

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
дневной формы обучения*

**ОСНОВЫ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**



Могилев 2018

УДК 621.38 : 53
ББК 32.85 : 22.3
Ф 50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой физики «З» апреля 2018 г., протокол № 8

Составители: д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ляпин;
ст. преподаватель В. В. Глущенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

В методических рекомендациях приводятся основы физики полупроводниковых приборов, описание лабораторных установок, рассматривается принцип их действия, излагается порядок выполнения лабораторных работ по изучаемому курсу.

Учебно-методическое издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2018



Содержание

Инструкция по охране труда при работе в лаборатории.....	4
1 Общие сведения к лабораторным работам № 2.1–2.3.....	5
2 Лабораторная работа № 2.1. Исследование вольт-амперной характеристики p – n -переходов с различной шириной запрещенной зоны полупроводника.....	18
3 Лабораторная работа № 2.2. Исследование влияния температуры на вольт-амперную характеристику p – n -перехода.....	20
4 Лабораторная работа № 2.3. Исследование обратной ветви вольт-амперной характеристики p – n -переходов с различной шириной запрещенной зоны полупроводника.....	24
5 Лабораторная работа № 2.4. Исследование проводимости МДП-структур.....	26
Список литературы.....	39



Инструкция по охране труда при работе в лаборатории

1 К работе в учебной лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда с соответствующей записью в протоколе проверки знаний по мерам безопасности.

2 В учебную лабораторию запрещено входить в верхней одежде.

3 Для работы приборов используется напряжение 220 В, представляющее опасность для жизни, что требует повышенного внимания и обязательного выполнения правил и норм охраны труда.

4 Перед началом проведения лабораторной работы студенту необходимо внимательно осмотреть приборы и оборудование на рабочем столе: нет ли механических повреждений, оголенных или оборванных проводов; проверить наличие заземления на приборах. О неисправностях сообщить преподавателю или лаборанту.

5 Электрическая схема студентом собирается при отключенных приборах и оборудовании от электрической сети. Собранный электрическую схему обязательно должен проверить преподаватель. Перед включением источника постоянного тока в сеть проверить, находятся ли их «регулировки выхода» в положении, соответствующем минимальному выходному напряжению.

6 Приступать к выполнению лабораторной работы можно только с разрешения преподавателя. После подключения к схеме источников напряжения никаких переключений в схеме не производить. Не прикасаться руками к точкам установки, которые могут оказаться под напряжением.

7 При проведении работы необходимо быть внимательным и при резких отклонениях в показаниях приборов, появлении характерного запаха, искрения нужно отключить приборы и сообщить преподавателю.

8 Не оставлять без присмотра приборы, устройства и оборудование, включенные в электрическую сеть.

9 В случае возгорания электрических проводов или приборов необходимо их немедленно обесточить и сообщить преподавателю или лаборанту.

10 При снятии температурных зависимостей следует соблюдать осторожность с термокамерой, температура которой может достигать 100 °С.

11 В случае поражения работающего электрическим током необходимо:

- немедленно отключить оборудование;
- освободить пострадавшего от токоведущих частей;
- уложить пострадавшего;
- проверить у пострадавшего наличие дыхания;
- убедиться в наличии пульса;
- при необходимости приступить к искусственному дыханию, вызвать

врача скорой помощи по тел. 103.

12 По окончании лабораторной работы необходимо отключить электрические приборы, навести порядок на своём рабочем месте.



1 Общие сведения к лабораторным работам № 2.1–2.3

1.1 Контакт двух полупроводников *p*- и *n*-типа

Переход между двумя областями полупроводника с различным типом электропроводности называют электронно-дырочным или *p–n*-переходом. Электронно-дырочный переход, у которого $p_p \approx n_n$, называют **симметричным**. Если концентрации основных носителей заряда в областях *p* и *n* различны ($n_n \gg p_p$ или $p_p \gg n_n$) и отличаются в 100...1000 раз, то такие переходы называют **несимметричными**. На практике для изготовления полупроводниковых приборов используют несимметричные *p–n*-переходы. Данный переход обладает выпрямительными свойствами.

1.2 Параметры и характеристики несимметричного *p–n*-перехода

Рассмотрим переход между двумя областями полупроводника (рисунок 1.1, *а*), где концентрация дырок в *p*-области намного выше концентрации электронов в *n*-области. Если основные носители в двух областях связаны между собой отношением $p_p \gg n_n$, то и для неосновных носителей выполняется неравенство $n_p \ll p_n$ (рисунок 1.1, *б*).

Поскольку концентрация дырок в *p*-области значительно больше, чем в *n*-области, а концентрация электронов в *n*-области значительно больше, чем в *p*-области, то на границе двух областей *p* и *n* возникают градиенты концентрации электронов и дырок (см. рисунок 1.1, *б*). Они являются причиной диффузии дырок из *p*-области в *n*-область, а электронов из *n*-области в *p*-область.

Плотность суммарного диффузионного тока, направление которого совпадает с направлением движения дырок, определяется двумя составляющими:

$$j_{\text{диф}} = j_{\text{диф } n} + j_{\text{диф } p} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.1)$$

где D_p, D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов;

q – заряд электрона.

Для кремния $D_n = 38 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p = 13 \text{ см}^2/\text{с}$, а для германия $D_n = 93 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p = 44 \text{ см}^2/\text{с}$.

