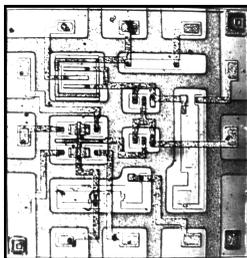


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
**«Физические основы электроники»**  
для студентов направления подготовки бакалавров  
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», профиля  
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
очной формы обучения  
Часть 2



Воронеж 2016

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения. Ч. 2 / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2016. 63 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с физическими принципами действия и рабочими характеристиками полупроводниковых приборов и структур (диодов, биполярных и полевых транзисторов, МДП-структур). Методические указания предназначены для студентов - бакалавров третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде и содержится в файле «Му лр ФОЭ ч2.pdf».

Табл. 6. Ил. 27. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет», 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы электроники» (часть 2) предназначен для освоения студентами методик измерения параметров и исследования характеристик полупроводниковых приборов, используемых для расчета их режимов работы и выявления влияния внешних воздействий на работу приборов.

**Электроника** – область науки и техники, которая занимается изучением электронных и ионных явлений в различных средах и на их границах. Основное место в электронике занимают электронные приборы. В электронных приборах используются вещества во всех четырех агрегатных состояниях – твердые тела, жидкости, газы и плазма. Применяются различные типы электромагнитных взаимодействий, постоянные и переменные электрические и магнитные поля различных конфигураций, в которых движутся потоки заряженных частиц.

Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная и твердотельная электроника.

**Твердотельная электроника** решает задачи, связанные с изучением свойств твердотельных материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и др.), влиянием на эти свойства примесей и особенностей структуры материала; изучением свойств поверхностей и границ раздела между слоями различных материалов; созданием в кристалле разными методами областей с различными типами проводимости; созданием гетеропереходов и монокристаллических структур; созданием функциональных устройств микронных и субмикронных размеров, а также способов измерения их параметров. Основными направлениями твердотельной электроники являются: **полупроводниковая электроника**, связанная с разработкой различных видов полупроводниковых приборов, и **микроэлектроника**, связанная с разработкой интегральных схем.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Объем каждой лабораторной работы можно выполнить в отведенное время только при условии предварительной подготовки, в процессе которой студенты должны:

а) изучить теоретический материал по лабораторной работе, пользуясь методическими указаниями и литературой, приведенной в них;

б) уяснить цель работы и порядок ее выполнения;

в) выяснить порядок включения и основные правила работы измерительных приборов;

г) изучить методику выполнения измерений и проведения вычислений.

Лабораторные работы выполняют с соблюдением следующих требований:

1. На одном рабочем месте допускается к работе не более 2 – 3 студентов. Каждый член бригады должен вести рабочую тетрадь.

2. Перед проведением лабораторной работы преподаватель проверяет степень готовности студентов к выполнению работы.

3. Сборку схемы студенты выполняют самостоятельно; правильность соединений элементов схемы проверяет преподаватель до включения схемы. Студенты не имеют права включать схему без проверки ее преподавателем.

4. Первоначальное включение схемы и измерительных приборов под напряжение производится только в присутствии преподавателя или лаборанта.

5. После проведения измерений сделать оценочные расчеты величин или построить предварительные графики, отражающие ход зависимостей, и показать преподавателю. Измерительную схему при этом не выключать! При необходимости по указанию преподавателя провести измерения заново.

6. После выполнения работы выключить приборы из сети, схему соединений разобрать, навести порядок на рабочем месте, и доложить об этом лаборанту.

При работе в лаборатории студенты должны:

строго соблюдать установленные правила внутреннего распорядка и техники безопасности;

бережно обращаться с оборудованием и измерительными приборами;

соблюдать следующие правила обращения с измерительными приборами:

а) при включении в схему приборов постоянного тока следить за полярностью включения;

б) до включения напряжения коммутирующее устройство и ручки управления прибора установить в нужное положение согласно инструкции;

в) после включения напряжения необходимо выдержать установленную для данного типа прибора норму времени прогрева прибора согласно инструкции;

сообщить преподавателю или лаборанту о неисправностях оборудования или измерительных приборов.

Отчет о проделанной работе составляется каждым студентом самостоятельно. Отчет должен содержать:

наименование, цель работы и используемое оборудование;

методику измерений в данной лабораторной работе;

краткие сведения об объектах измерения;

результаты измерений и расчетов (таблицы, графики, осциллограммы);

краткие выводы и заключения.

Исследование работы электронных приборов неизбежно связано с применением повышенных напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям. Поэтому при выполнении лабораторных работ

необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Перед началом работ следует ознакомиться с источниками электропитания, способами их включения, эксплуатации и выключения.

2. При сборке схемы все имеющиеся реостаты, автотрансформаторы и потенциометры устанавливаются в положения, указанные в описании к работе.

3. Сборку схемы необходимо производить соединительными проводами с исправной изоляцией.

4. После окончания сборки схемы преподаватель или лаборант должен ее проверить и разрешить включить источники питания.

5. Запрещается включать в схему измерительные приборы, корпуса которых не заземлены; место расположения клеммы « $\perp$ » указывается в техническом описании к приборам.

6. Запрещается прикасаться руками к зажимам, находящимся под напряжением; наличие напряжения на зажимах приборов следует проверять только измерительным прибором.

7. Все изменения в схеме, а также устранения неисправностей следует производить после отключения схемы.

8. Запрещается оставлять без наблюдения схему и измерительные приборы, подключенные к источнику питающего напряжения.

9. Разбирать схему по завершении работы следует только после отключения источников питания и с разрешения преподавателя.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

**Цель работы:** экспериментальное изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов; изучение влияния температуры на ВАХ диодов.

**Используемое оборудование и материалы:** вольтметры, милли- и микроамперметры, стенд для снятия характеристик по точкам, нагреватель, кремниевый и германиевый диоды.

### Теоретическая часть

Аналитическая или графическая зависимость, связывающая между собой значение тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход, и величину приложенного смещения, называется вольт-амперной характеристикой. Расчет идеальной ВАХ  $p$ - $n$ -перехода проводится на основе решения уравнений непрерывности для дырок и электронов, которые имеют вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_p; \quad \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n, \quad (1.1)$$

где  $G_p, G_n$  – скорости генерации;  $R_p, R_n$  – скорости рекомбинации дырок и электронов соответственно.

Для упрощения задачи принимается ряд допущений.

1. Рассматривается тонкий плоский  $p$ - $n$ -переход. При этом не учитывается генерация и рекомбинация носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ - $n$ -перехода ( $W \ll L$ , где  $L$  – диффузионная длина носителей заряда), и задача сводится к одномерному случаю ( $\operatorname{div} j_n = \partial j_n / \partial x$ ;  $\operatorname{div} j_p = \partial j_p / \partial x$ ). Считается, что в полупроводниковой структуре существуют только термогенерированные носители заряда, уравновешенные рекомбинацией ( $G = 0$ ).

2. Рассматривается стационарный случай протекания тока через  $p$ - $n$ -переход, т.е.  $\partial n/\partial t = 0$ ;  $\partial p/\partial t = 0$ .

3. Контакты полупроводника с металлом, к которым подается внешнее смещение, сделаны омическими и находятся далеко от  $p$ - $n$ -перехода, ловушки и поверхностная рекомбинация отсутствуют, так что неравновесные носители заряда, прошедшие  $p$ - $n$ -переход, рекомбинируют в объеме полупроводника.

4. Концентрация подвижных носителей заряда в ОПЗ мала, и объемный заряд в ней определяется только ионами примеси. Токи малы и не вызывают существенного падения напряжения на сопротивлении квазинейтральных областей кристалла полупроводника и контактах. Таким образом, все внешнее напряжение приложено непосредственно к  $p$ - $n$ -переходу.

5. Уровень инжекции мал ( $\Delta n_p \ll p_p$ ;  $\Delta p_n \ll n_n$ ). Поэтому в объеме полупроводника механизм рекомбинации линейный, т.е. скорость рекомбинации пропорциональна  $\Delta n$  и  $\Delta p$ :

$$R_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n}; \quad R_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = \frac{\Delta p_n}{\tau_p}, \quad (1.2)$$

и поле в квазинейтральных областях отсутствует.

С учетом указанных упрощений общее решение уравнений (1.1) имеет вид

$$\begin{aligned} p_n(x) &= p_{n0} + p_{n0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{сн}}}{kT}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(-\frac{x - W_n}{L_p}\right); \\ n_p(x) &= n_{p0} + n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{сн}}}{kT}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(-\frac{x - W_p}{L_n}\right). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Отсюда следует, что концентрация дырок в случае, когда ширина квазинейтральной области много больше диффузионной длины, уменьшается по экспоненциальному закону, и на достаточно большом расстоянии уменьшается до равновесной концентрации.

Для плотности токов  $j_p$  и  $j_n$  получим выражения

$$j_p = j_p(W_n) = \frac{qD_p}{L_p} p_{n0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{en}}}{kT}\right) - 1 \right];$$

$$j_n = j_n(W_p) = \frac{qD_n}{L_n} n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{en}}}{kT}\right) - 1 \right].$$
(1.4)

Принимая во внимание условие  $j_p^n = j_p^p$ ;  $j_n^p = j_n^n$  и то, что общий ток через  $p$ - $n$ -переход равен сумме электронного и дырочного токов, выражение для ВАХ  $p$ - $n$ -перехода можно представить в виде

$$j = q \left( \frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right) \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{en}}}{kT}\right) - 1 \right] = j_s \left[ \exp\left(\frac{qU_{\text{en}}}{kT}\right) - 1 \right],$$
(1.5)

где  $j_s$  – плотность тока насыщения

$$j_s = j_{ps} + j_{ns} = q \left( \frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) =$$

$$= q n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p n_{n0}} + \frac{D_n}{L_n p_{p0}} \right) = q \left( \frac{p_{n0} L_p}{\tau_p} + \frac{n_{p0} L_n}{\tau_n} \right).$$
(1.6)

Для идеальной ВАХ ток насыщения наблюдается при больших обратных смещениях на  $p$ - $n$ -переходе и определяется

диффузионным потоком неосновных носителей заряда к границе  $p$ - $n$ -перехода.

При рассмотрении работы реального диода необходимо учитывать некоторые дополнительные явления, происходящие в  $p$ - $n$ -переходе. На рис. 1.1 и 1.2 представлена реальная и идеальная вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$ -перехода.

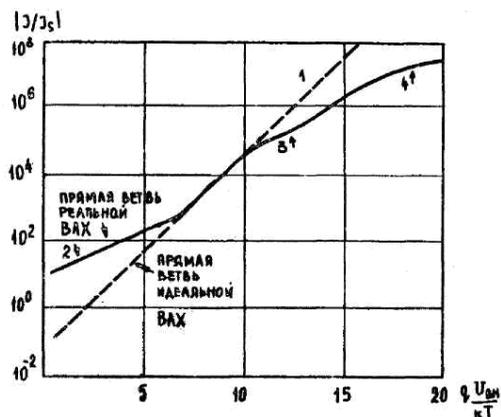


Рис. 1.1. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода

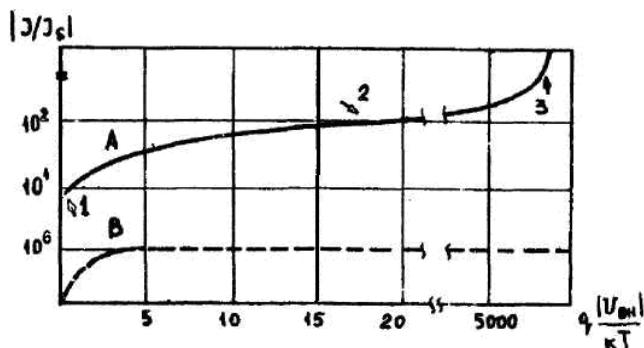


Рис. 1.2. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода

При прямом смещении отклонение реальной вольт-амперной характеристики от идеальной происходит по следующим причинам:

а) рекомбинация носителей заряда в области объемного заряда;

б) большой уровень тока (высокий уровень инжекции).

в) падение напряжения на сопротивлении базовой области и переходном сопротивлении невыпрямляющих контактов приводит к тому, что не все напряжение, приложенное к внешним зажимам, приходится на слой объемного заряда. При прямых смещениях, превышающих величину контактной разности потенциалов, электронно-дырочный переход теряет свои нелинейные свойства.

Одна из основных причин, влияющих на вид вольт-амперной характеристики при обратном смещении – наличие токов утечки в местах выхода электронно-дырочного перехода на поверхность кристалла. На поверхности всегда имеются дефекты, которые приводят к возникновению заряда, а, следовательно, к появлению сопротивления утечки, шунтирующего *p-n*-переход. Поверхностные токи утечки в некоторых случаях во много раз превышают теоретически рассчитанную величину обратного тока.

При обратном смещении, поданном на переход, область объемного заряда расширяется, а концентрация подвижных носителей заряда в области объемного заряда много меньше, чем в равновесном состоянии,  $n \cdot p \leq n_i^2$ . При таких условиях генерация носителей заряда не уравнивается рекомбинацией.

