

**В. А. КАНДАЕВ, К. В. АВДЕЕВА, Н. Н. БАЖЕНОВ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»**

***ЧАСТЬ 1***

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

**ОМСК 2013**

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. Н. Баженов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»

*Часть 1*

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Утверждено редакционно-издательским советом университета

Омск 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
Лабораторная работа 1. Полупроводниковый диод .....	6
1.1. Краткие сведения из теории .....	6
1.2. Порядок выполнения работы .....	18
1.3. Содержание отчета .....	20
1.4. Контрольные вопросы .....	21
Лабораторная работа 2. Полевой транзистор .....	21
2.1. Краткие сведения из теории .....	21
2.2. Схема исследования полевого транзистора .....	30
2.3. Порядок выполнения работы .....	31
2.4. Содержание отчета .....	33
2.5. Контрольные вопросы .....	33
Библиографический список .....	33

УДК 621.37, 621.38, 621.39  
ББК 39.217  
К19

**Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электроника». Часть 1. Полупроводниковые приборы / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. Н. Баженов; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. 34 с.**

В методических указаниях представлены краткие теоретические сведения о полупроводниковых диодах и полевых транзисторах и методика их исследования. Приведены порядок выполнения лабораторных работ, содержание отчета и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов 2-го курса специализаций «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта», «Радиотехнические системы на железнодорожном транспорте» специальности «Системы обеспечения движения поездов» Института автоматики, телекоммуникаций и информационных технологий очной и заочной форм обучения.

Библиогр.: 5 назв. Табл. 6. Рис. 15.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент Ю. М. Елизарова;  
канд. техн. наук, доцент С. Н. Чижма.

## ВВЕДЕНИЕ

Выпрямительные свойства контактов между металлами и некоторыми сернистыми соединениями были обнаружены в 1874 г., а в 1895 г. А. С. Поповым при изобретении радио был применен порошковый когерер, в котором использовались нелинейные свойства зернистых систем. В 1922 г. О. В. Лосев использовал отрицательное дифференциальное сопротивление, возникающее при определенных условиях на точечных контактах металла с полупроводником, для генерации высокочастотных электрических колебаний. Кроме того, им было обнаружено свечение кристаллов карбида кремния при прохождении тока через точечные контакты.

С 1948 г., т. е. со времени создания американскими учеными Дж. Бардиным, В. Браттейном и В. Шокли точечного транзистора, начался новый этап развития полупроводниковой электроники. В 50-х гг. прошлого столетия были разработаны различные типы биполярных транзисторов, тиристоров, мощных выпрямительных диодов, фотодиодов, фототранзисторов, кремниевых фотоэлементов – солнечных батарей, туннельных диодов и других полупроводниковых приборов, которые в настоящее время находят широкое применение в электронных устройствах.

Электроника – базовая дисциплина для специалистов по автоматике, телемеханике и связи на железнодорожном транспорте. Широкое внедрение электроники требует от современного специалиста умения применять теоретические знания для решения практических задач, стоящих перед железнодорожным транспортом.

В ходе выполнения лабораторных работ студенты должны изучить физические основы работы полупроводникового диода и полевого транзистора и приобрести навыки построения их характеристик. К выполнению следующей лабораторной работы студент допускается после сдачи отчета по предыдущей (оформленного по требованиям стандартов предприятия).

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

Цель работы: ознакомиться с физическими основами работы полупроводникового диода, исследовать его вольт-амперную характеристику.

### 1.1. Краткие сведения из теории

Работа полупроводниковых диодов основана на явлениях, происходящих при контакте областей, имеющих различные типы проводимости – электронную и дырочную. Такие полупроводники имеют различную концентрацию электронов и дырок, из которых одни являются основными носителями с большой концентрацией, а другие – неосновными. Проводимость легированных полупроводников называется примесной.

Структура p-n-перехода и его зонная диаграмма приведены на рис. 1.1.

При соединении n- и p-областей полупроводника образуется разность концентраций основных носителей, под действием сил которых начнется их движение (диффузия) через границу, создадутся большие потоки электронов из n-области и дырок из p-области. Электроны оставляют в n-области некомпенсированные положительные ионы доноров, а в p-области эти электроны встречают приграничные акцепторы, образуя слой отрицательных ионов примеси. Заряд положительных ионов-доноров равен заряду отрицательных ионов-акцепторов, а ширина заряженного слоя в n-области (базе) должна быть больше, чем в p-области. Между разноименными зарядами возникает электрическое поле напряженностью  $E_0$ , тормозящее потоки основных носителей, т. е. создается барьер для этих носителей.

Неосновные носители (электроны в p-области, дырки в n-области) отличаются от основных концентрацией и знаком, поэтому поле  $E_0$ , тормозящее основные носители, ускоряет неосновные, которые под действием сил этого поля дрейфуют через границу (электроны из p-области – в n-область, а дырки – из n-области – в p-область). Значение дрейфовых токов (дырочного и электронного) определяется концентрацией неосновных носителей, которая зависит от исходного материала полупроводника и концентрации примесей в нем. Носители выбрасываются полем напряженностью  $E_0$  в «свои» области: дырки – в p-область,

а электроны – в n-область, поэтому область между штриховыми линиями (см. рис. 1.1) является обедненным носителями заряда слоем в полупроводниковой структуре. Это и есть собственно p-n-переход.

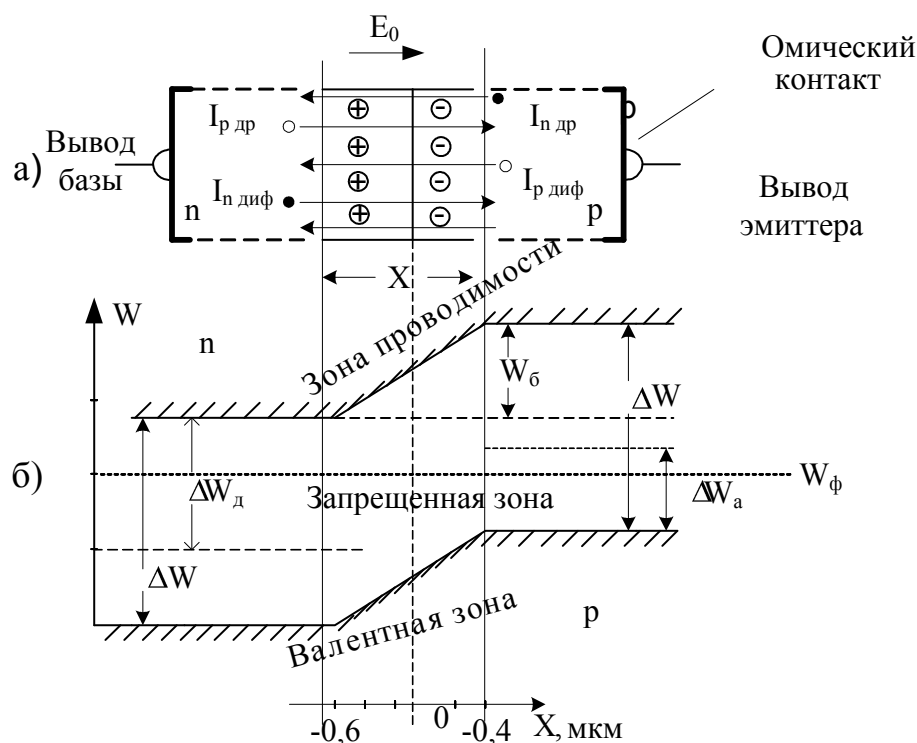


Рис. 1.1. Несмещенный p-n-переход:

а – структура p-n-перехода; б – зонная диаграмма p-n-перехода;  $\oplus$ ,  $\ominus$  – положительный и отрицательный ионы атомов донорной примеси;  $\bullet$  – электрон;  $\circ$  – дырка (валентный электрон);  $X$  – ширина p-n-перехода, мкм;  $I_{n\text{ др}}$  – дрейфовый электронный ток (ток проводимости, ток неосновных носителей);  $I_{p\text{ др}}$  – дрейфовый дырочный ток (ток неосновных носителей);  $I_{p\text{ диф}}$  – диффузионный дырочный ток (ток основных носителей);  $I_{n\text{ диф}}$  – диффузионный электронный ток (ток основных носителей);  $E_0$  – напряженность электрического поля в p-n-переходе;  $\Delta W$  – ширина запрещенной зоны атомов основного вещества, эВ;  $\Delta W_a$  – ширина запрещенной зоны атомов акцепторной примеси, эВ;  $\Delta W_d$  – ширина запрещенной зоны атомов донорной примеси, эВ;  $W_6$  – энергетический барьер, эВ;  $W_\phi$  – уровень Ферми несмещенного p-n-перехода ( $U = 0$ )

В отсутствие внешних источников ЭДС в кристалле наступает и поддерживается динамическое равновесие. Токи одноименных носителей взаимно уравниваются и в сумме равны нулю:

$$\begin{cases} I_{p\text{ диф}} = I_{p\text{ др}}; \\ I_{n\text{ диф}} = I_{n\text{ др}}. \end{cases} \quad (1.1)$$

Так как диффузионные и дрейфовые токи противоположно направлены, то результирующий ток через несмещенный р-п-переход равен нулю. При образовании р-п-перехода и установлении равновесия все энергетические уровни и зоны энергетической диаграммы р-п-перехода искривляются на величину контактной разности потенциалов, т. е. на высоту барьера  $\phi_0 = \frac{E_0}{X}$ , что приводит к возникновению энергетического барьера  $W_\phi = e \phi_0$ .