В формуле (1.1) знак «минус» перед дырочной составляющей плотности тока появляется потому, что дырки, как и электроны, движутся против вектора градиента концентрации, но имеют положительный заряд. Электроны имеют отрицательный заряд, поэтому «минус» перед электронной составляющей диффузионного тока исчезает.

Диффузионный перенос носителей заряда нарушает электрическую нейтральность прилегающих к границе частей кристалла полупроводника. В *p*-области вследствие ухода дырок остается нескомпенсированный **отрицательный заряд неподвижных ионов акцепторных примесей**, а в *n*-области из-за ухода электронов остается нескомпенсированный **положительный заряд**



неподвижных ионов донорной примеси (рисунок 1.1, в). Таким образом, на границе двух полупроводников образуется слой, обедненный подвижными носителями заряда, т. е. слой с высоким сопротивлением. Его и принято называть ***p-n-переходом***. За пределами *p-n*-перехода все заряды взаимно компенсируют друг друга, и полупроводник остается электрически нейтральным.

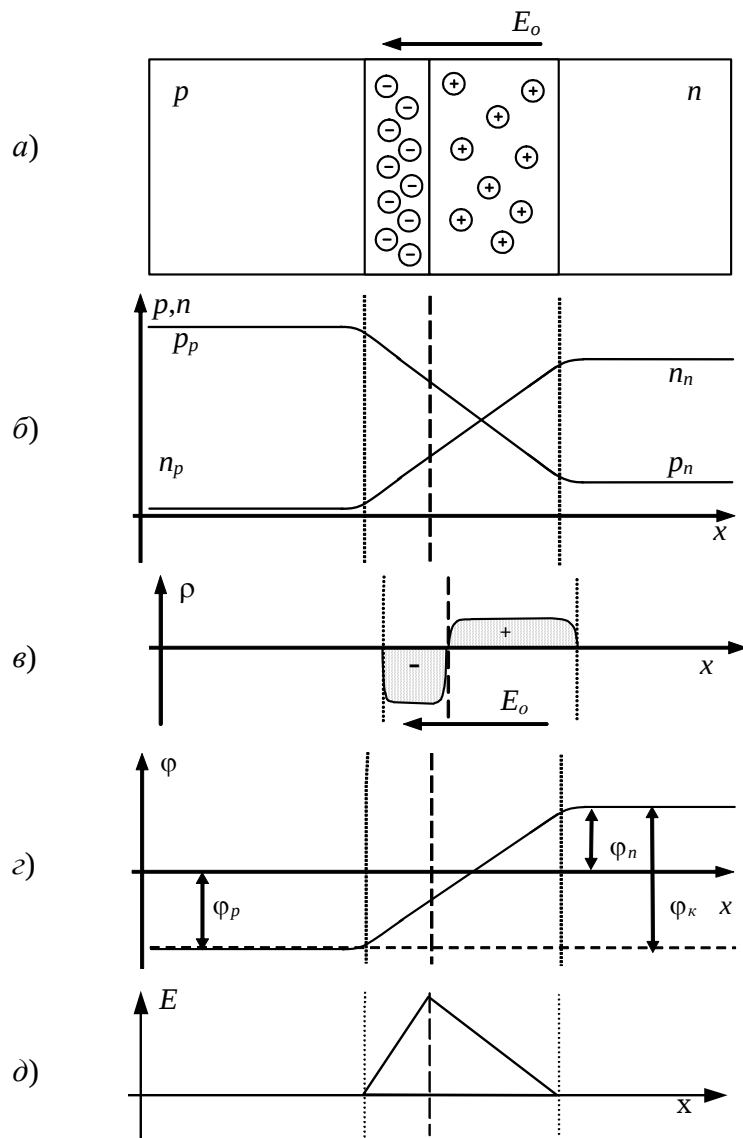


Рисунок 1.1 – Характеристики *p-n*-перехода

Между образовавшимися зарядами возникает **контактная разность потенциалов** $\varphi_k = \varphi_n - \varphi_p$ и **электрическое поле** E_0 , направленное от *n*-области к *p*-области (рисунок 1.1 г, д). Электрическое поле препятствует движению основных носителей заряда через переход. Однако это же поле является ускоряющим для неосновных носителей – дырок из *n*-области и электронов из *p*-области, и в поле напряженности E_0 происходит их дрейф.

Плотность дрейфового тока

$$j_{dp} = j_{dpp} + j_{dnp} = q(p_n \mu_p E + n_p \mu_n E), \quad (1.2)$$

где μ_p, μ_n – подвижности дырок и электронов.

Для германия $\mu_p = 1900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_n = 3900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, для кремния $\mu_p = 430 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_n = 1350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Перемещение неосновных носителей приводит к уменьшению объемного заряда и электрического поля p – n -перехода. Как следствие, имеет место дополнительная диффузия основных носителей, в результате чего электрическое поле принимает исходное значение. При равенстве потоков основных и неосновных носителей заряда наступает динамическое равновесие и суммарная плотность токов равна нулю:

$$j_{\text{диф}} + j_{\text{др}} = 0.$$

Контактная разность потенциалов в p – n -переходе $\varphi_k = \varphi_n - \varphi_p$ в первом приближении может быть рассчитана по формуле

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \quad (1.3)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура;

N_a, N_d – концентрация акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно;

p_p, p_n – концентрация дырок в p - и n -областях;

n_i – собственная концентрация полупроводника.