При повышении обратного смещения, приложенного к переходу, можно обнаружить явление, при котором небольшое изменение напряжения приводит к резкому возрастанию тока. Если при этом величина тока не ограничена добавочным сопротивлением, то *p-n*-переход может быть нарушен. Это яв-

ление называется пробоем электронно-дырочного перехода. Существует три основных механизма пробоя:

а) **тепловой пробой**, при котором увеличение тока происходит за счет разогрева перехода. Тепловой пробой имеет место в полупроводниковых приборах с плохим теплоотводом, поскольку при этом в электронно-дырочном переходе выделяется больше тепла, чем отводится;

б) **лавинный пробой** электронно-дырочного перехода обусловлен эффектом умножения носителей заряда в электрическом поле обратно-смещенного перехода.

в) **туннельный пробой** или зиннеровский эффект основан на механизме туннельного прохождения тока через электронно-дырочный переход.

Температурная зависимость вольт-амперной характеристики определяется экспоненциальным множителем  $qU_{\text{вн}}/kT$  и током насыщения  $I_s$ , плотность которого определяется выражением (1.6).

Выражение (1.6) можно переписать в виде

$$I_s = S_{p-n} \left( L_p \frac{p_{n0}}{\tau_p} + L_n \frac{n_{p0}}{\tau_n} \right), \quad (1.7)$$

тогда становится более ясным физический смысл тока насыщения. Ток насыщения – это ток, вызванный генерацией неосновных носителей заряда со скоростью генерации  $p_{n0}/\tau_p$  и  $n_{p0}/\tau_n$  на расстояниях  $L_p$  и  $L_n$  от границы области объемного заряда.

Температурная зависимость тока насыщения определяется, в основном, температурной зависимостью собственной концентрации:

$$I_s = S_{p-n} q n_i^2 \left( \frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right). \quad (1.8)$$

В этом выражении принято, что все атомы полностью ионизированы, то есть  $N_D \approx N_D^+ \approx n_{n0}$ ;  $N_A \approx N_A^+ \approx p_{p0}$ .

Собственная концентрация носителей заряда является сложной функцией температуры:

$$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{2kT}\right) = 2\left(\frac{2\pi k}{h^2}\right)^{3/2} (m_n^* \cdot m_p^*)^{3/4} T^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (1.9)$$

где  $N_C$  и  $N_V$  – эффективные плотности уровней в зоне проводимости и в валентной зоне;  $m_n^*$  и  $m_p^*$  – эффективные массы электронов и дырок;  $h$  – постоянная Планка;  $\Delta E_g$  – ширина запрещенной зоны.

В общем виде температурная зависимость обратного тока диода с  $n$ - $p^+$ -переходом записывается в виде

$$I_s = S_{p-n} q \frac{L_p}{\tau_p} \cdot \frac{n_i^2}{N_D} \cong B \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (1.10)$$

где  $B$  – некоторый коэффициент, который включает в себя все множители, по температурной зависимости более слабые, чем экспонента.

Вольт-амперные характеристики германиевых и кремниевых диодов одинаковой конструкции различаются между собой. На рис. 1.3 для сравнения показаны характеристики германиевого (рис. 1.3, а) и кремниевого (рис. 1.3, б) диодов, имеющих одинаковую конструкцию и предназначенных для работы в одном и том же диапазоне токов и напряжений.

Поскольку ширина запрещенной зоны у кремния больше, чем у германия, то обратный ток кремниевых диодов значительно меньше. Кроме того, обратная ветвь характеристики

кремниевых диодов не имеет явно выраженного участка насыщения, что обусловлено генерацией носителей зарядов в *p-n*-переходе и токами утечки по поверхности кристалла.

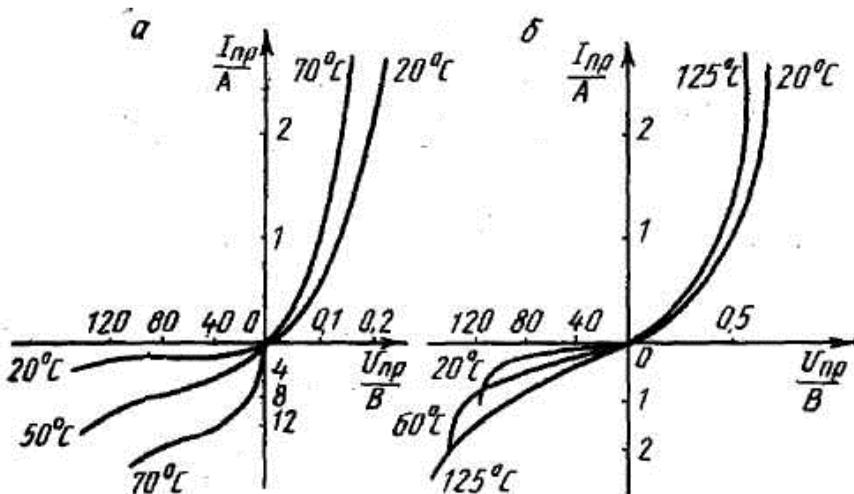


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов

Вследствие большого обратного тока у германиевых диодов наступает тепловой пробой, приводящий к разрушению кристалла. У кремниевых диодов из-за малого обратного тока вероятность теплового пробоя мала, и у них возникает электрический пробой.

Поскольку прямой ток диода определяется из уравнения  $I_{np} = I_s[\exp(U_{np}/\varphi_T) - 1]$ , вследствие меньшего значения обратного тока кремниевого диода его прямой ток, равный току германиевого диода, достигается при большем значении прямого напряжения. Поэтому мощность, рассеиваемая при одинаковых токах, в германиевых диодах меньше, чем в кремниевых. На характеристики диодов существенное влияние оказывает температура окружающей среды. С ростом температуры

становится интенсивнее генерация носителей зарядов и увеличиваются обратный и прямой токи диода.

Для приближенной оценки можно считать, что с увеличением температуры на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  обратный ток германиевых диодов возрастает в два, а кремниевых – в два с половиной раза. Однако вследствие того, что при комнатной температуре обратный ток у германиевого диода значительно больше, чем у кремниевого, абсолютное значение приращения обратного тока у германиевого диода с ростом температуры оказывается в несколько раз больше, чем у кремниевого. Это приводит к увеличению потребляемой диодом мощности, его разогреву и уменьшению напряжения теплового пробоя. У кремниевых диодов из-за малого обратного тока вероятность теплового пробоя мала, и у них вначале возникает электрический пробой.

### Методика измерения

Схема измерения ВАХ по точкам показана на рис. 1.4, а.

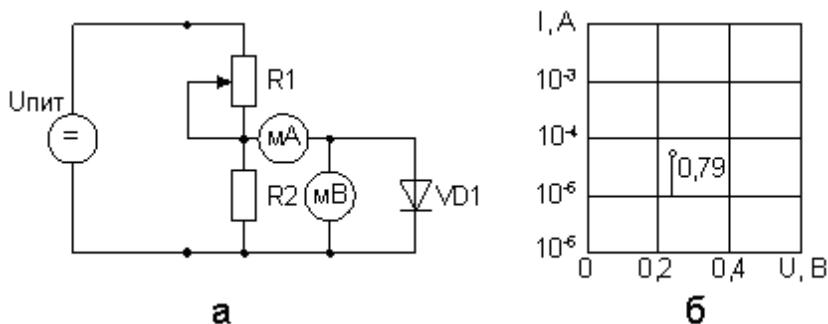


Рис. 1.4. Схема для снятия статических ВАХ диода (VD1) по точкам (а) и построение точек ВАХ в полулогарифмическом масштабе (б)

Напряжение на измеряемый диод  $V_{DI}$  подается не непосредственно, а через делитель напряжения. Это сделано для того, чтобы легче было управлять напряжением на диоде в окрестности нуля, то есть в диапазоне малых токов. Напряжение регулируется резистором  $R1$  и ручкой на передней панели блока питания. Измерения при повышенной температуре производятся с помощью нагревателя, в котором заданная температура поддерживается автоматически с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

В данной работе потребуется строить вольт-амперные характеристики в полулогарифмическом масштабе. Обычно логарифмические шкалы применяются в тех случаях, когда поведение нужной величины интересует в пределах нескольких порядков. Представление чисел на логарифмических шкалах иногда представляет трудности. Для такого представления необходимо выполнить следующие действия: перевести ток в амперы и найти нужный порядок, затем логарифмировать мантиссу и построить полученную точку в пределах найденного порядка.

Пример: при некотором напряжении  $U$  измерено значение тока  $62\text{ мкА} = 6,2 \cdot 10^{-5}\text{ А}$ , поэтому данная точка будет лежать выше порядка  $10^5$  (рис. 1.4, б). Теперь логарифмируем:  $\lg 6,2 = 0,7$  (логарифм десятичный!). Полученную величину откладываем над уровнем  $10^5$ . Координаты с одной логарифмической и одной линейной шкалой называются полулогарифмическими, с двумя логарифмическими шкалами – двойными логарифмическими.

На прямой ветви вольт-амперной характеристики диода, построенной в полулогарифмических координатах, могут существовать участки, связанные с различными механизмами образования тока. Там, где вольт-амперная характеристика экспоненциальна, в данной системе координат получается прямолинейный отрезок (рис. 1.5). При напряжении на диоде, равном нулю, ток равен нулю. Следовательно,  $\lg I \rightarrow -\infty$ . При малых напряжениях на диоде ток может определяться реком-

бинацией в электронно-дырочном переходе. Тогда он зависит от напряжения как  $\exp(qU/2kT)$ , что дает на графике отрезок прямой линии с угловым коэффициентом 1/2.

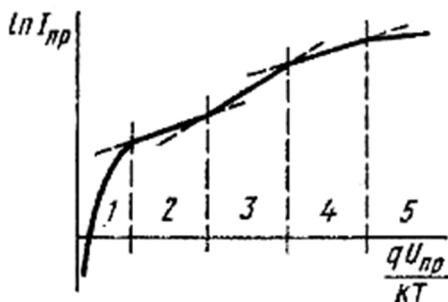


Рис. 1.5. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода:

- 1 – участок малых токов; 2 – участок с преобладанием рекомбинации в  $p$ - $n$ -переходе; 3 – участок с преобладанием процесса инжекции; 4 – участок, связанный с модуляцией сопротивления базы при высоком уровне инжекции; 5 – участок, связанный с нарушением условий на границах  $p$ - $n$ -перехода и на невыпрямляющем контакте с базой

При бóльших напряжениях преобладает ток, связанный с инжекцией носителей заряда и зависящий от напряжения как  $\exp(qU/kT)$ , что дает на графике отрезок прямой линии с угловым коэффициентом 1. При дальнейшем увеличении тока наряду с инжекцией носителей заряда начинает сказываться модуляция сопротивления базы, что опять дает зависимость  $\exp(qU/2kT)$  или на графике – отрезок прямой с угловым коэффициентом 1/2.

Наконец, при очень больших прямых токах вольт-амперная характеристика диода становится неэкспоненциальной из-за нарушения условий на электронно-дырочном переходе и на невыпрямляющем контакте. Соответствующий отрезок на графике не будет прямой линией.

## Экспериментальное задание

1. Снять прямые ветви ВАХ кремниевого и германиевого диодов по точкам при комнатной температуре. Типичный диапазон прямых напряжений – до 0,6 В. На ИПД-1 задавать для кремниевого диода  $U_{пр} \leq 4$  В, для германиевого диода  $U_{пр} \leq 2$  В. Результаты представить в полулогарифмическом масштабе по оси токов и в реальном масштабе с шагом напряжения 0,05 В

2. Измерить обратные токи кремниевого и германиевого диодов на пологом участке обратной ветви ВАХ при комнатной и повышенной (40 – 50 °С) температуре. Типичный диапазон обратных напряжений: 3 – 6 В. На ИПД-1 задавать для кремниевого и германиевого диода  $U_{обр} \leq 10$  В.

## Расчетное задание

1. По результатам измерений прямой ветви ВАХ по точкам отсчитать значение коэффициента неидеальности диода по следующей формуле

$$m_i = \frac{1}{\varphi_T} \frac{dU}{d(\ln I)} = \frac{1}{\varphi_T} \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{2,3(\lg I_{i+1} - \lg I_{i-1})}, \quad (1.11)$$

где  $m_i$  – коэффициент неидеальности диода;  $\varphi_T$  – термический потенциал Больцмана,  $\varphi_T = 0,026$  В.

2. Оценить токи насыщения диодов.