Толщина р-п-перехода  $X$  составляет 0,1 – 10 мкм. У кремниевого р-п-перехода  $X$  при прочих одинаковых условиях больше, чем у германиевого. С увеличением концентрации примесей и при повышении температуры ширина р-п-перехода уменьшается.

При подаче прямого смещения  $U_{пр}$  на р-п-переход высота барьера уменьшается на величину  $eU_{пр}$ .

Источник питания должен быть подключен «плюсом» к р-области, а «минусом» – к п-области. При прямом смещении уменьшаются высота барьера и ширина запирающего слоя. Границы обедненного слоя сближаются, смещаются относительно исходного состояния. Поскольку для основных носителей барьер снижен, возрастают диффузионные токи дырок и электронов через р-п-переход. Большая концентрация основных носителей обуславливает большой прямой ток, сопротивление перехода в прямом направлении уменьшается, переход будет открыт.

Зонная диаграмма р-п-перехода при прямом его смещении приведена на рис. 1.2. Диффузионные токи (токи инжекции) резко возрастают, дрейфовые (токи экстракции) остаются практически неизменными. Для смещенного р-п-перехода характерным является режим инжекции основных носителей в соседние области.

Уравнение вольт-амперной характеристики р-п-перехода имеет вид:

$$I = I_0 \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (1.2)$$

где  $I_0 = j_0 S_{p-n}$  – тепловой ток р-п-перехода (ток неосновных носителей);

$j_0$  – плотность теплового тока;

$S_{p-n}$  – площадь р-п-перехода;

$\exp$  – экспонента;



$e$  – заряд электрона;

$U$  – приложенное внешнее напряжение;

$k$  – постоянная Больцмана,  $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/К ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – температура, К.

На ток  $I_0$  существенно влияет температура полупроводника.

При  $U_{пр} \geq (75 - 100)$  мВ выражение (1.2) упрощается:

$$I_{пр} = I_0 \exp\left(\frac{eU_{пр}}{kT}\right). \quad (1.3)$$

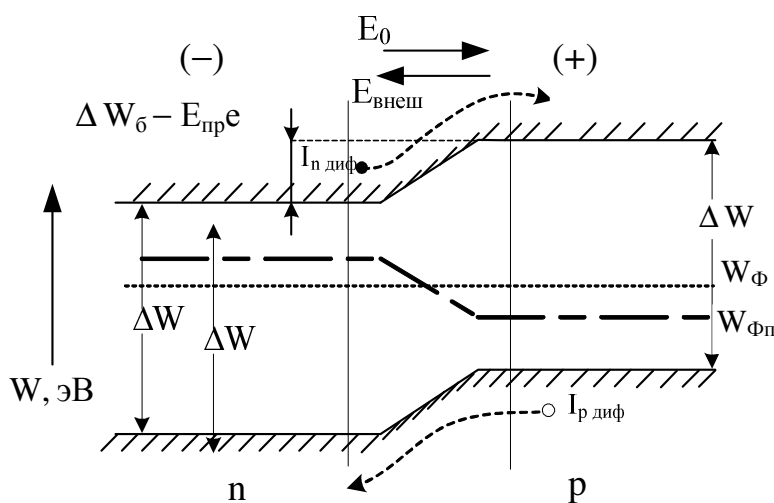


Рис. 1.2. Зонная диаграмма прямосмещенного р-п-перехода:  $W_{Фп}$  – уровень Ферми прямосмещенного р-п-перехода ( $U_{пр} > 0$ )

При подаче обратного смещения на р-п-переход внешнее напряжение  $U_{обр}$  (рис. 1.3) прикладывается к выводам диода так, что его поле суммируется с полем барьера («+» – к n-области, «-» – к p-области). Высота энергетического барьера при обратном смещении увеличивается на величину  $e U_{обр}$ . При этом резко

возрастает ширина р-п-перехода. Диффузионные токи снижаются до нуля. Обратный ток перехода  $I_{обр}$  составят неосновные носители, по-прежнему экстрагируемые из областей р и n и ускоряемые полем перехода. Концентрация неосновных носителей много ниже, чем основных. Ток  $I_{обр}$  незначительный, он обусловлен дрейфом неосновных носителей. Сопротивление перехода постоянному и переменному току велико. Переход закрыт и находится в режиме экстракции неосновных носителей. Зонная диаграмма для обратносмещенного р-п-перехода приведена на рис. 1.3.

$$\text{При } U_{\text{обр}} = (3 - 4) \frac{kT}{e} \quad I_{\text{обр}} = -I_0 \exp\left(\frac{-e|U_{\text{обр}}|}{kT}\right) \ll 1. \quad (1.4)$$

Выражения (1.4) легли в основу теоретической вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода. Ток  $I_0$  – важнейший параметр p-n-перехода – ток экстрагируемых полем перехода и дрейфующих через переход неосновных носителей, концентрация которых зависит от материала (ширины запрещенной зоны), степени легирования (удельного сопротивления полупроводника и температуры), поэтому ток  $I_0$  носит название обратного дрейфового, экстракционного, теплового и практически не зависит от  $U_{\text{обр}}$ .

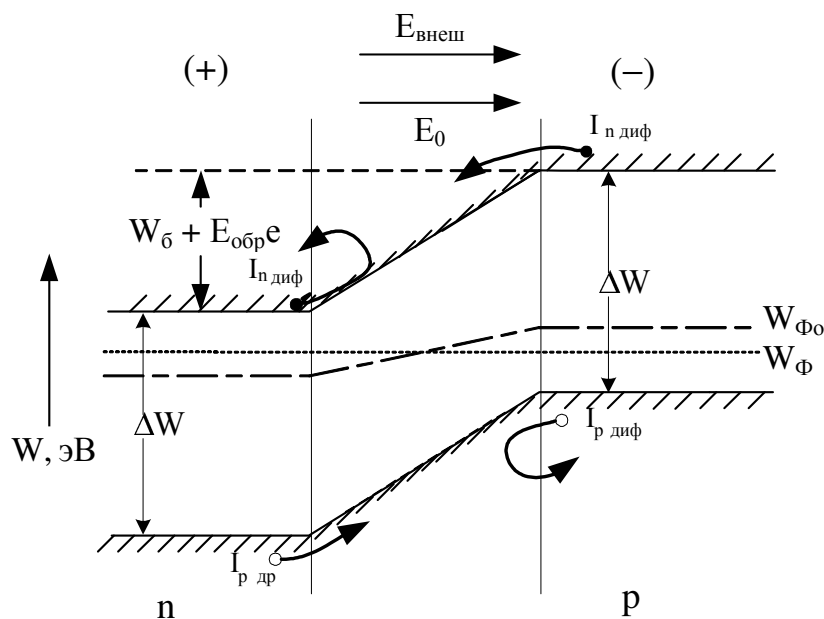


Рис. 1.3. Зонная диаграмма обратносмещенного p-n-перехода:  
 $W_{\Phi_0}$  – уровень Ферми обратносмещенного p-n-перехода ( $U_{\text{обр}} \ll 0$ )

Прямое напряжение для любого типа перехода не может быть больше высоты потенциального барьера  $\phi_0$ , поэтому масштаб по оси напряжения для всех видов переходов на прямой ветви ВАХ один и тот же (доли вольта).

Значение тока зависит от площади p-n-перехода и изменяется от сотен ампер (мощные диоды) до сотен миллиампер. Обратное напряжение  $U_{\text{обр}}$  может составлять сотни – тысячи вольт в зависимости от степени легирования полупроводника примесями, а обратный ток – единицы микроампер. При большом обратном смещении происходит пробой p-n-перехода, т. е. резкое возрастание обратного тока.

ВАХ p-n-перехода и ее зависимость от температуры, степени легирования материала полупроводника приведены на рис. 1.4, из которого, в частности, видно, что при  $T = 300 \text{ K}$  и одинаковой концентрации примесей плотность обратного тока кремниевого диода  $j_0 \approx 10^{-4} \text{ мкА/см}^2$  и на семь порядков ниже, чем у германиевого.

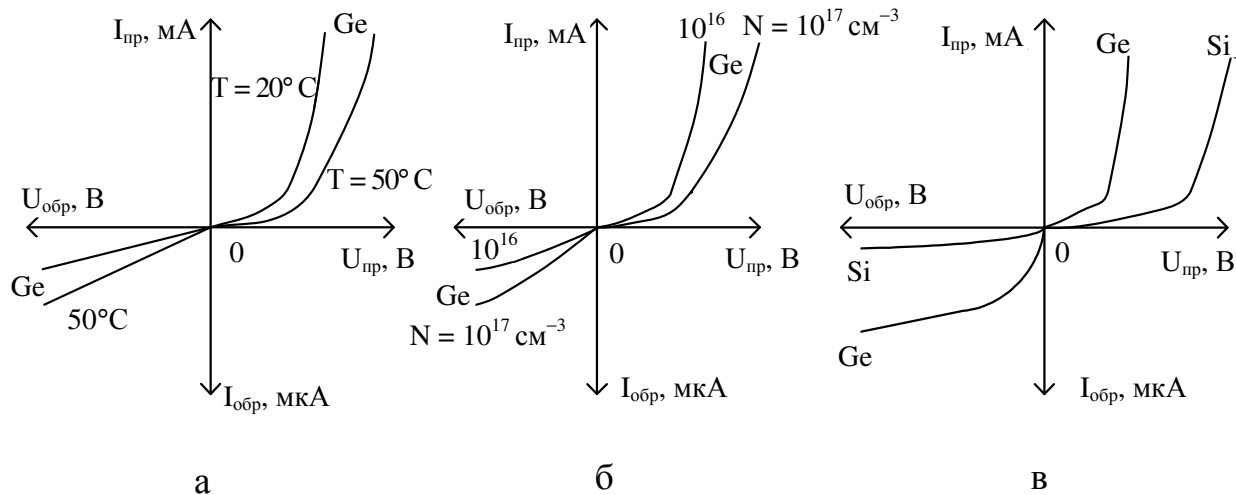


Рис. 1.4. ВАХ p-n-перехода в совмещенной системе координат при изменении:  
а – температуры; б – степени легирования;  
в – полупроводникового материала