Из анализа формулы (1.3) можно сделать следующие выводы:

– контактная разность потенциалов зависит от типа полупроводника (в знаменателе формулы присутствует n_i^2). Поскольку концентрация пар электрон-дырка в собственном полупроводнике n_i зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника, то чем шире запрещенная зона полупроводника, тем меньше n_i и выше контактная разность потенциалов;

– контактная разность потенциалов тем выше, чем выше концентрация примесей в p - и n -областях, т. к. в этом случае увеличиваются объемные заряды по обе стороны от перехода и напряженность электрического поля;

– контактная разность потенциалов зависит от температуры. Хотя в формуле (1.3) имеется прямая зависимость φ_k от температуры T , но значительно сильнее ее влияние проявляется через механизм воздействия на концентрацию носителей в собственном полупроводнике: чем выше температура, тем больше n_i и ниже φ_k .

Значения контактной разности потенциалов для наиболее распространенных полупроводниковых материалов приведены в таблице 1.1.

Толщину p – n -перехода δ можно определить по формуле

$$\delta = \delta_p + \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \varphi_k}, \quad (1.4)$$

где δ_p, δ_n – толщина перехода в областях p и n соответственно;

N_a, N_d – концентрации примесей в p - и n - областях;

ε и ε_o – диэлектрическая проницаемость полупроводника и воздуха соответственно.

Таблица 1.1 – Контактная разность потенциалов для ряда материалов

Полупроводник	$\varphi_k, \text{В}$
Ge	0,3...0,4
Si	0,7...0,8
GaAs	1

Из формулы (1.4) следует, что толщина p – n -перехода зависит от концентрации примесей в p - и n -областях. В случае рассматриваемого несимметричного p – n -перехода $N_a \gg N_d$ и $1/N_a \approx 0$ формула принимает следующий вид:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_o}{q} \frac{\varphi_k}{N_d}}.$$

Что еще раз подтверждает положение о том, что p – n -переход практически полностью располагается в слабо легированной области полупроводника.

В реальных полупроводниковых приборах толщина p – n -перехода составляет от сотых долей до единиц микрометров.

1.3 Электронно-дырочный переход под прямым напряжением

При отсутствии внешнего воздействия

$$I_{p-n} = I_{\text{диф}} + I_{\text{др}} = 0,$$

т. е. дрейфовая и диффузионная составляющие тока уравниваются друг друга. При этом потенциальный барьер препятствует движению основных (преобладающих в полупроводниковых областях) носителей, образующих диффузионные составляющие, а дрейфовые составляющие ограничиваются низкой концентрацией неосновных (составляющих меньшинство) носителей, образующих данный ток.

Если к p – n -переходу приложено внешнее напряжение, то равновесие между диффузионным и дрейфовым токами нарушается и через p – n -переход начинает протекать электрический ток.

Напряжение, приложенное плюсом к p -области полупроводника, а минусом – к n -области, называется **прямым** или отпирающим для p – n -перехода. При подаче такого напряжения на переход говорят, что переход включен в прямом направлении (рисунок 1.2, а).

Так как обедненный подвижными носителями заряда p – n -переход обладает значительно большим сопротивлением, чем p - и n -области, то при приближенном анализе процессов в переходе можно считать, что все внешнее напряжение приложено к p – n -переходу. Под действием прямого внешнего напряжения



в p – n -переходе возникает электрическое поле, направленное противоположно внутреннему полю перехода E_o , отчего результирующее поле в p – n -переходе ослабляется, и потенциальный барьер снижается. Высота его становится равной $\varphi = \varphi_k - U_{np}$ (рисунок 1.2, б).

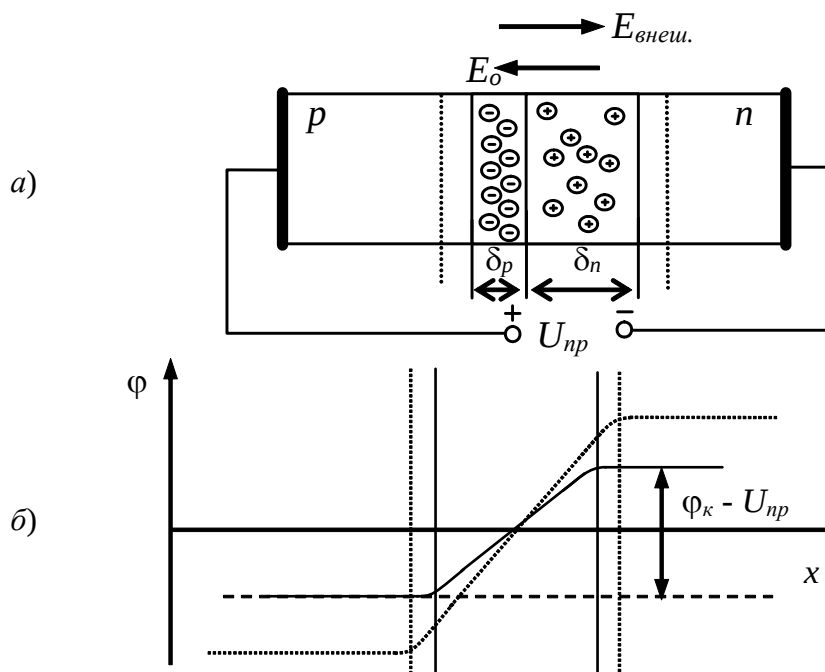


Рисунок 1.2 – Включение перехода в прямом направлении

В результате снижения потенциального барьера количество основных носителей, диффундирующих через p – n -переход, возрастает (см. рисунок 1.2, б). При этом дефицит носителей в обедненном слое сокращается, сопротивление его уменьшается, толщина перехода также уменьшается:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_o}{q} \frac{\varphi_k - U_{np}}{N_d}}. \quad (1.5)$$

