков;  
ст. науч. сотрудник ИРЭ НАН Украины,  
доктор физ.-мат. наук, проф. А. А. Булгаков;  
доц. Каф. полупроводниковой электроники ХНУ имени В. Н. Каразина  
канд. физ.-мат. наук, доц. Н. И. Белецкий.

**Че 34 Чеботарев В. И., Думин А. И., Холодов В. И. Полупроводники  
в радиоэлектронике: Учебно-методическое пособие /2-е изд., испр.  
и доп. Под ред. В. И. Чеботарева.– Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина,  
2008.– 52 с.**

В пособии рассматриваются физические основы полупроводниковой электроники. В первую очередь приведены общие сведения о полупроводниках и рассмотрены электрические процессы в р-п переходе. Далее представлены сведения об основных разновидностях диодов и транзисторов. Приведены схемы их включения и многочисленные примеры использования в радиоэлектронике. Сформулированы задания для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей и используется при изучении курсов «Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы радиоэлектроники», «Электронные цепи».

УДК 261.375  
ББК 32.844

© ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008  
© Чеботарев В. И., Думин А. И.,  
Холодов В. И., 2008  
© Дончик И. Н., макет обложки, 2008

## 1. Общие сведения о полупроводниках

Все вещества в зависимости от их способности проводить электрический ток делятся на **проводники**, **диэлектрики** и **полупроводники**. Проводники обладают высокой электрической проводимостью, диэлектрики – ничтожно низкой, а промежуточное место между ними занимают полупроводники. Это наиболее распространённая в природе группа веществ. К ней относятся: 12 химических элементов, ряд химических соединений, большинство минералов, а также многие органические вещества. Для полупроводников характерна значительная зависимость электропроводности от температуры – с ее ростом она увеличивается.

Только небольшое число полупроводниковых веществ находит применение в электронике, поскольку исходные материалы, из которых изготавливают полупроводниковые приборы, должны обладать определенными физико-химическими и механическими свойствами. Этим требованиям удовлетворяют в первую очередь монокристаллы, в которых, в отличие от аморфных тел и поликристаллов, обеспечивается высокая периодичность кристаллической решетки.

Среди двенадцати химических элементов наиболее подходящими для производства полупроводниковых приборов являются германий (Ge) и кремний (Si). Наряду с ними в полупроводниковой технике находят применение ряд соединений: арсенид галлия (GaAs), антимонид индия (InSb) и др.

На внешней электронной оболочке элементов Ge и Si находится четыре валентных электрона. При образовании кристаллов атомы элементов располагаются так, что их внешние электронные оболочки перекрываются, и валентные электроны соседних атомов становятся общими, образуя *ковалентные* (парноэлектронные) связи. Основу кристаллической решетки Ge и Si составляет тетраэдр – пространственная фигура, имеющая четыре треугольные грани. В вершинах тетраэдра и в его центре расположены атомы. При рассмотрении физических процессов в полупроводниковых материалах удобнее пользоваться плоским эквивалентом тетраэдрической решетки, где каждый атом соединяется парноэлектронными связями с четырьмя ближайшими атомами, как это показано на рис.1 для идеального монокристалла.

При абсолютном нуле температуры все валентные электроны в кристаллической решетке связаны (рис 1а), свободных электронов нет, и такой кристалл является диэлектриком.

С повышением температуры тепловые колебания атомов решетки приводят к разрыву электронных связей (рис 1б). Электроны, покинувшие свои ковалентные орбиты, становятся свободными. Появление свободных электронов сопровождается образованием **дырок** – вакансий, т. е. пустых мест в атомах, которые покинул электрон. *Дырка ведет себя подобно*

**частице с элементарным положительным зарядом, равным заряду электрона.** Под действием внешнего электрического поля электроны и дырки начинают двигаться навстречу друг другу, образуя электрический ток.

В отличие от электрона, который может блуждать, занимая в решетке любое положение, дырка может перемещаться от одного атома к другому только за счет того, что разорванная ковалентная связь замещается электроном одного из соседних атомов, где при этом образуется новая дырка и т. д. Поэтому способности электронов и дырок двигаться под действием электрического поля, называемые их *подвижностью*, различны. В Ge и Si подвижность электронов в 2 – 2,5 раза выше, чем подвижность дырок.

Появившись одновременно со свободным электроном, дырка в течение некоторого времени перемещается, а затем сливается с одним из свободных электронов. В стационарном режиме образование таких пар – *генерация* и их исчезновение – *рекомбинация* находятся в динамическом равновесии.

Причиной разрыва электронных связей, приводящих к появлению в полупроводнике пар электронов и дырок, служат не только повышение температуры, но также облучение светом, радиация и другие явления, связанные с увеличением внутренней энергии кристаллической решетки.

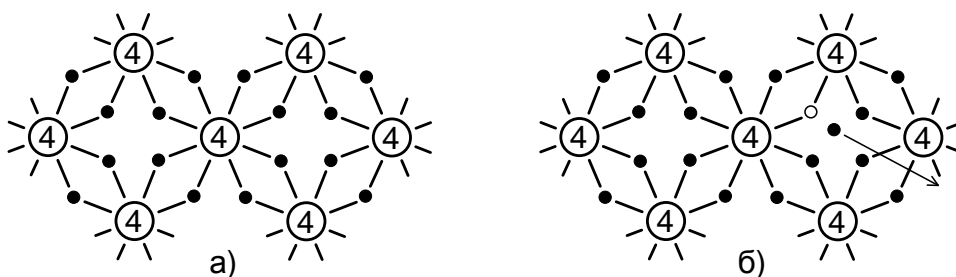


Рис.1. Модель кристаллической решетки идеального полупроводника

(○ – дырка, ● – свободный электрон):

а) плоский эквивалент кристаллической решетки;

б) появление свободного электрона и дырки

**Зонная теория.** Анализ процессов, происходящих в полупроводниковых материалах и полупроводниковых приборах, основывается на *зонной теории твердого тела*, учитывающей различные квантовомеханические эффекты. Согласно этой теории, электроны в каждом уединенном атоме могут занимать вполне определенные разрешенные энергетические уровни. В системе атомов эти уровни расщепляются, образуя *энергетические зоны*. Разрешенные энергетические зоны отделены друг от друга запрещенными энергетическими участками – *запрещенными зонами*. Их ширина определяется строением и состоянием атомов, образующих монокристалл.

Для рассмотрения физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах интерес представляют только три верхние

энергетические зоны: *валентная, запрещенная и свободная – зона проводимости* (рис. 2). Именно эти зоны обуславливают электропроводность полупроводника. Причем одним из важнейших параметров полупроводникового материала, определяющим его электрические свойства, является ширина запрещенной зоны  $\Delta E$ . Значение этого параметра определяет принадлежность вещества к полупроводникам или к диэлектрикам. Так, к полупроводникам принято относить вещества с  $\Delta E < 3$  эВ, а к диэлектрикам вещества с  $\Delta E > 3$  эВ.

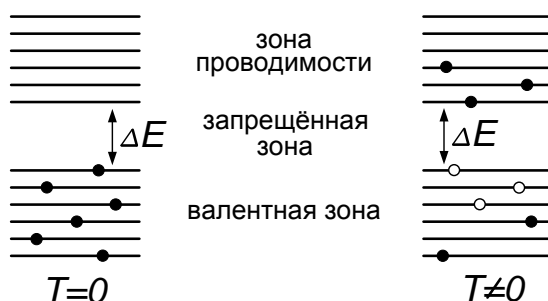


Рис. 2. Верхние энергетические зоны полупроводника

При температуре абсолютного нуля валентная зона заполнена электронами целиком, а зона проводимости пуста, поэтому электропроводность полупроводника равна нулю. С ростом температуры электроны переходят в зону проводимости, при этом в валентной зоне образуются свободные уровни и появляется возможность перехода на них электронов.

### Вопросы и задания

1. В зависимости от какого свойства вещества делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники?
2. Какой является электрическая проводимость полупроводникового кристалла при абсолютном нуле температуры? Объясните почему?
3. Как изменяется проводимость полупроводников с ростом температуры? Объясните почему?
4. Что такое «дырка»? Как она ведет себя в электрическом поле?
5. Какие теоретические представления лежат в основе анализа процессов, происходящих в полупроводниковых материалах и полупроводниковых приборах?
6. Какие энергетические зоны используются при рассмотрении физических процессов в полупроводниках? Какой параметр полупроводникового материала определяет его электрические свойства?

## 2. Собственные и примесные полупроводники

**Собственные полупроводники.** В абсолютно чистом, так называемом *собственном* полупроводнике количество электронов и дырок одинаково. То есть *концентрации свободных электронов в зоне проводимости  $n_i$  и свободных дырок в валентной зоне  $p_i$  в собственном полупроводнике равны* ( $i$  от *intrinsic* – «собственный») и в соответствии с зонной теорией твердого тела определяются выражением:

$$n_i = p_i = AT^{3/2} \exp(-\Delta E/2kT). \quad (1)$$

Здесь  $A$  – числовой множитель, содержащий универсальные константы;  $T$  – температура в градусах кельвина;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны при  $T = 0$  К, равная минимальной энергии, которую нужно сообщить электрону, чтобы вывести его из валентной зоны в зону проводимости;  $kT$  – средняя тепловая энергия электрона.

Приведенная формула (1) указывает на сильную зависимость концентраций  $n_i$  и  $p_i$  от температуры  $T$  и объясняет уменьшение сопротивления полупроводников с ростом температуры.

Параметры полупроводниковых материалов, получивших наибольшее применение для изготовления полупроводниковых приборов, приведены в таблице 1 (для  $T = 300$  К).

Таблица 1

Параметр	Кремний	Германий	Арсенид галлия
Атомный номер	14	32	—
Электронные оболочки	2, 8, 4	2, 8, 18, 4	—
Плотность атомов, $N$ , см <sup>-3</sup>	$5 \cdot 10^{22}$	$4,4 \cdot 10^{22}$	$2,2 \cdot 10^{22}$
Удельное сопротивление, $\rho_i$ , Ом·см	$3 \cdot 10^3$	0,6	$7,5 \cdot 10^6$
Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$ , отн. ед.	12	16	11
Ширина запрещенной зоны, $\Delta E$ , эВ	1,12	0,67	1,43
Концентрация электронов, $n_i$ (дырок, $p_i$ ), см <sup>-3</sup>	$2 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,8 \cdot 10^6$
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /сВ	1500	3900	8500
Подвижность дырок, см <sup>2</sup> /сВ	450	1900	400
Коэффициент диффузии электронов, $D_n$ , см/с	36	100	290
Коэффициент диффузии дырок, $D_p$ , см/с	13	45	12
Диффузионная длина дырок, мм	0,3 ÷ 1,5	0,1 ÷ 0,5	—

**Примесные полупроводники.** Любые примеси в полупроводниках приводят к существенному изменению их свойств. В частности, изменяется электропроводность полупроводника. *Примесные* полупроводники, в которых концентрации электронов и дырок значительно различаются, играют главную роль в полупроводниковой электронике. Концентрации носителей заряда обоих знаков в любых примесных полупроводниках удовлетворяет соотношению

$$np = n_i^2 = p_i^2 = A^2 T^3 \exp(-\Delta E/kT). \quad (2)$$

При заданной температуре это произведение является постоянной величиной

$$np = \text{const} = n_i^2 = p_i^2. \quad (3)$$

Примеси, создающие избыток электронов в кристаллической решетке, называют *донорными* (от *donor* – «жертвователь»), а примеси, создающие их нехватку, т.е. избыток дырок в кристаллической решетке – *акцепторными* (от *to accept* – «принимать»). **Чтобы примесь существенно влияла на величину проводимости полупроводника, концентрация примеси должна быть на порядок или несколько порядков больше собственной концентрации свободных носителей.**

В качестве донорных примесей используют пятивалентные химические элементы. Так, если в кремний ввести атом пятивалентного фосфора, то четыре из его валентных электронов образуют с четырьмя электронами соседних атомов кремния ковалентные связи. Пятый электрон оказывается слабо связанным с ядром и при самых незначительных тепловых колебаниях решетки покидает атом и становится свободным (рис. 3а), увеличивая проводимость кристалла. При этом **атом примеси превращается в положительный ион с единичным зарядом**. Поскольку примесные электроны слабее связаны с ядром, их концентрация может значительно превышать концентрацию собственных электронов, а следовательно, и концентрацию дырок. Полупроводники с донорной примесью называются *полупроводниками с электронной проводимостью* или **полупроводниками *n*-типа** (от *negative* – «отрицательный»). Основными носителями заряда здесь являются электроны, а неосновными – дырки.

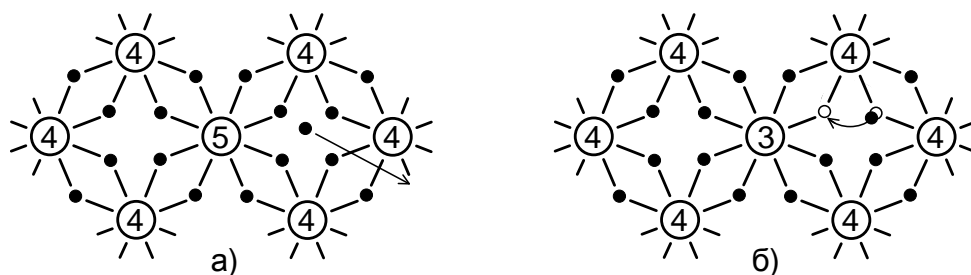


Рис. 3. Модели кристаллических решеток примесных полупроводников:  
а) *n*-типа;  
б) *p*-типа

Если в полупроводнике *n*-типа концентрация донорной примеси  $N_D$  настолько высока, что  $N_D \gg n_i$ , тогда концентрация электронов  $n_n$  значительно превышает концентрацию дырок  $p_n$  ( $n_n \gg p_n$ ), причем с учетом (3) имеем:

$$n_n \approx N_D, \quad (4)$$

$$p_n = (n_i^2 / n_n) \approx (n_i^2 / N_D). \quad (5)$$

В качестве акцепторных примесей используют трехвалентные химические элементы. Так, если в кремний ввести атом трёхвалентного бора, то для валентной связи бора с четырьмя ближайшими атомами кремния необходимы четыре валентных электрона. Недостающий электрон отбирается из основной решетки, и тогда атом бора превращается в отрицательный ион, а на месте покинувшего атом кремния электрона образуется дырка (рис. 3б). Полупроводники с акцепторной примесью называются *полупроводниками с дырочной проводимостью* или **полупроводниками *p*-типа** (от *positive* – «положительный»). Основными носителями заряда здесь являются дырки, а неосновными – электроны.

Если в полупроводнике *p*-типа концентрация акцепторной примеси  $N_A \gg p_i$ , тогда и концентрация дырок  $p_p$  значительно превышает концентрацию электронов  $n_p$  ( $p_p \gg n_p$ ), причем с учетом (3) имеем:

$$p_p \approx N_A, \quad (6)$$

$$n_p = (n_i^2 / p_p) \approx (n_i^2 / N_A). \quad (7)$$

**Движение носителей заряда.** Направленное движение свободных электронов и дырок в полупроводниках обусловлено явлениями их диффузии и дрейфа.

**Диффузия** – перемещение свободных носителей заряда от мест с большей концентрацией к местам с меньшей концентрацией. Непременным условием диффузии является наличие градиента концентраций носителей заряда. Основным параметром этого процесса служит *коэффициент диффузии*, связывающий градиент концентрации свободных носителей с их потоком. Другим параметром этого движения является *диффузионная длина* – среднее расстояние, на котором концентрация носителей уменьшается в  $e$  раз.

**Дрейф** – направленное движение свободных носителей заряда под действием внешнего электрического поля. Непременным условием дрейфа является наличие градиента потенциала электрического поля. Основным параметром дрейфового движения является *подвижность*, характеризующая скорость, приобретаемую свободными носителями заряда в электрическом поле единичной напряженности, например 1В/см.

Диффузия и дрейф электронов и дырок в полупроводниках сопровождается процессами генерации и рекомбинации носителей заряда.

**Численный пример.** Приведём численные данные, иллюстрирующие рассмотренные понятия. Плотность атомов  $N$  в 1 см<sup>3</sup> в твёрдом теле имеет величину порядка  $10^{22} — 10^{23}$  см<sup>-3</sup> (в Si  $N \approx 5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>, в Ge  $N \approx 4,4 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>). Концентрация свободных электронов  $n$  при комнатной температуре составляет: в металле  $n \approx 10^{22}$  см<sup>-3</sup>; в диэлектрике  $n \approx 10^{-2}$  см<sup>-3</sup>; в собственных полупроводниках в Ge  $n_i \approx 2,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, в Si  $n_i \approx 2 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

Пусть в примесном полупроводнике Si количество вводимых атомов, например, донорной примеси составляет всего 0,0001% (1 атом примеси на 1 миллион атомов исходного материала). Следовательно, концентрация



примеси  $N_D$  равна  $N_D = N \cdot 10^{-6} \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . При комнатной температуре все атомы примеси ионизированы и дадут  $n_n = N_D \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  электронов. В соответствии с формулой (5) имеем  $p_n = (n_i^2 / n_n) \approx 4 \cdot 10^{20} / 5 \cdot 10^{16} = 0,8 \cdot 10^4$ . Следовательно, в рассмотренном примере концентрация электронов в зоне проводимости  $n_n$  превышает концентрацию дырок  $p_n$  в валентной зоне более, чем в  $10^{12}$  раз!