Таким образом, можно заключить, что p-n-переход действительно характеризуется свойствами односторонней проводимости, которые удобно оценивать, сопоставляя электрические сопротивления p-n-перехода при его прямом и обратном включении. Различают дифференциальное (сопротивление переменному току) сопротивление p-n-перехода

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.5)$$

и сопротивление постоянному току

$$r_0 = \frac{U}{I} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right). \quad (1.6)$$

Дифференциальное сопротивление p-n-перехода определяется по формуле:

при прямом включении –

$$r_{\text{диф пр}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \frac{kT}{eI_{\text{пр}}} \quad (1.7)$$

(составляет 1 – 500 Ом);

при обратном –

$$r_{\text{диф обр}} = \frac{\Delta U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}} \quad (1.8)$$

(составляет  $10^5 - 10^8$  Ом).

Параметры выпрямительного диода:

$U_{\text{пр}}$  – постоянное прямое напряжение диода при заданном постоянном прямом токе  $I_{\text{пр}}$ ;

$I_{\text{обр}}$  – постоянный обратный ток, протекающий через диод в обратном направлении, при заданном обратном напряжении  $U_{\text{обр}}$ ;

$U_{\text{обр max}}$  – максимально допустимое обратное напряжение;

$I_{\text{пр max}}$  – максимально допустимый прямой ток, определяемый условиями нагрева прибора, этот ток ограничивается максимальной мощностью  $P_{\text{max}}$ ;

$I_{\text{пр имп}}$  – максимально допустимый импульсный прямой ток диода. При кратковременном импульсном воздействии тока значение его может быть увеличено при заданной максимальной длительности импульса;

$t_{\text{уст}}$  и  $t_{\text{вост}}$  – время переключения из закрытого состояния в открытое и наоборот;

$f_{\text{гр}}$  – предельная рабочая частота диода;

$P_{\text{max}}$  – максимально допустимая постоянная или средняя за период мощность, рассеиваемая диодом, при которой он может длительно работать, не изменяя своих параметров. Эта мощность рассеивается диодом при протекании тока в прямом и обратном направлениях, складывается из суммы произведений тока и напряжения при прямом и обратном смещениях перехода. Для диодов малой мощности без теплоотвода

$$P_{\text{max}} = \frac{T_{\text{п max}} - T_{\text{окр}}}{R_{\text{п-с}}}, \quad (1.9)$$

где  $T_{\text{п max}}$  – максимальная температура перехода. В случае превышения этой температуры р- и n-области полупроводника из примесных превращаются в

собственные. Для германиевых диодов  $T_{п\ max}$  равна 80 – 110 °С, для кремниевых – 150 – 220 °С;

$T_{окр}$  – температура окружающей среды (воздуха), измеренная вблизи диода при условии естественной конвекции;

$R_{п-с}$  – тепловое сопротивление «переход – окружающая среда», °С/Вт,

$$R_{п-с} = \frac{T_{п} - T_{окр}}{P_{п}}, \quad (1.10)$$

где  $P_{п}$  – выделяемая на переходе средняя за период или постоянная мощность, Вт;

$T_{п}$  – температура перехода.

Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения в схемах. На их вольт-амперной характеристике при обратном смещении имеется участок с высокой крутизной, где напряжение на диоде слабо зависит от тока, протекающего через диод.

Стабистором называют полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом смещении слабо зависит от тока в его заданном диапазоне измерения.

Стабисторы предназначены для стабилизации незначительных значений напряжения (постоянного, импульсного), а также используются как термокомпенсирующие элементы для поддержания заданного уровня напряжения в схеме при изменении температуры окружающей среды.

От обычных выпрямительных диодов стабилитроны отличаются повышенной концентрацией носителей заряда  $N$ , достигающей  $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Благодаря высокой концентрации носителей напряженность электрического поля в р-п-переходе возрастает настолько, что при сравнительно небольшом внешнем обратном напряжении, приложенном к кремниевому стабилитрону, возникает электрический пробой перехода, ток резко увеличивается при почти неизменном напряжении.

Пробоем называют резкое изменение режима работы перехода, находящегося под обратным напряжением. Характерной особенностью этого изменения является резкое уменьшение дифференциального сопротивления перехода. Существует три вида пробоя р-п-перехода: туннельный, лавинный, тепловой.

Если расстояние между валентной зоной и зоной проводимости (ширина, толщина барьера) незначительно, то возникает туннельный эффект – явление прохождения электронов сквозь потенциальный барьер. Туннельный пробой имеет место в р-п-переходах с базой с низким значением удельного сопротивления.

Лавинный пробой возникает, если при движении до очередного соударения с атомом дырка (или электрон) приобретает энергию, достаточную для ионизации атома. Расстояние, которое проходит носитель заряда до соударения, называют длиной свободного пробега. Лавинный пробой имеет место в переходах с высокоомной базой (имеющей большое удельное сопротивление).

Увеличение тока при тепловом пробое объясняется разогревом полупроводника в области р-п-перехода и соответствующим увеличением удельной проводимости. После электрического пробоя р-п-переход не изменяет своих свойств. После теплового пробоя, если полупроводник успел нагреться достаточно сильно, свойства перехода необратимо изменяются (соответствующий полупроводниковый прибор выходит из строя).

В настоящее время на основе кремния разработано и выпускается большое количество стабилитронов различных типов с напряжением стабилизации  $U_{ст}$ , равным 3,5 – 400 В, мощностью – от 250 мВт до 500 Вт.

ВАХ полупроводникового стабилитрона приведена на рис. 1.5. Интервал рабочего тока стабилитрона выбирают от  $I_{ст\ min}$ , определяемого необходимой устойчивостью работы, до  $I_{ст\ max}$ , определяемого максимально допустимой рассеиваемой мощностью, при которой гарантируется надежность прибора при его длительной работе. Параметрами стабилитронов являются следующие (см. рис. 1.5):

$U_{ст\ ном}$  – номинальное напряжение стабилизации;

$I_{ст\ ном}$  – номинальный ток стабилизации, т. е. значение тока, при котором определяются параметры стабилитрона;

$I_{ст\ min}$  – минимальный ток стабилизации;

$I_{ст\ max}$  – максимальный допустимый ток стабилизации, десятки миллиампер – единицы ампер;

$r_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона при заданном токе стабилизации; чем меньше  $r_{диф}$ , тем выше качество стабилизации;

$R_{ст} = \frac{U_{ст}}{I_{ст}}$  – статическое сопротивление (сопротивление постоянному

току) при заданном токе стабилизации (см. рис. 1.5, точка Б);

$\alpha_{ст}$  – температурный коэффициент стабилизации,  $\%/^{\circ}\text{C}$ , характеризующий влияние температуры на  $U_{ст}$ ,  $\alpha_{ст} = (\Delta U_{ст} / U_{ст} / \Delta T) \cdot 100$ ,

где  $\Delta U_{ст}$  – температурное изменение значения напряжения стабилизации;

$\Delta T$  – разность значений температуры окружающей среды или корпуса прибора, которой соответствует изменение  $\Delta U_{ст}$ .

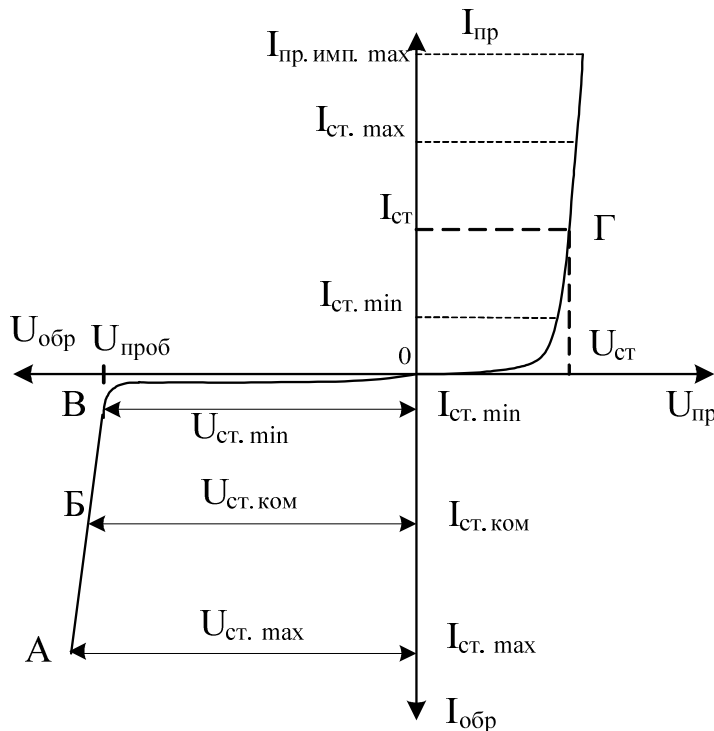


Рис. 1.5. ВАХ кремниевого стабилитрона

Для увеличения  $U_{ст}$  иногда применяют последовательное соединение нескольких стабилитронов, смонтированных в одном корпусе или сформированных в одном кристалле.