Чем больше значение напряжения U_{np} , прикладываемое к p – n -переходу, тем ниже становится высота потенциального барьера. Это способствует увеличению потока дырок, преодолевающих потенциальный барьер и переходящих в n -область, и потока электронов, переходящих в p -область, где эти носители становятся неосновными. Этот процесс называется **инжекцией**.

Число основных носителей (дырок и электронов), преодолевающих потенциальный барьер в отсутствие внешнего напряжения, подчиняется распределению Максвелла-Больцмана.

$$p_{n0} = p_{p0} e^{q\varphi_k/(kT)};$$

$$n_{p0} = n_{n0} e^{q\varphi_k/(kT)}.$$

При подключении прямого напряжения это количество увеличивается в $\exp(qU_{np}/kT)$ раз:

$$p_n = p_{no} e^{qU_{np}/(kT)};$$

$$n_p = n_{po} e^{qU_{np}/(kT)}.$$

Следует ожидать, что во столько же раз увеличится и диффузионный ток через p – n -переход:

$$I_{\text{диф}} = I_{\text{диф}0} e^{qU_{np}/(kT)},$$

где $I_{\text{диф}0}$ – диффузионный ток через переход в состоянии равновесия.

Поток же неосновных носителей остается неизменным, т. к. на неосновные носители заряда изменение высоты потенциального барьера не оказывает влияния: результирующее электрическое поле всегда достаточно велико, чтобы перебросить их через переход. Ток неосновных носителей (дрейфовый ток) зависит только от количества неосновных носителей, подошедших к p – n -переходу на расстояние диффузионной длины. Изменение толщины p – n -перехода для неосновных носителей не играет существенной роли. Соответственно ток, обусловленный движением этих носителей заряда, остается таким же, как и в равновесном состоянии, при котором он был равен диффузионному току и направлен навстречу ему.

Обозначив $I_{\text{др}0} = I_{\text{диф}0} = I_0$ в равновесном состоянии, получим, что при подключении к p – n -переходу прямого напряжения результирующий ток

$$I_{np} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} = I_0 e^{qU_{np}/kT} - I_0$$

или

$$I_{np} = I_0 (e^{qU_{np}/kT} - 1), \quad (1.6)$$

где $q/kT = 26 \text{ мВ}$.

Уравнение (1.6) является вольт-амперной характеристикой прямо смещенного p – n -перехода. Из него следует, что зависимость прямого тока от прямого напряжения носит экспоненциальный характер.

1.4 Электронно-дырочный переход под обратным напряжением

Если внешнее напряжение плюсом приложено к n -области, а минусом – к p -области, то в этом случае говорят, что p – n -переход находится под **обратным** напряжением. Его полярность при этом совпадает с полярностью контактной разности потенциалов (рисунок 1.3, а).

Высота потенциального барьера при обратном напряжении увеличивается до $\phi = \phi_k + U_{\text{обр}}$ (рисунок 1.3, б). Поле, создаваемое обратным напряжением, складывается с полем контактной разности потенциалов. Под действием возросшего поля, тормозящего для основных носителей, последние интенсивнее возвращаются в «свои» области, увеличивая дефицит свободных носителей в p – n -переходе. Это приводит к увеличению его электрического сопротивления.



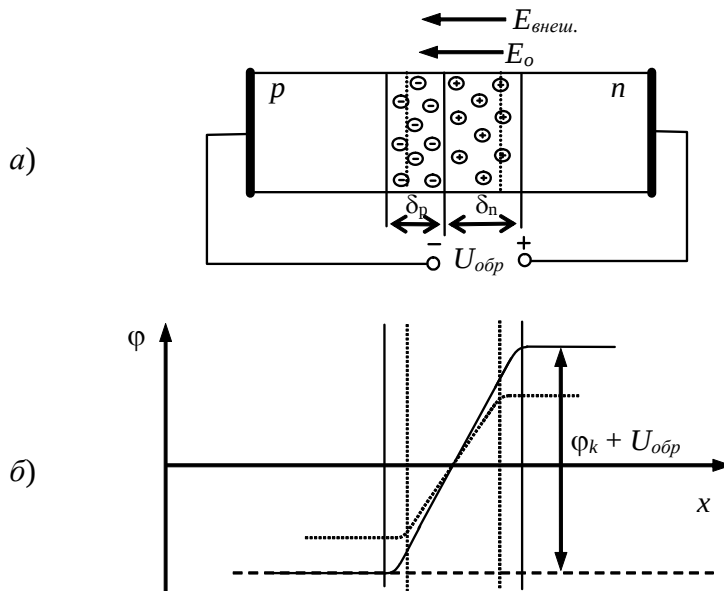


Рисунок 1.3 – Включение перехода в обратном направлении

Поскольку основные носители отесняются от перехода, толщина его увеличивается:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_o(\varphi_k + U_{обр})}{qN_d}}. \quad (1.7)$$

Количество дырок и электронов, способных преодолеть увеличившийся потенциальный барьер, можно описать выражениями:

$$p_n = p_{n0} e^{-\frac{qU_{обр}}{kT}}; \quad n_p = n_{p0} e^{-\frac{qU_{обр}}{kT}},$$

из которых следует, что число основных носителей, принимающих участие в образовании тока при обратном включении p – n -перехода, экспоненциально убывает с ростом $U_{обр}$.