### **Вопросы и задания**

1. Какие полупроводники называют собственными, какие – примесными?
2. Какие примеси называют донорными, какие – акцепторными?
3. При каком условии примесь существенно влияет на величину проводимости полупроводника?
4. Какие носители заряда в примесном полупроводнике называют основными, а какие – неосновными? Как соотносятся их концентрации?
5. Какими явлениями обусловлено направленное движение электронов и дырок в полупроводниках?
6. Кристалл германия Ge легирован трехвалентным индием In таким образом, что на один атом In приходится 2 миллиона атомов Ge. Во сколько раз возрастет концентрация дырок, если плотность атомов Ge  $N = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация дырок в собственном полупроводнике –  $p_i = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ?
7. При очистке кристалла кремния Si от фосфора P достигнута концентрация примеси, при которой на один атом P приходится  $10^{11}$  атомов Si. Во сколько раз концентрация электронов в таком кристалле выше по сравнению с концентрацией электронов в чистом кремнии Si, если  $n_i = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ? Плотность атомов кремния Si  $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .
8. Кристалл чистого кремния Si необходимо превратить в полупроводник  $p$ -типа с  $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  путем легирования его бором В. Найти соотношение между количеством атомов бора В и количеством атомов кремния Si в единице объема, если плотность атомов Si  $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .
9. В процессе работы полупроводникового прибора на основе германия Ge его температура поднялась с  $T_1 = 300 \text{ К}$  до  $T_2 = 320 \text{ К}$ . Во сколько раз увеличится концентрация собственных носителей зарядов, если  $\Delta E = 0,67 \text{ эВ}$ ,  $kT_1 = 0,025 \text{ эВ}$  ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ,  $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ )?

### 3. Электронно-дырочный переход

Переходный слой между областями твердого тела с различными типами или значениями электрической проводимости называется **электрическим переходом**.

Электрический переход между областями полупроводника, одна из которых имеет проводимость  $n$ -типа, а другая –  $p$ -типа, называют **электронно-дырочным** или  **$p$ - $n$  переходом**. **Свойства этого перехода играют исключительно важную роль в электронике, так как они положены в основу принципов работы различных полупроводниковых приборов.**

По соотношению концентраций основных носителей зарядов в  $p$ - и  $n$ -областях перехода различают *симметричные  $p$ - $n$  переходы*, когда  $n_n = p_p$ , и *несимметричные  $p$ - $n$  переходы*, когда  $n_n > p_p$  или  $n_n < p_p$ . В последних случаях различие может составлять 100 – 1000 раз и тогда область с большей концентрацией примеси называют *эмиттером*, а с меньшей – *базой*.

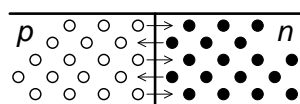
В зависимости от площади перехода  $p$ - $n$  переходы разделяются на *точечные* и *плоскостные*. В зависимости от толщины области изменения концентрации примеси вблизи границы перехода  $p$ - $n$  – на *резкие переходы* и *плавные переходы*.

Переходы, образованные между двумя полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны, называются *гетеропереходами*.

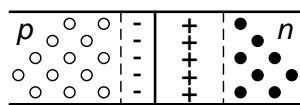
#### 3.1. Равновесное состояние перехода

Рассмотрим идеализированный полупроводниковый прибор с резкой плоской границей  $p$ - $n$  перехода. Торцы прибора снабжены контактами, посредством которых к нему может быть приложено внешнее напряжение.

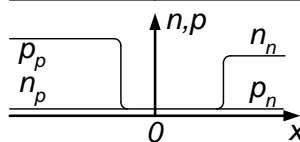
Равновесное состояние перехода, окрестность границы раздела которого представлена на рис. 4, соответствует нулевому внешнему напряжению. Поскольку концентрация электронов в  $n$ -области значительно больше, чем в  $p$ -области, ( $n_n \gg n_p$ ), часть электронов из  $n$ -области диффундирует в  $p$ -область (рис. 4а). При этом в  $p$ -области вблизи перехода появятся избыточные электроны. Их рекомбинация с дырками приведет к появлению нескомпенсированных отрицательных зарядов акцепторных ионов (рис. 4б). С другой стороны от границы – в  $n$ -области обнажатся нескомпенсированные положительные заряды донорных ионов (рис. 4б). Последнее явление эквивалентно уходу – диффузии дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. Ионизация атомов примеси зарядами, пересекающими границу раздела, снижает в  $p$ - $n$  переходе концентрацию подвижных носителей заряда, формируя слой с пониженной электропроводностью – *обедненный слой* (рис. 4в).



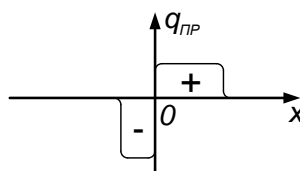
а) Изначальная встречная диффузия основных носителей заряда через границу раздела



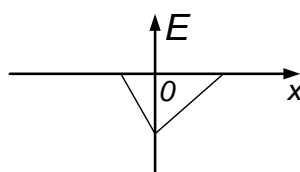
б) Накопление в переходе нескомпенсированных пространственных зарядов ионов примеси



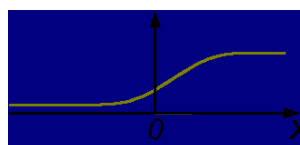
в) Распределение концентраций носителей заряда ( $p_p \gg n_p$ ,  $n_n \gg p_n$ )



г) Распределение в переходе плотности пространственных зарядов ионов примеси



д) Распределение в переходе электрического поля



е) Распределение в переходе потенциала

Рис. 4. Явления в  $p$ - $n$  переходе в равновесном состоянии

Таким образом, в результате диффузии свободных электронов и дырок *по обе стороны границы раздела накапливаются равные по величине и противоположные по знаку нескомпенсированные пространственные (объемные) заряды* (рис. 4г), образуя в  $p$ - $n$  переходе *двойной электрический слой разноименно заряженных ионов*. В этом слое с пониженной концентрацией подвижных носителей заряда, имеющем толщину около  $10^{-4} - 10^{-5}$  см, *возникает электрическое поле*, направленное из  $n$ -области в  $p$ -область (рис. 4д). Напряженность этого поля составляет величину порядка  $10^6$  В/м. За пределами перехода полупроводники  $p$ - и  $n$ -областей электрически нейтральны, и поле в них отсутствует.

Возникшее в  $p$ - $n$  переходе электрическое поле препятствует дальнейшей диффузии основных носителей зарядов, вытесняя из перехода свободные электроны в  $n$ -область, а дырки – в  $p$ -область.

Однако то же самое поле является ускоряющим для неосновных носителей зарядов – дырок в  $n$ -области и свободных электронов в  $p$ -области. Происходит их перемещение через  $p$ - $n$  переход – дрейф,

возникают дрейфовые токи. Движение зарядов прекращается, когда наступает динамическое равновесие – **дрейфовые и диффузионные токи, направленные навстречу друг другу, уравниваются**. Поэтому при отсутствии внешнего поля результирующий ток через ***p-n*** переход равен нулю.

Появившееся вблизи перехода электрическое поле обуславливает *потенциальный барьер* (контактную разность потенциалов)  $\varphi_0$  (рис. 4е). Его величина составляет для германия Ge  $\varphi_0 = 0,3 \div 0,4$  В, для кремния Si  $\varphi_0 = 0,7 \div 0,8$  В.

### 3.2. Неравновесное состояние перехода

Состояние перехода становится неравновесным, когда к переходу прикладывается *внешнее напряжение*. В зависимости от полярности внешнего напряжения потенциальный барьер  $\varphi$  повышается или понижается по сравнению с его величиной  $\varphi_0$  в равновесном состоянии.

Подключение внешнего источника напряжения плюсом к *p*-области, а минусом – к *n*-области (рис. 5а), называют включением *p-n* перехода в *прямом направлении*. Напряжение  $U$ , приложенное к переходу таким образом, называется *прямым*  $U = U_{\text{ПР}}$ , а протекающий через него ток  $I$  – *прямым током*  $I = I_{\text{ПР}}$ . Увеличение *прямого напряжения* уменьшает и напряженность электрического поля, и контактную разность потенциалов ( $\varphi = \varphi_0 - U_{\text{ПР}}$ ). Обедненный подвижными носителями слой истончается и исчезает. **Начинается диффузия основных носителей зарядов – в переход с двух сторон поступают электроны и дырки диффузионного тока, сопротивление перехода уменьшается, величина прямого тока увеличивается.**

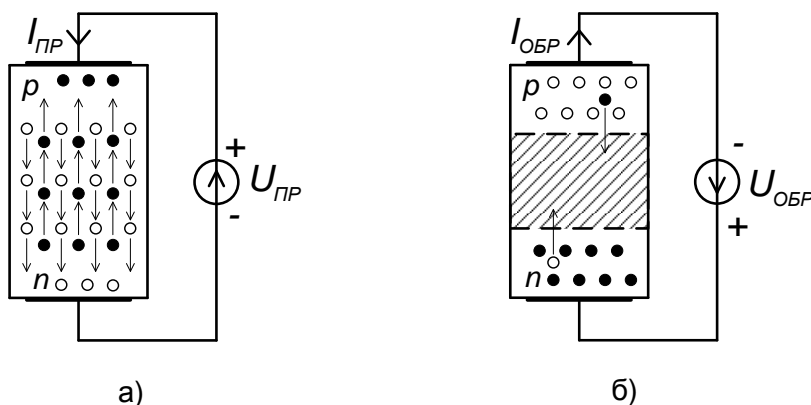


Рис. 5. Неравновесное состояние перехода:

- а) включение перехода в прямом направлении;
- б) включение перехода в обратном направлении

Если полярность подключения источника изменить на противоположную (рис. 5б), тогда *p-n* переход становится включенным в *обратном* направлении. Напряжение  $U$ , приложенное к переходу таким

образом, называется *обратным*  $U = U_{OBR}$ , а протекающий через него ток  $I$  – *обратным током*  $I = I_{OBR}$ . Увеличение *обратного напряжения* усиливает в переходе электрическое поле, увеличивает контактную разность потенциалов ( $\varphi = \varphi_0 + U_{OBR}$ ) и толщину обедненного слоя. В этом случае **диффузия основных носителей заряда через переход отсутствует и происходит экстракция** (от *extract* – «извлечение») **неосновных носителей заряда**, ускоряющихся в суммарном поле контактной разности потенциалов и внешнего источника напряжения. **Их дрейф создает обратный ток  $p$ - $n$  перехода. При увеличении обратного напряжения до некоторой величины ток не увеличивается**, так как в  $p$ - и  $n$ -областях число неосновных носителей в единицу времени определяется лишь температурой.

#### Вопросы и задания

1. Что такое  $p$ - $n$  переход? Какие параметры  $p$ - $n$  переходов определяют их разнообразие?
2. Какое состояние  $p$ - $n$  перехода называется равновесным? Как оно устанавливается?
3. Какое состояние  $p$ - $n$  перехода называется неравновесным? Что происходит в  $p$ - $n$  переходе при прикладывании внешнего напряжения в прямом направлении?
4. Что происходит в  $p$ - $n$  переходе при прикладывании внешнего напряжения в обратном направлении?

### 3.3. Вольт-амперная характеристика $p$ - $n$ перехода

Зависимость тока через переход  $I$  от приложенного к нему напряжения  $U$ , выраженная графически, называется **вольт-амперной характеристикой** (ВАХ). Пример характерной ВАХ  $p$ - $n$  перехода приведен на рис. 6.

Теоретический анализ рассмотренных выше явлений в  $p$ - $n$  переходе в равновесном и неравновесном состояниях приводит к аналитическому выражению ВАХ:

$$I = I_0 (\exp(U/\varphi_T) - 1), \quad (8)$$

где  $I_0$  – ток, обусловленный дрейфом неосновных носителей заряда,  $\varphi_T = kT/e_0$  – термический потенциал, ( $e_0$  – заряд электрона). При комнатной температуре ( $T \approx 300$  К)  $\varphi_T \approx 0,025$  В. Приведенная формула хорошо описывает участки 1 и 2 ВАХ, указанные на рис. 6.

При прямом напряжении (участок 1), когда  $U > 0,1$  В, ток  $I$  возрастает по экспоненте и может превышать значение  $I_0$  на много порядков. Этот ток  $I$ , обусловленный при прямом включении основными носителями, может достигать больших значений, т. к. основных носителей заряда в областях  $n$  и  $p$  много.

При обратном включении (участок 2) ток быстро достигает значения, равного  $I_0$ . При определенной температуре ток  $I_0$  – величина постоянная,

зависящая только от концентрации неосновных носителей  $n_p$  и  $p_n$ . Значение последних определяется только температурой полупроводника, поэтому ток  $I_0$  называют тепловым током.

Участки 1 и 2 ВАХ иллюстрируют **важнейшее свойство  $p$ - $n$  перехода** – его **одностороннюю проводимость**. **Сопротивление  $p$ - $n$  перехода в прямом направлении мало** (порядка 10 Ом), **а в обратном направлении – велико** ( $10^5 - 10^6$  Ом).

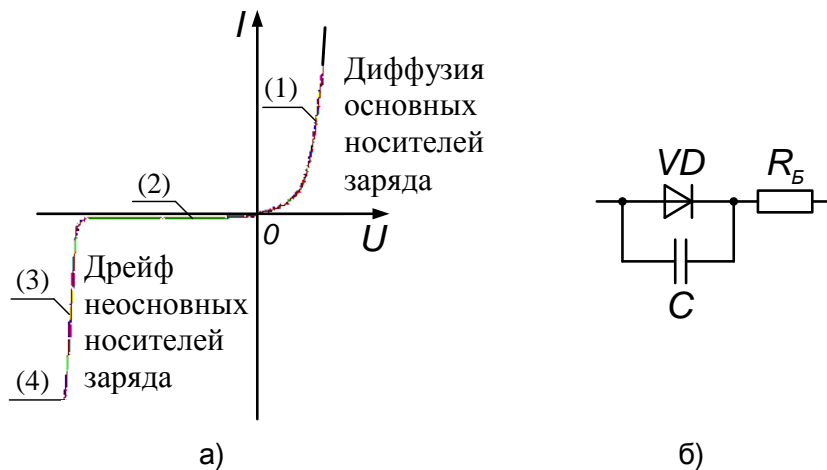


Рис. 6.  $p$ - $n$  переход:  
а) вольт-амперная характеристика;  
б) эквивалентная схема

**Пробой  $p$ - $n$  перехода.** При дальнейшем увеличении обратного напряжения происходит резкое увеличение тока через переход – *пробой  $p$ - $n$  перехода* (участок 3 на графике ВАХ). Существуют три основных вида пробоя: *туннельный*, *лавинный (электрический)* и *тепловой*.

*Туннельный пробой* связан с *туннельным эффектом* – переходом электронов сквозь потенциальный барьер без изменения энергии.

*Лавинный пробой* связан с образованием лавины носителей заряда под действием сильного электрического поля, в котором носители на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для образования новых электронно-дырочных пар путем ударной ионизации атомов полупроводника. Туннельный и лавинный пробой не сопровождаются разрушением  $p$ - $n$  перехода.

*Тепловой пробой* возникает из-за перегрева  $p$ - $n$  перехода или отдельного его участка. При этом происходит интенсивная генерация пар электрон–дырка. Ток увеличивается, вызывая дальнейший разогрев перехода. Этот процесс, также лавинообразный, завершается расплавлением перегретого участка  $p$ - $n$  перехода и выходом прибора из строя (4 на графике ВАХ).

**Емкость  $p$ - $n$  перехода.** Наличие при обратном включении  $p$ - $n$  перехода (участок 2 на графике ВАХ) слоя, обедненного подвижными носителями заряда, и зависимость толщины этого слоя от величины обратного напряжения  $U_{OBR}$  свидетельствуют о присущей переходу

электрической емкости, называемой *барьерной*. Ее величина аппроксимируется выражением

$$C_{\text{БАР}}(U_{\text{ОБР}}) = C_{\text{БАР}}(0) / (1 - U_{\text{ОБР}} / \varphi_0)^m, \quad (9)$$

где  $m = 0.3 \div 0.5$ .

При прямом включении *p-n* перехода существенной становится *диффузионная* емкость  $C_{\text{ДФ}}$ , обусловленная изменением заряда неосновных носителей, происходящей в результате их диффузии.

Все участки вольт-амперной характеристики рассмотренного *p-n* перехода находят применение при создании полупроводниковых приборов, выполняющих те или иные функции. Участок ВАХ *p-n* перехода, используемый в конкретном случае, называется рабочим. Эквивалентная схема реального *p-n* перехода, учитывающая безынерционную модель перехода, емкость  $C = C_{\text{БАР}} + C_{\text{ДФ}}$  и сопротивление базы  $R_{\text{Б}}$ , представлены на рис. 6б.

**Переходные процессы в *p-n* переходе.** Электронно-дырочный переход часто используется в импульсном режиме, когда полярность и величина внешнего напряжения меняются скачкообразно, а длительности импульсов малы. При этом проявляется инерционность *p-n* перехода. Если установление прямого напряжения – *отпирание* *p-n* перехода – из-за большого тока  $I_{\text{пр}}$  происходит быстро, то переключение *p-n* перехода обратным напряжением – его *запирание* – происходит с задержкой, обусловленной, главным образом, рассасыванием неосновных носителей заряда, накопленных в переходе при протекании прямого тока.

#### **Вопросы и задания**

1. Что происходит в *p-n* переходе при его включении в прямом направлении?
2. Что происходит в *p-n* переходе при его включении в обратном направлении?
3. Какие виды пробоя присущи *p-n* переходу?
4. Когда происходит лавинный пробой *p-n* перехода?
5. Какие емкости присущи *p-n* переходу?
6. Что происходит в *p-n* переходе в импульсном режиме?
7. Используя выражение (8), рассчитайте ВАХ *p-n* перехода, находящегося при комнатной температуре ( $T \approx 300$  К,  $\varphi_T \approx 0,025$  В,  $I_0 = 10^{-9}$  А), в диапазонах значений напряжения  $U$ : от  $-6$  В до  $0$  В с интервалом  $\Delta U = 0,5$  В; от  $-0,10$  В до  $+0,60$  В с интервалом  $\Delta U = 0,05$  В. Постройте график ВАХ.
8. Используя результаты вычислений, выполненных в предыдущем упражнении, рассчитайте значения статических  $R_{\text{СТ}}$  и дифференциальных  $R_{\text{ДИФ}}$  сопротивлений *p-n* перехода в указанном диапазоне значений напряжения  $U$  по формулам  $R_{\text{СТ}} = U/I$ ,  $R_{\text{ДИФ}} = \Delta U / \Delta I$ .