3. По результатам измерений оценить температуру удвоения германиевого и кремниевого диодов, используя следующую формулу

$$I_s(T) = I_s(T_0) \cdot 2^{\Delta T/T_y}, \quad (1.12)$$

где  $I_s(T)$  – ток насыщения диода при повышенной температуре;  $I_s(T_0)$  – ток насыщения диода при комнатной температуре;  $\Delta T = T - T_0$  – разница между комнатной и повышенной температурой;  $T_y$  – температура удвоения.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определения резкого и плавного  $p$ - $n$ -переходов.
2. Нарисуйте зонные диаграммы  $p$ - $n$ -перехода в равновесии, при прямом и обратном смещениях. Покажите направления движения носителей.
3. Напишите уравнение ВАХ идеального диода, приведите выражения для плотности тока насыщения.
4. Перечислите причины, по которым реальная ВАХ диода отличается от идеальной: а) на прямой ветви; б) на обратной ветви.
5. Как влияет температура на обратную ветвь ВАХ диода? Сравните влияние температуры на германиевый и кремниевый диоды. Обоснуйте границы диапазона рабочих температур для германиевого и кремниевого диодов.
6. Как влияет температура на прямую ветвь ВАХ диода?
7. Назовите виды пробоя диода.
8. Сравните вольт-амперные характеристики германиевых и кремниевых диодов одинаковой конструкции.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ МДП-СТРУКТУРЫ

**Цель работы:** исследование вольт-фарадных характеристик реальной МДП-структуры.

**Используемое оборудование и материалы:** измеритель вольт-фарадных характеристик, вольтметр, пластина с МДП-структурами

#### Теоретическая часть

Структуры металл – диэлектрик – полупроводник, или сокращенно МДП-структура представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, называемую *подложкой*, закрытую с планарной стороны *диэлектриком*. Металлический электрод, нанесенный на диэлектрик, носит название *затвора*, а сам диэлектрик называется *подзатворным*. На обратную сторону полупроводниковой пластины наносится металлический электрод, называющийся омическим контактом (рис. 2.1). Довольно часто в качестве диэлектрика в МДП-структурах используют оксиды, поэтому вместо МДП употребляется название МОП-структура.

*Идеальная МДП-структура* - это такая система металл – диэлектрик – полупроводник в которой:

- отсутствуют поверхностные состояния на границе раздела полупроводник – диэлектрик;
- термодинамические работы выхода металла затвора и полупроводника подложки равны между собой;
- отсутствуют заряженные центры в объеме подзатворного диэлектрика;
- сопротивление подзатворного диэлектрика бесконечно велико, так что сквозной ток через него отсутствует при любых напряжениях на затворе.

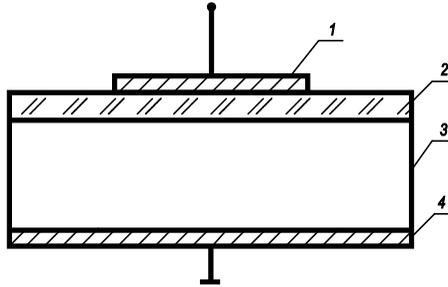


Рис. 2.1. МДП-структура: 1 – затвор; 2 – подзатворный диэлектрик; 3 – полупроводниковая подложка; 4 – омический контакт

Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V = 0$  приведены на рис. 2.2.

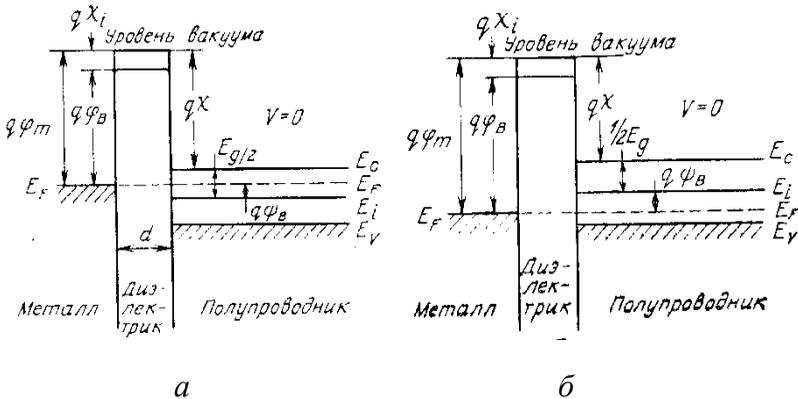


Рис. 2.2. Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V = 0$  : а – полупроводник  $n$ -типа; б - полупроводник  $p$ -типа

МДП-структуры, близкие к идеальным, получают, используя «хлорную» технологию термического выращивания

диоксида кремния на кремнии, причем для  $n$ -Si в качестве материала затвора используется алюминий, а для  $p$ -Si - золото.

МДП-структуры, в которых нарушается одно из вышеперечисленных требований, получили название реальных МДП-структур.

Когда к идеальной МДП-структуре приложено напряжение того или другого знака, на полупроводниковой поверхности могут возникнуть три основные ситуации (рис. 2.3). Рассмотрим их сначала для МДП-структуры с полупроводником  $p$ -типа. Если к металлическому электроду структуры приложено отрицательное напряжение ( $V < 0$ ), край валентной зоны у границы с диэлектриком изгибается вверх и приближается к уровню Ферми (рис. 2.3, *а*). Поскольку в идеальной МДП-структуре сквозной ток равен нулю, уровень Ферми в полупроводнике остается постоянным. Так как концентрация дырок экспоненциально зависит от разности энергий ( $E_F - E_V$ ), такой изгиб зон приводит к увеличению числа основных носителей (дырок) у поверхности полупроводника. Этот режим называется **режимом обогащения (аккумуляции)**. Если к МДП-структуре приложено не слишком большое положительное напряжение ( $V > 0$ ), зоны изгибаются в обратном направлении и приповерхностная область полупроводника обедняется основными носителями (рис. 2.3, *б*). Этот режим называют **режимом обеднения** или **истощения** поверхности. При больших положительных напряжениях зоны изгибаются вниз настолько сильно, что вблизи поверхности происходит пересечение уровня Ферми  $E_F$  с собственным уровнем  $E_i$ . В этом случае (рис. 2.3, *в*) концентрация неосновных носителей (электронов) у поверхности превосходит концентрацию основных носителей (дырок). Эта ситуация называется **режимом инверсии**. Аналогичное рассмотрение можно провести и для МДП-структуры с полупроводником  $n$ -типа. Указанные режимы осуществляются при напряжении противоположной полярности.

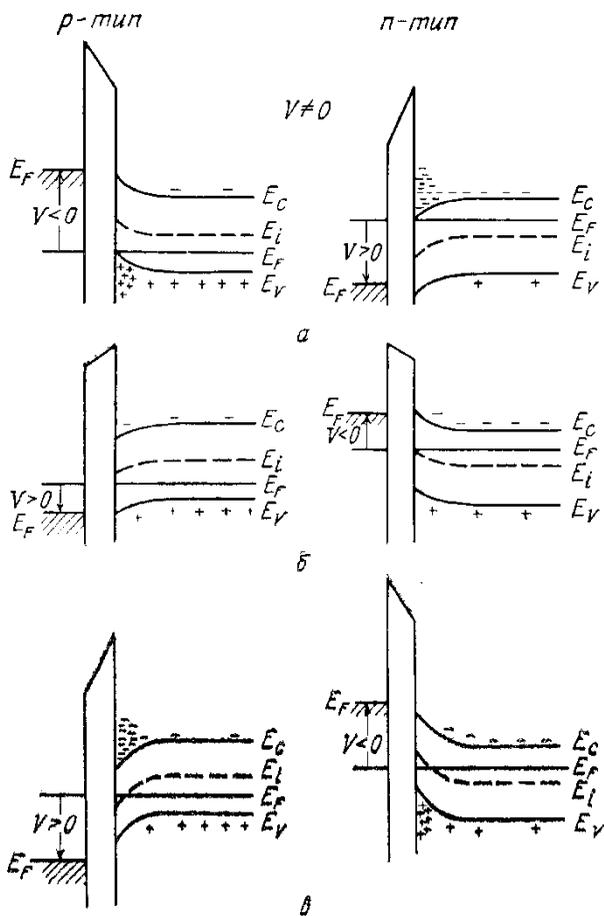


Рис. 2.3. Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V \neq 0$ : а – режим аккумуляции; б – режим обеднения; в – режим инверсии

Одним из наиболее распространенных методов изучения свойств структур металл – диэлектрик – полупроводник является метод, основанный на анализе зависимости емкости МДП-структуры  $C_{\text{МДП}}$  от напряжения на затворе  $V$ , так назы-

ваемый метод вольт-фарадных характеристик (ВФХ) или  $C$ - $V$  метод.

Емкость МДП-структуры представляет собой последовательное соединение емкости диэлектрика  $C_i$  и приповерхностной емкости полупроводника  $C_s$

$$\frac{1}{C_{МДП}} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_s}, \quad C_{МДП} = \frac{C_i C_s}{C_i + C_s}. \quad (2.1)$$

График зависимости емкости МДП-структуры от напряжения на затворе, так называемая вольт-фарадная характеристика МДП-структуры, приведен на рис. 2.4.

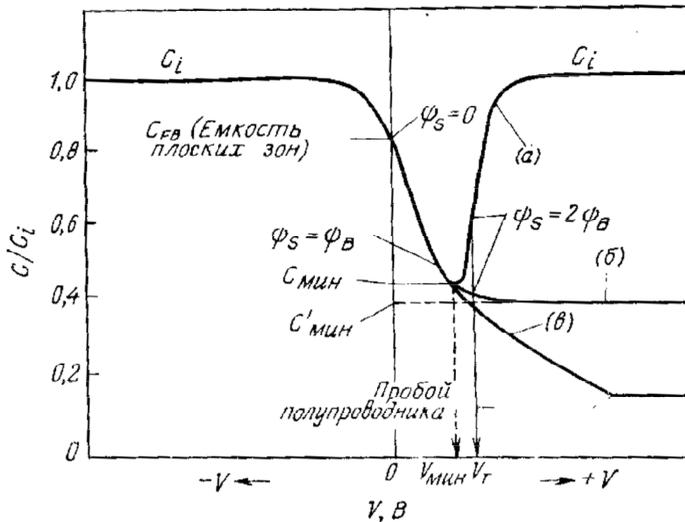


Рис. 2.4. Вольт-фарадные характеристики идеальной МДП-структуры:  $a$  – в области низких частот;  $b$  – в области высоких частот;  $v$  – в режиме глубокого обеднения

Если  $V < 0$  и полупроводниковая подложка имеет  $p$ -тип проводимости, то около поверхности полупроводника накапливаются дырки (режим аккумуляции, обогащения). В этом режиме дифференциальная емкость полупроводника существенно больше емкости диэлектрика, поэтому полная емкость структуры близка к величине емкости диэлектрика:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d}. \quad (2.2)$$

Когда напряжение на затворе меняется в направлении напряжения плоских зон, поверхностное обогащение исчезает и вследствие роста длины Дебая у поверхности емкость начинает уменьшаться.

При переходе МДП-структуры в режим обеднения ( $V > 0$ ) дырки удаляются от поверхности, образуется ОПЗ и начинает сказываться влияние приповерхностной емкости  $C_s$ , значение которой зависит от напряжения на затворе. Обедненная область действует как добавочный слой диэлектрика. В этом режиме полная емкость МДП-структуры состоит из последовательно соединенных емкостей диэлектрика и приповерхностной обедненной области полупроводника

$$C_{МДП} = \left( \frac{1}{C_i} + \frac{W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{-1}, \quad (2.3)$$

где  $W$  – ширина приповерхностного обедненного слоя, которая зависит как от напряжения на затворе, так и концентрации примеси.

Из выражения (2.3) следует, что с увеличением ширины обедненной области полная емкость МДП-структуры уменьшается.

При превышении  $V$  значения порогового напряжения в МДП-структуре происходит инверсия проводимости приповерхностного слоя: поверхностная концентрация электронов в инверсионном слое растет экспоненциально с напряжением, а поверхностный потенциал увеличивается пропорционально квадрату толщины обедненной области. После того как значение  $W$  достигнет максимальной величины, дальнейшее приращение положительного заряда на затворе будет компенсироваться возрастанием концентрации электронов в канале. Появление избыточных электронов обеспечивается достаточно медленной генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ. Поэтому, если к постоянному напряжению на затворе  $V$  добавляется малое переменное напряжение  $dV$  с высокой частотой, то концентрация носителей в инверсионном слое (электронов) не успевает изменяться с частотой переменного напряжения и емкость МДП-структуры остается постоянной (рис. 2.4, кривая б).

Если же частота изменений  $V$  низкая, то изменение концентрации носителей в инверсионном слое (электронов) успевает следовать за изменением напряжения. Дифференциальная емкость инверсионного слоя значительно превышает емкость диэлектрика, поэтому полная емкость МДП-структуры в режиме инверсии резко возрастает, снова приближаясь к емкости диэлектрика (рис. 2.4, кривая а).