Дрейфовый ток обусловлен движением неосновных носителей. Его величина, как указывалось ранее, практически не зависит от величины потенциального барьера. Неосновные носители – дырки из n -области и электроны из p -области, подошедшие к p – n -переходу на расстояние диффузионной длины, втягиваются полем перехода и переносятся в соседнюю область, где они становятся основными носителями заряда. Этот процесс называется **экстракцией**.

Плотность дрейфового тока согласно (1.2)

$$j_{др} = j_{дрp} + j_{дрn} = q(p_n\mu_p E + n_p\mu_n E) = q\left(\frac{p_n D_p}{L_p} + \frac{n_p D_n}{L_n}\right),$$

где D_p , D_n и L_p , L_n – коэффициенты диффузии дырок, электронов и их диффузионная длина соответственно.

Результирующий ток обратно смещенного перехода

$$I_{обр} = I_{диф} - I_{др} = I_0 e^{-qU_{обр}/(kT)} - I_0$$

или

$$I_{обр} = I_0 (e^{-qU_{обр}/(kT)} - 1). \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) является уравнением вольт-амперной характеристики (ВАХ) обратно смещенного $p-n$ -перехода. При обратном напряжении $U_{обр} \geq 3\varphi_T$ диффузионный ток прекращается, и обратный ток представляет собой ток неосновных носителей, величина которого *не зависит от приложенного напряжения, а определяется только площадью $p-n$ -перехода, типом полупроводника и концентрацией неосновных носителей:*

$$I_{обр} = I_0 = qS_{p-n} \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right),$$

где S_{p-n} – площадь $p-n$ -перехода.

Итак, вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода как при прямом, так и при обратном включении определяется экспоненциальной функцией вида

$$I = I_0 (e^{qU/kT} - 1) = I_0 (e^{U/U_T} - 1), \quad (1.9)$$

где U_T – температурный потенциал, $U_T = kT / q$ (при 300 К $U_T = 26$ мВ);

I_0 – обратный ток насыщения.

Графический вид этой характеристики представлен на рисунке 1.4. Из графика следует, что $p-n$ -переход представляет собой нелинейный элемент, обладающий выпрямляющим свойством, т. к. величина тока при запирающем смещении оказывается значительно меньшей, чем при прямом.

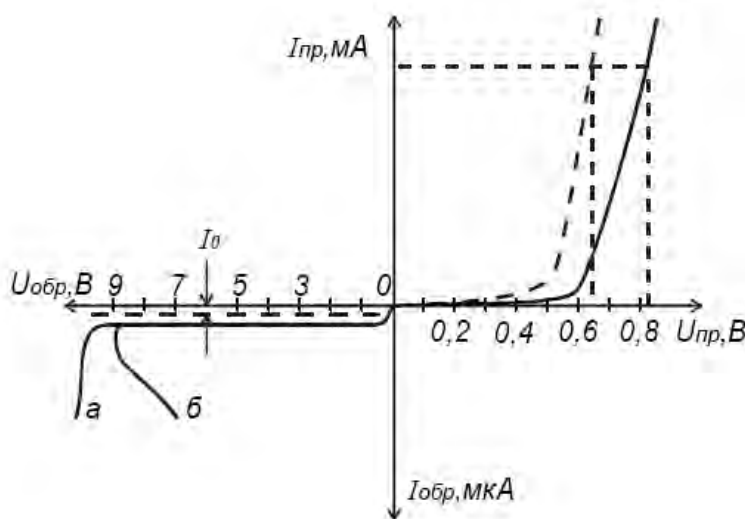


Рисунок 1.4 – Вольт-амперные характеристики $p-n$ -перехода



1.5 Вольт-амперная характеристика реального p – n -перехода

Функция (1.9) описывает ВАХ *идеального* p – n -перехода, т. к. при ее выводе учитывались только процессы инжекции и экстракции и не учитывались многие факторы.

Вольт-амперная характеристика *реального* электронно-дырочного перехода отличается от соответствующей характеристики идеального перехода прежде всего тем, что приложенное к выводам напряжение включает в себя напряжения, падающие в объемах областей p и n , т. е. отличается от напряжения на самом p – n -переходе. Полупроводниковый переход представляет собой объединение собственно p – n -перехода и омического сопротивления p - и n -областей. Поэтому ВАХ собственно перехода характеризуется экспоненциальной зависимостью на прямой ветви только на начальном участке. При достижении порогового напряжения U_{nop} переход исчезает и зависимость между током и напряжением определяется величиной сопротивления $r_0 = r_p + r_n$. (рисунки 1.5 и 1.6).