## 4. Диоды

Рассмотренный в п. 3.1 полупроводниковый прибор, содержащий *p-n* переход и два внешних вывода, является **диодом** – двухэлектродным электронным прибором, обладающим различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Принцип работы большинства полупроводниковых диодов основан на использовании физических явлений в электрических переходах: в *p-n* переходе, в контакте металла с полупроводником и др. Полупроводниковый диод как элемент электрической цепи является нелинейным двухполюсником, представляемым различными эквивалентными схемами, содержащими в общем случае сопротивления, емкости и индуктивности.

В основу классификации диодов положены различные признаки – вид электрического перехода, физические процессы в переходе и т. п. В справочниках по полупроводниковым приборам обычно приводится классификация диодов по применению в радиоэлектронной аппаратуре или по назначению. При этом классификация отражает принцип использования свойств электрического перехода, диапазон рабочих частот, исходный материал. Все эти данные находят отражение в системе названий и условных обозначений современных полупроводниковых диодов. Структура реального диода содержит один или несколько электрических переходов.

### 4.1. Выпрямительные диоды

**Выпрямительные низкочастотные диоды.** Основное свойство диодов – **односторонняя проводимость** – позволяет решать многочисленные задачи, в том числе преобразование переменных напряжений (токов) в постоянные напряжения (токи), осуществляемое *выпрямителями* в источниках питания. Используемые в этих целях диоды называют *выпрямительными*. Выпрямительные полупроводниковые диоды составляют большой класс приборов. Наибольшее использование в радиоэлектронной аппаратуре нашли кремниевые диоды, германиевые диоды и диоды с барьером Шотки. Основой последних является выпрямляющий контакт металл-полупроводник.

Рабочий участок ВАХ и условные обозначения на схемах выпрямительного диода и диода с барьером Шотки показаны на рис. 7.

Основными *статическими параметрами* низкочастотных выпрямительных диодов является прямое падение напряжения  $U_{пр}$  при заданном прямом токе  $I_{пр}$  и постоянный обратный ток  $I_{обр}$  при заданном обратном напряжении  $U_{обр}$ . К основным *динамическим параметрам* относятся средние за период значения: выпрямленного тока, прямого падения напряжения, обратного тока, обратного напряжения и граничная



частота, на которой выпрямленный ток диода уменьшается до установленного уровня. Параметрами эксплуатационных режимов являются максимальные значения прямого тока  $I_{ПР.МАКС}$ , обратного напряжения  $U_{ОБР.МАКС}$ , мощности, рассеиваемой диодом  $P_{МАКС}$ , и др.

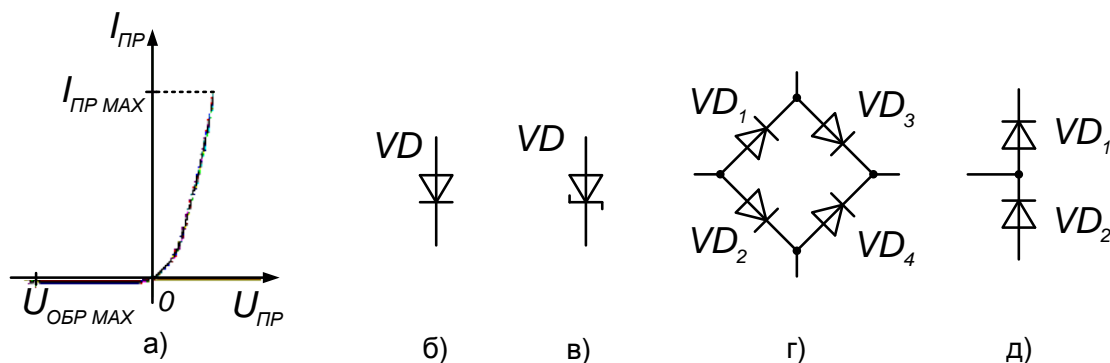


Рис. 7. Выпрямительный диод:

- а) рабочий участок ВАХ;
- б) условное обозначение на схемах;
- в) условное обозначение на схемах диодов с барьером Шоттки;
- г) соединение диодов по мостовой схеме;
- д) последовательное соединение диодов

Наряду с одиночными выпрямительными диодами промышленностью выпускаются выпрямительные блоки, в которых диоды имеют различные схемы соединений. Наиболее часто встречаются соединения диодов по мостовой схеме (рис. 7в) и по схеме удвоения напряжения (рис. 7г).

Работу простейшего выпрямителя иллюстрирует схема, приведенная на рис. 8а. Переменное напряжение, действующее в цепи с диодом  $VD$ , полуволной одного знака включает диод в прямом направлении. В этом случае его сопротивление мало. Через него и сопротивление нагрузки  $R_H$  течёт ток, создавая падение напряжения, заряжающее конденсатор  $C$ . Полуволна напряжения другого знака включает диод в обратном направлении. В этом случае существенно возросшее сопротивление диода препятствует протеканию тока от источника напряжения. Заряженный ранее конденсатор  $C$  начинает разряжаться через сопротивление нагрузки  $R_H$ . Полярность напряжения на нагрузке сохраняется, а величина постепенно убывает. С приходом очередной полуволны всё повторяется. Такой выпрямитель, названный *однополупериодным*, широко используют в маломощных источниках питания и в радиоприемниках в качестве амплитудного детектора – устройства, выделяющего из переменного напряжения с изменяющейся амплитудой зависимость амплитуды от времени.

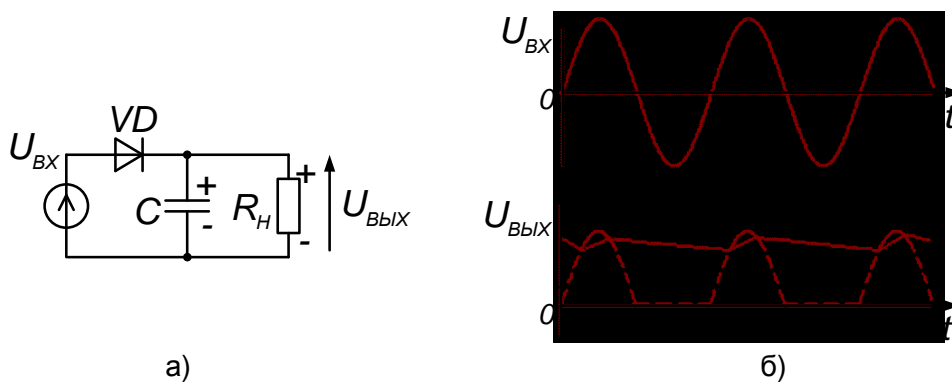


Рис. 8. Однополупериодный выпрямитель:

а) схема выпрямителя;

б) графики  $U_{BX}(t)$  и  $U_{BbIX}(t)$

На рисунках 9а и 9б приведены схемы *двухполупериодных* выпрямителей. Рисунки 9в и 9г иллюстрируют схемы выпрямителей с удвоением и умножением напряжений.

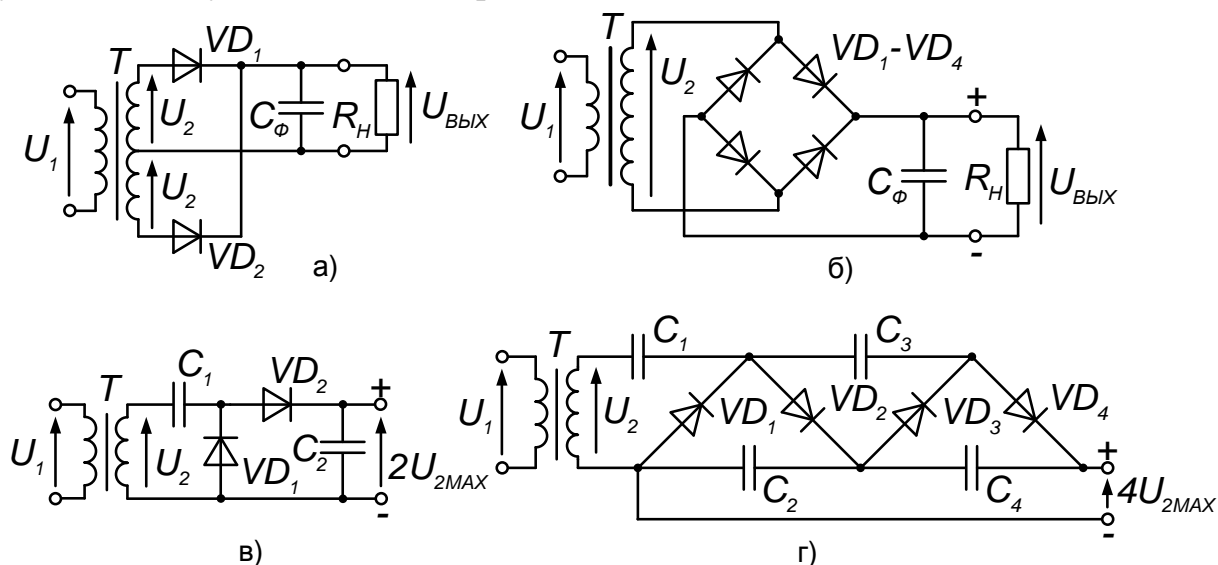


Рис. 9. Схемы выпрямителей:

а) двухполупериодного с нулевым выводом;

б) двухполупериодного мостового;

в) с удвоением напряжения;

г) с умножением напряжения

**Выпрямительные высокочастотные диоды.** Эти диоды предназначены для нелинейного преобразования сигналов с частотой до сотен и тысяч мегагерц. В радиоэлектронных устройствах они широко используются в схемах детекторов и преобразователей частоты высокочастотных сигналов, в схемах ограничителей и коммутации сигналов и других многочисленных приложениях. Во всех перечисленных применениях сигнал преобразуется за счет нелинейности ВАХ диода. Выпрямительные высокочастотные диоды универсальны по применению и могут выполнять все функции, перечисленные выше. Высокочастотные свойства диодов достигаются их конструктивно-технологическими

особенностями, снижающими емкость перехода, сопротивления  $p$ - и  $n$ -областей, а также время жизни неосновных носителей.

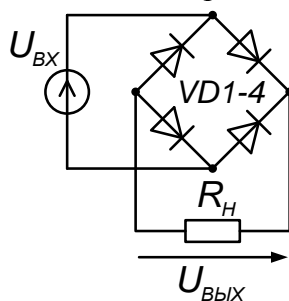
Рабочий участок ВАХ, условное обозначение на схемах и статические параметры высокочастотного выпрямительного диода те же, что и у низкочастотных выпрямительных диодов. Основным динамическим параметром является граничная рабочая частота.

**Импульсные диоды.** Эти диоды в основном предназначены для работы в быстродействующих импульсных схемах. Как и высокочастотные выпрямительные диоды, они имеют ряд конструктивно-технологических особенностей, снижающих барьерную емкость и накопленный заряд носителей в переходе.

Рабочий участок ВАХ, условное обозначение на схемах и статические параметры импульсного диода те же, что и у выпрямительных диодов. К характерным импульсным параметрам диодов относят емкость диода между его выводами при заданном обратном напряжении, время установления прямого и обратного сопротивлений и др.

#### Вопросы и задания

1. Какое свойство  $p$ - $n$  перехода используется в выпрямительных диодах?
2. Укажите основные разновидности выпрямительных диодов, их назначение и параметры?
3. Начертите схему однополупериодного выпрямителя (рис. 8). Поясните его работу. Рассчитайте среднюю мощность, выделяющуюся на сопротивлении  $R_H$ , опираясь на предположение, что прямое сопротивление диода бесконечно мало (или много меньше  $R_H$ ), обратное – бесконечно велико (или много больше  $R_H$ ), а емкость  $C$  пренебрежимо мала. Входное напряжение  $U_{AO} = A \sin \omega t$  имеет амплитуду  $A = 10$  В,  $R_H = 25$  Ом.
4. Начертите схему двухполупериодного выпрямителя, представленную на рис. К этому упражнению. Поясните его работу. Рассчитайте среднюю мощность, выделяющуюся на сопротивлении  $R_H$  в процессе работы, используя такие же предположения и исходные данные, как в предыдущей задаче.



Двухполупериодный мостовой выпрямитель

5. Начертите схему выпрямителя с удвоением напряжения (рис. 9в). Поясните его работу.
6. Начертите схему выпрямителя с умножением напряжения (рис. 9г). Поясните его работу.

## 4.2. Стабилитроны

Полупроводниковые диоды, вольт-амперные характеристики которых имеют участки, где значительным изменениям протекающего тока соответствуют незначительные изменения приложенного напряжения, используют для стабилизации напряжения. Специализированные диоды, в которых используется падающий участок характеристики в области включения  $p-n$  перехода в обратном направлении, называют **стабилитронами**, а диоды, в которых для стабилизации напряжения в схемах используется прямая ветвь ВАХ, – **стабисторами**. В обоих случаях используется неразрушающий лавинный электрический пробой. На рис.10 представлены рабочий участок ВАХ и условное обозначение стабилитрона на схемах.

Схема стабилизатора напряжения на стабилитроне приведена на рис. 10в. Входное напряжение  $U_{ВХ}$ , превышающее по величине  $U_{ВЫХ}$ , распределяется между ограничивающим сопротивлением  $R_{ОГР}$  и параллельно включенными стабилитроном  $VD$  и сопротивлением нагрузки  $R_H$ . При правильно выбранных значениях,  $U_{ВЫХ}$ ,  $R_{ОГР}$  и  $R_H$  используется рабочий участок ВАХ прибора и величина  $U_{ВЫХ}$  не выходит за пределы  $\Delta U_{СТ}$ . Рассмотренный стабилизатор напряжения называется *параметрическим*. Он находит широкое применение в радиоэлектронных устройствах.

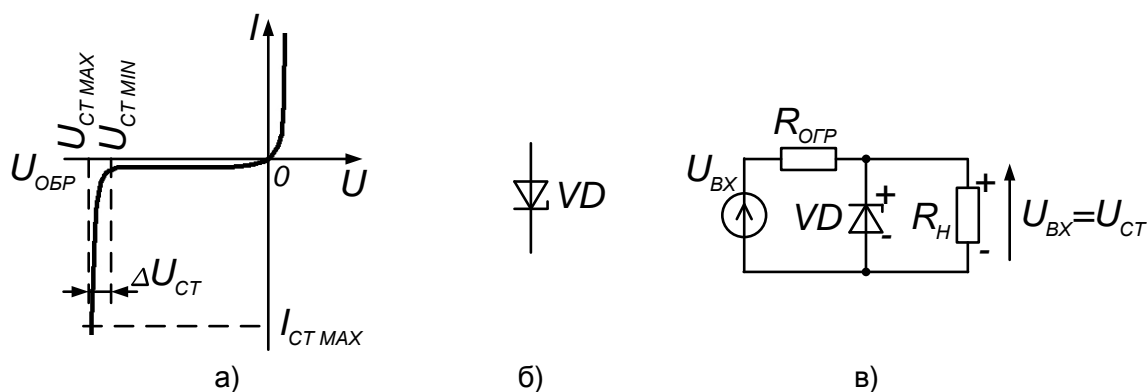


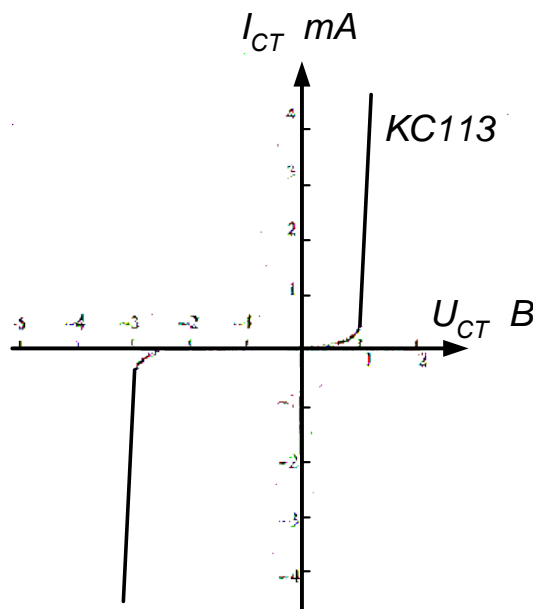
Рис. 10. Стабилитрон:

- а) рабочий участок ВАХ;
- б) условное обозначение на схемах;
- в) параметрический стабилизатор напряжения

### Вопросы и задания

1. Какое явление используется в стабилитронах? Начертите схему стабилизатора напряжения на стабилитроне. Поясните его работу.
2. Найти ток, протекающий через стабилитрон в параметрическом стабилизаторе, изображенном на рис. 10 в, и максимально допустимый ток нагрузки, если  $U_{ВХ} = 6$  В,  $R_{ОГР} = 1,5$  кОм и  $R_H = 7,5$  кОм. Для этого необходимо графически решить систему уравнений, используя приведенную ниже вольт-амперную

характеристику стабилитрона *KC113*. Максимально допустимый ток нагрузки соответствует точке минимального тока стабилитрона на участке стабилизации.