Рассмотрим теперь, как меняется емкость МДП-структуры при подаче на затвор импульса напряжения. Пусть в исходном состоянии напряжение на затворе равнялось нулю, если теперь к затвору «скачком» прикладывается положительное напряжение, превышающее пороговое, то дырки удаляются от поверхности полупроводника и образуется ОПЗ. Однако инверсии проводимости не происходит, так как инерционный процесс генерации электронов не успевает за изменением напряжения. Вследствие того, что инверсионный слой отсутствует, положительный заряд на металлическом затворе

может быть скомпенсирован только ионами акцепторов в ОПЗ. Поэтому толщина ОПЗ увеличивается. Удельная емкость структуры в этом режиме по аналогии с (2.3) равна:

$$C_{МДП} = \left( \frac{1}{C_i} + \frac{W_{\max} + \Delta W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{-1}, \quad (2.4)$$

Фактически в выражении (2.4) отражено сохранение режима обеднения и при напряжениях на затворе, больших порогового. Толщина обедненной области под увеличивается на  $\Delta W$ , а значение емкости  $C_s$  и общей емкости МДП-структуры уменьшается (рис. 2.4, кривая  $\nu$ ), при этом зависимость емкости затвора от напряжения на затворе аналогична зависимости барьерной емкости обратно-смещенного  $p$ - $n$ -перехода от обратного напряжения.

При экспериментальном измерении вольт-фарадных характеристик МДП-структур важное значение имеет частота измерительного сигнала  $\omega$ . Это связано с тем, что процессы захвата и выброса на поверхностные состояния, а также изменения заряда свободных носителей в инверсионном слое, характеризующие емкость поверхностных состояний  $C_{ss}$  и емкость ОПЗ  $C_{sc}$ , имеют конечные времена  $\tau$ , сравнимые с периодом обычно используемого в эксперименте сигнала. Напомним, что изменение заряда  $Q_n$  в инверсионном слое характеризуется генерационно-рекомбинационным процессом и определяется временем жизни неосновных носителей  $\tau_n$  в ОПЗ. Характерное время захвата и выброса на поверхностные состояния определяется постоянной времени  $\tau$  этих состояний. В зависимости от частоты измерительного сигнала различают два метода – метод высокочастотных  $C$ - $V$  характеристик и квазистатический  $C$ - $V$  метод.

**Метод высокочастотных вольт-фарадных характеристик.** Для создания полевого эффекта в МОП-структуре необходимо подать напряжение на металлический затвор. (В

настоящей работе все напряжения отсчитываются от подложки). Напряжение на затворе перераспределит заряды, но сохранит их общий нулевой баланс. В идеальном случае заряд на металлическом затворе уравновешивается зарядами инверсионного и обедненного слоя (рис. 2.5, *a*). В реальной МОП-структуре (рис. 2.5, *б*) в этом балансе участвует также заряд диэлектрика, который влияет на приповерхностный изгиб зон и который надо учитывать, анализируя свойства МОП-приборов.

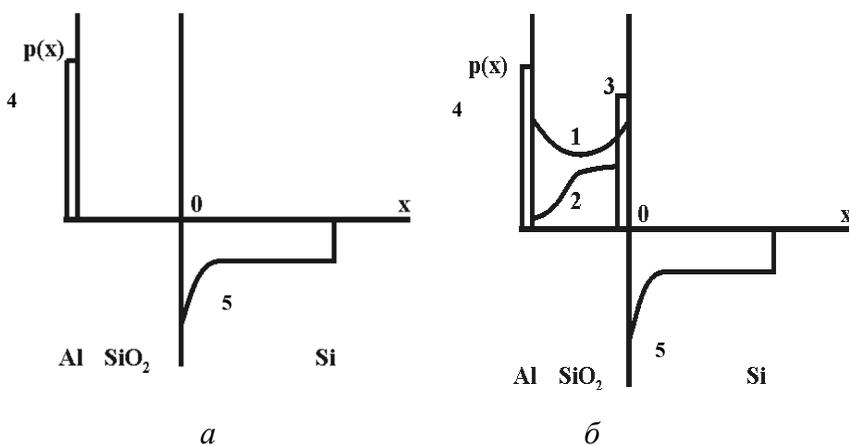


Рис. 2.5. Распределение заряда в идеальной (*a*) и реальной (*б*) МДП-структуре: 1, 2, 3 - заряд в диэлектрике; 4 - заряд на металлическом затворе; 5 - заряд инверсионного и обедненного слоя

Заряд в диэлектрике образован рядом компонентов, совместное присутствие которых описывается величиной  $Q_{ss \text{ эф}}$  и приводит к сдвигу высокочастотной ВФХ с деформацией (вытягиванием) вдоль оси напряжений (рис. 2.6). Величина сдвига равна  $\varphi_s + (Q_{ss \text{ эф}}/C_i)$ , где  $\varphi_s$  - поверхностный потенциал,  $C_i$  - удельная емкость изолятора.

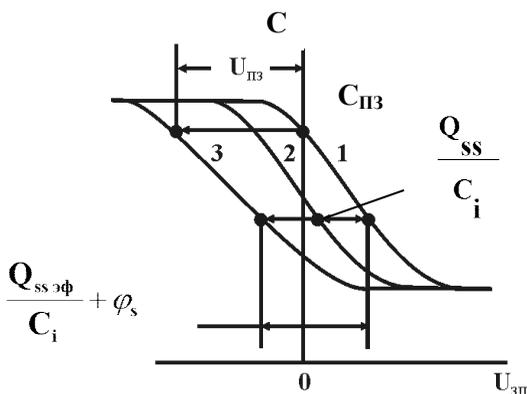


Рис. 2.6. Высокочастотная ВФХ: 1 - идеальная ВФХ; 2 - сдвиг ВФХ под действием только объемного заряда в окисле; 3 - реальная ВФХ, учитывающая все компоненты в окисле

### Методика измерения

Статические высокочастотные вольт-фарадные характеристики снимаются с помощью специального измерителя ВФХ, в котором есть источник регулируемого постоянного напряжения смещения и измерительный высокочастотный сигнал обеих полярностей.

Емкость измеряется на частоте 500 кГц, обеспечиваемой собственным генератором измерителя. Диапазон измерения от 10 до 500 пФ разбит на три поддиапазона, выбираемые ручкой *ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ*. При отсчете емкости деления шкалы стрелочной головки переводятся в значения емкости по графику, укрепленному на верхней крышке измерителя. Исследуемая емкость подключается к клеммам  $C_x$ , одна из которых заземлена, а на другую может быть подано постоянное смещение от собственного источника измерителя. Знак смещения задается тумблером *ПОЛЯРНОСТЬ*, а величина - ручкой  $U_{см}$ . Постоянное напряжение может быть измерено внешним вольт-

тметром, подключенным к клеммам *ВНЕШНИЙ ВОЛЬТ-МЕТР*.

Для правильного задания полярности необходимо проследить за тем, чтобы шнур от «массы» зондовой головки был подключен к клемме «земля», тогда на другой клемме, ведущей к игле зонда, будет знак напряжения, определяемый тумблером ПОЛЯРНОСТЬ. Напряжение постоянного смещения измеряется внешним вольтметром на соответствующих клеммах. Показания стрелки прибора пересчитываются в емкость по калибровочной кривой, прилагаемой к прибору.

### Экспериментальное задание

1. Измерить статическую вольт-фарадную характеристику МОП-структуры.

2. Определить тип проводимости подложки. Высокочастотная (ВЧ) вольт-фарадная характеристика МОП-структуры с монополярным полупроводником имеет вид плавной ступеньки. При этом верхний уровень практически равен емкости диэлектрика  $C_{\max} = C_{\text{ок}}$  и соответствует области сильного обогащения ОПЗ полупроводника, а нижний определяется инверсной емкостью МДП-структуры  $C_{\min} = C_i$ . Если учесть, что знак управляющего напряжения  $U_3$  отсчитывается относительно металлического электрода (затвора), тип проводимости полупроводника легко идентифицируется:

- *n*-тип подложки: верхний уровень ступеньки ВФХ направлен в сторону  $(+U_3)$ , нижний в сторону  $(-U_3)$  (рис. 2.7, а);

- *p*-тип подложки: наоборот верхний уровень направлен в сторону  $(-U_3)$ , нижний в сторону  $(+U_3)$  (рис. 2.7, б).

3. Найти толщину диэлектрика. Толщину диэлектрика можно определить, используя формулу для емкости диэлектрика:

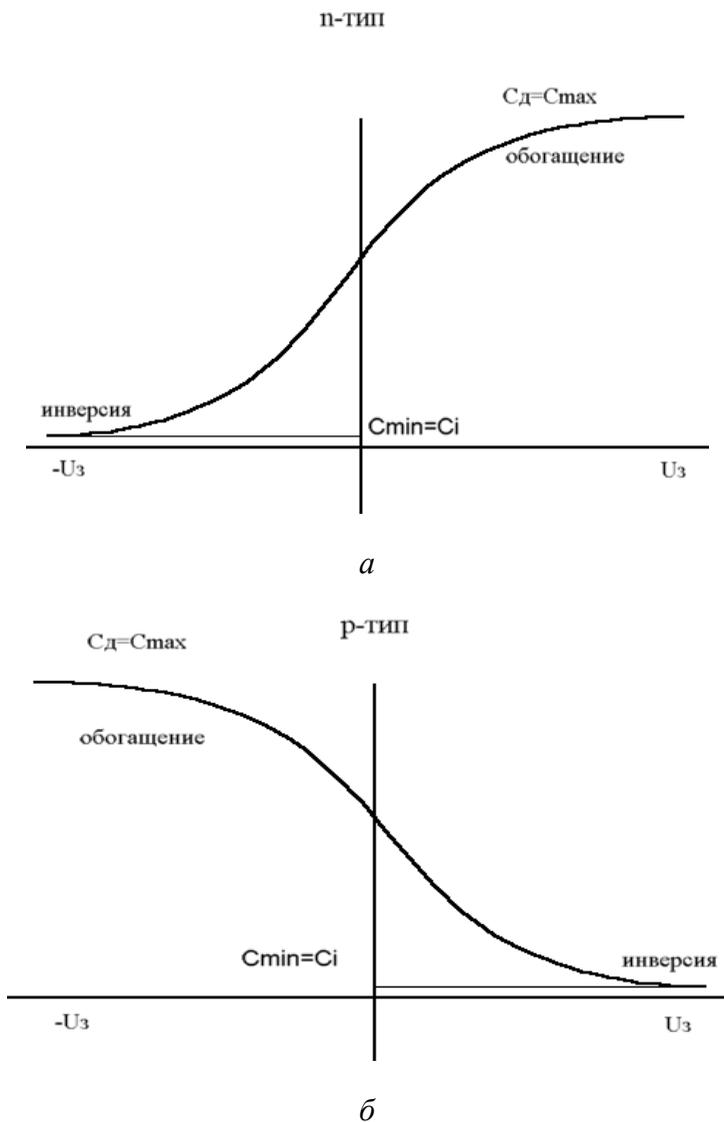


Рис. 2.7. Высокочастотная вольт-фарадная характеристика МОП-структуры для полупроводника *n*-типа (а) и *p*-типа (б)

отсюда

$$C_{\max} = C_{ox} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_{ox}} \quad (2.5)$$

$$d_{ox} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C_{\max}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C_{ox}}$$

где  $C_{ox}$  - емкость диэлектрика;  $d_{ox}$  - толщина диэлектрика;  $S$  - площадь МОП - структуры,  $S = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-2} \text{ см}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\text{SiO}_2$ ,  $\varepsilon = 3,8$ ; диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

4. Найти ширину обедненной области в режиме сильной инверсии, величину  $\varphi_v$  в объеме подложки, концентрацию легирующей примеси в подложке, разность работ выхода  $\Phi_{мп}$ .

В области сильной инверсии ВЧ емкость МДП - структуры минимальна  $C_{мп} = C_{\min} = C_i$ , практически не зависит от  $U_3$  (см. рис. 2.7), но является функцией  $N_d$  или  $N_a$ . Из ВЧ ВФХ определяем емкость инверсного слоя:

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{1}{C_{\max}} + \frac{1}{C_{sc}} \Rightarrow \frac{1}{C_{sc}} = \frac{1}{C_{\min}} - \frac{1}{C_{\max}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{C_{мп}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc}} \quad C_{sc} = \frac{C_{\min} C_{\max}}{C_{\max} - C_{\min}},$$

где  $C_{ox}$  - емкость диэлектрика;  $C_{sc}$  - емкость области пространственного заряда р-п-перехода;

С другой стороны

$$C_{sc} = \frac{\varepsilon_{Si} \varepsilon_0 S}{x_{d\max}} \Rightarrow x_{d\max} = \frac{\varepsilon_{Si} \varepsilon_0 S (C_{\max} - C_{\min})}{C_{\max} C_{\min}}, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon_{Si} = 12$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Максимальная толщина обедненной области  $x_{d\max}$  полупроводника  $n$ -типа, может быть выражена через концентрацию ионизированных доноров  $N_d$ , а для полупроводника  $p$ -типа – через концентрацию ионизированных акцепторов  $N_a$ :

для полупроводника  $n$ -типа

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{st}\varepsilon_0}{qN_d} \cdot 2|\varphi_e|}, \quad (2.8)$$

где  $\varphi_e$ -разница между уровнями Ферми в собственном полупроводнике и в полупроводнике  $n$ -типа,  $\varphi_e = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i}$ ;  $n_i$  - концентрация носителей в собственном полупроводнике,  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;

для полупроводника  $p$ -типа

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{st}\varepsilon_0}{qN_a} \cdot 2|\varphi_e|}, \quad (2.9)$$

где  $\varphi_e$ -разница между уровнями Ферми в собственном полупроводнике и в полупроводнике  $p$ -типа,  $\varphi_e = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$ ;

Итак, для полупроводника  $n$ -типа имеем

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_{st}\varepsilon_0}{qN_d} \cdot \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i}}, \quad (2.10)$$

а для  $p$ -типа

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_{st}\varepsilon_0}{qN_a} \cdot \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}} \quad (2.11)$$

Решая трансцендентные уравнения, можем определить  $N_d$  или  $N_a$  и  $\varphi_b$ . Обычно концентрация примеси в подложке  $N_a$ ,  $N_d \approx 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^3$ .