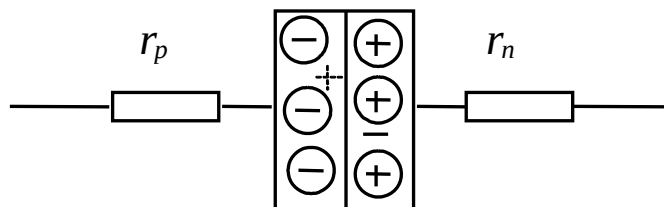


Рисунок 1.5 – Эквивалентная схема p – n -перехода

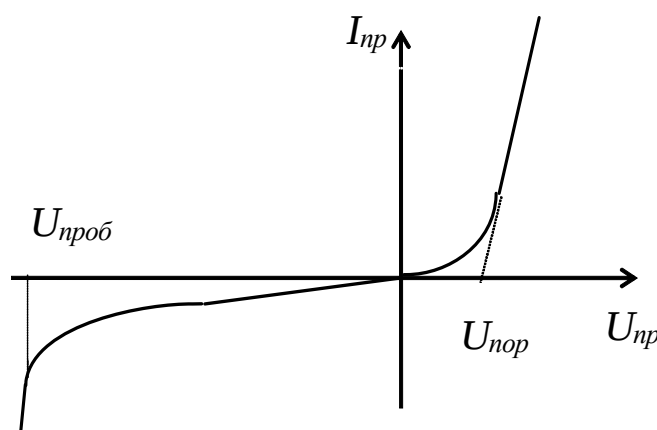


Рисунок 1.6 – Вольт-амперная характеристика реального p – n -перехода

Кроме того, общий ток через переход состоит из ряда составляющих:

$$I = I_0 + I_{ген} + I_{рек} + I_{кан} + I_{ут},$$

в отличие от идеального p – n -перехода, имеющего всего одну составляющую, определяемую выражением (1.9). Объясняется это тем, что при анализе идеального перехода мы полагали, что потоки носителей заряда при их пролете через

переходный слой остаются постоянными, а поэтому токи в этом слое не меняются. В действительности же в переходном слое так же, как и в областях p и n , происходит генерация и рекомбинация носителей заряда. При этом образуются токи генерации $I_{ген}$ и рекомбинации $I_{рек}$, влияние которых в ряде случаев существенно, в особенности для приборов, изготовленных из кремния. Эти составляющие тока ведут себя по-разному в различных включениях p – n -перехода. В частности, при отсутствии напряжения ток генерации компенсируется током рекомбинации точно такой же величины:

$$I_{ген} = I_{рек}.$$

При **запирающем** напряжении высота потенциального барьера повышается, поток основных носителей через переход почти прекращается, поэтому исчезает ток рекомбинации $I_{рек}$. Ток генерации $I_{ген}$, наоборот, возрастает, т. к. расширяется переходный слой, т. е. та область, в которой происходит генерация носителей заряда.

При **отпирающем** напряжении из-за сужения p – n -перехода ток генерации спадает, но заметно возрастает ток рекомбинации, т. к. существенно растет поток основных носителей заряда через переход.

Суммарный ток через переход включает в себя также токи утечки $I_{ут}$ и канальные токи $I_{кан}$, которые обусловлены поверхностными эффектами. Ток утечки образуется по поверхности переходного слоя и зависит от ее состояния. При изготовлении полупроводниковых приборов специальной обработкой стремятся уменьшить величину токов утечки до пренебрежимо малых значений.

Более существенное влияние на работу p – n -переходов оказывают канальные токи, которые образуются в так называемых каналах на поверхности кристалла из-за искривления энергетических зон полупроводника. Канал работает как обычный p – n -переход, и его токи суммируются с остальными токами как при прямом, так и при обратном включении перехода.

Таким образом, график ВАХ реального p – n -перехода выглядит иначе, чем для идеального (см. рисунок 1.6). При прямом напряжении характеристика реального перехода пройдет ниже характеристики идеального p – n -перехода вследствие падения напряжения на сопротивлениях областей p и n .

Уравнение ВАХ в этой области будет иметь вид:

$$I = I_0 [e^{q(U_{np} - I r_0) / (kT)} - 1],$$

где r_0 – сопротивление менее легированной из областей полупроводника, образующих p – n -переход.

Кроме того, величина прямого тока уменьшается из-за рекомбинации носителей в переходе. При увеличении обратного напряжения обратный ток через переход не остается постоянным, а увеличивается, т. к. возрастают ток генерации (из-за расширения переходного слоя) и канальный ток (из-за увеличения напряженности поля на поверхности кристалла). При достижении обратным напряжением некоторого критического значения наблюдается резкое увеличение обратного тока через p – n -переход. Это явление называется **пробоем**.

перехода. Напряжение, при котором наступает пробой, может иметь величину от единиц до сотен вольт.

Различают три вида (механизма) пробоя p – n -перехода: лавинный, туннельный и тепловой. Первые два связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе, а третий – с увеличением рассеиваемой мощности и, соответственно, температуры.