Вольт-амперная характеристика стабилитрона *KC113*

- Используя график вольт-амперной характеристики стабилитрона, приведенный в предыдущей задаче, найти максимальное значение  $R_{огр}$ , при котором возможна работа стабилизатора. Считаем, что  $U_{вх} = 5\text{ В}$ , а  $R_H \gg R_{огр}$ .
- Известно, что вольт-амперная характеристика стабилитрона при  $U_{СТ} = -10\text{ В}$  имеет участок резкого нарастания тока от величины  $1\text{ мА}$  до  $20\text{ мА}$ . Найти максимальное и минимальное значения сопротивления нагрузки для схемы, приведенной на рис. 6в, если  $U_{вх} = 25\text{ В}$ ,  $R_{огр} = 500\text{ Ом}$ .
- Найти величину  $R_{огр}$  для схемы, приведенной на рис. 6в, если вольт-амперная характеристика стабилитрона при  $U_{СТ} = -12\text{ В}$  имеет участок резкого нарастания тока от величины  $2\text{ мА}$  до  $20\text{ мА}$ ,  $R_H = 2\text{ кОм}$ . Выходное напряжение должно быть стабильно при колебаниях входного напряжения  $U_{вх}$  в пределах от  $16$  до  $24\text{ В}$ .

### 4.3. Фотодиоды

Принцип действия фотодиодов основан на **внутреннем фотоэффекте**, состоящем в генерации под действием света пар электронов и дырок в *p-n* переходе, в результате чего увеличивается концентрация основных и неосновных носителей заряда в его объеме. Обратный ток фотодиода определяется концентрацией неосновных носителей и, следовательно, интенсивностью облучения. ВАХ фотодиода (рис.11а) показывают, что каждому значению светового потока  $\Phi$  соответствует определенное значение обратного тока. Такой режим работы прибора называют фотодиодным. Условное обозначение фотодиода на схемах дано на рис.10б, а схема включения – на рис.10в.

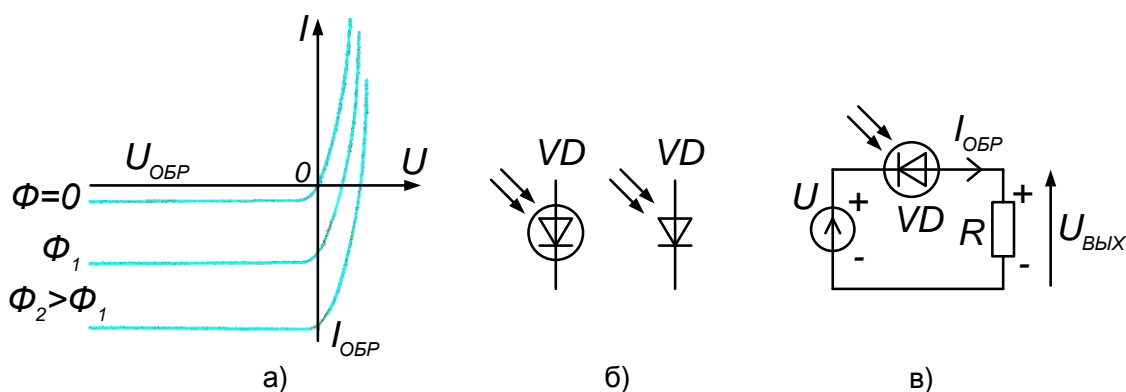


Рис. 11. Фотодиод:

а) рабочая область ВАХ;

б) условное обозначение на схемах;

в) схема включения

Наряду с фотодиодным режимом работы в приборах, называемых **фотоэлементами**, используется **фотогальванический режим**, заключающийся в том, что при освещении непосредственно *p-n* перехода образующиеся в нем пары электронов и дырок разделяются электрическим полем, образованным контактной разностью потенциалов. В результате на выводах фотоэлемента появляется фотоэлектродвижущая сила, а при его включении в замкнутую цепь – электрический ток. Этот режим используется и в **солнечных батареях** – преобразователях солнечной энергии в электрическую, используемую для питания различных устройств. Зависимости тока фотоэлемента от светового потока при различных сопротивлениях цепи, условные обозначения фотоэлемента и солнечной батареи на схемах, а также схема их включения приведены на рис.12.

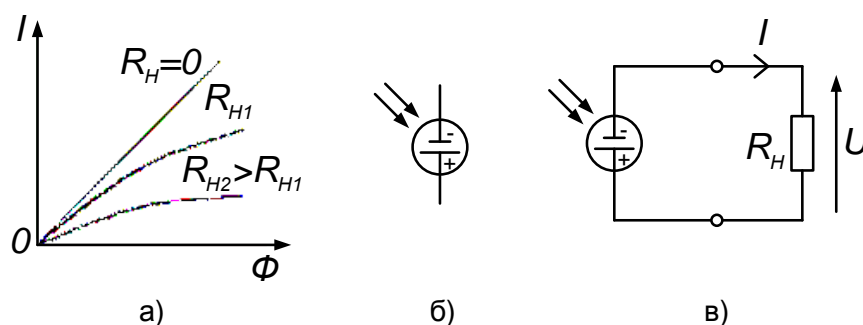


Рис. 12. Фотоэлемент (солнечная батарея):

а) рабочие характеристики;

б) условные обозначения на схемах;

в) схема включения

### Вопросы и задания

1. Какое явление используется в фотодиодах?
2. Какое явление используется в солнечных батареях?
3. Солнечная батарея состоит из 10 последовательно включенных кремниевых фотоэлементов. Какое максимальное напряжение может быть получено на выходных клеммах такой солнечной батареи, если для кремния Si  $\Delta E = 1,12$  эВ?

## 4.4. Светодиоды

При подаче прямого напряжения в некоторых  $p-n$  переходах из-за интенсивной инжекции (от *inject* – «впрыскивание») электронов в  $p$ -область, где они рекомбинируют с дырками, происходит интенсивная **инжекционная электролюминесценция**. При рекомбинации свободный электрон теряет свою потенциальную энергию, которая излучается в виде фотона. Явление инжекционной электролюминесценции используется в **светодиодах**, преобразующих энергию электрического тока в энергию видимого или инфракрасного излучения. Рабочий участок ВАХ светодиода, его условное обозначение на схемах и схема включения приведены на рис.13а–в.

Светодиоды широко используют в индикаторных устройствах, оптических линиях связи, оптопарах и т.д. Так, в частности, совмещение в одном корпусе светодиода и фоточувствительного элемента, например фотодиода, позволяет осуществлять электрическое (гальваническое) разделение цепей в устройствах передачи информации. Такие электронные приборы называются **оптронами**. Условное обозначение диодного оптрона на схемах приведено на рис. 13г.

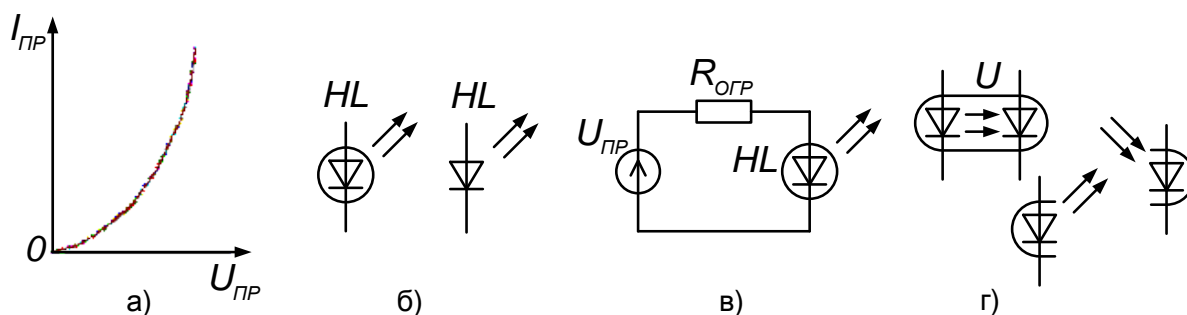


Рис.13. Светодиод и оптрон:

- а) рабочая характеристика светодиода;
- б) условные обозначения на схемах светодиода;
- в) схема включения светодиода;
- г) условное обозначение на схемах диодного оптрона

### Вопросы и задания

1. Какое явление используется в светодиодах? Начертите схему включения светодиода.
2. Энергия фотонов видимого света ( $\lambda = 0,4 \div 0,7$  мкм) лежит в пределах  $1,3 \div 1,8$  эВ. Какой полупроводниковый материал годится для изготовления светодиодов видимого света – германий, кремний или арсенид галлия, если  $\Delta E_{Ge} = 0,67$  эВ,  $\Delta E_{Si} = 1,12$  эВ,  $\Delta E_{GaAs} = 1,43$  эВ?
3. Какие явления используются в оптопарах – диодных оптронах?

## 4.5. Варикапы

При подаче обратного напряжения  $p$ - $n$  переход представляет собой конденсатор, диэлектриком которого служит **высокоомный запирающий слой** с низкой концентрацией носителей заряда, а электродами – слои полупроводникового материала по обе стороны от него, сохраняющие высокую проводимость. Емкостью такого конденсатора является барьерная емкость  $p$ - $n$  перехода, зависящая от величины обратного напряжения. С увеличением этого напряжения запирающий слой расширяется, что равносильно увеличению расстояния между электродами. Рассмотренный прибор называют **варикапом**. Зависимость емкости варикапа  $C_B$  от приложенного обратного напряжения выражается формулой (9), приведенной выше. Для  $p$ - $n$  переходов с резкой границей эта формула принимает вид

$$C_{БАР}(U_{ОБР}) = C_{БАР}(0) / (1 - U_{ОБР} / \varphi_0)^{0,5}. \quad (10)$$

Варикапы используют, главным образом, для управления параметрами колебательных контуров в системах автоподстройки частоты радиоприемных устройств, а также в возбудителях передатчиков с частотной модуляцией и в параметрических усилителях.

Рабочая характеристика и условное обозначение варикапа на схемах варикапов даны на рис.14. Там же приведен пример схемы с применением варикапа для перестройки колебательного контура.

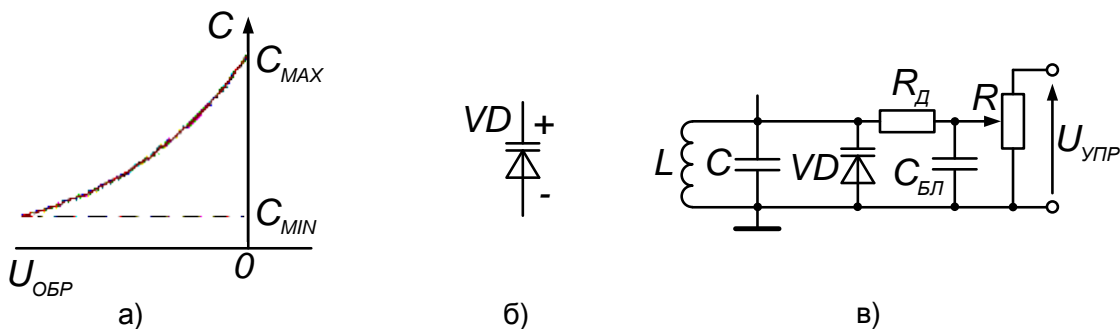


Рис. 14. Варикап:

- а) рабочая характеристика;
- б) условное обозначение;
- в) колебательный контур с электрической перестройкой

### Вопросы и задания

1. Что такое варикап? Какое явление используется в варикапах?
2. Используя формулу (10), рассчитайте рабочую характеристику варикапа в диапазоне обратных напряжений до  $-5$  В, если:  $C_{БАР}(0) = 150$  пФ,  $\varphi_0 = 0,75$  В.
3. Барьерная емкость варикапа равна  $150$  пФ при подаче обратного напряжения  $1$  В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы уменьшить емкость до  $50$  пФ?
4. Перестройка радиоприемника по частоте осуществляется изменением емкости варикапа, включенного в колебательный контур. Максимальная и минимальная



частоты рабочего диапазона отличаются в 2 раза. При  $U_{OBR} = 2$  В радиоприемник настроен на минимальную частоту диапазона. Найти  $U_{I\Delta E}$  для настройки на максимальную частоту рабочего диапазона.

#### 4.6. Туннельные и обращённые диоды

Принцип действия **туннельных диодов** основан на явлении **туннельного эффекта** в электронно-дырочном переходе, образованном полупроводниками с высокой концентрацией примеси – **вырожденными полупроводниками**. Туннельный эффект приводит к появлению участка отрицательной проводимости на ВАХ диода при прямом напряжении. Туннельные диоды применяют для усиления и генерирования электрических колебаний сверхвысоких частот. Вольт-амперная характеристика туннельного диода, его условное обозначение на схемах и схема автогенератора гармонических колебаний на диоде приведены на рис.15а–в.

Разновидностью туннельных диодов являются **обращённые диоды**, которые также изготавливают из вырожденных полупроводников, но с несколько меньшей концентрацией примесей. При обратном включении обращенные диоды хорошо проводят ток, а при прямом включении (до  $U_{пр} = 0,3 - 0,6$  В) ток невелик. Обращенные диоды используют как выпрямительные для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 – 0,6 В). Вольт-амперная характеристика обращенного диода и его условное обозначение на схемах приведены на рис.15г–д.

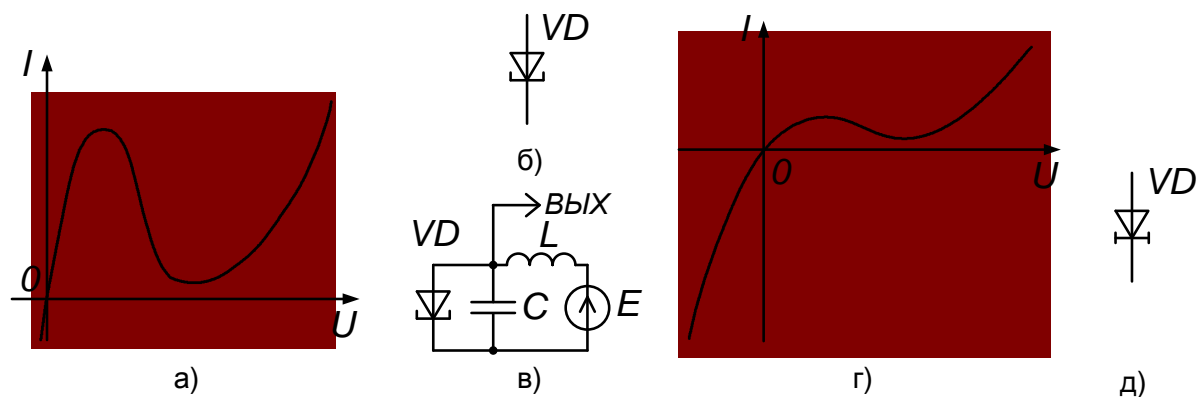


Рис. 15. Туннельный и обращенный диоды:  
а) рабочий участок ВАХ туннельного диода;  
б) его условное обозначение;  
в) автогенератор на туннельном диоде;  
г) рабочий участок ВАХ обращенного диода;  
д) его условное обозначение

### Вопросы и задания

1. На каком явлении основан принцип действия туннельных диодов?
4. Какие полупроводники называют вырожденными?
5. Каковы особенности ВАХ туннельных и обращенных диодов?
6. В каких целях используют туннельные и обращенные диоды?

## 4.7. Тиристоры

**Тиристор** – полупроводниковый прибор, принимающий одно из двух устойчивых состояний: открытое, при котором сопротивление прибора мало, и закрытое, при котором оно велико. Это свойство обеспечивается соединением трех и более  $p$ - $n$  переходов. По устройству тиристоры подразделяются на *динисторы*, *тринисторы* и *симисторы*. ВАХ всех тириستоров имеет участок отрицательного сопротивления.

Структура динистора (диодного тиристора) показана на рис.16а. В ней содержится три  $p$ - $n$  перехода. Электрод, примыкающий к крайней  $p_1$ -области, называется анодом (**а**); электрод, примыкающий к крайней  $n_2$ -области – катодом (**к**). Подключенное к динистору напряжение  $U$ , указанной на рисунке полярности, распределится между  $p$ - $n$  переходами  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ , причем при малых значениях этого напряжения его большая часть будет приложена к переходу  $\Pi_2$ , так как для него оно является обратным. Постепенное увеличение напряжения  $U$  приводит к увеличению концентрации неосновных носителей в  $n_1$ - и  $p_2$ -областях и к лавинному электрическому пробое переходу  $\Pi_2$ . При этом сопротивление динистора становится малым, и ток  $I$  в цепи нарастает, пока его величина не ограничится сопротивлением нагрузки  $R_H$ . Запереть динистор можно, прекратив ток  $I$ .

Если у динистора сделать вывод из области  $n_1$  или  $p_2$ , которую называют управляющим электродом, то, меняя ток в его цепи  $I_y$ , можно управлять включением тиристора при любом напряжении  $U$ . ВАХ тиристоров и их условные обозначения на схемах приведены на рис.16.

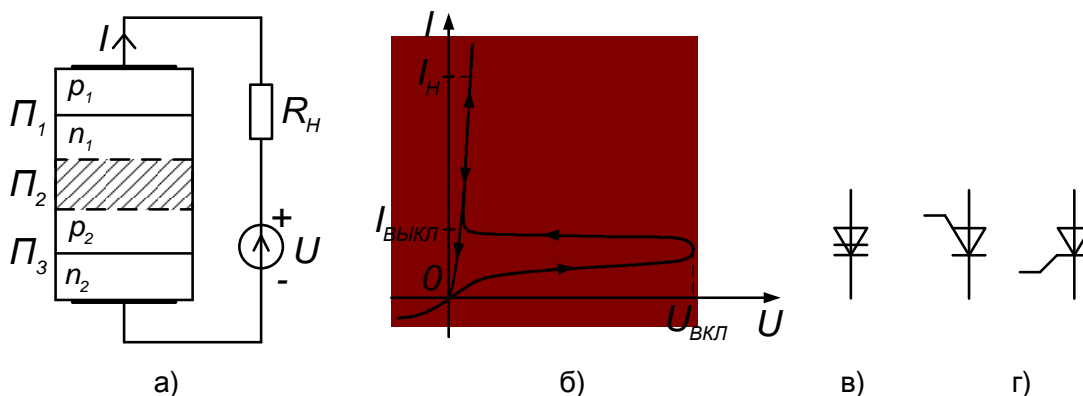


Рис.16. Тиристоры:

- а) структура динистора;
- б) рабочий участок ВАХ динистора;
- в) условное обозначение динистора;
- г) условные обозначения тринисторов

Полупроводниковый прибор, реализующий встречно параллельное включение двух тиристоров, называется симистором или симметричным тиристором. В открытом состоянии симистор проводит ток в обоих направлениях.