Найти концентрацию легирующей примеси в подложке можно, перестроив вольт-фарадную характеристику в координатах  $1/C^2$  по оси  $y$  и  $U$  по оси  $x$ , найти  $dC^{-2}/dU$  и по следующей формуле определить  $N(x)$

$$N(x) = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[ \frac{dC^{-2}}{dU} \right]^{-1}. \quad (2.12)$$

Разность работ выхода металл - полупроводник

$$\Phi_{\text{мп}} = \Phi_{\text{м}} - \Phi_{\text{пп}} = \Phi_{\text{Al}} - \Phi_{\text{Si}}, \quad (2.13)$$

где  $\Phi_{\text{мп}}$  - работа выхода из металла,  $\Phi_{\text{Al}} = 4,25$  эВ;  $\Phi_{\text{пп}}$  - работа выхода из полупроводника:

для полупроводника  $p$ -типа

$$\Phi_{\text{пп}} = X_{\text{Si}} + E_g / 2 + |\varphi_a|;$$

для полупроводника  $n$ -типа

$$\Phi_{\text{пп}} = X_{\text{Si}} + E_g / 2 - |\varphi_a|,$$

где  $X_{\text{Si}}$  - электронное сродство полупроводника,  $X_{\text{Si}} = 4,05$  эВ;  $E_g$  - ширина запрещенной зоны,  $E_g = 1,12$  эВ.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение идеальной МДП-структуры.
2. Основные режимы смещения МДП-структуры.
3. Нарисуйте зонные диаграммы идеальных МДП-структур, соответствующие основным режимам.

4. Нарисуйте графики ВФХ на низкой и высокой частотах измерительного сигнала и в импульсном режиме. Поясните понятие глубокого обеднения.

5. Изложите методику нахождения средней (эффективной) концентрации легирующей примеси в подложке.

6. Дайте определение порогового напряжения МДП-структуры.

7. Перечислите компоненты заряда в реальной двуокиси кремния. Поясните их влияние на свойства кремниевых МОП-приборов.

8. Дайте определение напряжения плоских зон МДП-структуры.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** экспериментальное изучение статических вольт-амперных характеристик биполярного транзистора в схемах включения с общим эмиттером и ознакомление с основными статическими параметрами биполярных транзисторов.

**Используемое оборудование и материалы:** установка для исследования полупроводниковых биполярные транзисторы, вольтметры, амперметры.

#### Теоретическая часть

*Транзистором* называется полупроводниковый прибор с двумя электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов. В транзисторе используются оба типа носителей – основные и неосновные, поэтому его называют *биполярным*.

Биполярный транзистор (БТ) состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: *эмиттера*, *базы* и *коллектора* (рис. 3.1, а, б).

Переход, который образуется на границе эмиттер – база, называется эмиттерным, а на границе база – коллектор – коллекторным. В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n*.

Область транзистора, расположенная между переходами, называется *базой* (Б). Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую – так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы.

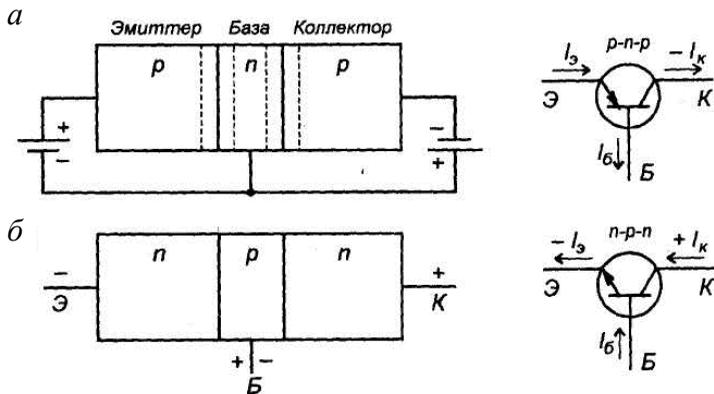


Рис. 3.1. Схематическое изображение биполярного плоскостного транзистора и его условное изображение:  
*а* - *p-n-p*-типа; *б* - *n-p-n*-типа

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а соответствующий переход – эмиттерным.

Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы, называют коллектором (К), а переход – коллекторным.

Принцип работы транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*-типов одинаков, но в транзисторе со структурой типа *p-n-p* основной ток, текущий через базу, создается дырками, инжектируемыми из эмиттера, а в транзисторах со структурой *n-p-n*-типа – электронами. На условных обозначениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода (то есть от «плюса» к «минусу»).

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

- режим *отсечки* – оба *p-n*-перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток;
- режим *насыщения* – оба *p-n*-перехода открыты;
- *активный* режим – один из *p-n*-переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором невозможно. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы. Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном переходе – обратное, то включение транзистора считают *нормальным*, при противоположной полярности – *инверсным*.

Различают три схемы включения транзистора в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов (рис. 3.2): с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). В этих схемах источники постоянного напряжения и резисторы нагрузки обеспечивают режимы работы транзисторов по постоянному току.

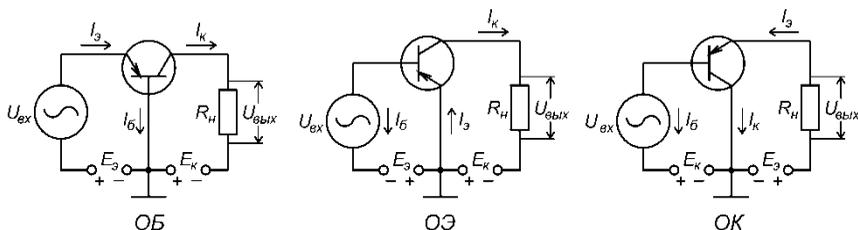


Рис. 3.2. Основные схемы включения транзисторов

Несмотря на то, что в транзисторе имеются три внешних вывода, его можно рассматривать как четырехполюсник. В этом случае транзистор характеризуется четырьмя параметрами: входным напряжением  $U_1$ , током  $I_1$ , выходным напряже-

нием  $U_2$  и током  $I_2$ . Графическое изображение зависимостей между токами и напряжениями называется семейством вольт-амперных характеристик транзистора. Для случая постоянных токов и напряжений это семейство статических характеристик. Для транзистора различают входные и выходные характеристики.

Входные характеристики транзистора  $p-n-p$ -типа в схеме с ОБ определяются зависимостью тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой при постоянном напряжении между коллектором и базой  $I_3 = f(U_{эб})$  при  $U_{кб} = const$  (рис. 3.3, а).

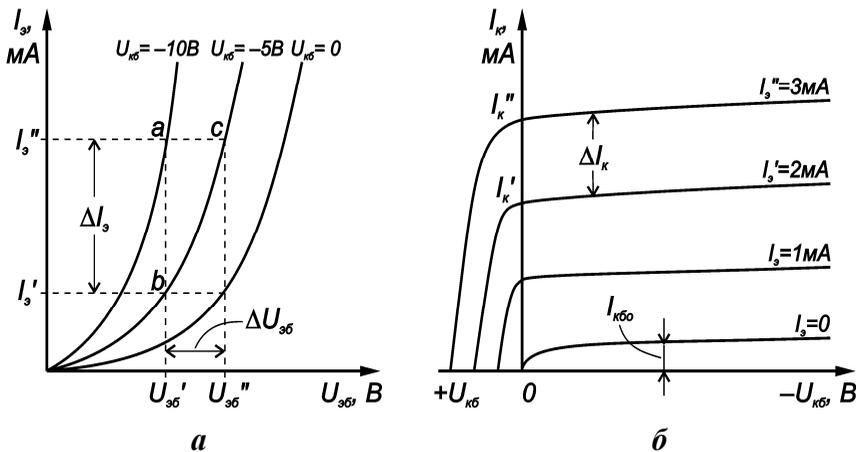


Рис. 3.3. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик  $p-n-p$ -транзистора в схеме с ОБ

При напряжении  $U_{кб} = 0$  вольт-амперная характеристика аналогична характеристике полупроводникового диода при прямом включении. Эмиттерный ток экспоненциально возрастает с увеличением напряжения между эмиттером и базой. Увеличение напряжения коллектор – база (в абсолютном значении) и повышение температуры смещает характеристики в сторону оси ординат (т.е. влево).

Выходные характеристики транзисторов  $p-n-p$ -типа в схеме с ОБ, называемые также коллекторными, определяются зависимостью тока коллектора от напряжения между коллектором и базой при постоянном токе эмиттера  $I_k = f(U_{кб})$  при  $I_э = const$  (рис. 3.3, б). При токе  $I_э = 0$  через коллекторный переход течет обратный ток  $I_{кбо}$ , величина которого слабо зависит от коллекторного напряжения.

С ростом эмиттерного тока растет коллекторный ток, что соответствует принципу действия транзистора. Общий характер этих зависимостей аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики диода, так как коллекторный переход включен в обратном направлении.

На рис. 3.4, а представлены семейства входных характеристик транзистора  $p-n-p$ -типа в схеме с ОЭ  $I_б = f(U_{эб})$  при  $U_{кэ} = const$ . Входным током транзистора при этой схеме включения является ток базы, характеристика которого при напряжении  $U_{кэ} = 0$  идет из начала координат и представляет собой суммарный ток эмиттерного и коллекторного переходов, соединенных параллельно и подключенных к источнику в прямом направлении. При увеличении по абсолютной величине напряжения коллектор–эмиттер входные характеристики сдвигаются вправо, так как с ростом напряжения вероятность рекомбинаций неосновных носителей в области базы уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы и росту коллекторного тока. В справочниках обычно приводятся входные характеристики при  $U_{кэ} = 0$  и  $U_{кэ} = -5$  В. Все остальные характеристики, снятые при  $|U_{кэ}| > 1$  В, незначительно отличаются от характеристики, снятой при  $U_{кэ} = -5$  В.

Коллекторные, т.е. выходные, характеристики транзистора в схеме с ОЭ  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_б = const$  приведены на рис. 3.4, б. Выходные характеристики в схеме с ОЭ имеют больший наклон, чем в схеме с ОБ, то есть наблюдается большая зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе. С ростом базового тока коллекторные характеристи-

ки располагаются выше, так как увеличение базового тока происходит вследствие увеличения тока эмиттера, следовательно, и тока базы. Выходные характеристики транзистора при выборе в качестве параметра тока  $I_{\bar{b}}$  можно описать с помощью уравнения

$$I_{\kappa} = \beta I_{\bar{b}} + I_{\kappa\bar{c}\bar{o}},$$

где  $I_{\kappa\bar{c}\bar{o}}$  – начальный («сквозной») ток, который протекает через структуру при токе  $I_{\bar{b}} = 0$ , т.е. при обрыве в цепи базы.

Так как  $I_{\bar{b}} = (1 - \alpha) I_{\bar{c}} - I_{\kappa\bar{b}\bar{o}}$ , то при  $I_{\bar{b}} = 0$  имеем  $I_{\bar{c}} = I_{\kappa} = I_{\kappa\bar{b}\bar{o}}$ , поэтому получим  $I_{\kappa\bar{c}\bar{o}} = I_{\kappa\bar{b}\bar{o}} / (1 - \alpha) \approx \beta I_{\kappa\bar{b}\bar{o}}$ .

Ток  $I_{\kappa\bar{c}\bar{o}}$  в  $\beta$  раз больше тока  $I_{\kappa\bar{b}\bar{o}}$ , т.е. тепловой ток в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ, что является недостатком схемы с ОЭ по сравнению со схемой с ОБ.

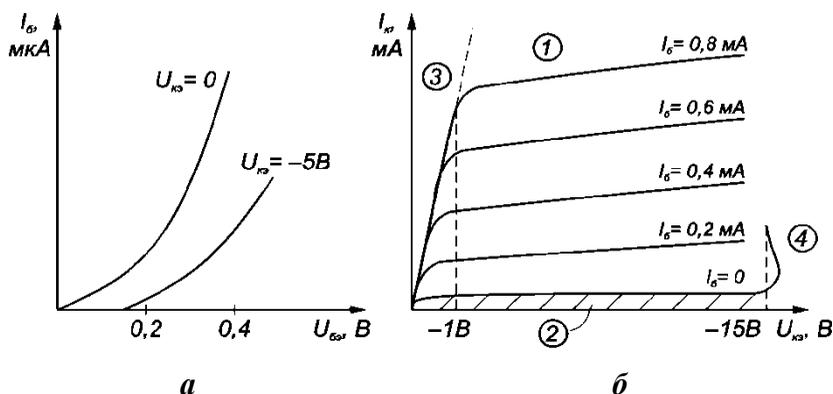


Рис. 3.4. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик  $p-n-p$ -транзистора в схеме с ОЭ

### Экспериментальное задание

Записать типы и марки исследуемых транзисторов. Проанализировать полярности напряжений необходимых для до-

стижения активного прямого режима в схеме включения с общим эмитером.