Наиболее часто стабилитроны применяют в схемах стабилизации напряжения. Стабилизатором напряжения называют устройство, преобразующее входное напряжение в такое выходное, которое при изменении входного напряжения и тока нагрузки в определенных пределах сохраняется постоянным. Простейшая схема параметрического стабилизатора постоянного напряжения приведена на рис. 1.6, этот стабилизатор представляет собой делитель напряжения из резистора  $R_{огр}$  и стабилитрона VD. Стабилитрон VD включен в обрат-

К параметрам стабилитрона относится и емкость  $C$ , измеряемая между его выводами при заданном обратном напряжении, которая составляет сотни пикофарад.

В качестве элементов для стабилизации напряжения амплитудой менее 3 В в каналообразующей аппаратуре железнодорожного транспорта используют кремниевые стабилитроны.

ном направлении параллельно нагрузке  $R_H$ . Для анализа работы схемы построена линия нагрузки на ВАХ стабилитрона (см. рис. 1.6).

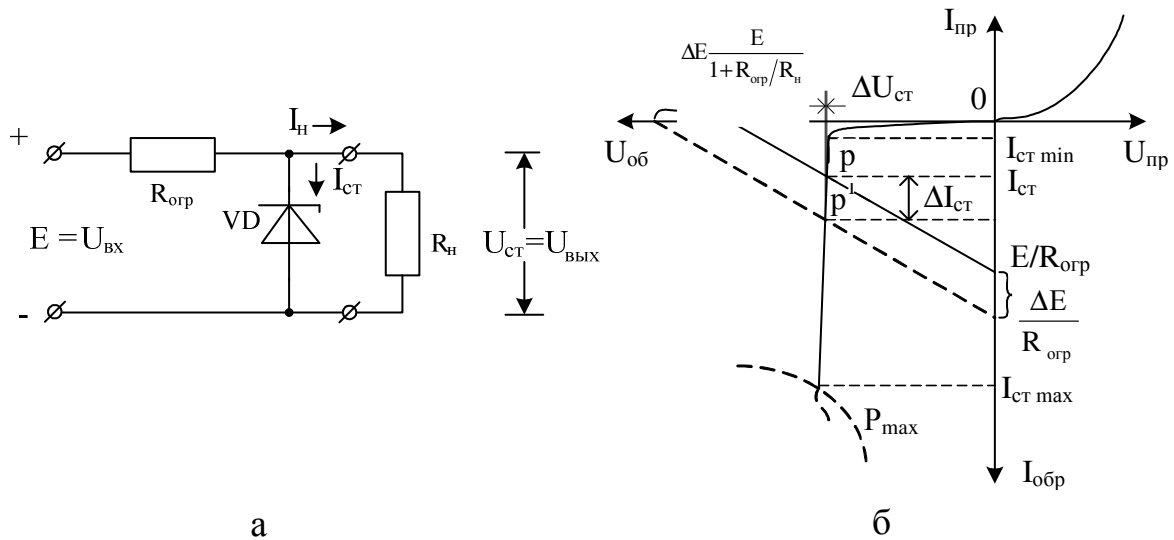


Рис. 1.6. Схема параметрического стабилизатора напряжения:  
а – электрическая схема; б – построения на ВАХ, поясняющие действие  
схемы стабилизации

Напряжение источника питания

$$E = (I_{ст} + I_H) R_{огр} + U_{ст}, \quad (1.11)$$

в режиме стабилизации

$$\begin{cases} I_H = \frac{U_{ст}}{R_H}; \\ I_{ст} = \frac{U_{ст}}{r_{диф}}. \end{cases} \quad (1.12)$$

Тогда

$$E = U_{ст} + R_{огр} \left( \frac{U_{ст}}{r_{диф}} + \frac{U_{ст}}{R_H} \right) = I_{ст} R_{огр} + U_{ст} \left( 1 + \frac{R_{огр}}{R_H} \right). \quad (1.13)$$

Уравнение (1.13) определяет нагрузочную прямую стабилитрона: при  $I_{ст} = 0$   $U_{ст} = E / (1 + R_{огр} / R_H)$ ; при  $U_{ст} = 0$   $I = E / R_{огр}$ .



Координаты рабочей точки пересечения нагрузочной прямой с ВАХ стабилизатора (рис. 1.6, б, точка Р) определяют ток и напряжение прибора при заданных значениях ЭДС, источника питания  $E$  и сопротивлений  $R_{огр}$  и  $R_n$ . При изменении ЭДС  $E$  нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе. Пока рабочая точка  $P$  располагается в пределах рабочего участка характеристики АВ, напряжение на нагрузке ( $U_{ст} = U_n$ ) стабилизировано. Кривая максимально допустимой рассеиваемой мощности  $P_{max}$  в точке пересечения с ВАХ стабилизатора определяет максимальный ток через стабилизатор  $I_{ст max}$ .

Передаточная характеристика (рис. 1.7) содержит начальную область (от 0 до  $U_{вх min}$ ), в которой зависимость между  $U_{вых}$  и  $U_{вх}$  близка к линейной, и рабочую область (от  $U_{вх min}$  до  $U_{вх max}$ ), где зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  нелинейна, но отношение  $\frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}$  постоянно. Нагрузочная характеристика (см. рис. 1.7) показывает, что стабилизация выходного напряжения сохраняется и при изменении  $R_n$ , а следовательно, и тока нагрузки  $I_n$  в определенных пределах. По нагрузочной характеристике определяется коэффициент стабильности напряжения стабилизатора по току нагрузки  $K_{ст i}$ .

Рабочий участок на передаточной характеристике – отрезок АВ, в общем случае при равной вероятности как увеличения, так и уменьшения  $U_{вх}$  рабочая точка  $P$  располагается в середине рабочего участка.

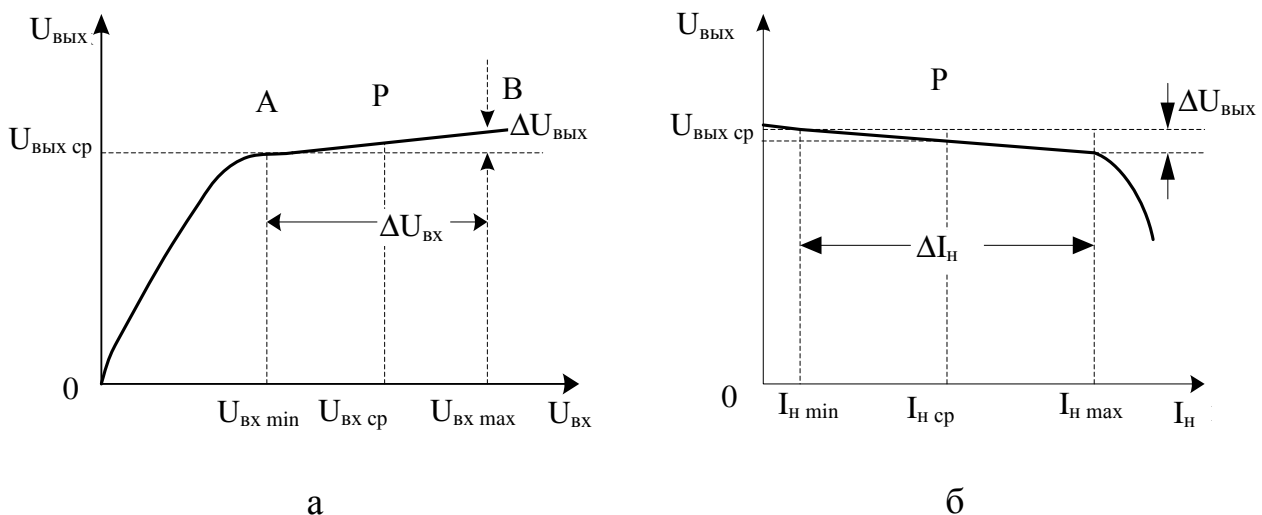


Рис. 1.7. Характеристики стабилизатора напряжения:  
а – передаточная  $U_{вых} = f(U_{вх})$ ; б – нагрузочная  $U_{вых} = f(I_n)$

Коэффициент стабильности по напряжению может быть определен через параметры стабилитрона и схемы рис. 1.7:

$$K_{\text{ст}} = \frac{R_{\text{ст}}(r_{\text{диф}} + R_{\text{огр}})}{r_{\text{диф}}(R_{\text{ст}} + R_{\text{огр}})} \quad (1.14)$$

или

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх ср}}} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых ср}}} \quad (1.15)$$

Коэффициент  $K_{\text{ст}}$  можно увеличить, выбирая стабилитрон с малым  $r_{\text{диф}}$  и увеличивая  $R_{\text{огр}}$  схемы.

## 1.2. Порядок выполнения работы

1) Изучите теорию образования р-п-переходов, их свойства и использование в выпрямительных диодах.

2) Запишите паспортные данные исследуемых диодов, заданных преподавателем. При выполнении лабораторной работы необходимо не превышать значения величин, указанные в паспортных данных, чтобы не вывести из строя исследуемый электронный прибор.

3) Соберите схему для снятия прямой ветви ВАХ выпрямительного диода (рис. 1.8, а).