Динисторы, маломощные тринисторы и симисторы являются важнейшими элементами в переключающих автоматических устройствах, в схемах генераторов релаксационных колебаний, в преобразователях сигналов и других устройствах импульсной техники. Тринисторы средней и большой мощности используются в электросиловых установках для выпрямления тока, для генерирования токов большой мощности и высокой частоты.

#### ***Вопросы и задания***

1. Какое свойство присуще тиристорам? Чем оно обеспечивается?
2. Какова особенность ВАХ тиристора?
3. Укажите разновидности тиристоров и области их применения.

## 5. Транзисторы

Исключительно важную роль в современной технике играют *электронные приборы, являющиеся регуляторами протекающего тока. Величина сопротивления этих приборов зависит от напряжения, приложенного к их управляющему электроду, и может изменяться в широких пределах.* Наименьшее сопротивление электронного прибора соответствует его открытому состоянию, наибольшее – закрытому (запертому) состоянию. «Легкость» управления сопротивлением таких приборов и, как следствие, простота управления протекающим через них током позволяют осуществлять важнейшие в радиоэлектронике процессы – *усиление сигналов, генерирование колебаний, модуляцию колебаний* и др.

К числу таких приборов относятся электронные лампы и транзисторы. Появление транзисторов обеспечило во второй половине прошлого века стремительный научно-технический прогресс. В настоящее время используются следующие их разновидности: *биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим  $p$ - $n$  переходом, полевые транзисторы с индуцированным каналом и полевые транзисторы со встроенным каналом.*

### 5.1. Биполярные транзисторы

**Биполярный транзистор** – полупроводниковый прибор, в котором для регулировки протекающего через транзистор тока используются явления *инжекции* и *экстракции* неосновных носителей заряда. Транзистор имеет трехслойную структуру с двумя  $p$ - $n$  переходами. Одна из крайних областей – **эмиттер** (от *emit* – «испускать, выделять») предназначена для инжекции носителей заряда в среднюю область, называемую **базой**. Другая крайняя область – **коллектор** (от *collect* – «собирать») предназначена для экстракции носителей из базовой области. Переход эмиттер–база называется **эмиттерным**, а переход база–коллектор – **коллекторным**.

Взаимодействие между переходами обеспечивается следующими обстоятельствами. Во-первых, расстояние между переходами (толщина базы) много меньше диффузионной длины неосновных носителей зарядов в базе. Во-вторых, концентрация основных носителей зарядов в эмиттере существенно превышает концентрацию основных носителей зарядов в базе, что обеспечивает одностороннюю инжекцию носителей зарядов в базу. Кроме того, площадь эмиттерного перехода обычно меньше площади коллекторного перехода.

Области прибора эмиттер, база и коллектор снабжены контактами. Через них к транзистору подключаются внешние источники напряжения. В зависимости от проводимостей чередующихся областей различают транзисторы типа  $n$ - $p$ - $n$  и типа  $p$ - $n$ - $p$ . Условные обозначения биполярных

транзисторов на схемах представлены на рис. 17. Принцип работы транзисторов обоих типов одинаков.

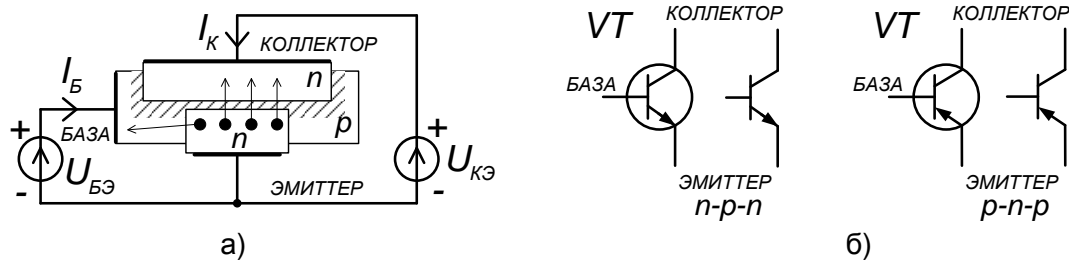


Рис. 17. Биполярный транзистор:  
а) структура транзистора *n-p-n*-типа;  
б) условные обозначения на схемах

Поясним принцип работы биполярного транзистора на примере рассмотрения одного из его типов. На рис.17а представлена структура транзистора *n-p-n*-типа.

В активном режиме, который является основным для усилительных схем, к эмиттерному переходу приложено прямое напряжение  $U_{БЭ}$  (для транзисторов *n-p-n*-типа  $U_{БЭ} > 0$ ), а к коллекторному переходу – обратное напряжение  $U_{БК}$  (для транзисторов *n-p-n*-типа  $U_{КЭ} > U_{БЭ} > 0, \Rightarrow U_{БК} < 0$ ).

Через эмиттерный переход происходит инжекция электронов из эмиттера в базу. Их количество определяется приложенным к базе напряжением  $U_{БЭ}$ , обеспечивающим прямое включение *p-n* перехода. Инжектированные в базу электроны движутся к коллекторному переходу. Это движение является совокупностью диффузии и дрейфа. Диффузионное движение обусловлено более высокой концентрацией электронов в базе около эмиттерного перехода вследствие их инжекции и низкой концентрацией электронов в базе около коллекторного перехода из-за их экстракции полем этого перехода. Дрейфовое движение электронов вызывается внутренним электрическим полем в базе.

Электроны, достигающие коллекторного перехода, втягиваются в него электрическим полем и перебрасываются в коллектор. Таким образом, в активном режиме коллектор «собирает» инжектированные в базу электроны, что и отражено в его названии (*collector* – «сборщик»).

В активном режиме токи коллектора и эмиттера почти одинаковы, а их разность равна току базы.

Коллекторный ток практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поскольку при любом обратном напряжении все электроны, достигающие в базе коллекторного перехода, попадают в его ускоряющее поле и уносятся в коллектор. По этой причине дифференциальное сопротивление коллекторного перехода очень велико, что характерно для *p-n* переходов, включенных в обратном направлении. В то же время дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода, включенного в прямом направлении, очень мало.

Описанные процессы, происходящие в транзисторе, представляются двумя семействами *статических вольт-амперных характеристик* (ВАХ), приведенными на рис.18. Первое семейство кривых определяет зависимость тока базы  $I_B$  от напряжений на базе  $U_{БЭ}$  и на коллекторе  $U_{КЭ}$ , представленную графиками  $I_B = f_1(U_{БЭ})$ , где  $U_{КЭ}$  является параметром семейства. Эти характеристики называют *входными* (или *базовыми*). Второе семейство кривых определяет зависимость тока коллектора  $I_K$  от тех же напряжений  $U_{БЭ}$  и  $U_{КЭ}$ , представленную графиками  $I_K = f_2(U_{КЭ})$ . Здесь параметром является напряжение на базе  $U_{БЭ}$ . Эти характеристики называют *выходными* (или *коллекторными*).

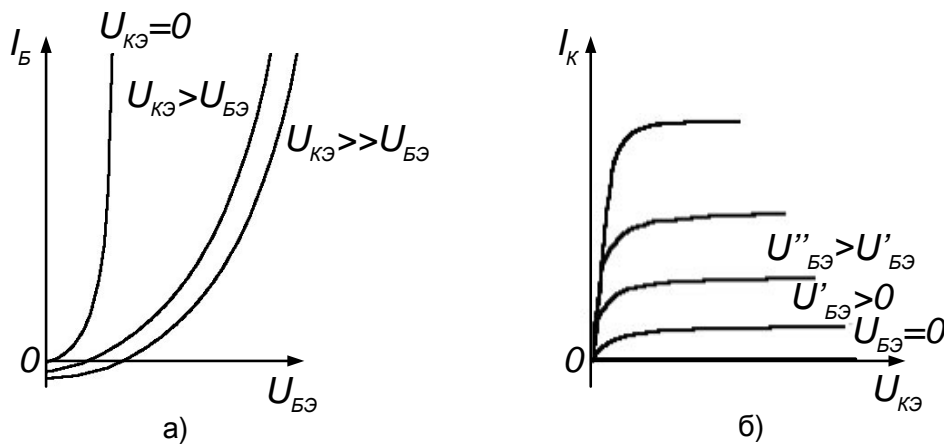


Рис. 18. Семейства вольт-амперных характеристик биполярного транзистора:  
а) входные характеристики;  
б) выходные характеристики

Входные характеристики транзистора (рис. 18а) формируются описанными выше (п. 3.3) процессами в  $p-n$  переходе при его включении в прямом направлении. Если напряжение  $U_{КЭ} = 0$ , то в транзисторе осуществляется диодный режим работы, и тогда входная характеристика совпадает с участком 1 на графике ВАХ  $p-n$  перехода, представленном на рис. 6, и описывается формулой (8). Если напряжение  $U_{КЭ} > 0$  и превышает по величине  $U_{БЭ}$ , тогда коллекторный  $p-n$  переход, включенный в обратном направлении, своим электрическим полем в переходе обеспечивает дрейф неосновных носителей — электронов — из области базы в область коллектора. Происходит перераспределение носителей зарядов — при той же величине напряжения на базе  $U_{БЭ}$  по мере увеличения напряжения на коллекторе  $U_{КЭ}$  ток базы  $I_B$  уменьшается. Соответствующие кривые на графике проходят ниже первой зависимости, сохраняя свой вид.

Выходные характеристики транзистора (рис.18б) определяются процессами в коллекторном  $p-n$  переходе, который при указанных условиях включен в обратном направлении. Ток коллектора  $I_K$ , обусловленный дрейфом неосновных носителей (электронов), слабо зависит от коллекторного напряжения  $U_{КЭ}$  и определяется напряжением  $U_{БЭ}$ , приложенным к базовому переходу. Поэтому при  $U_{КЭ} > U_{БЭ}$  графики

имеют горизонтальные участки, которым и соответствует высокое дифференциальное сопротивление коллекторного перехода.

Таким образом, при указанных полярностях внешних источников напряжения в цепях базы и коллектора ***изменением напряжения на переходе эмиттер–база биполярного транзистора можно регулировать величину тока в коллекторной цепи.***

#### ***Вопросы и задания***

1. Какое основное свойство, присущее транзисторам, широко используется в радиоэлектронике?
2. Какие явления в *p-n* переходе используются в биполярных транзисторах для регулировки протекающего тока?
3. Какими обстоятельствами обеспечивается эффективное взаимодействие между переходами?
4. Укажите разновидности биполярных транзисторов. Начертите в рабочей тетради их условные обозначения на схемах?
5. Какие напряжения по полярности и соотношению величин прикладываются в активном режиме к эмиттерному и коллекторному переходам биполярных транзисторов? Укажите знаки полярности напряжений на базе и на коллекторе относительно эмиттера транзисторов типов *n-p-n* и *p-n-p*.
6. Почему коллекторный ток практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе, а определяется, в основном, напряжением, приложенным к базе?
7. Какие процессы формируют входные и выходные вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов? Начертите графики этих характеристик. Укажите, чем такие характеристики отличаются у транзисторов типов *n-p-n* и *p-n-p*.

## 5.2. Полевые транзисторы

**Полевой транзистор** – полупроводниковый прибор, содержащий три области одного и того же типа проводимости: *исток*, *канал* и *сток*, а также управляющий электрод – *затвор*.

В транзисторе используется движение носителей заряда только одного знака (основных носителей), которые из истока через канал движутся в сток под действием продольного электрического поля (направленного вдоль канала), создаваемого напряжением между стоком и истоком. Электрическое поле, возникающее при приложении напряжения между затвором и истоком, направленное поперек канала, изменяет его проводимость и, следовательно, регулирует ток через транзистор.

Полевые транзисторы различают по типу проводимости канала: транзисторы с каналом *n*- или *p*-типа. Структуры полевых транзисторов весьма разнообразны и подробно рассматриваются в специальной литературе.

### 5.2.1. Полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом

Это полупроводниковые приборы, в которых протекающий через транзистор ток основных носителей заряда управляется поперечным электрическим полем, изменяющим толщину запирающего слоя в окрестности *p-n* перехода.

Изображение структуры полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом и условные обозначения этих транзисторов на схемах представлены на рис. 19а–в.

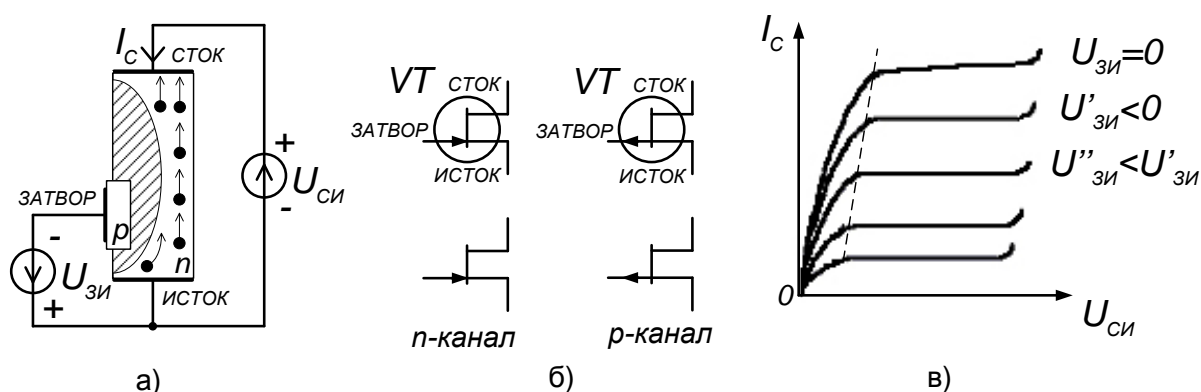


Рис. 19. Полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом:

- а) структура транзистора с каналом *n*-типа;
- б) условные обозначения на схемах;
- в) вольт-амперные характеристики

Транзистор представляет собой токопроводящий канал, выполненный из полупроводника *n*- или *p*-типа (в данном случае – *n*-типа). Его торцы – *исток* и *сток* – снабжены контактами. Через них к транзистору подключается внешний источник напряжения  $U_{си}$ ,



обеспечивающий движение основных носителей заряда по каналу от истока к стоку. На боковую поверхность канала нанесен **затвор** – слой полупроводника другого типа проводимости (в данном случае –  $p$ -типа). Между затвором и каналом располагается  $p$ - $n$  переход. Затвор снабжен контактом, через который к нему подключается источник напряжения  $U_{зи}$ .

Исток является инжекторным электродом. Здесь основные носители заряда начинают движение в канале. Сток служит коллекторным электродом. Здесь основные носители заряда заканчивают движение в канале. Затвор – электрод, управляющий величиной поперечного сечения канала.

Источник управляющего напряжения  $U_{зи}$ , действующий между затвором и истоком, обеспечивает включение  $p$ - $n$  перехода в обратном направлении. Увеличение обратного напряжения увеличивает толщину запирающего слоя, уменьшая тем самым сечение канала. Сопротивление канала увеличивается, и поэтому ток основных носителей заряда (в данном случае – электронов) в канале уменьшается.

Процессы, происходящие в транзисторе, представляются семейством *выходных* (или *стоковых*) *характеристик*, определяющим зависимость тока стока  $I_C$  от напряжений на стоке  $U_{си}$  и на затворе  $U_{зи}$ . Графики этого семейства кривых  $I_C = f(U_{си})$ , где  $U_{зи}$  – параметр, представлены на рис. 19в.

Если напряжение  $U_{зи} = 0$ , то при малых значениях  $U_{си}$  ток  $I_C$  изменяется примерно прямо пропорционально изменениям напряжения  $U_{си}$ . При существенном увеличении  $U_{си}$  запирающий слой  $p$ - $n$  перехода со стороны стока расширяется, сужая стоковый участок канала. Рост тока  $I_C$  сначала замедляется, а затем ток достигает значения насыщения, после чего остается примерно постоянным. При дальнейшем увеличении  $U_{си}$  возникает электрический (лавинный) пробой.

При отрицательном напряжении  $U_{зи} < 0$  исходная проводимость канала уменьшается, поэтому начальный участок данной стоковой характеристики становится более пологим. Кроме этого, переход к режиму насыщения наступит при меньших значениях напряжения и тока стока.

Таким образом, при указанных полярностях внешних источников напряжения в цепях затвора и стока **изменением напряжения на затворе транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом можно регулировать величину тока в стоковой цепи.**

### 5.2.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Это полупроводниковые приборы, в которых протекающий через транзистор ток основных носителей заряда управляется поперечным электрическим полем, изменяющим толщину наведенного (индуцированного) канала. В отличие от полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом этот транзистор имеет изолированный затвор

и поэтому сохраняет высокое входное сопротивление независимо от полярности управляющего напряжения на затворе.