Для исследования статических характеристик биполярного транзистора в данной лабораторной работе применяются следующие типовые и лабораторные приборы: установка для исследования электронных приборов (рис. 3.5), амперметры и вольтметры или цифровые мультиметры.

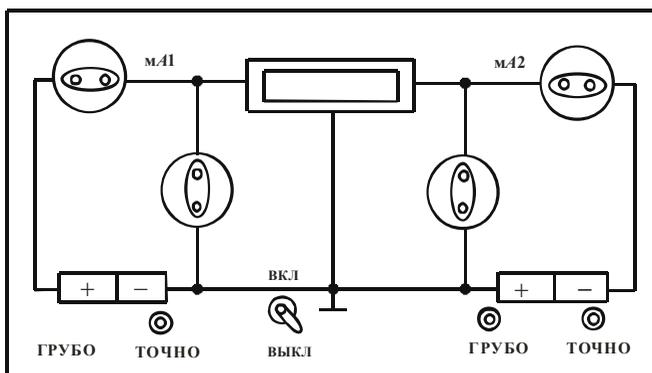


Рис. 3.5. Внешний вид установки для исследования электронных приборов

Исходное положение органов управления установки для исследования электронных приборов (УИЭП):

тумблер ВКЛ-ВЫКЛ - в положении ВЫКЛ;

ручки регулировки напряжения ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей - в крайнем левом положении;

к гнездам «V1» и «mA1» входной цепи подключить мультиметры, обеспечивая требуемые режимы измерения параметров: соответственно гнезда «V» и «┴» - для измерения напряжения, а гнезда «A» и «┴» - для измерения тока;

к гнездам «V2» и «mA2» подключить мультиметры, обеспечивая требуемые режимы измерения параметров: соот-

ответственно гнезда «V» и «L» - для измерения напряжения, а гнезда «A» и «L» - для измерения тока.

1. Снятие входной характеристики БТ в схеме с общим эмиттером.

Для снятия статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, применяется схема исследования, представленная на рис. 3.6. Установить панель с биполярным транзистором, включенным по схеме с ОЭ, в разъем на лицевой панели УИЭП, а контактными колодками «+» «-» обеспечить активный режим работы транзистора.

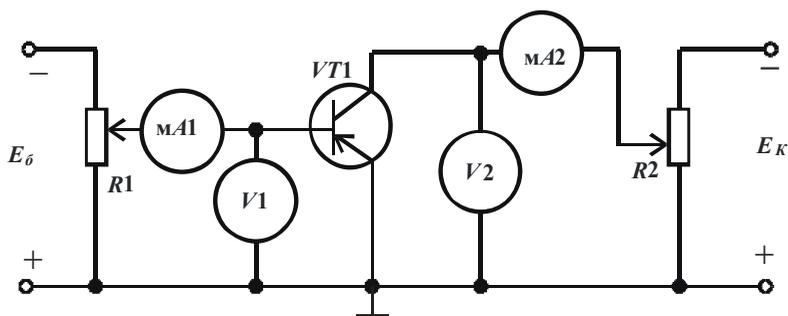


Рис. 3.6. Схема исследования статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Включить УИЭП и, изменяя ток базы  $I_b$  в пределах от 0 до 120 мкА ручкой ТОЧНО (а при необходимости и ручкой ГРУБО) входной цепи, измерить падение напряжения на эмиттерном переходе  $U_{бэ}$  (рекомендуемые значения тока базы указаны в табл. 3.1) при  $U_{кэ} = 0$ .

Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной цепи в исходное положение.

Ручкой регулировки напряжения выходной цепи ТОЧНО (а при необходимости и ручкой ГРУБО) установить на коллекторе  $U_{кэ} = -2$  В и повторить эксперимент. Результаты измерений также занести в табл. 3.1.

Выключить УИЭП и установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей в исходное положение.

По данным табл. 3.1 построить семейство входных характеристик БТ, включенного по схеме с общим эмиттером.

Таблица 3.1

Входные характеристики БТ в схеме с общим эмиттером

Схема с ОЭ	$I_b$ , мкА		0	10	20	40	60	80	100	120
Тип транзистора	$U_{бэ}$ , В	$U_{кэ} = 0$								
		$U_{кэ} = -2$ В								

2. Снятие выходной характеристики БТ в схеме с общим эмиттером.

Установить панель с БТ, включенным по схеме с ОЭ, в разъем на лицевой панели УИЭП, а контактными колодками «+» «-» согласно схеме исследования (рис. 3.6) обеспечить активный режим работы транзистора.

Перевести переключатель режимов работы мультиметра, подключенного к гнездам «mA1», в положение «200 мкА» и обеспечить требуемую полярность.

**ПЕРЕМЫЧКУ В ГНЕЗДА «VI» НЕ УСТАНАВЛИВАТЬ!**

Включить УИЭП установить значение тока базы  $I_b$  и, изменяя напряжение на коллекторе  $U_{кэ}$  в пределах от 0 до 10 В ручкой ТОЧНО (а при необходимости и ручкой ГРУБО) выходной цепи, измерять ток коллектора  $I_k$  (рекомендуемые значения напряжения указаны в табл. 3.2).

Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Установить ручки ГРУБО и ТОЧНО выходной цепи в исходное положение.

Таблица 3.2

Выходные характеристики БТ в схеме с общим эмиттером

Схема с ОЭ	$U_{кэ}, В$		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	...	10
	Тип транзистора	$I_{к}, мА$	$I_{б} = 20мкА$								
$I_{б} = 40мкА$											
$I_{б} = 60мкА$											
$I_{б} = 80мкА$											
$I_{б} = 100мкА$											

Ручкой регулировки напряжения входной цепи ТОЧНО (а при необходимости и ручкой ГРУБО) установить следующее значение тока базы  $I_{б}$  и повторить эксперимент. Результаты измерений также занести в табл. 3.2.

Выключить УИЭП и установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей в исходное положение.

По данным табл. 3.2 построить семейство выходных характеристик БТ, включенного по схеме с общим эмиттером.

### 3. Расчет $h$ - параметров биполярных транзисторов.

Рассчитать три основных  $h$ -параметра биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, по следующим формулам:

- входное сопротивление в схеме с ОЭ

$$h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{б}, \text{ при } U_{кэ} = const ;$$

- выходная проводимость в схеме с ОЭ

$$h_{22} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кэ}, \text{ при } I_{б} = const;$$

коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ ( $\beta$ )

$$h_{21} = \Delta I_{к} / \Delta I_{б}, \text{ при } U_{кэ} = const$$

Параметры  $h_{21}$  и  $h_{22}$  рассчитываются по выходным характеристикам, а параметр  $h_{11}$  - по входным. При этом на характеристиках следует построить так называемый характеристический треугольник, то есть обозначить приращения  $\Delta I$  и  $\Delta U$  на графиках.

В отчете по лабораторной работе привести расчетные формулы и расчеты основных  $h$ -параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

### Контрольные вопросы

1. Что такое транзистор? Какие бывают структуры биполярных транзисторов и их обозначение?
2. Приведите основные схемы включения биполярных транзисторов.
3. Перечислите основные режимы включения биполярного транзистора.
4. Укажите полярности напряжений на входе и выходе транзистора, обеспечивающие заданный режим для  $p-n-p$ - и  $n-p-n$ -транзисторов в схемах включения с общей базой и общим эмиттером.
5. Что называется коэффициентом передачи тока эмиттера и статическим коэффициентом передачи тока базы?
6. По какой схеме нужно включить транзистор, чтобы получить усиление по току?
7. Какая схема включения транзистора дает усиление по напряжению?
8. Какая схема включения транзистора дает усиление по мощности?
9. Нарисуйте входные и выходные ВАХ транзистора в схеме включения с общей базой, укажите области активного режима, насыщения, отсечки.
10. Нарисуйте входные и выходные ВАХ в схеме включения с общим эмиттером, укажите области активного режима, насыщения, отсечки.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** исследование статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, оценка их основных статических параметров.

**Используемое оборудование и материалы:** установка для исследования полупроводниковых приборов, полевые транзисторы с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, МОП-транзисторы, вольтметры, амперметры.

#### Теоретическая часть

**Полевой транзистор** (ПТ) – это полупроводниковый прибор, в котором изменение тока происходит под действием перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом.

Протекание электрического тока в полевых транзисторах обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие транзисторы называют также *униполярными* в отличие от биполярных.

По физическим эффектам, лежащим в основе управления носителями заряда, полевые транзисторы бывают трех видов: с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, с управляющим переходом металл-полупроводник и со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзисторы).

**Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом** – полупроводниковый прибор, в котором ток основных носителей заряда управляется поперечным электрическим полем обратнo смещенного  $p$ - $n$ -перехода (или переходов).

Простейший полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом состоит из полупроводниковой пластины, имеющей электропроводность определенного типа, от концов кото-

рой сделаны два вывода – электроды стока (С) и истока (И), с одним (рис. 4.1, а) или двумя  $p-n$ -переходами (рис 4.1, б) от которых сделан третий вывод – затвор (З).

Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют **истоком**, а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют **стоком**. Условные обозначения даны на рис. 4.1, з, д, а одна из структур выпускаемых промышленностью полевых транзисторов на рис. 4.1, в. Действие этих транзисторов основано на зависимости толщины области пространственного заряда (ОПЗ)  $p-n$ -перехода от приложенного к нему напряжения.

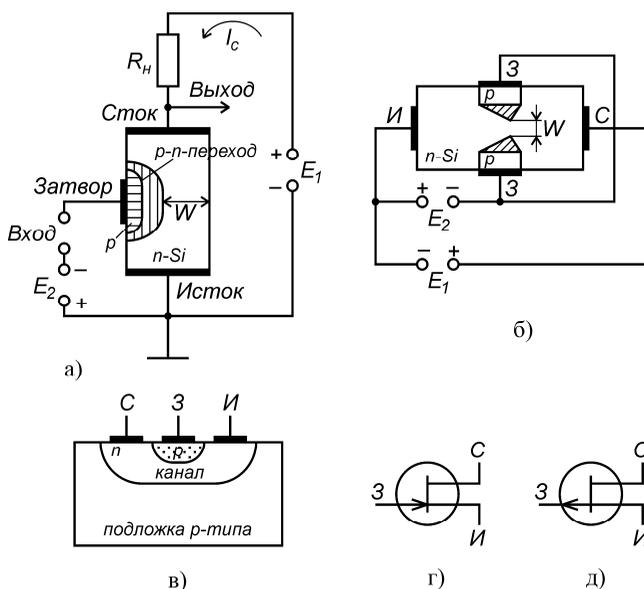


Рис. 4.1. Структура полевого транзистора с одним управляющим  $p-n$ -переходом (а); с двумя управляющими  $p-n$ -переходами (б); типовая структура (в) и условные обозначения транзистора с каналом  $n$ -типа (з) и  $p$ -типа (д)

При включении между истоком и стоком транзистора источника напряжения  $E_1$  (или  $E_{СИ}$ ) по каналу от истока к стоку потечет ток основных носителей (в данном случае – электронов), величина которых определяется приложенным напряжением и сопротивлением канала. Если на затвор транзистора подать напряжение  $E_2$  (или  $E_{ЗИ}$ ) так, чтобы  $p$ - $n$ -переход (или переходы) оказались смещенными в обратном направлении, то переход (переходы) расширяясь, уменьшают ширину канала  $W$ . Уменьшение поперечного сечения канала приводит к увеличению его сопротивления и поэтому к уменьшению протекающего по каналу тока.

Напряжение на затворе, при котором канал полностью перекрывается и ток через него практически прекращается, называют **напряжением отсечки**  $U_{отс}$ . При этом напряжении остаются лишь токи утечки.

Зависимость тока стока  $I_C$  от напряжения стока  $U_{СИ}$  при постоянном напряжении на затворе ( $U_{ЗИ} = \text{const}$ ) определяется стоковой характеристикой (рис. 4.2). Ширина  $p$ - $n$ -перехода зависит также от тока, протекающего через канал.

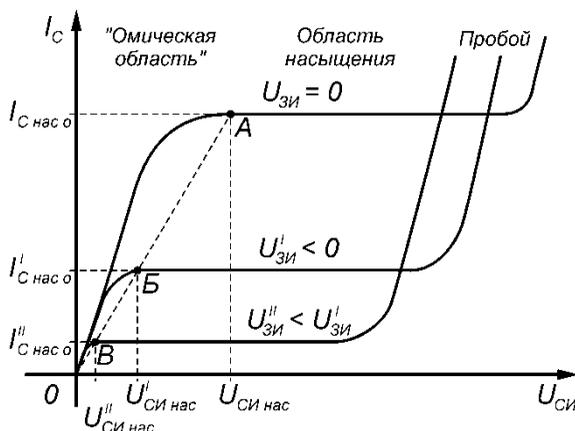


Рис. 4.2. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом

Если затвор закорочен с истоком ( $U_{зи} = 0$ ), а на сток подается положительное относительно истока напряжение, то падение напряжения в канале при протекании по нему потока электронов приводит к тому, что ширина  $p$ - $n$ -перехода увеличивается в направлении от истока к стоку, а ширина токопроводящего канала  $W$  соответственно уменьшается, т.е. ширина обедненного слоя в канале не одинакова по длине канала.