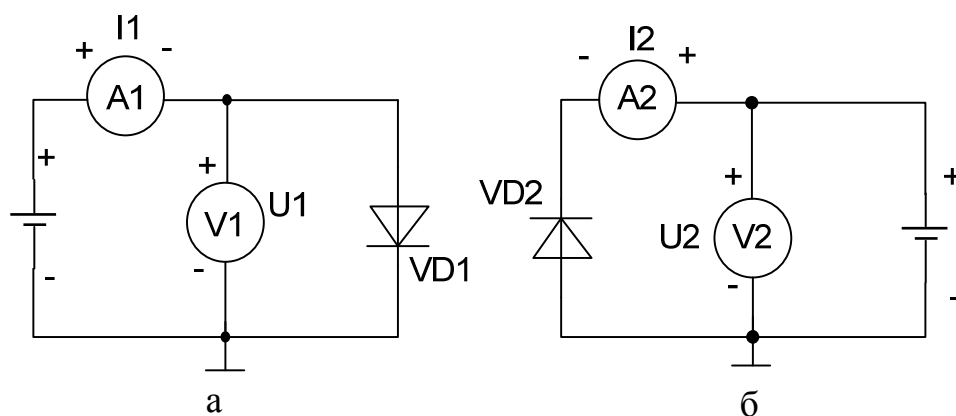


Рис. 1.8. Электрические схемы для снятия ВАХ полупроводникового диода:  
а – прямая ветвь; б – обратная

Снимите прямую ветвь ВАХ, задавая значения прямого тока, не превышающие предельно допустимого. Полученные данные занесите в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода

Параметр		Значение параметра							
Прямой ток диода $I_{пр}$ , мА		0	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	max
Прямое падение напряжения на диодах $U_{пр}$ , В	диод 1								
	диод 2								

4) Соберите схему для снятия обратной ветви ВАХ германиевого и кремниевых диодов (рис. 1.8, б) и снимите обратную ветвь ВАХ, полученные данные занесите в табл. 1.2.

Обратную ветвь ВАХ диода снимают, задавая напряжение  $U_{обр}$ , не допуская теплового пробоя диода, т. е. не превышая допустимого обратного напряжения  $U_{обр\ max}$  (по паспортным данным).

Таблица 1.2

Обратная ветвь ВАХ полупроводникового диода

Параметр		Значение параметра							
Обратное напряжение диода $U_{обр}$ , В		0	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	max
Обратный ток $I_{обр}$ , мА	диод 1								
	диод 2								

5) Постройте график вольт-амперной характеристики выпрямительного диода (прямую и обратную ветви). По графику ВАХ в нескольких точках (не менее трех) определите дифференциальное сопротивление диодов  $r_{диф}$  и сопротивление диодов постоянному току при прямом и обратном его включениях.

Постройте графики зависимостей:  $r_{диф\ пр} = f(I_{пр})$ ;  $r_{0\ пр} = f(I_{пр})$ ;  $r_{0\ обр} = f(U_{обр})$ .

6) Соберите схему для снятия ВАХ стабилитрона (прямой ветви ВАХ стабилитрона  $U_{пр} = f(I_{пр})$ ). Проведите измерения, результаты измерений занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

## Прямая ветвь ВАХ стабилитрона

Параметр	Значение параметра							
$I_{пр}$ , мА	0	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	max
$U_{пр}$ , В								

7) Соберите схему для снятия обратной ветви ВАХ  $U_{обр} = f(I_{обр})$  стабилитрона. Данные измерений занесите в табл. 1.4.

Таблица 1.4

## Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

Параметр	Значение параметра							
$U_{обр}$ , В	0	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	max
$I_{обр}$ , мА								

8) Постройте в совмещенной системе координат ВАХ стабилитрона (прямую и обратную ветви). Выполните необходимые графические построения и определите параметры стабилитрона  $r_{диф}$  и  $R_{ст}$ , сравните их с паспортными данными. Найдите коэффициент стабильности по напряжению для исследуемого стабилитрона  $K_{ст}$  при заданном  $R_{огр}$ .

### 1.3. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен в соответствии с требованиями СТП-ОмГУПС-1.2-2005 и должен содержать следующее:

- 1) цель работы;
- 2) паспортные данные и схему расположения выводов исследуемых диодов;
- 3) схемы исследования с указанием диапазонов измерения приборов;
- 4) таблицы и графики ВАХ выпрямительного диода и стабилитрона (их прямые и обратные ветви изображаются на одном графике);
- 5) графики зависимостей  $r_{диф пр} = f(I_{пр})$ ;  $r_{0 пр} = f(I_{пр})$ ;  $r_{0 обр} = f(U_{обр})$  для выпрямительного диода;
- 6) краткие выводы, в которых дается сравнительная оценка выпрямительного диода и стабилитрона.

## 1.4. Контрольные вопросы

- 1) Виды проводимости полупроводников. Токи в полупроводниках.
- 2) Чем различаются зонные диаграммы собственного и примесных полупроводников?
- 3) Какова природа диффузионного и дрейфового токов в полупроводнике?
- 4) Что такое электронно-дырочный переход?
- 5) Как высота и ширина потенциального барьера зависят от величины и полярности приложенного напряжения, от концентрации примесей?
- 6) Что такое пробой в полупроводниковом диоде?
- 7) Перечислите основные параметры стабилитрона и укажите их физический смысл.
- 8) Укажите различия ВАХ диода и стабилитрона.
- 9) Области практического применения полупроводниковых диодов. По каким критериям выбирается полупроводниковый диод?

### *Лабораторная работа 2*

## ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

Цель работы: ознакомиться с принципом действия, статическими характеристиками и параметрами полевых транзисторов, изучить разновидности и применение полевых транзисторов.

### 2.1. Краткие сведения из теории

В полевых транзисторах (ПТ) используется движение носителей заряда только одного знака (основные носители). Электрическое поле, возникающее при подаче напряжения  $U_{зи}$ , изменяет проводимость канала и, следовательно, ток через канал. Это управляющее электрическое поле направлено перпендикулярно движению носителей в канале, которые движутся от истока (И) к стоку (С) под действием продольного электрического поля (вдоль канала), создаваемого напряжением  $U_{си}$ .

В большинстве структур ПТ И и С – сильнолегированные области, а область канала – слаболегированный примесями тонкий слой полупроводника,

расположенный непосредственно у поверхности полупроводникового кристалла. Таким образом, носители движутся вдоль поверхности.

Различают три типа ПТ:

ПТ с изолированным затвором (З). В них между металлическим затвором и каналом расположен слой диэлектрика так, что образуется структура «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП) или «металл – окисел – полупроводник» (МОП). Существуют МОП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом. Поперечное электрическое поле в МОП-транзисторах, проникая через тонкий слой диэлектрика, управляет концентрацией носителей заряда в канале;

ПТ с управляющим переходом «металл – полупроводник» (ПТ Шоттки). В них металлический затвор образует с приповерхностным слоем канала выпрямляющий контакт, на него в рабочем режиме подается обратное напряжение, которое изменяет толщину обедненного слоя контакта и тем самым управляет толщиной проводящей части канала, количеством носителей в канале и током через него;

ПТ с управляющим р-п-переходом. В них в качестве З используется область противоположного типа проводимости по отношению к каналу, канал с затвором образует р-п-переход, который в рабочем режиме смещен в обратном направлении. Напряжение  $U_{зи}$  изменяет толщину обедненного слоя управляющего р-п-перехода и тем самым – толщину проводящей части канала, число носителей заряда в нем и, следовательно, ток в канале.

ПТ различают также по типу проводимости канала: транзисторы с каналом р- или n-типа. У ПТ очень незначителен ток в цепи З, так как З либо изолирован, либо образует с каналом обратносмещенный управляющий р-п-переход. Обычно ПТ характеризуется очень высоким входным сопротивлением  $R_{вх}$  на постоянном токе (более  $10^8 - 10^{10}$  Ом). Для сравнения: у биполярных транзисторов (БТ) во входной базовой цепи при прямом смещении эмиттерного р-п-перехода протекает значительный ток и сопротивление  $R_{вх}$  БТ весьма незначительно (десятки – сотни Ом в схемах с общим эмиттером (ОЭ) и общей базой (ОБ)).

ПТ можно рассматривать как прибор, управляемый напряжением (электрическим полем), а БТ – прибор, управляемый током.

Благодаря внедрению микроэлектроники широко используются МОП-транзисторы с изолированным затвором в интегральных схемах разной степени

интеграции. Мощные МОП-транзисторы применяются в переключающих схемах. Транзисторы с управляющим переходом «металл – полупроводник» на арсениде галлия используются при создании сверхскоростных цифровых интегральных микросхем (ИМС) и в СВЧ-устройствах. ПТ с управляющим р-п-переходом на кремнии используются в основном как низкочастотные приборы. По принципу действия они практически не отличаются от ПТ с переходом «металл – полупроводник».

МОП-транзистор с изолированным затвором имеет один или несколько  $\bar{3}$ , электрически изолированных от проводящего канала, расположенного в поверхностном слое полупроводника. Принцип работы ПТ этого типа основан на изменении концентрации носителей в проводящем слое полупроводника под действием внешнего электрического поля. Различают МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами, а режимы их работы – с обеднением и обогащением канала носителями заряда. Наиболее распространены (особенно в микроэлектронике) ПТ с индуцированным каналом.