Структура транзистора, в котором индуцируется канал  $n$ -типа и условные обозначения транзисторов с каналами  $n$ -типа и  $p$ -типа на схемах, показаны на рис. 20. В пластинке, называемой *подложкой*, выполненной из полупроводника  $n$ -или  $p$ -типа (в данном случае  $p$ -типа), создаются две области другого типа проводимости (в данном случае  $n$ -типа) с высокой концентрацией основных носителей заряда. Одна из них является *истоком*, другая – *стоком*. Поверхность подложки покрыта диэлектрическим слоем, изолирующим электрод *затвора*, расположенный между истоком и стоком. Подложка, исток, сток и затвор снабжены контактами. Через них к транзистору подключаются внешние источники напряжения  $U_{си}$  и  $U_{зи}$ . Первый из них –  $U_{си}$  обеспечивает движение основных носителей заряда по каналу от истока к стоку, второй –  $U_{зи}$  предназначен для создания канала и управления его шириной (сечением). Подложку обычно соединяют с истоком. В исходном состоянии, при отсутствии напряжения на затворе ( $U_{зи} = 0$ ), токопроводящий канал между истоком и стоком отсутствует. При подаче на затвор управляющего напряжения  $U_{зи} > 0$  в прилегающей к затвору области появляется электрическое поле. По мере увеличения напряжения на затворе это поле вытесняет из прилегающей к затвору области основные носители заряда в подложке – дырки – и подтягивает неосновные носители заряда – электроны. При некотором пороговом напряжении на затворе в поверхностном слое подложки тип проводимости изменяется с дырочной на электронную. При этом две области  $n$ -типа оказываются соединенными друг с другом посредством  $n$ -слоя, образующего канал. В этом канале от истока к стоку движутся носители заряда – электроны. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_{зи}$  канал расширяется, его сопротивление уменьшается. Оно и определяет величину тока  $I_c$  при  $U_{си} = \text{const}$ .

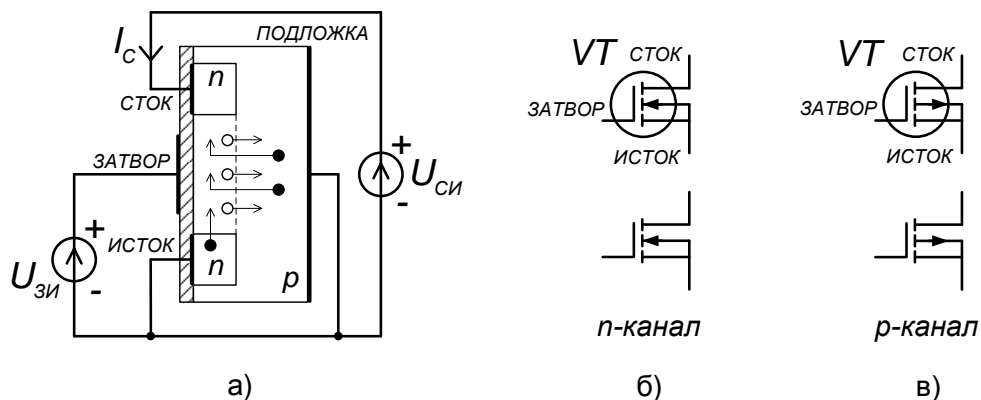


Рис. 20. Полевой транзистор с индуцированным каналом:

- а) структура транзистора с каналом  $n$ -типа;
- б) условные обозначения на схемах

### 5.2.3. Полевые транзисторы со встроенным каналом

Эти транзисторы отличаются от предыдущих тем, что токопроводящий канал создают – «встраивают» технологическим путем в виде тонкого полупроводникового слоя, соединяющего исток и сток. В зависимости от типа проводимости подложки транзистор будет иметь канал *n*-или *p*-типа. Условные изображения полевых транзисторов этой разновидности представлены на рис. 21.

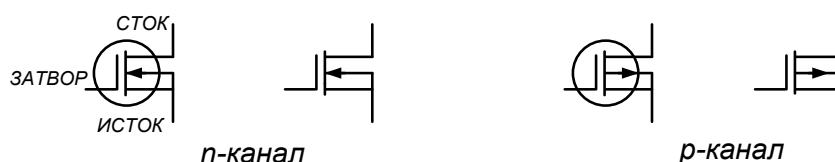


Рис. 21. Условные обозначения на схемах полевого транзистора со встроенным каналом

Семейства стоковых характеристик, определяющих зависимость тока  $I_c$  от напряжений  $U_{си}$  и  $U_{зи}$ , у всех разновидностей полевых транзисторов сходны и отличаются только полярностями внешних источников напряжения в цепях затвора и стока.

Таким образом, *изменением напряжения на затворе полевого транзистора любой рассмотренной разновидности можно регулировать величину тока в стоковой цепи.*

**Обобщение.** Подводя итог рассмотренным разновидностям транзисторов, отметим, что все они (как, впрочем, и другие электронные приборы, являющиеся регуляторами протекающего тока, в первую очередь – электронные лампы) имеют три основных электрода – **инжекторный, коллекторный и управляющий**. Первый из них служит для внесения – «инжекции» (впрыскивания) носителей заряда в рабочую область прибора, второй электрод собирает – «коллектирует» эти носители заряда, третий электрод регулирует их количество – «управляет» протекающим током.

Основной характеристикой, определяющей способность регулировать протекающий ток, может служить зависимость тока в коллекторной цепи  $I_k$  от напряжения на управляющем электроде  $U_u$ , отсчитываемого от инжекторного электрода, а основным параметром – *крутизна* этой характеристики  $S = \Delta I_k / \Delta U_u$  в выбранной точке исходного состояния активного режима.

При анализе транзисторных схем, работающих в линейном режиме или в режиме близком к линейному, когда сигналы достаточно малы, транзисторы заменяют схемами, представленными на рис. 22. Их называют схемами замещения (малосигнальными). Схемы рис. 22б и рис. 22д, пригодные при исследовании низкочастотных процессов, получают путем формального анализа статических вольт-амперных характеристик транзисторов. Параметрами этих схем являются дифференциальные

проводимости  $G_{ВХ}$ ,  $G_{ВН}$  и крутизна  $S$ . Схемы рис. 22в и рис. 22е, пригодные при исследовании высокочастотных процессов, получают путем учета физических явлений в  $p-n$  переходах транзисторов. Параметрами этих схем, наряду с дифференциальными проводимостями крутизной  $S$ , являются межэлектродные емкости транзисторов и входное сопротивление базы  $R_{Б'}$  биполярных транзисторов.

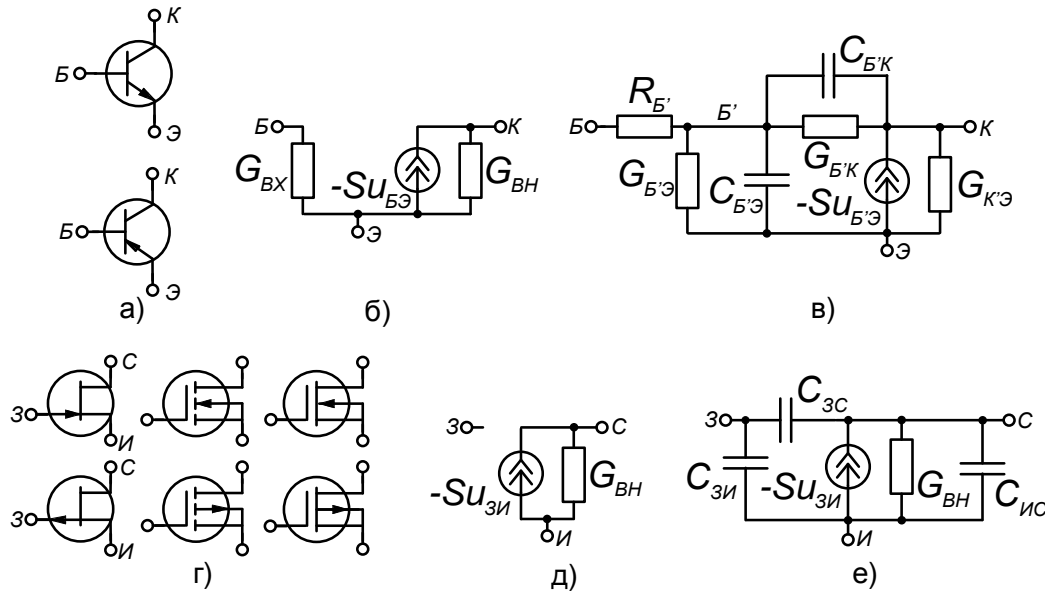


Рис. 22. Транзисторы и их эквивалентные схемы:

- а), г) условные обозначения транзисторов;  
 б), д) формальные малосигнальные схемы замещения;  
 в), е) физические схемы замещения

### Вопросы и задания

1. Как осуществляется управление протекающим током в полевых транзисторах?
2. Перечислите основные разновидности полевых транзисторов. Начертите и усвойте их условные обозначения.
3. Посредством чего регулируется протекающий ток в полевых транзисторах с управляющим  $p-n$  переходом?
4. Как происходит управление током, протекающим в полевых транзисторах с индуцированным и встроенным каналами?
5. Как формируются стоковые вольт-амперные характеристики полевых транзисторов? Что общего и в чем отличие этих характеристик у разновидностей транзисторов. Начертите графики стоковых характеристик разновидностей полевых транзисторов.
6. Какие напряжения по полярности и соотношению величин прикладываются в активном режиме к электродам полевых транзисторов? Укажите знаки полярности напряжений на затворе и на стоке относительно истока транзисторов с каналами  $n$ - и  $p$ -типов.
7. Почему входные сопротивления всех разновидностей полевых транзисторов являются высокими?

## 6. Транзисторы в схемах радиоэлектронных узлов

Стремительное развитие радиоэлектронных средств и их повсеместное использование как во всех отраслях науки и техники, так и в обиходе привело к большому количеству различных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры. В связи с этим транзисторная схемотехника является столь многообразной, что в этом пособии можно указать только на несколько фундаментальных приложений.

### 6.1. Транзисторы в электронных усилителях

**Усиление сигналов** является наиболее важным и самым распространенным процессом в радиоэлектронике, причем сигналом, как правило, является напряжение  $u$ , изменяющееся во времени  $u(t)$ . **При усилении сигнала происходит увеличение его энергии**, т. е.  $W_{\text{ВЫХ.С.}} > W_{\text{ВХ.С.}}$ . Устройства, которые осуществляют этот процесс, называют **усилителями**.

Если входной и выходной сигналы связаны линейной зависимостью  $u_{\text{ВЫХ}}(t) = k u_{\text{ВХ}}(t)$ , усиление называют **линейным**.

**Принцип электронного усиления заключается в управлении посредством электронных приборов электрическими токами и напряжениями, создаваемыми в усилительной цепи сторонним источником энергии – источником питания.** Этот принцип поясняют рис. 23 и рис. 24.

В цепи рис. 23а, составленной из последовательно соединенных двух резисторов с сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$  и источника постоянного напряжения  $E$ , образующих контур, течет ток  $I$ , величина которого равна  $I = E / (R_1 + R_2)$ . Падение напряжения на резисторе  $R_2$  определяется формулой  $U = R_2 E / (R_1 + R_2)$ . Диаграмма рис. 23б иллюстрирует величину напряжения  $U$  при различных соотношениях  $R_1$  и  $R_2$ . Из нее видно, что изменение сопротивления  $R_2$  приводит к изменению напряжения  $U$  в пределах от 0 до величины, близкой  $E$ .

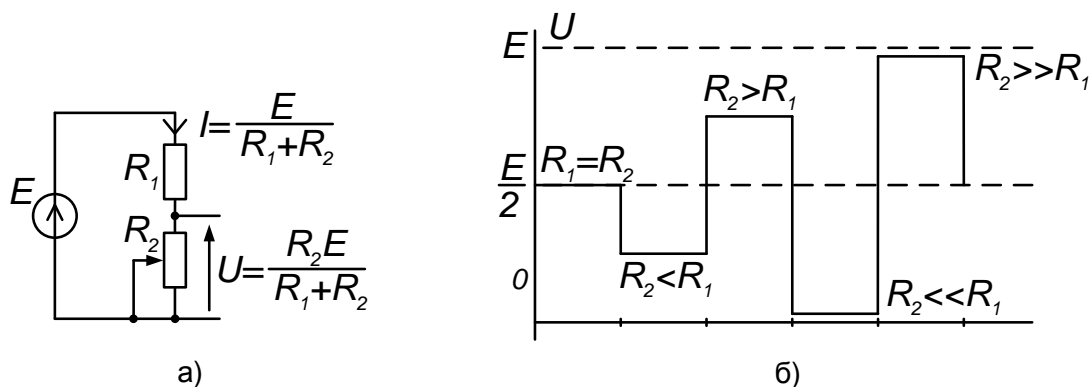


Рис. 23. Распределение напряжения в резисторной цепи

На рис. 24 представлены схемы простейших электронных усилителей. Роль управляемого резистора  $R_2$  в схеме рис. 24а выполняет какой-либо транзистор  $VT$ , (в схеме рис. 24б это, в частности, биполярный транзистор, а в схеме рис. 24в это полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$  переходом). Источник постоянного напряжения  $E$  в этих схемах – источник питания, обозначенный как  $E_{\text{п}}$ . Именно он является источником энергии при усилении сигналов. Роль постоянного резистора  $R_1$  в этих схемах, в частности, выполняют резисторы, обозначенные как  $R_K$  и  $R_C$ , называемые *нагрузками* транзисторов. Элементы усилителя  $VT$ ,  $R_K$  и  $E_{\text{п}}$  соединены последовательно, образуя контур. Величина тока  $I_K$  в контуре регулируется транзистором в зависимости от *входного сигнала* – входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ . Посредством нагрузки транзистора – резистора  $R_K$  ( $R_C$ ) изменение тока преобразуется в *выходной сигнал* – напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Энергия, которую способен выделить выходной сигнал  $W_{\text{вых.с.}}$ , превосходит энергию входного сигнала  $W_{\text{вх.с.}}$ , затраченную на управление транзистором.

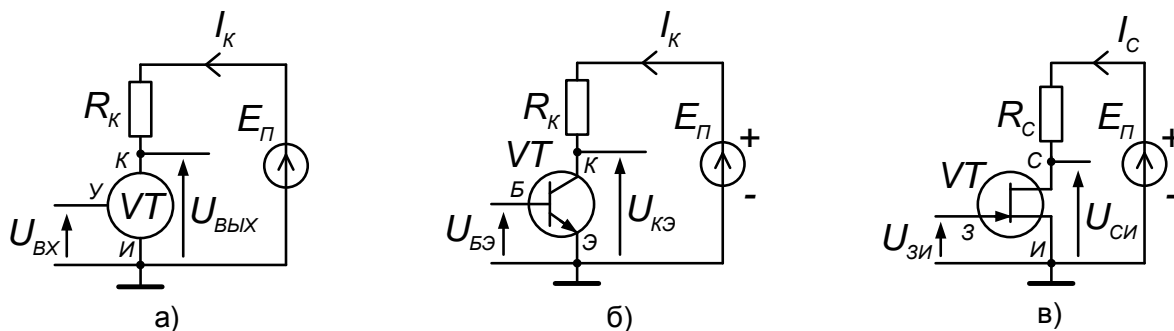


Рис. 24. Электронные усилители:

- а) обобщенная схема усилителя;
- б) схема усилителя на биполярном транзисторе;
- в) схема усилителя на полевом транзисторе

Заметим, что в этих схемах усилителя *увеличение напряжения на управляющем электроде*, открывающее транзистор (уменьшающее его сопротивление), *приводит к уменьшению напряжения на коллекторном электроде*. Если эти изменения происходят в пределах линейных областей вольт-амперных характеристик транзистора, тогда процесс усиления сигналов является линейным. Поясним его следующим упрощенным анализом. Пусть входной сигнал получает приращение  $\Delta U_{\text{вх}}$ . Тогда коллекторный ток получает приращение  $\Delta I_K = S \Delta U_{\text{вх}}$ . Выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = E_{\text{п}} - R_K I_K$  получает приращение

$$\Delta U_{\text{вых}} = -R_K \Delta I_K = -R_K S \Delta U_{\text{вх}}.$$

Отношение приращений напряжений на выходе усилителя  $\Delta U_{\text{вых}}$  и на его входе  $\Delta U_{\text{вх}}$  определяет **коэффициент передачи схемы по напряжению**

$$k_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = -SR_K. \quad (11)$$

Из этой формулы следует, что выходной сигнал **инвертируется**, т. е. меняет свою полярность на противоположную и **усиливается** –

увеличивается пропорционально значениям крутизны  $S$  и сопротивления коллекторной нагрузки  $R_K$ .

Таким образом, основными частями, присущими каждому усилителю, являются: *источник питания* – источник энергии; *электронный прибор*, регулирующий расход этой энергии (в данном случае транзистор  $VT$ ); *нагрузка электронного прибора* (в данном случае резистор  $R_K$ ), посредством которой из контура расхода энергии извлекается усиленный сигнал.

В современной схемотехнике усилительных устройств в качестве электронных приборов используются транзисторы, выгодно отличающиеся от предшествующих им электронных ламп. Разновидность транзистора и его тип выбирают с учетом характеристик сигналов. В качестве нагрузки транзистора наряду с резисторами используют колебательные контуры, трансформаторы и другие радиокомпоненты.

На рис. 25а–в представлены реальные схемы усилителей на биполярном транзисторе, предназначенные для линейного усиления сигналов. Жирными линиями на них отмечены основные элементы усилителя:  $VT$ ,  $R_K$ ,  $C_K$ ,  $L_K$ . Остальные элементы –  $R_B$ ,  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ,  $R_Э$  и  $C$  являются вспомогательными. С их помощью обеспечивается и стабилизируется исходное – «приоткрытое» состояние транзистора и отделение переменной составляющей напряжения – выходного сигнала – от постоянной составляющей напряжения на коллекторе транзистора  $R_K$ .