При увеличении напряжения стока  $U_{си}$  (при  $U_{зи} = 0$ ) увеличивается поток электронов к стоку, т.е. происходит рост тока стока  $I_C$ . Но это в свою очередь приводит к увеличению падения напряжения в канале, расширению обедненной носителями области  $p$ - $n$ -переходов, дальнейшему сужению канала и росту его сопротивления. В итоге рост тока  $I_C$  с увеличением напряжения  $U_{си}$  вначале замедляется, а затем практически прекращается. Дальнейшее повышение напряжения на стоке уже не приводит к росту тока  $I_C$ , т.к. одновременно с повышением  $U_{си}$  увеличивается и сопротивление канала, наступает своеобразное равновесие, при котором увеличение  $U_{си}$  и рост тока  $I_C$  вызывают дальнейшее сужение канала и соответственно уменьшение тока  $I_C$ . В результате этот ток остается практически постоянным. Напряжение, при котором наступает режим насыщения, называется **напряжением насыщения**. Оно, как видно из рис. 4.2, меняется при изменении напряжения на затворе. Область, в которой ток  $I_C$  существенно зависит от напряжения на стоке  $U_{си}$  (слева от пунктирной линии АБВ, рис. 4.2), называется **омической областью**; правая область, в которой ток  $I_C$  остается практически неизменным – **областью насыщения**.

Характеристики передачи полевого транзистора представляют собой зависимости тока стока от напряжения на затворе при различных постоянных напряжениях на стоке (рис. 4.3).

Одним из основных параметров полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом является **крутизна передаточ-**

*ной характеристики* определяющая эффективность изменения тока в цепи стока при изменении напряжения на затворе.

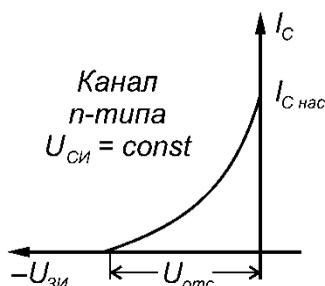


Рис. 4.3. Статическая характеристика передачи полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} \quad (4.1)$$

Максимальные значения крутизны характеристики при  $U_{ЗИ} = 0$  в реальных транзисторах равно порядка 20 мА/В.

К параметрам таких транзисторов относятся также *напряжение отсечки*  $U_{отс}$ ; *ток насыщения стока*  $I_{С нас}$  при  $U_{ЗИ} = 0$ ; *емкости*  $C_{СИ}$  и  $C_{ЗИ}$ ; *сопротивление транзистора в омической области*  $R_o$ , определяемое наклоном стоковой характеристики; *внутренне сопротивление*

$$R_i = dU_C / dI_C, \quad (4.2)$$

определяемое в области насыщения при различных напряжениях на затворе  $U_{ЗИ}$ ; а также *границная частота*.

Схемы включения полевых транзисторов определяются по электроду, общему для входной и выходной цепей. Различают схемы включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ). Схема включения с общим

истокком (соответствует схеме включения с общим эмиттером для биполярных транзисторов) характеризуется наибольшим усилением по мощности и напряжению по сравнению с другими схемами включения.

У МДП-транзисторов в отличие от полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод от кристалла, на котором выполнен прибор, называемый подложкой (рис. 4.4).

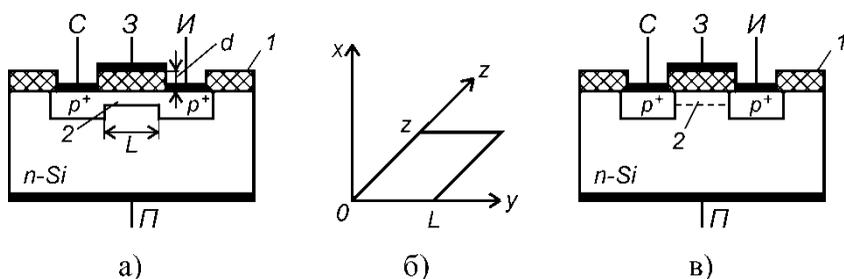


Рис. 4.4. МДП-транзистор с каналом  $p$ -типа: *а* – планарный транзистор со встроенным каналом; *б* – геометрические размеры канала; *в* – планарный транзистор с индуцированным каналом; 1 – диэлектрик; 2 – канал

В этих транзисторах управляющий электрод, т.е. – затвор, отделен от канала тонким слоем диэлектрика (0,05 – 0,20 мкм) и допускает приложения напряжения любой полярности. Если в качестве диэлектрика применен оксид кремния, то эти транзисторы называются МОП-транзисторы (т.е. со структурой металл–оксид–полупроводник).

МДП-транзисторы по способу образования канала подразделяются на транзисторы со встроенным каналом, (канал создается при изготовлении) и с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам). Важными параметрами МДП-транзистора являются длина канала  $L$  (обычно 0,1 – 5 мкм),

ширина канала  $z$  (на рис. 4.4,  $\bar{b}$ ), толщина диэлектрика (изолятора)  $d$  с диэлектрической постоянной  $\varepsilon_i$  и проводимость канала.

Физической основой работы полевого транзистора со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) является эффект поля. В полевых приборах с МДП-структурой внешнее поле обусловлено приложенным напряжением на металлический электрод – затвор. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения присутствуют четыре состояния области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника – обогащение, обеднение, слабая и сильная инверсия.

Полевые транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии, т.е. в том случае, когда инверсионный канал между истоком и стоком отделен от объема подложки слоем обеднения.

В области инверсии концентрация неосновных носителей заряда в канале выше, чем концентрация основных носителей в объеме полупроводника. Изменяя величину напряжения на затворе, можно менять концентрацию свободных носителей в инверсионном канале и тем самым модулировать сопротивление канала. Источник напряжения в стоковой цепи вызовет изменяющийся в соответствии с изменением сопротивления канала ток стока и тем самым будет реализован эффект усиления. Таким образом, МДП-транзистор является сопротивлением, регулируемым внешним напряжением.

МДП-транзисторы могут быть с  $p$ - и  $n$ -каналами. Условные графические обозначения МДП-транзисторов показаны на рис. 4.5. Стрелка во внутрь круга указывает на  $n$ -тип канала; стрелка из круга на канал  $p$ -типа.

МДП-транзисторы характеризуются в основном теми же параметрами, что и полевые транзисторы с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Основные параметры МДП-транзисторов и их ориентировочные значения следующие:

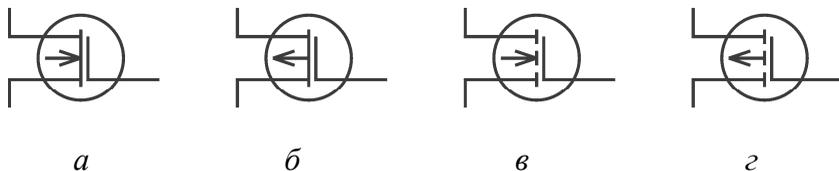


Рис. 4.5. Условные графические обозначения  
МДП-транзисторов со встроенным каналом (а, б)  
и с индуцированным каналом (в, з)

а) **крутизна характеристики**  $S = dI_C / dU_{ЗИ}$  при  $U_{СИ} = \text{const}$ . Обычно  $S = 0,1 - 500$  мА/В;

б) **начальный ток стока**  $I_{C \text{ нач}}$  – ток стока при нулевом напряжении  $U_{ЗИ}$  у транзисторов со встроенным каналом  $I_{C \text{ нач}} = 0,1 - 100$  мА; с индуцированным каналом  $I_{C \text{ нач}} = 0,01 - 0,5$  мкА;

в) **напряжение отсечки**  $U_{ЗИ \text{ отс}}$ . Обычно  $U_{ЗИ \text{ отс}} = 0,2 - 10$  В;

г) **пороговое напряжение**  $U_{ЗИ \text{ пор}}$ . Обычно  $U_{ЗИ \text{ пор}} = 1 - 6$  В;

д) **сопротивление сток–исток в открытом состоянии**  $R_{СИ \text{ отк}}$ ,  $R_{СИ \text{ отк}} = 2 - 200$  Ом;

е) **максимальный ток стока**  $I_{C \text{ макс}}$ . Обычно имеет величину от 10 мА до 0,2 А;

ж) **максимальная частота усиления**  $f_{\text{макс}}$  – частота, на которой коэффициент усиления по мощности  $K_P$  равен единице; величина  $f_{\text{макс}}$  – десятки – сотни МГц.

Устройство транзистора с встроенным  $p$ -каналом схематично представлено на рис. 4.4, а. Основой является пластина слаболегированного кремния с электропроводностью  $n$ -типа. Области стока и истока обладают электропроводностью  $p^+$ -типа и соединены узкой слаболегированной областью кремния с электропроводностью  $p$ -типа, являющейся встроенным каналом. Затвор представляет собой металлический слой, изолированный от канала тонким диэлектриком толщиной  $d$ . В

транзисторе со встроенным каналом происходит расширение или сужение имеющегося канала в результате приложения отрицательного или положительного напряжения соответственно. При положительном напряжении на затворе дырки отесняются из области канала в объем полупроводника. Канал обедняется носителями заряда, сужается к стоку. При подаче на затвор отрицательного напряжения происходит обогащения дырками объема канала, он расширяется и его проводимость возрастает. Таким образом, изменяя напряжение на затворе, можно изменять проводимость канала, т.е. ток, проходящий через этот канал.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе (рис. 4.6). Для прекращения его необходимо к затвору приложить положительное напряжение (для транзистора с каналом  $p$ -типа), равное напряжению  $U_{ЗИ\text{ отс}}$ . При приложении отрицательного напряжения канал расширяется и ток увеличивается.

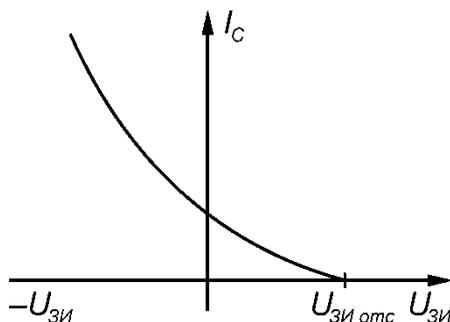


Рис. 4.6. Стокзатворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

Выходные характеристики МДП-транзисторов аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (рис. 4.7). В них можно выделить крутую (I) и пологую области (II), а также область пробоя (III).

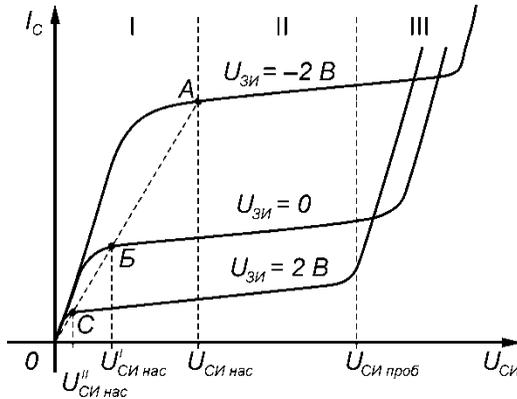


Рис. 4.7. Выходные характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом  $p$ -типа: I – крутая, или «омическая», область; II – пологая или насыщенная область; III – область пробоя

В области I транзистор может работать как электрически управляемое сопротивление. Пологая область II обычно используется при построении усилительных каскадов. При увеличении напряжения  $U_{СИ}$  ширина канала уменьшается вследствие подъема на нем напряжения и изменения результирующего электрического поля. Это особенно сильно проявляется в той части канала, которая находится вблизи стока.

При напряжении  $U_{СИ нас}$  канал вблизи стока становится настолько узким, что наступает динамическое равновесие, когда увеличение напряжения  $U_{СИ}$  вызывает уменьшение ширины канала и повышение его сопротивления. В итоге значение тока  $I_C$  достигает насыщения при увеличении напряжения  $U_{СИ}$ .

Структура МДП - транзистора с индуцированным  $p$ -каналом показана на рис. 4.4, в. В качестве исходного материала транзистора использован кремний  $n$ -типа. Чаще всего диэлектриком является оксид кремния  $\text{SiO}_2$ . В оксиде кремния всегда содержится положительно заряженные ионы натрия,

калия, водорода, осаждаемые на поверхность кремния в процессе выполнения технологических операций. Положительный заряд в пленке оксида кремния наводит (индуцирует) у поверхности  $n$ -области слой, в котором концентрация электронов выше, чем в объеме  $n$ -области. При подаче на затвор отрицательного напряжения  $U_{зи}$  электроны поверхностного слоя отталкиваются в глубь полупроводника, а дырки движутся к поверхности. Приповерхностный слой приобретает дырочную электропроводность, т.е. появляется тонкий инверсный слой, соединяющий сток с истоком, который играет роль канала. Толщина индуцированного канала составляет всего 1 – 5 нм. При приложении напряжения между истоком и стоком дырки, перемещаясь по каналу, создают ток стока. Изменяя напряжение на затворе, можно расширять или сужать канал, увеличивая или уменьшая ток стока.

Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называют **пороговым напряжением**  $U_{зи\ пор}$  (рис. 4.8, а).

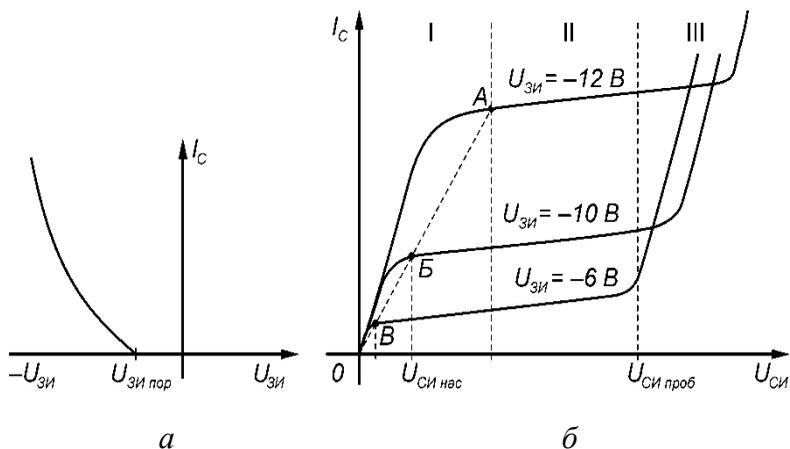


Рис. 4.8. Стокозатворные (а) и выходные (б) характеристики МДП-транзисторов с индуцированным  $p$ -каналом

Вид выходных характеристик этих транзисторов (рис. 4.8, б) аналогичен выходным характеристикам МДП-транзисторов со встроенным  $p$ -каналом. Разница состоит в том, что напряжение затвор-исток всегда отрицательное, т.е.  $U_{зи} < 0$ . Наблюдаются те же три области: омическая, насыщения и пробоя.

### Экспериментальное задание

Записать типы и марки исследуемых транзисторов. Проанализировать полярности напряжений при включения транзисторов по схеме с общим истоком.

Для исследования статических характеристик полевого транзистора в данной лабораторной работе применяются те же типовые и лабораторные приборы, что и в лабораторной работе № 3: установка для исследования электронных приборов, вольтметры и амперметры.

Подготовка приборов к работе. Исходное положение органов управления установки для исследования электронных приборов (УИЭП):

тумблер ВКЛ-ВЫКЛ - в положении ВЫКЛ;

ручки регулировки напряжения ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей - в крайнем левом положении;

к гнездам «V2» и «mA2» выходной цепи подключить цифровые вольтметры, обеспечивая требуемые режимы измерения параметров: соответственно гнезда «V» и «└» - для измерения напряжения, а гнезда «A» и «└» - для измерения тока;

к гнездам «V1» подключить вольтметр, обеспечив режим измерения постоянного напряжения 2 В;

в гнезда «mA1» установить перемычку.

1. Измерение основных параметров полевых транзисторов. Для снятия статических характеристик ПТ с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа, включенного по схеме с общим истоком, применяется схема исследования, представленная на рис. 4.9. Установить панель с полевым транзистором

в разъем на лицевой панели УИЭП, а контактными колодками «+» и «-» обеспечить требуемое включение транзистора.

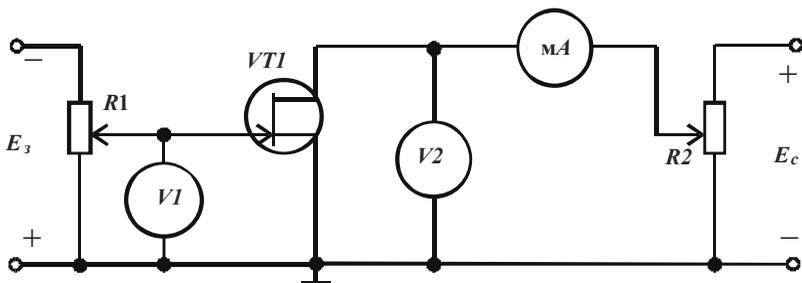


Рис. 4.9. Схема исследования статических характеристик полевого транзистора с управляющим  $p - n$  переходом и каналом  $n$  – типа

Переключатель режимов работы вольтметра, подключенного к гнездам, «V2» перевести в положение 20 В, а переключатель режимов работы амперметра, подключенного к гнездам «МА2», перевести в положение 20 мА.

Включить УИЭП и ручками ГРУБО и ТОЧНО выходной цепи установить напряжение на стоке  $U_{си} = 5$  В.

Ручки ГРУБО и ТОЧНО входной цепи должны оставаться в крайнем левом положении, т.е.  $U_{зи} = 0$  В.

Измерить значение начального тока стока  $I_c = I_{c0}$  и результат измерения занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

### Основные параметры полевых транзисторов

Тип транзистора	Значение параметров		
	$I_{c0}$ , мА	$U_{отс}$ , В	$S$ , мА/В
	измеренное		
	справочное		

Напряжение отсечки  $U_{отс}$  полевого транзистора - это напряжение, при котором  $I_c$  практически равен нулю (в справочной литературе обычно принимают  $I_c < 10$  мкА). Поэтому для определения  $U_{отс}$  необходимо увеличивать напряжение на затворе  $U_3$  до такого значения, при котором ток стока уменьшится до значения 10 мкА, то есть ток стока будет равным  $I_c = 0,01$  мА. (Если напряжение отсечки более 2 В то установить предел измерения напряжения 20 В)

Полученное значение напряжения на затворе  $U_{зи} = U_{отс}$  занести также в табл. 4.1.

Выключить УИЭП и установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей в исходное (крайнее левое) положение.

(Измеренное значение крутизны передаточной характеристики  $S$  занести в табл. 4.1 после ее расчета в пункте 4).

Для сравнительного анализа измеренных и справочных параметров исследуемого полевого транзистора из табл. 4.2 выписать необходимые справочные данные для данного типа транзистора ( $I_{co}$ ,  $U_{отс}$  и  $S$ ) в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Справочные параметры исследуемых  
полевых транзисторов

Тип транзистора	$I_{co}$ , мА при $U_{си} = 5В$	$U_{отс}$ , В при $I_c = 10$ мкА	$S$ , мА/В при $U_{си} = 5 В$
КП303А	0,5...2,5	0,5...3	1...4
КП303В	1,5...5	1...4	2...5
КП303Г	3...12	$\leq 8$	3...7
КП303Е	5...20	$\leq 8$	$\geq 4$
КП303И	1,5...5	1...3	2...6

В выводах по лабораторной работе провести сравнительный анализ измеренных и рассчитанных основных параметров исследуемого полевого транзистора со справочными.

2. Исследование передаточной характеристики ПТ, включенного по схеме с общим истоком.

Для снятия передаточных характеристик полевого транзистора необходимо изменять напряжение на затворе в пределах от В и отсчитывать при этом значения тока стока  $I_c$  по прибору «МА2». Перед началом эксперимента в диапазоне напряжений  $U_{отс} \dots 0$  целесообразно выбрать 5 - 6 значений  $U_{зи}$ , удобных для установки по шкале вольтметра «V1» и занести их в табл. 4.3.

Например: для  $U_{отс} = 2,7$  В следует задавать следующие значения  $U_{зи}$ : 2,7; 2,5; 2; 1,5; 1; 0,5 и 0 В.

Включить УИЭП и по вольтметру «V2» установить  $U_{си} = 5$  В. Изменяя напряжение на затворе  $U_{зи}$  в соответствии с выбранными значениями, отсчитать значения тока стока  $I_c$  и занести их в табл. 4.3.

Установить напряжение на стоке  $U_{си} = 2$  В. и повторить эксперимент.

Результаты измерений также занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Исследование передаточной характеристики ПТ

$U_{зи}, \text{В}$		$U_{отс} =$								0
$I_c, \text{мА}$	$U_{си} = 5 \text{ В}$									
	$U_{си} = 2 \text{ В}$									

Выключить УИЭП и установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей в исходное (крайнее левое) положение.

По результатам табл. 4.3 построить семейство передаточных характеристик полевого транзистора.

3. Исследование выходной характеристики ПТ, включенного по схеме с общим истоком.

Для снятия выходных характеристик полевого транзистора необходимо изменять напряжение на стоке  $U_{си}$  в пределах от 0 до 5 В и отсчитывать при этом значения тока стока  $I_c$ .

Рекомендуемые значения  $U_{си}$ : 0; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4 и 5 В.

Включить УИЭП и установить напряжение на затворе  $U_{зи} = 5$  В.

Изменяя  $U_{си}$  в соответствии с выбранными значениями, отсчитать значения тока стока  $I_c$  и занести их в табл. 4.4.

Установить напряжение на затворе  $U_{зи} = 0,5U_{отс}$  и повторить эксперимент (устанавливаемое на затворе напряжение при необходимости следует округлить). Результаты измерений занести в табл. 4.4.

Выключить УИЭП и установить ручки ГРУБО и ТОЧНО входной и выходной цепей в исходное (крайнее левое) положение.

По результатам таблицы 4.4 построить семейство выходных характеристик исследуемого полевого транзистора.

Таблица 4.4

#### Исследование выходной характеристики ПТ

		$U_{си}, \text{В}$							
$I_c, \text{мА}$	$U_{зи} = 0 \text{ В}$								
	$U_{зи} = 0,5U_{отс}$								

4. Расчет дифференциальных параметров полевых транзисторов.

По экспериментально построенным статическим характеристикам или по табл. 4.3 - 4.4 рассчитать следующие дифференциальные параметры.

Крутизну передаточной характеристики  $S$ :

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}, \text{ при } U_{си} = const.$$

Выходное (внутреннее) сопротивление  $R_i$

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c}, \text{ при } U_{зи} = const.$$

Коэффициент усиления  $\mu$ :

$$\mu = S R_i.$$

Крутизна  $S$  рассчитывается по передаточной характеристике при  $U_{си} = 5$  В. Приращение  $\Delta U_{зи}$  необходимо выбирать на линейном участке характеристики в следующих пределах:  $\Delta U_{зи} = 0,5$  В или  $\Delta U_{зи} = 1$  В

Выходное (внутреннее) сопротивление  $R_i$  рассчитывается по выходной характеристике при  $U_{зи} = 0$  В. Приращение  $\Delta U_{си}$  необходимо выбирать на линейном участке характеристики в следующих пределах:  $\Delta U_{си} = 1$  В или  $\Delta U_{си} = 2$  В.

Рассчитанное значение крутизны  $S$  занести в табл. 4.1.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы полевых транзисторов.
2. Нарисуйте устройство ПТУП. В чем его сходство и отличие от полевого транзистора Шоттки?
3. Нарисуйте и объясните выходную ВАХ ПТУП в схеме с общим истоком.

4. Нарисуйте и объясните передаточную ВАХ ПТУП в схеме с общим истоком и приведите выражение для ее крутизны.

5. Дайте классификацию основных типов МДП-транзисторов и нарисуйте для них схематически разрезы структур.

6. Нарисуйте и объясните выходные ВАХ МДП-транзистора с  $n$ - и  $p$ -каналами в схеме с общим истоком.

7. Нарисуйте и объясните передаточные ВАХ МДП-транзистора с индуцированным и встроенным  $n$ - каналами. В чем разница между ними?

8. Дайте определение и запишите выражение для крутизны ВАХ МДП-транзистора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов [Текст]: в 2-х кн / С. Зи; пер. с англ. - М.: Мир, 1984.
2. Крутякова М.Г. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования [Текст] / М.Г. Крутякова, Н.А. Чарыков, В.В. Юдин. М.: Радио и связь, 1983. 352 с.
3. Маллер Р. Элементы интегральных схем [Текст] /Р. Маллер, Т. Кейминс. М.: Мир, 1989. 630 с.
4. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника [Текст] / Л. Росадо. М.: Высш. шк., 1991. 351 с.
5. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы [Текст]: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб.: Лань, 2003. 480 с.
6. Свистова Т.В. Приборы твердотельной электроники [Текст]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 294 с.
7. Свистова Т.В. Твердотельная электроника [Текст]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 1. 193 с.
8. Свистова Т.В. Твердотельная электроника [Текст]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 2. 173 с.
9. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
Организация и проведение лабораторных работ	2
Лабораторная работа № 1	5
Лабораторная работа № 2	18
Лабораторная работа № 3	34
Лабораторная работа № 4	45
Библиографический список	63

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Физические основы электроники»  
для студентов направления подготовки бакалавров  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,  
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
очной формы обучения  
Часть 2

Составитель  
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 17.05.2016  
Уч.-изд. л. 3,9

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14