Основой ПТ с индуцированным каналом служит пластина слаболегированного p-Si, который называется подложкой (рис. 2.1), в ней сформированы две сильнолегированные (концентрация доноров –  $10^{19}\text{см}^{-3}$ ) n-области (И и С), расположенные на близком расстоянии (5 – 10 мкм) друг от друга. Структура ПТ обратима. Алюминиевый  $\bar{3}$  изолирован от полупроводникового кристалла тонким слоем диэлектрика (чаще всего из двуокисла кремния  $\text{SiO}_2$ ) толщиной 0,05 – 0,1 мкм (см. рис. 2.1).

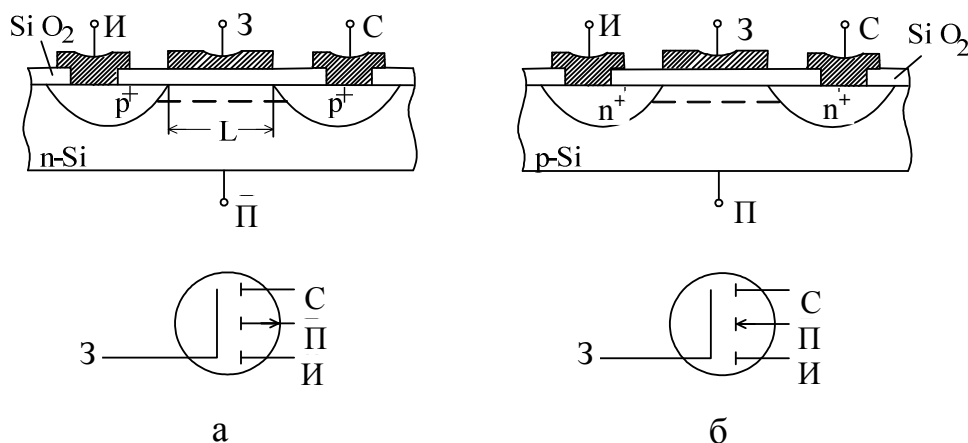


Рис. 2.1. Структура ПТ с индуцированным каналом:  
а – канал р-типа; б – канал n-типа

Рассмотрим физические явления в МДП-транзисторе с каналом n-типа при различных соотношениях потенциала  $\bar{3}$  и С.

Если напряжение каждого электрода равно нулю ( $U_{\text{СИ}} = U_{\text{ЗИ}} = 0$ ), то на границе между диэлектриком  $\text{SiO}_2$  и поверхностью полупроводника возникает двойной слой электрических зарядов, так как пленка  $\text{SiO}_2$  всегда содержит донорные примеси (натрий, калий, водород). Атомы примеси располагаются обычно на границе с полупроводником, они отдают ему свои электроны и образуют в диэлектрике положительный заряд ионов. На поверхности полупроводника концентрируются компенсирующие этот заряд электроны, однако плотность их невелика. Двойной слой электрических зарядов создает контактную разность потенциалов между металлом и полупроводником напряжением 0,3 – 0,4 В.

При  $U_{\text{ЗИ}}$ , равном нулю, и увеличении напряжения  $U_{\text{СИ}}$  ток между И и С ничтожно мал, так как переход «сток – подложка» включен в обратном направлении, а разность потенциалов на переходе «исток – подложка» равна нулю. Если подать на З напряжение  $U_{\text{ЗИ}} < 0$ , то поверхностный слой обогатится основными носителями подложки – дырками, ток в цепи «И – С» почти не изменится.

При подаче на З положительного смещения ( $U_{\text{ЗИ}} > 0$ ) дырки уходят из поверхностного слоя, в нем остается обедненная носителями область с зарядами ионов акцепторной примеси. Одновременно в поверхностный слой притягиваются неосновные носители подложки – электроны. Концентрация дырок  $p$  в поверхностном слое снижается, а электронов  $n$  растет. Соответственно изменяется и проводимость поверхностного слоя, по мере увеличения  $U_{\text{ЗИ}}$  она из дырочной при  $n = p$  становится собственной, а затем, когда  $n > p$ , – электронной, т. е. противоположной проводимости подложки. Таким образом, между И и С формируется соединяющий их  $n$ -канал толщиной в несколько тысячных долей микрона. Этот канал отделен от остального объема полупроводника слоем, обедненным подвижными носителями, где находятся лишь ионы акцепторов  $p$ -подложки (см. рис. 2.1), поэтому если в одной подложке сформировать несколько МДП-транзисторов, то взаимное влияние между каналами будет незначительным.

Канал, образующийся под действием внешнего электрического поля, называют индуцированным. Минимальное напряжение З, при котором возникает канал, называют пороговым напряжением  $U_{\text{ЗИ пор}}$ .

Если при  $U_{\text{ЗИ пор}} < U_{\text{ЗИ}}$  подать положительное напряжение на С, то в канале начнется дрейфовое перемещение электронов от И к С под действием продольного электрического поля и в цепи С потечет ток.



Токами МДП-транзистора можно управлять, изменяя напряжение на  $\bar{3}$ . При изготовлении ПТ со встроенным каналом проводящий канал формируют в виде тонкого слаболегированного n- или p-слоя, соединяющего области И и С с той же проводимостью (рис. 2.2). В таком транзисторе с каналом n-типа при отсутствии напряжения на  $\bar{3}$  и  $U_{СИ} > 0$  между С и И протекает ток, определяемый сопротивлением канала. Канал может обедняться или обогащаться электронами при изменении напряжения  $U_{\bar{3}И}$ , приложенного к  $\bar{3}$  относительно И. Когда отрицательное напряжение  $U_{\bar{3}И}$  увеличивается, электроны перемещаются из области канала в область p-подложки. Канал обедняется носителями, его сопротивление растет. При некотором отрицательном напряжении  $U_{\bar{3}И \text{ пор}}$  область канала изменяет свою электропроводность с электронной на дырочную, тогда  $I_C$  равен нулю. При положительном напряжении  $\bar{3}$  канал обогащается электронами и его проводимость возрастает.

Таким образом, МДП-транзистор может работать при положительном и отрицательном значениях напряжения  $\bar{3}$  в режимах как обеднения, так и обогащения. Все остальные процессы в ПТ со встроенным каналом аналогичны рассмотренным выше процессам в МДП-транзисторе с индуцированным каналом.

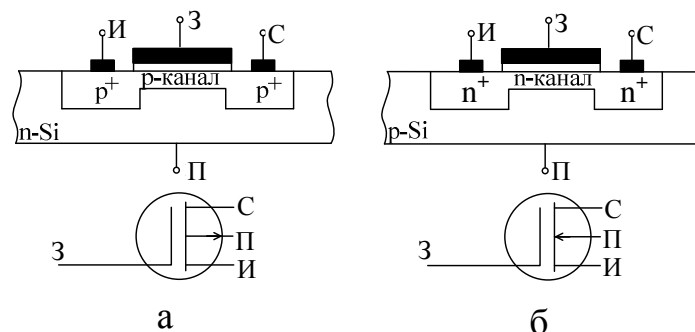


Рис. 2.2. Структура ПТ со встроенным каналом:  
а – канал p-типа; б – канал n-типа

Простейший транзистор с управляющим p-n-переходом представляет собой полупроводниковую структуру (обычно кремниевую) с одним p-n-переходом (рис. 2.3). Область между С и И имеет меньше примесей и соответственно меньшую концентрацию основных носителей по сравнению с областью  $\bar{3}$ . Р-n-переход несимметричен, его запирающий слой расположен в основном в области канала. Иногда в одном полупроводниковом кристалле формируют два ПТ с идентичными параметрами, их называют сдвоенными. Р-n-переход включают в обратном направлении относительно И. Между С и И действует раз-

ность потенциалов  $U_{СИ}$  от источника питания  $E_{СИ}$ , поэтому обратное напряжение и ширина р-п-перехода неодинаковы вдоль длины канала. В схеме с общим истоком (ОИ) они возрастают по направлению к С. Вблизи И напряжение на р-п-переходе  $|U_{р-п И}| = |U_{ЗИ}|$ , а вблизи С  $|U_{р-п С}| = |U_{ЗИ}| + |U_{СИ}|$ . Ширина запирающего слоя у С наибольшая, а сечение канала – наименьшее.

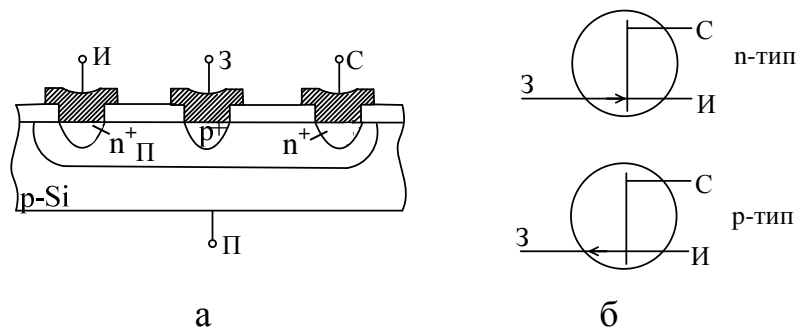


Рис. 2.3. Структура ПТ с управляющим р-п-переходом:  
а – структура ПТ; б – условное обозначение ПТ

В цепь З в схеме с ОИ включают источник управляющего входного сигнала, в цепь С – резистор нагрузки. Действие прибора обусловлено модуляцией ширины канала при изменении  $U_{обр}$ , приложенного к переходу. При увеличении  $U_{обр}$  ширина запирающего слоя р-п-перехода возрастает. Вследствие этого уменьшается поперечное сечение канала, растет его сопротивление и снижается ток в цепи «И – С». Таким образом, током С можно управлять, изменяя напряжение  $U_{ЗИ}$  и  $U_{СИ}$ . Обратный ток р-п-перехода мал и слабо зависит от значения приложенного напряжения. ПТ управляется напряжением. Входное сопротивление ПТ этого типа также велико ( $10^6 - 10^8$  Ом), поэтому ПТ широко применяют в схемах с источниками сигналов, имеющими высокое сопротивление. Выходное сопротивление в ПТ зависит от сопротивления канала и достигает  $10^4 - 10^6$  Ом. Таким образом, ПТ в отличие от БТ имеет близкие по значению сопротивления входа и выхода, что облегчает согласование каскадов на ПТ между собой.