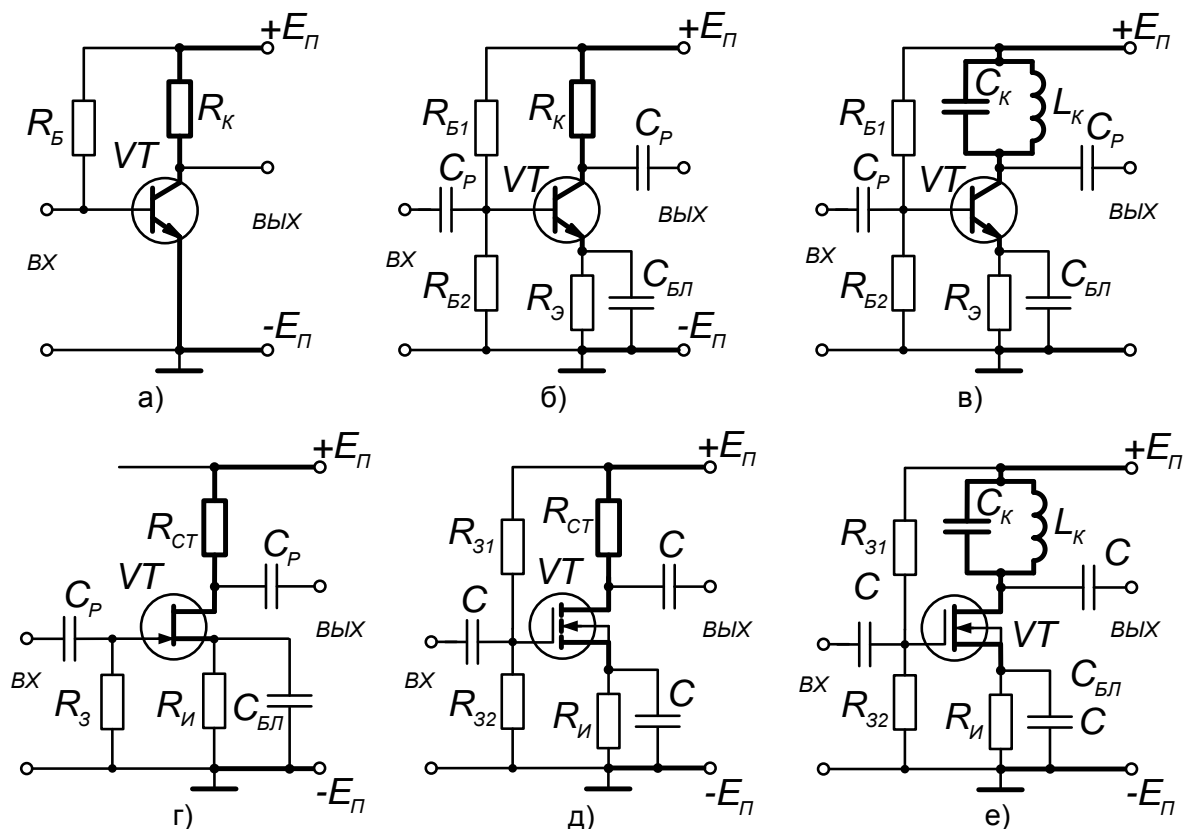


Рис. 25. Схемы усилителей на транзисторах:

а), б), г), д) резисторные усилители;  
 в), е) резонансные усилители

Коллекторными нагрузками транзисторов на рис. 25а,б служат резисторы поэтому такие усилители называют **резисторными**. Коллекторной нагрузкой транзистора на рис. 25в служит колебательный контур  $C_k L_k$ . Присущее ему явление резонанса послужило поводом называть подобные усилители **резонансными**. Рис. 25г–е иллюстрируют схемы усилителей на полевых транзисторах, аналогичные схемам усилителей на биполярных транзисторах (рис. 25а–в).

### **Вопросы и задания**

1. Какова суть процесса усиления сигналов? При каком условии усиление является линейным?
2. Сформулируйте принцип электронного усиления сигналов.
3. Перечислите основные части элементарной усилительной цепи. Укажите их назначение.
4. Поясните, как происходит усиление сигналов в электронном усилителе?
5. Повторяя упрощенный анализ усилительных схем, приведенных на рис. 23, получите формулу, определяющую коэффициент передачи напряжения схемы в режиме линейного усиления.
6. Какие усилители называют **резисторными**?
7. Какие усилители называют **резонансными**? Начертите схему такого усилителя.



## 6.2. Транзисторы в автогенераторах

**Генерированием колебаний** в радиоэлектронике называется процесс, при котором энергия источника питания (чаще всего источника постоянного напряжения) преобразуется в электрические колебания заданной формы и частоты. Устройства, в которых осуществляется этот процесс, называются **автогенераторами**. Они представляют собой систему с достаточно сильной положительной обратной связью, обеспечивающей исходную неустойчивость этой системы. Отсутствие в ней иных устойчивых состояний приводит к возникновению в этой системе автоколебаний.

Обычно в такой системе в качестве одного из звеньев – основного – используют какой-либо усилительный каскад, а в качестве другого – пассивную цепь или еще один усилительный каскад. Форма и частота автоколебаний определяются элементами  $L$ ,  $C$  и  $R$ , входящими в состав звеньев. Ниже приведены примеры схем транзисторных автогенераторов.

Рис. 26а–в иллюстрирует схемы  $LC$ -автогенераторов гармонических колебаний с индуктивной (трансформаторной) обратной связью. Основа этих автогенераторов – резонансные усилители. Обратная связь здесь осуществляется посредством взаимной индуктивности  $L_{CB}$ , «связывающей» выход и вход усилительного каскада, причем  $L_{CB}$  подключается к входу так, чтобы скомпенсировать инверсию колебания, происходящую при его усилении в основном звене. В этих схемах электронные приборы работают в ключевом режиме, а колебательные контуры  $LC$  отфильтровывают гармоническую составляющую резонансной частоты  $\omega_P = 1/\sqrt{LC}$ . Именно на этой частоте выполняется условие баланса фаз – синфазность сигналов на входе и выходе усилительного каскада.

Рис. 26г иллюстрирует схему  $RC$ -автогенератора гармонических колебаний с лестничной фазозадающей  $RC$ -цепью. Основа этого автогенератора – резистивный усилитель, представленный выше схемой рис. 24г. Обратная связь здесь осуществляется посредством трехзвенной  $RC$ -цепи, «связывающей» выход и вход усилительного каскада, обеспечивая на частоте  $\omega_T = 1/RC\sqrt{6}$  синфазность сигналов на его входе и выходе.

Рис. 27 иллюстрирует схемы автогенераторов релаксационных, т. е. «негармонических» колебаний. Первая из них (рис. 27а) – транзисторный мультивибратор. Фактически это двухкаскадный резисторный усилитель, выход которого соединен со входом. Каждый каскад инвертирует усиливаемый сигнал, обеспечивая синфазность сигналов на его входе и выходе в широком диапазоне частот. Форма колебаний напряжения на коллекторах – прямоугольная, на базах – треугольная. Вторая схема (рис. 27б) представляет транзисторный блокинг-генератор. Здесь обратная связь осуществляется посредством трансформатора, который, как и в

предыдущей схеме, обеспечивает синфазность сигналов на его входе и выходе в широком диапазоне частот. Форма колебаний напряжения на выходе трансформатора – импульсы малой (по сравнению с периодом колебаний) длительности.

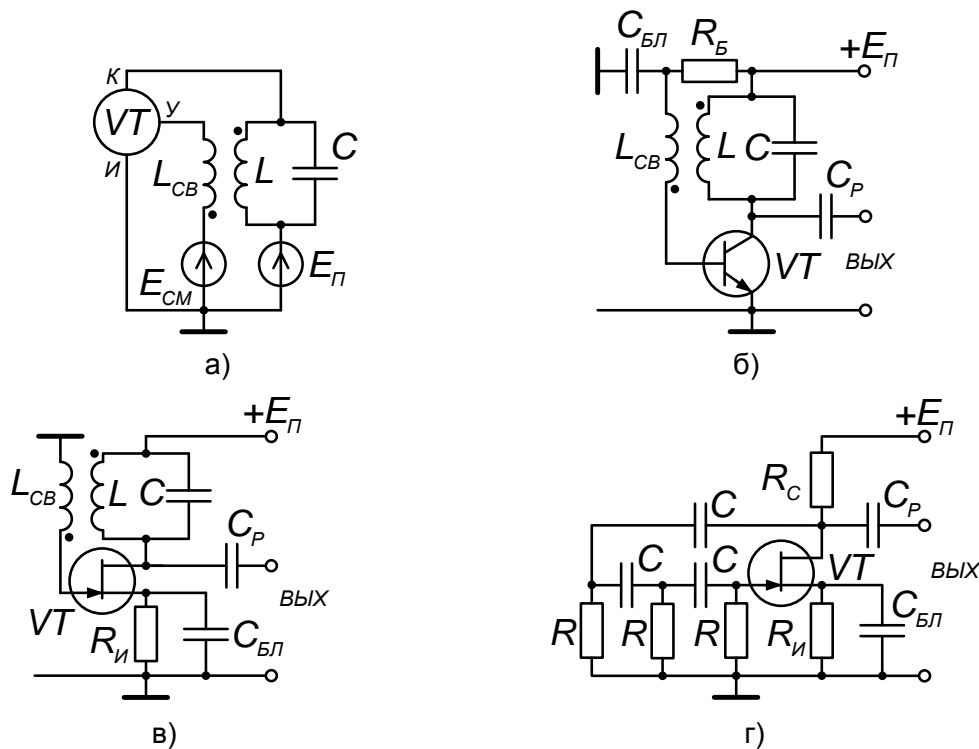


Рис 26. Схемы автогенераторов гармонических колебаний:  
а) обобщенная схема  $LC$  автогенератора с индуктивной связью;  
б) вариант этой схемы на биполярном транзисторе;  
в) вариант этой схемы на полевом транзисторе;  
г)  $RC$ -автогенератор

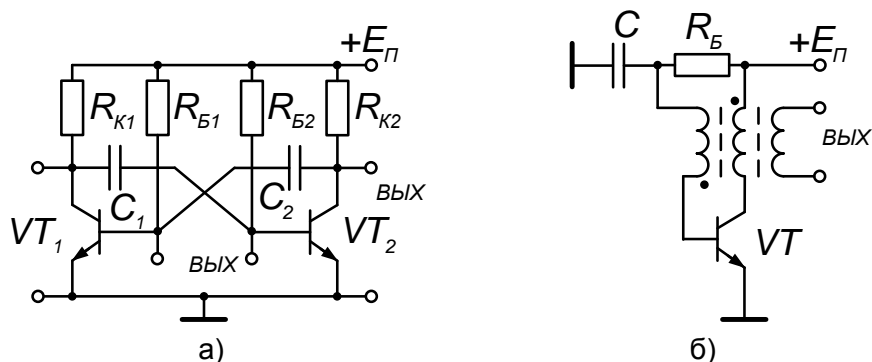


Рис. 27. Схемы автогенераторов релаксационных колебаний:  
а) транзисторный мультивибратор;  
б) блокинг-генератор

### Вопросы и задания

1. Какой системой является автогенератор? Чем является его основное звено?
2. Какие явления используются в  $LC$ -автогенераторах?
3. Укажите, какими способами осуществляется фазирование колебаний на выходе и входе основных звеньев в схемах, представленных на рис. 26 и рис. 27?
4. Укажите, что общего и в чем различие между автогенераторами, представленными на рисунках 26б и 27б?

### 6.3. Транзисторы в модуляторах

**Модуляцией** в радиоэлектронике называется процесс, при котором *информационный сигнал* (ИС) «наносится» на *несущее колебание* (НК). В качестве последнего обычно используется гармоническое колебание. Принудительное изменение его амплитуды, частоты, или фазы, выполняемое в соответствии с информационным сигналом, осуществляется в **модуляторах**. В диапазонах радиочастот в качестве их основы можно использовать представленные выше резонансные усилители и автогенераторы гармонических колебаний. Схемы таких модуляторов даны на рис. 28.

Амплитудная модуляция (АМ) в транзисторном резонансном усилителе может осуществляться либо путем одновременной подачи на его вход НК и ИС (рис. 28а), либо посредством изменения напряжения питания, добавляя ИС к  $E_{\text{П}}$  (рис. 28б).

Частотная модуляция (ЧМ) может осуществляться в транзисторном LC автогенераторе путем изменения частоты его генерации с помощью варикапа, добавляя его емкость к емкости конденсатора, входящего в колебательный контур (рис. 28в).

Фазовая модуляция (ФМ) может осуществляться в транзисторном резонансном усилителе путем изменения частоты его настройки с помощью варикапа, добавляя его емкость к емкости конденсатора, входящего в колебательный контур (рис. 28г).

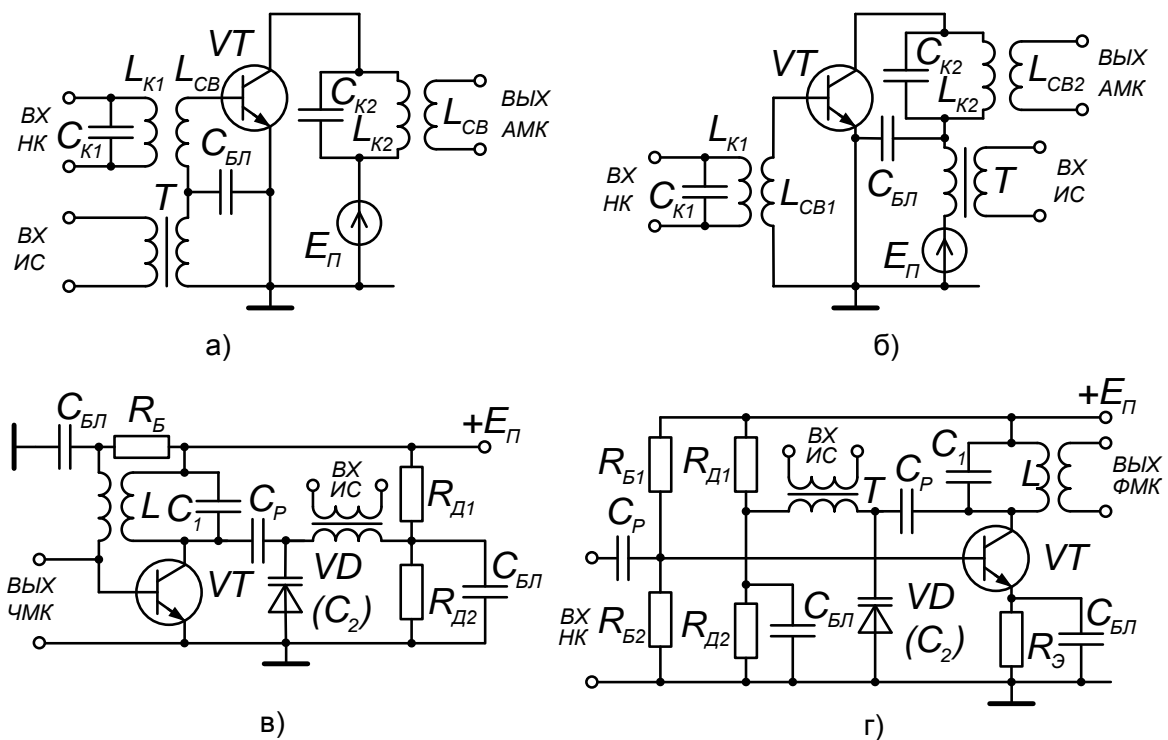


Рис. 28. Схемы модуляторов АМ (а, б), ЧМ (в) и ФМ (г)

#### Вопросы и задания

Укажите назначение элементов схем модуляторов, представленных на рис. 28.

## 6.4. Транзисторы в цифровых схемах

Передачу, прием обработку и хранение информации в цифровой форме обеспечивает **цифровая техника** – интенсивно развивающаяся отрасль науки и техники, тесно связанная с радиоэлектроникой в «интегральном» исполнении – **микроэлектроникой**. Информацию в цифровой технике заключают в чередование двух уровней носителей сигнала. Так, чаще всего она содержится в чередовании двух уровней напряжения – «низкого», близкого к 0 и «высокого», близкого к  $+E_{\text{п}}$ . Для обработки и усиления таких сигналов используют схемы, в которых диоды и транзисторы – «ключи», принимающие одно из двух возможных состояний: *открытое* (отпертое) и *закрытое* (запертое). В открытом состоянии их сопротивление мало (порядка  $10^1$  Ом), в закрытом – велико ( $10^6 - 10^{10}$  Ом). Теоретической основой цифровой техники является алгебра логики (Булева алгебра), в которой над ее объектами определены три операции: **логическое отрицание** (инверсия, операция НЕ), **логическое сложение** (дизъюнкция, операция ИЛИ), **логическое умножение** (конъюнкция, операция И). И эти элементарные, и другие более сложные операции осуществляются в логических элементах, изготавливаемых средствами микроэлектроники в различных сериях цифровых интегральных микросхем. В качестве базовых логических элементов в ряде серий выступают элементы ИЛИ-НЕ и И-НЕ, выполненные на основе транзисторных усилителей цифровых сигналов.

Существует большое многообразие схемных решений базовых логических элементов, ориентированных на различные технологии изготовления интегральных микросхем. Здесь, на рис. 29 представлены простые примеры схем усилителей, которые используются при создании базовых логических элементов. Это усилители, инвертирующие сигналы (см. рис. 23), выполняют в цифровых схемах операцию НЕ. Схема рис. 29а на биполярном транзисторе содержит в цепи базы резистор  $R_{\text{Б}}$ , ограничивающий её ток при высоком уровне входного сигнала. На схеме рис. 29б на полевом транзисторе стоковой нагрузкой служит резистор  $R_{\text{С}}$ , а на схеме рис. 29в этот резистор заменен транзистором  $VT_2$  с противоположным по отношению к транзистору  $VT_1$  типом проводимости. Такие транзисторы называют **комплементарными**.