Подобный принцип работы имеют полевые транзисторы Шоттки, в которых используется контакт «металл – полупроводник».

ПТ используют аналогично биполярным в трех схемах включения: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Наиболее распространена первая схема включения.

Основной статической характеристикой ПТ является выходная (стоковая) характеристика в схеме с ОИ  $I_C = f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = \text{const}$ , для МОП с индуциро-

ванным каналом она приведена на рис. 2.4, где 1 – крутая область, 2 – пологая, 3 – область пробоя.

При  $U_{зи} > U_{пор}$  и  $U_{си} = 0$  тока в канале нет и МДП-структура находится в состоянии равновесия. Поверхностный потенциал и плотность заряда электронов постоянны по длине канала. Стоковая характеристика в области 1 линейна (вблизи точки  $I_C = 0$ ), а канал представляет собой резисторы, сопротивление канала уменьшается пропорционально напряжению 3. При увеличении  $U_{си}$  проводимость канала понижается и повышение тока  $I_C$  замедляется, т. е. в целом в области 1 характеристика нелинейная.

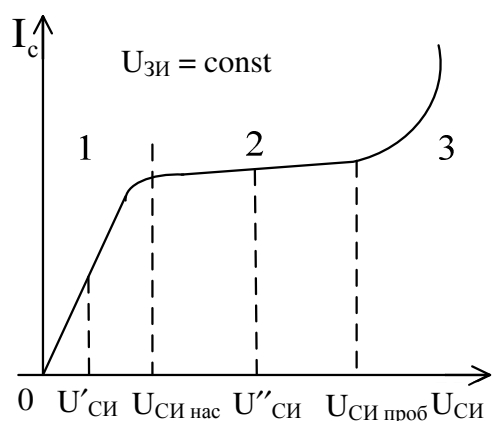


Рис. 2.4. Стоковая характеристика ПТ

При напряжении насыщения на С ( $U_{си нас}$ ) плотность заряда электронов в канале у С становится незначительной – происходит перекрытие канала, а при  $U_{си} > U_{си нас}$  канал перекрывается не в одной точке, а на участке конечной длины вблизи С. Имеет место эффект модуляции длины канала, увеличивается его сопротивление. Ток стока остается постоянным (см. рис. 2.4, пологая область 2). При достаточно большом  $U_{си}$  область перекрытия распространяется вплоть до И, происходит сквозное перекрытие канала, резко увеличивается инжекция электронов из И, которые сильным полем переносятся в С. Ток стока резко растет (участок пробоя 3). В ПТ с большой длиной канала лавинный пробой стокового р-п-перехода происходит раньше, чем сквозное перекрытие канала.

Типичное семейство стоковых характеристик МОП приведено на рис. 2.5. Штриховая линия отделяет крутую область от пологой. Значения  $U_{зи}$ , приведенные в скобках, соответствуют МОП со встроенным каналом.

Помимо стоковых характеристик широко используются стокзатворные (передаточные) характеристики  $I_C = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$  для МОП с индуцированным и встроенным каналами. Характеристики совпадают по форме, однако они сдвинуты относительно друг друга по оси напряжений  $U_{зи}$  на значение, равное разности пороговых напряжений. Характеристики при  $U_{си}$ , равном 1 В, линейны, так как соответствуют крутой области стоковых характеристик, а для  $U_{си}$ , равных 5, 10 В, – нелинейны и соответствуют пологой области стоковых характеристик.

Выходные характеристики ПТ с управляющим контактом «металл – полупроводник» и с управляющим р-п-переходом имеют тот же вид, как и для МДП-транзистора (рис. 2.6). Основным преимуществом ПТ с управляющим контактом «металл – полупроводник» является высокая стабильность их характеристик во времени, так как канал отделен от поверхности обедненным слоем. На границе канала с обедненным слоем отсутствуют дефекты кристаллической решетки, поверхностные каналы и загрязнения – все то, что у МДП-транзистора является причиной нестабильности.

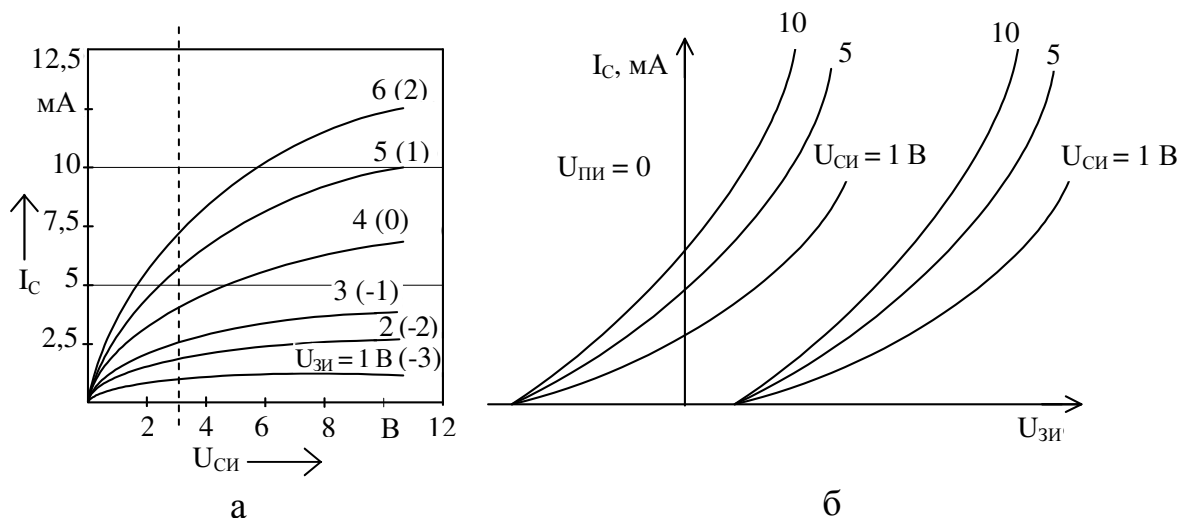


Рис. 2.5. Статические характеристики МДП-транзистора:  
а – стоковые; б – стокзатворные

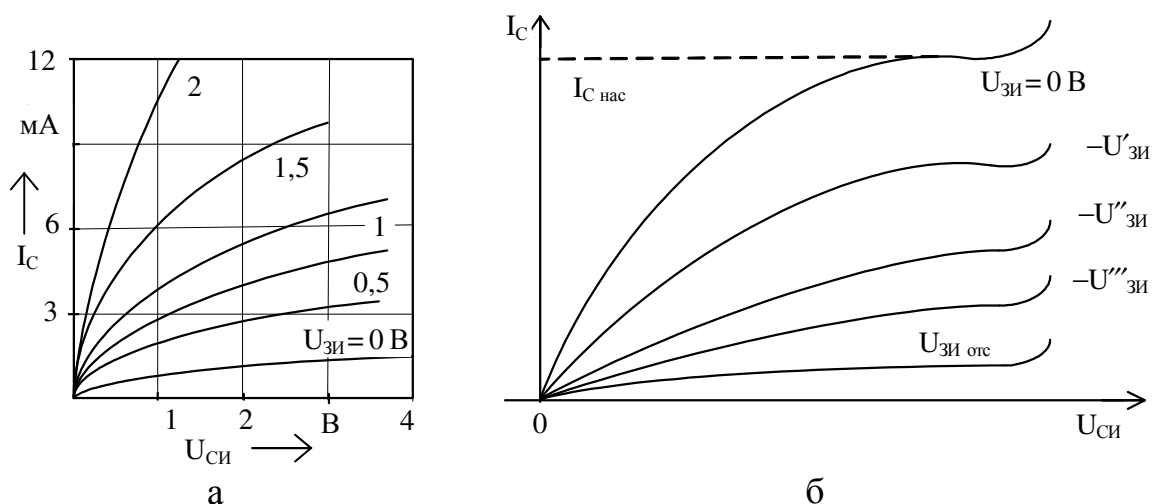


Рис. 2.6. Стоковые характеристики ПТ:  
а – с управляющим контактом «металл – полупроводник»;  
б – с управляющим р-п-переходом

Длина канала у ПТ с управляющим р-п-переходом значительно больше, чем у транзистора с контактом «металл – полупроводник», поэтому увеличение  $I_C$  при больших значениях напряжения  $U_{СИ}$  определяется лавинным пробоем запирающего слоя р-п-перехода в области стока, где к переходу приложено наибольшее обратное напряжение. Подача на З управляющего напряжения  $U_{ЗИ}$  уменьшает поперечное сечение канала (рис. 2.6, б), поэтому насыщение начинается при меньшем  $I_C$  и меньшем напряжении  $U_{СИ\text{ нас.}}$

Пологий участок выходной характеристики ПТ соответствует основному рабочему режиму ПТ в качестве усилителя; крутую область используют при работе ПТ как переменного сопротивления, управляемого напряжением.

Свойства ПТ характеризует ряд параметров:

крутизна характеристики при постоянном  $U_{СИ}$

$$S_i = dI_C/dU_{ЗИ} = \Delta I_C/\Delta U_{ЗИ} \quad (2.1)$$

определяет наклон статической стокозатворной характеристики в заданной точке. Крутизна имеет максимальные значения (0,2 – 10 мА/В) при  $U_{ЗИ} = 0$ ;

активная составляющая выходного сопротивления при постоянном  $U_{ЗИ}$

$$R_i = 1/g_{22h} = \Delta U_{СИ}/\Delta I_C. \quad (2.3)$$

В режиме насыщения  $I_C$  практически не зависит от изменения напряжения  $U_{СИ}$ , поэтому сопротивление  $R_i$  значительно и составляет  $10^4 - 10^6$  Ом;

коэффициент усиления по мощности – отношение мощности на выходе ПТ к мощности на входе при определенной частоте и схеме включения –

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (2.3)$$

Для характеристики быстродействия ПТ используют импульсные параметры: время задержки включения, выключения ПТ; время нарастания тока; время спада тока; полное время включения, выключения ПТ. Частотные свойства ПТ характеризуются временем пролета носителей по каналу и процессом перезаряда емкости З через сопротивление канала. ПТ работают до частоты порядка единиц – десятков мегагерц, по частотным свойствам они уступают БТ.

В качестве предельных эксплуатационных данных в справочной литературе указывают максимально допустимые значения напряжений  $U_{зи}$ ,  $U_{си}$ , постоянного тока  $I_C$ , постоянной рассеиваемой мощности и диапазон рабочей температуры. Максимально допустимая рассеиваемая мощность для маломощных ПТ составляет десятки – сотни милливатт, а для мощных – десятки ватт.

При изменении температуры на ПТ влияет ряд противоречивых факторов. Так, при повышении температуры, во-первых, возрастает обратный ток перехода «З – И», т. е. снижается входное сопротивление ПТ. Во-вторых, уменьшается ширина р-п-перехода, поэтому поперечное сечение канала и ток  $I_C$  возрастают. В-третьих, снижается подвижность носителей заряда, что уменьшает ток  $I_C$ . Два последних процесса компенсируют друг друга частично или полностью. Вследствие этого температурные свойства ПТ лучше, чем биполярных.

## 2.2. Схема исследования полевого транзистора

Схема включенного ПТ с ОИ приведена на рис. 2.7.

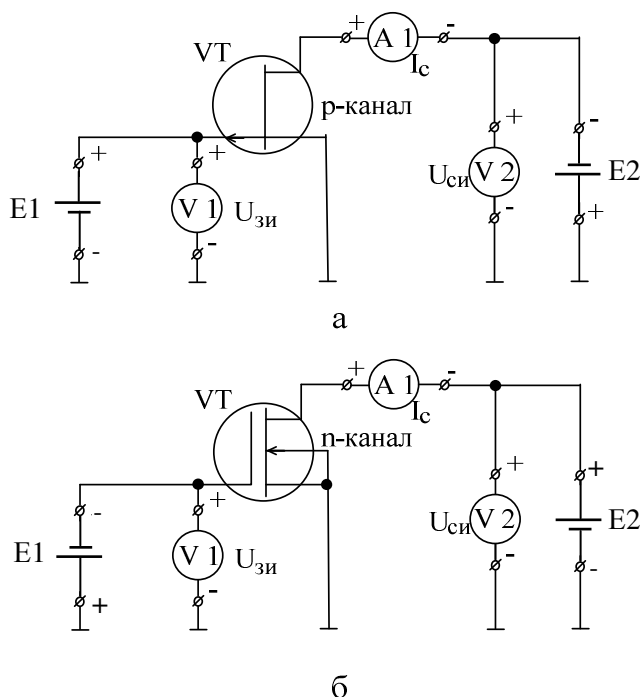


Рис. 2.7. Схемы исследования ПТ:

а – с управляющим р-п-переходом; б – со встроенным п-каналом

Для снятия стокзатворных характеристик  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$  и стокowych характеристик  $I_C = f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = \text{const}$  необходимо измерять величины  $I_C$ ,  $U_{ЗИ}$  и  $U_{СИ}$ .

Схема для снятия статических характеристик ПТ типа МДП со встроенным n-каналом, включенного по схеме с ОИ, приведена на рис. 2.7, б. Необходимо по цоколевке ПТ определить его электроды и подключить исследуемый транзистор к схеме. Полярность подаваемых напряжений от источников питания надо выбрать в соответствии с рис. 2.7 для режима обеднения n-канала основными носителями.

Для снятия стокзатворных (переходных) характеристик ПТ  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$  и стокowych  $I_C = f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = \text{const}$  необходимо измерять величины  $U_{ЗИ}$ ,  $U_{СИ}$  и  $I_C$ .

Как отмечалось выше, исследуемый ПТ со встроенным каналом n-типа может работать в режимах обеднения и обогащения канала основными носителями. При работе в режиме обеднения на З подается напряжение  $U_{ЗИ} < 0$ , на С относительно И исследуемого ПТ подается напряжение в положительной полярности (канал n-типа, основные носители – электроны).

### 2.3. Порядок выполнения работы

1) Соберите схему для снятия вольт-амперной характеристики ПТ, заданного преподавателем, по схеме включения с ОИ. Запишите паспортные данные в отчет, проанализировав предельно допустимые значения напряжения, тока и рассеиваемой мощности на исследуемом приборе. Снимите стокую (стокзатворную) характеристику  $I_C = f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = \text{const}$  ( $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$ ), полученные данные занесите в табл. 2.1. Следите за тем, чтобы допустимая рассеиваемая мощность на транзисторе не была превышена.

2) Соберите схему исследования МОП-транзистора (см. рис. 2.7, б). Задайте исходный режим работы ПТ (режим обеднения). Знак потенциалов на С и З определяется типом канала ПТ. Сам транзистор устанавливается на соответствующей плате, обеспечивающей удобство его подключения к стенду.

Таблица 2.1

Вольт-амперные характеристики ПТ с р-n-переходом  
в схеме включения с ОИ

Напряжение $U_{зи}$ , В	Ток стока $I_C$ , мА, при напряжении $U_{си}$ , В						
	0	-0,3	-0,6	-0,9	-3	-6	-9
0,8							
0,5							
0,25							
0							
-0,2							
-0,4							
-0,8							
-1,0							

Снимите стоковую  $I_C = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$  и стокотворную  $I_C = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$  характеристики МОП-транзистора, полученные данные занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Вольт-амперные характеристики ПТ со встроенным каналом

Напряжение $U_{зи}$ , В	Ток стока $I_C$ , мА, при напряжении $U_{си}$ , В								
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	3	6	9	12
-0,8									
-0,5									
-0,25									
0									
0,25									
0,5									

3) По данным табл. 2.1 и 2.2 начертите стоковые и стокотворные характеристики исследуемых ПТ в соответствующем масштабе. Рассчитайте по стоковым характеристикам статические параметры  $S_i$ ,  $R_i$ ,  $K_p$  ПТ в рабочей точке по паспортным данным. Сравните результаты расчета с паспортными данными.



## 2.4. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен в соответствии с требованиями СТП Ом-ГУПС-1.2-2005 и содержать следующее:

- 1) цель работы;
- 2) схему цоколевки и паспортные данные исследуемых ПТ;
- 3) схемы исследования ПТ с управляющим р-п-переходом и МОП-транзистора со встроенным каналом;
- 4) таблицы и графики стоковых и стокзатворных характеристик ПТ с управляющим р-п-переходом;
- 5) таблицы и графики стоковых и стокзатворных характеристик МОП-транзистора со встроенным каналом;
- б) расчет статических параметров  $S_i$ ,  $R_i$ ,  $K_p$  ПТ обоих типов.

## 2.5. Контрольные вопросы

- 1) Какие разновидности ПТ существуют?
- 2) Чем ПТ отличается от БТ?
- 3) Поясните принцип действия ПТ с изолирующим затвором, с управляющим контактом «металл – полупроводник», с управляющим р-п-переходом.
- 4) Изобразите эквивалентную схему ПТ и поясните назначение входящих в нее элементов. Зачем нужны эквивалентные схемы?
- 5) От чего зависит внешний вид стоковых характеристик ПТ различных типов?
- 6) Каковы особенности конструкции МДП-транзистора по сравнению с ПТ с управляющим р-п-переходом и управляющим контактом «металл – полупроводник»?
- 7) Укажите основные преимущества ПТ по сравнению с БТ.
- 8) Какими дифференциальными параметрами характеризуются ПТ? Где они находят применение?

## Библиографический список

1. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чуркин. СПб: Лань, 2001.
2. Лачин В. И. Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005.

3. Ткаченко Ф. А. Электронные приборы и устройства: Учебник / Ф. А. Ткаченко. Минск-М.: Новое знание-Инфра-М, 2011.

4. Баженов Н. Н. Полупроводниковые приборы: Конспект лекций / Н. Н. Баженов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012.

5. Ямпурин Н. П. Электроника: Учебное пособие / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. М.: Академия, 2011.

---

*Учебное издание*

КАНДАЕВ Василий Андреевич,  
АВДЕЕВА Ксения Васильевна,  
БАЖЕНОВ Николай Николаевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»

*Часть 1*

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

---

Редактор Н. А. Майорова  
Корректор И. А. Сенеджук

\*\*\*

Подписано в печать 06.02.2014. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,3.  
Тираж 150 экз. Заказ .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35