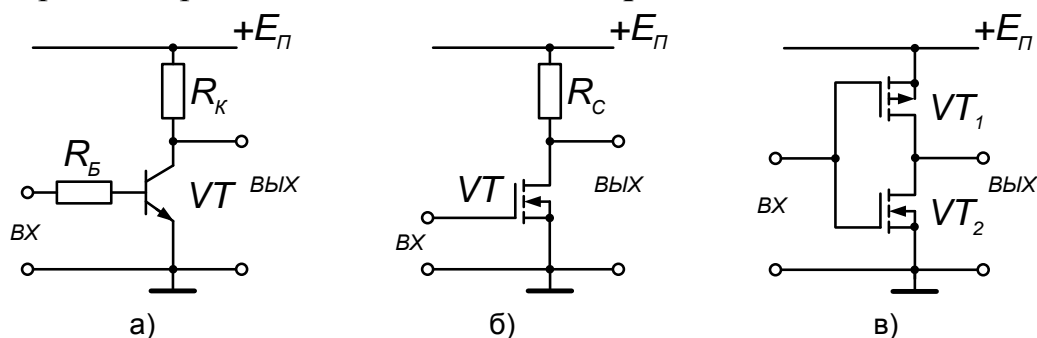


Рис. 29. Схемы усилителей цифровых сигналов, выполняющих операцию НЕ

Последняя схема, выполненная на комплементарных транзисторах, обладает существенным преимуществом по сравнению с предыдущими (рис. 29а,б) – ток через транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  течет только тогда, когда изменяется уровень входного сигнала. При его высоком уровне нижний транзистор  $VT_2$  открыт, его сопротивление мало, а верхний  $VT_1$  – закрыт, его сопротивление велико. Общее сопротивление велико – ток мал. Выходной сигнал имеет низкий уровень. При низком уровне входного сигнала состояние транзисторов изменяется на противоположное. Опять общее сопротивление велико – ток мал, и выходной сигнал принимает высокий уровень. В среднем потребление тока от источника питания мало. Такой вариант схемы, выгодно отличающий его от других схем (рис. 29а,б), составляет основу *комплементарной логики*, представленной на рис. 30 базовыми элементами И-НЕ и ИЛИ-НЕ.

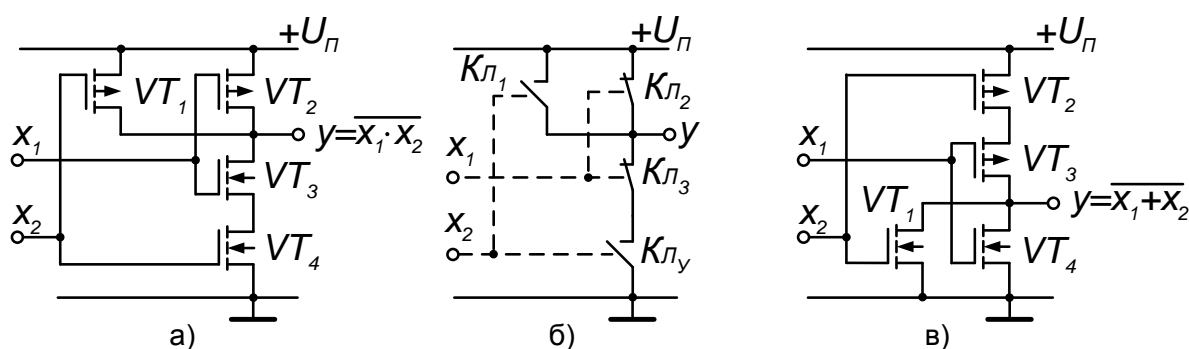


Рис. 30. Базовые элементы комплементарной логики:

- а) элемент И-НЕ;
- б) его эквивалентная схема;
- в) элемент ИЛИ-НЕ

Два элемента НЕ, соединенные таким образом, что выход каждого из них подключен ко входу другого, образуют систему с сильной положительной обратной связью. Этим в схеме обеспечивается наличие двух устойчивых состояний, когда один из транзисторов закрыт, а другой открыт, или наоборот. Такие схемы, называемые **триггерами** или **бистабильными ячейками**, составляют основу ряда важнейших функциональных узлов цифровой техники (счетчиков импульсов, регистров памяти, полупроводниковых запоминающих устройств и др.). Примеры схем триггеров представлены на рис. 31. Их основа – элементы НЕ, схемы которых приведены на рис. 29а и рис. 29в.

В цифровой технике самого различного назначения в настоящее время все большее использование получают **полупроводниковые запоминающие устройства**, содержащие большое количество **запоминающих элементов**, и устройства доступа к ним для записи и считывания информации. Запоминающим элементом полупроводниковой «памяти» может служить, например, представленная выше (на рис. 31б) бистабильная ячейка, дополненная адресной шиной (АШ), разрядными шинами (РШ) и транзисторными ключами. Схема такого запоминающего

элемента представлена на рис. 32а. Когда возбуждается адресная шина АШ, транзисторы  $VT_1$  и  $VT_6$  подключают бистабильную ячейку к разрядным шинам РШ«1» и РШ«0». В режиме записи посредством этих шин сигналы усилителя записи устанавливают ячейку в то или иное состояние, в режиме считывания через те же шины состояние ячейки передается в усилитель считывания. Недостатком этого запоминающего элемента является большое количество используемых в нем транзисторов (6), определяющее, в конечном итоге, размеры запоминающих устройств.

Схемы запоминающих элементов с меньшим числом транзисторов даны на рис. 32б–г. Основными элементами, сохраняющими информацию, здесь служат емкости, а транзисторы выполняют функции выключателей. Наличие или отсутствие заряда в емкости определяет состояние ячейки

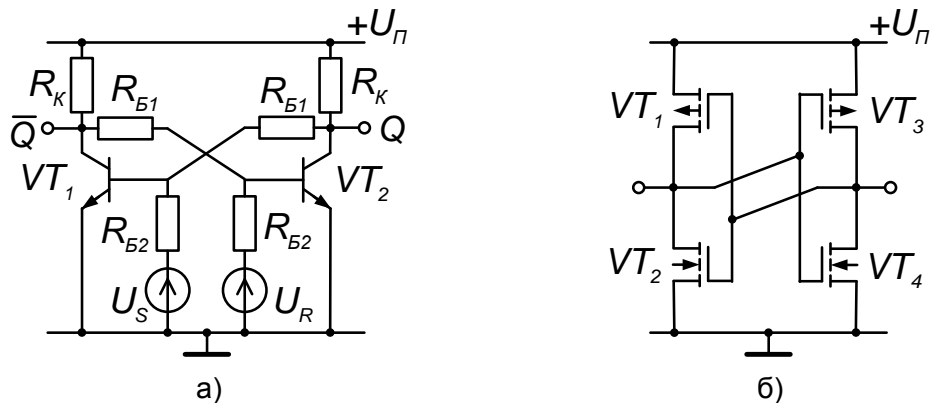


Рис. 31. Бистабильные ячейки (триггеры): а) на биполярных транзисторах; б) на комплементарной паре полевых транзисторов

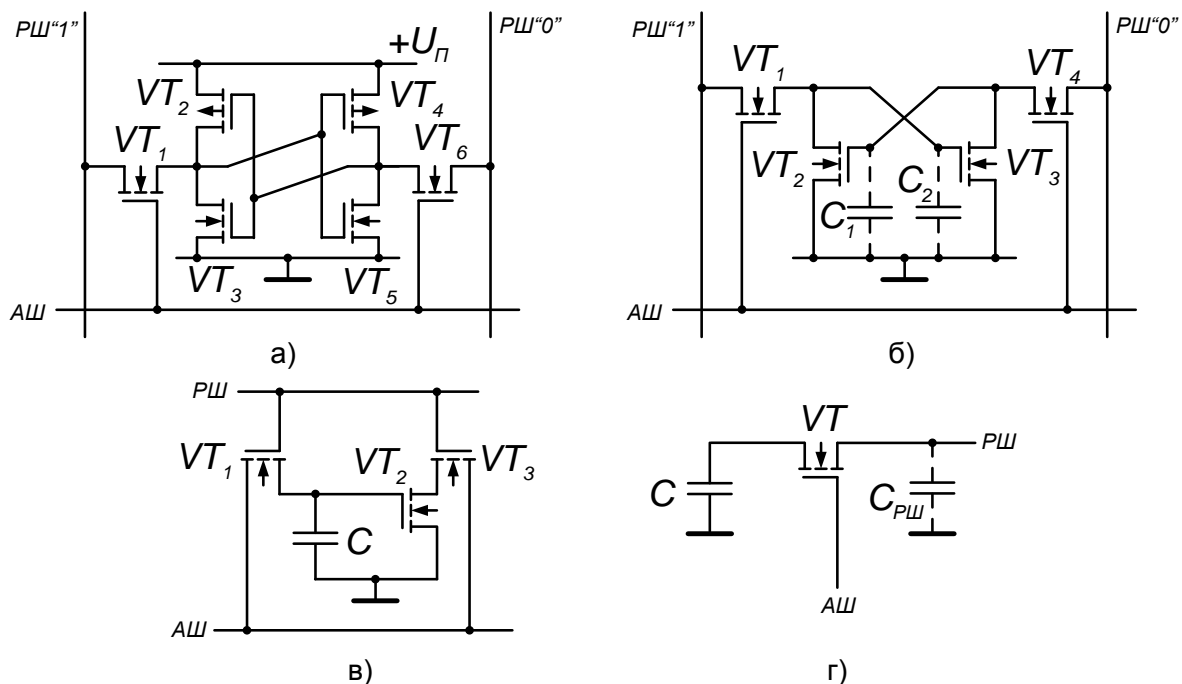


Рис. 32. Запоминающие элементы цифровой техники: а) шеститранзисторный; б) четырехтранзисторный; в) трехтранзисторный; г) однотранзисторный

### ***Вопросы и задания***

1. Какие логические элементы в ряде серий цифровых микросхем используют в качестве базовых?
2. Что является основой цифровых схем, выполняющих операцию НЕ?
3. Начертите схему инвертера цифровых сигналов на комплементарной паре транзисторов.
4. Начертите схему базового элемента И-НЕ комплементарной логики. Поясните, как она работает.
5. Начертите схему базового элемента ИЛИ-НЕ комплементарной логики и эквивалентную схему этого элемента. Поясните, как она работает.
6. Какова роль триггеров в цифровой технике? Начертите схему триггера на комплементарной паре полевых транзисторов. Поясните, как она работает.
7. Какова роль запоминающих устройств в цифровой технике?
8. Начертите схему шеститранзисторного запоминающего элемента статического запоминающего устройства с произвольной выборкой (рис. 32а). Поясните, как она работает.

## 7. Шумы полупроводниковых приборов

**Общие сведения.** Токи и напряжения в полупроводниковых приборах подвержены случайным изменениям, называемым *шумами*. ***Шумы присущи всем электронным приборам без исключения и принципиально неустранимы.*** Причины возникновения шумов различны: спонтанные флуктуации скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда, случайные распределения носителей по электродам прибора, флуктуации скоростей диффузии, флуктуации плотности носителей и др. Шумы приборов ограничивают нижний предел сигналов, которые можно обнаружить, усилить и измерить, т. е. ***шумами определяется пороговая чувствительность прибора.*** Частотный спектр шумов всегда превышает диапазон рабочих частот прибора.

В электронных приборах шумы рассматриваются как случайно изменяющаяся функция времени  $x(t)$  – *стохастический процесс*, который *стационарен*. Основными статистическими характеристиками шумов являются: *дисперсия шума* – средний квадрат флуктуаций, характеризующий энергию шума; *автокорреляционная функция*, характеризующая взаимосвязь между двумя значениями функции  $x(t)$ , отделенными промежутком времени; *спектральная плотность мощности*, определяющая среднюю спектральную составляющую шума на частоте в полосе частот 1 Гц.

**Источники шумов.** Наиболее часто в полупроводниковых электронных приборах встречаются такие виды шумов: тепловой, дробовой, генерационно-рекомбинационный, низкочастотный, а также шумы токораспределения, микроплазменный шум, фотонный шум и др.

**Тепловой шум** – это флуктуации тока или напряжения, обусловленные тепловым движением в среде свободных носителей. Их хаотическое движение приводит к флуктуации концентрации носителей, а следовательно, тока, протекающего в среде. Спектральная плотность теплового шума  $N_T(\omega)$  не зависит от частоты и определяется выражением  $N_T(\omega) = 4kTR$ , где  $R$  – активное сопротивление. ***Тепловой шум – неустранимое явление в любом резистивном материале.*** В электронных приборах его часто представляют в виде эквивалентного шумового сопротивления. Основным способом снижения тепловых шумов является уменьшение активных потерь в приборе и его охлаждение.

**Дробовой шум** электронных приборов связан со статистическим характером процесса преодоления носителями потенциального барьера. В полупроводниковых приборах этот барьер возникает при контактах материалов с различным типом проводимости. Дробовой шум является важнейшей составляющей шумов электронных приборов. Он, как и тепловой, имеет равномерный спектр. Среднеквадратичное значение источника шумового тока, обусловленного дробовым эффектом,



определяется выражением  $R_{д.ш.} = 2eI\Delta f$ , где  $I$  – постоянная составляющая тока;  $\Delta f$  – полоса частот.

**Генерационно-рекомбинационный шум** присущ полупроводниковым средам. Он обусловлен флуктуациями концентрации носителей в результате статистического характера актов генерации и рекомбинации. Спектральная плотность этого шума, подобно тепловому и дробовому шумам, не зависит от частоты. На высоких частотах мощность генерационно-рекомбинационного шума составляет приблизительно 2/3 мощности дробового шума.

**Низкочастотный шум (избыточный, фликкерный, 1/f-шум)** наблюдается в области низких частот во всех материалах и элементах электронных приборов, в частности, в полупроводниках и электрических переходах. Спектральная плотность этого шума уменьшается приблизительно обратно пропорционально частоте по закону  $A/f^\alpha$ , где  $A$  – некоторая константа, а  $\alpha = 0,8 \div 1,4$  – коэффициент. В области низких частот (до  $10^5 - 10^6$  Гц) 1/f-шум на 1 – 2 порядка превышает шумы других видов. Поэтому 1/f-шум часто называют избыточным.

**Шумы токораспределения** являются результатом статистического характера распределения носителей между электродами прибора. Спектр этого шума близок к равномерному.

**Микроплазменный шум** возникает в сильном электрическом поле, например, в *p-n* переходе при напряжении, близком к напряжению пробоя.

**Фотонный шум** наблюдается в фотоэлектрических и оптронных приборах и обусловлен дискретной природой принимаемого излучения и фона.

При оценке шумов электронные приборы рассматривают как линейные двух- или четырехполюсники. Их шумовыми параметрами являются: *шумовая температура  $T_{ш}$* ; *относительная шумовая температура  $t_{ш} = T_{ш} / T_0$* , где  $T_0 = 300$  К – стандартная (комнатная) температура; *эквивалентное шумовое сопротивление  $R_{ш}$*  и *эквивалентная шумовая проводимость  $G_{ш}$*  – активные сопротивление и проводимость, которые при стандартной температуре  $T_0$  имеют такую же спектральную плотность источника шумового тока или источника шумового напряжения, как и реальный прибор на частоте  $\omega$ . Шумовые свойства четырехполюсников чаще оценивают *коэффициентом шума*.

### **Вопросы и задания**

5. Какова роль шумов электронных приборов в радиоэлектронных устройствах?
6. Перечислите основные статистические характеристики шумов.
7. Перечислите источники и охарактеризуйте основные разновидности шумов электронных приборов.
8. Перечислите основные шумовые параметры электронных приборов.

### Список использованной и рекомендованной литературы

1. *Гаркуша Ж. Н.* Основы физики полупроводников. – М.: Высшая школа, 1982. – 245 с.
2. *Смит Р.* Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 558 с.
3. *Шалимова К. В.* Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 391 с.
4. *Зи С. М.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
5. *Викулин И. М., Стафеев В. И.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 263 с.
6. *Рывкин С. М.* Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: Физматгиз, 1963. – 494 с.
7. *Букингом М.* Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986. – 398 с.
8. *Батушев В. А.* Электронные приборы. – М.: Высшая школа, 1980. – 383 с.
9. *Электронные приборы* / Под ред. Г. Шишкина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 495 с.
10. *Пасынков В. В., Чиркин Л. К.* Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 1987. – 479 с.
11. *Электроника: Энциклопедический словарь* – М.: Советская энциклопедия, 1991. – 688 с.

## *Содержание*

	стр.
<b>1. Общие сведения о полупроводниках</b>	3
<b>2. Собственные и примесные полупроводники</b>	6
<b>3. Электронно-дырочный переход</b>	10
3.1. Равновесное состояние перехода	10
3.2. Неравновесное состояние перехода	12
3.3. Вольт-амперная характеристика <i>p-n</i> перехода	13
<b>4. Диоды</b>	16
4.1. Выпрямительные диоды	16
4.2. Стабилитроны	20
4.3. Фотодиоды	21
4.4. Светодиоды	23
4.5. Варикапы	24
4.6. Туннельные диоды и обращенные диоды	25
4.7. Тиристоры	26
<b>5. Транзисторы</b>	28
5.1. Биполярные транзисторы	28
5.2. Полевые транзисторы	32
5.2.1. Полевые транзисторы с управляющим <i>p-n</i> переходом	32
5.2.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом	33
5.2.3. Полевые транзисторы с встроенным каналом	35
<b>6. Транзисторы в схемах радиоэлектронных узлов</b>	37
6.1. Транзисторы в электронных усилителях	37
6.2. Транзисторы в автогенераторах	41
6.3. Транзисторы в модуляторах	43
6.4. Транзисторы в цифровых схемах	44
<b>7. Шумы полупроводниковых приборов</b>	48
<b>Список использованной и рекомендованной литературы</b>	50

Навчальне видання

**Чеботарьов** Вадим Іванович  
**Думін** Олександр Миколайович  
**Холодов** Володимир Іванович

Напівпровідники в радіoeлектроніці

Редактор Агаркова І. Ю.  
Коректор  
Комп'ютерна верстка Аксьонова Н. В.  
Ілюстрації Чеботарьов А. В.  
Макет обкладинки Дончик І. М.

Підписано до друку

61077, Харків, майдан Свободи, 4,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Організаційно-видавничий відділ НМЦ