Лавинный пробой, который является разновидностью электрического вида пробоя, возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих большую ширину перехода. Поскольку длина свободного пробега электрона значительно меньше ширины перехода, то за время свободного пробега электроны успевают приобрести достаточную энергию, чтобы при соударении с атомами ионизировать их, образуя пары электрон–дырка. Вновь образованные электроны, ускоряясь полем, в свою очередь, могут так же вызвать ионизацию атомов. Таким образом, будет происходить лавинообразное нарастание тока, приводящее к пробое p – n -перехода (см. рисунок 1.4, характеристика a). При этом ток, протекающий через переход, превысит в M раз величину тока I_0 , обусловленного потоком первоначальных носителей:

$$I = I_0 M,$$

где M – коэффициент лавинного умножения.

Напряжение лавинного пробоя зависит от температуры перехода. С повышением температуры напряжение пробоя возрастает, т. к. сокращается длина свободного пробега электронов и уменьшается энергия, приобретаемая ими на длине свободного пробега. Поэтому ионизация атомов электронами, пролетающими через переходный слой, происходит при больших напряжениях.

Туннельный пробой характерен для узких p – n -переходов, изготовленных из низкоомного полупроводника. Это другая разновидность электрического вида пробоя, и возникает он при напряженностях электрического поля около 200 кВ/см, когда становится возможным туннельный переход электронов из валентной зоны p -области непосредственно в зону проводимости n -области. При туннельном пробое увеличение напряжения настолько сильно искривляет энергетические зоны, что энергия валентных электронов в p -области становится такой же, как энергия свободных электронов в n -области. В случае очень узкого перехода возможен перенос электронов из p -области в n -область без изменения энергии (рисунок 1.7). Это приводит к увеличению тока через p – n -переход.

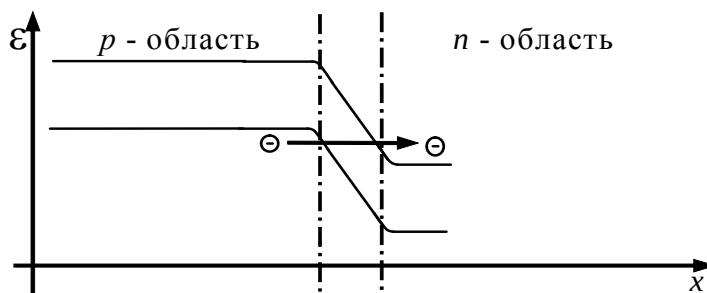


Рисунок 1.7 – Искривление энергетических зон при увеличении приложенного напряжения к p – n -переходу

Напряжение туннельного пробоя уменьшается с повышением температуры. При увеличении температуры ширина запрещенной зоны полупроводника уменьшается, и уровни энергии электронов в зоне проводимости и в валентной зоне выравниваются при меньших напряжениях. Туннельный переход становится возможным при более низких напряжениях.

Тепловой пробой возникает в результате разогрева перехода, когда количество теплоты, выделяемой током в p – n -переходе, больше количества теплоты, отводимой от него. При разогреве перехода происходят интенсивная генерация электронно-дырочных пар и увеличение обратного тока через переход. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению температуры и обратного тока. В итоге ток через переход лавинообразно увеличивается (см. рисунок 1.4, характеристика б). В отличие от электрических видов пробоя тепловой пробой необратим, т. к. при нем происходят необратимые изменения структуры p – n -перехода. Диод является температурно-зависимым элементом, т. к. изменение температуры окружающей среды приводит к изменению интенсивности термогенерации – процесса образования пар электрон–дырка. Температурные колебания приводят к сдвигу прямой ветви вольт-амперной характеристики влево/вправо, а обратной вверх/вниз. Наиболее важен сдвиг на прямой ветви, который оценивается температурным коэффициентом напряжения (ТКН):

$$TKH = \left. \frac{\Delta U}{\Delta T} \right|_{I = \text{const}},$$

где ΔT – некоторое изменение температуры окружающей среды;

ΔU – соответствующее изменение напряжения на диоде при постоянном прямом токе (рисунок 1.8).

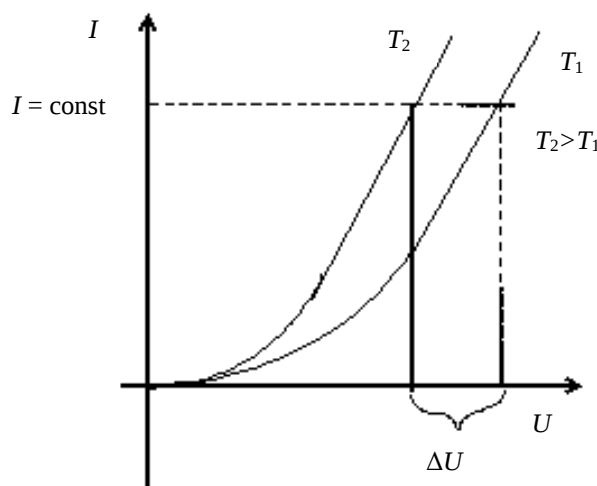


Рисунок 1.8 – К определению ТКН перехода

С повышением температуры кристалла увеличивается тепловая энергия электронов, поэтому повышается вероятность их перехода из валентной зоны в зону проводимости (возрастает скорость генерации пар электрон–дырка), что

приводит к росту концентрации неосновных носителей заряда и, соответственно, их потоков, образующих тепловые токи. Тепловые токи в реальных p – n -переходах образуются потоком неосновных носителей заряда, которые генерируются в различных областях кристалла: в областях p и n , в области перехода, в каналах. Степень изменения тепловых токов с изменением температуры зависит от вида генерации. Кроме того, на участке теплового пробоя $U_{обр}$ уменьшается при возрастании $I_{обр}$ (см. рисунок 1.4).

Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого переходов представлены на рисунке 1.9. При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом переходе (см. рисунок 1.9, а) значительно меньше, чем в германиевом (см. рисунок 1.9, б).

В германиевых p – n -переходах при комнатной и повышенных температурах преобладают тепловые токи, обусловленные прямой генерацией. Ширина запрещенной зоны в кристаллах германия достаточно мала, поэтому вероятность прямой генерации значительно выше, чем в кремниевых p – n -переходах.

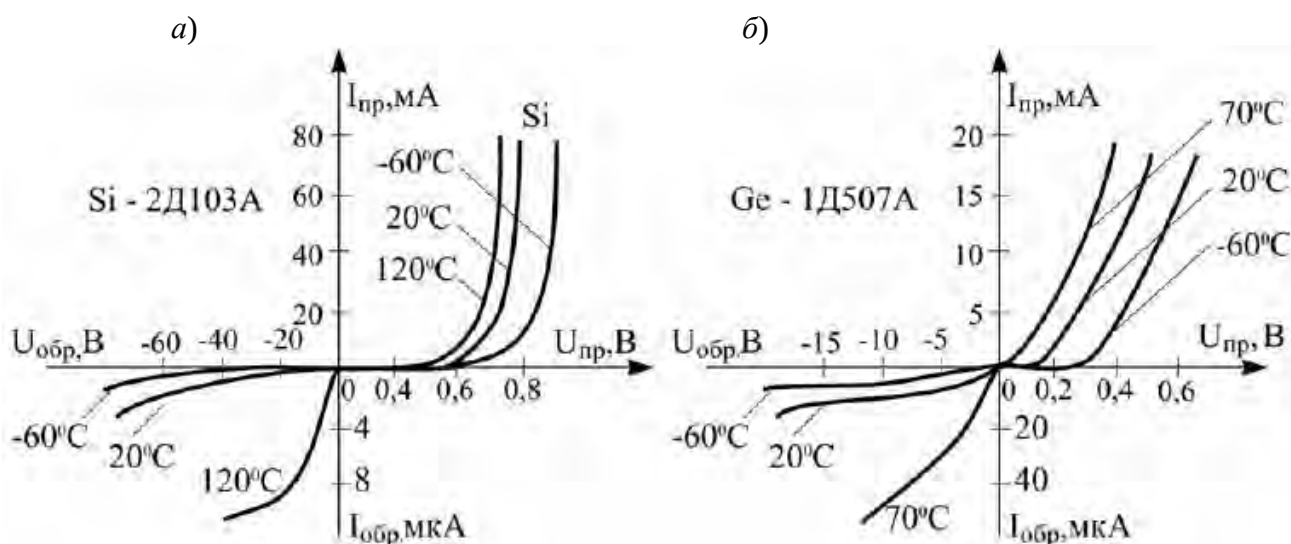


Рисунок 1.9 – Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого переходов

В кремниевых p – n -переходах ширина запрещенной зоны сравнительно велика, поэтому при комнатной температуре вероятность прямой генерации низка: тепловые токи, обусловленные этим видом генерации, не превышают сотых и тысячных долей тепловых токов, вызванных ступенчатой генерацией. Лишь при температурах 100...120 °С указанные составляющие тепловых токов становятся сравнимыми между собой. Таким образом, переходы, изготовленные из кремния, имеют лучшие обратные характеристики, что является их большим преимуществом.

Прямые ветви вольт-амперных характеристик с ростом температуры изменяются мало. На их положение оказывает влияние изменение контактной разности потенциалов, которая уменьшается с ростом температуры.

2 Лабораторная работа № 2.1. Исследование вольт-амперной характеристики p – n -переходов с различной шириной запрещенной зоны полупроводника

Цель работы: изучение вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых p – n -переходов. Сравнение результатов эксперимента с теорией p – n -перехода. Определение некоторых параметров p – n -перехода и полупроводникового материала, из которого он изготовлен.

2.1 Описание установки

Установка состоит из измерительного стенда, внешнего многопредельного вольтметра V и многопредельного миллиамперметра mA . Принципиальная схема ее приведена на рисунке 2.1.

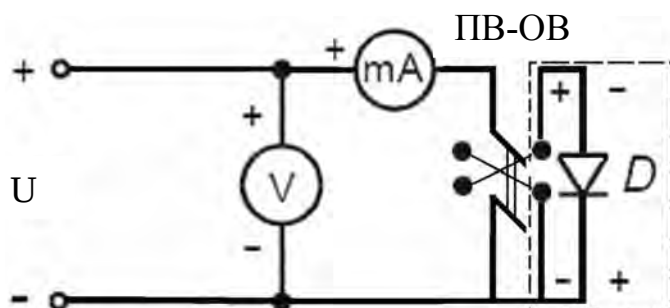


Рисунок 2.1 – Схема установки для снятия прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики диода

В состав стенда входят источник постоянного напряжения с регулятором постоянного напряжения U , переключатель ПВ–ОВ («прямая ветвь – обратная ветвь»), коммутационные гнезда.

Внимание! Перед включением приборов в сеть следует убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, находится крайнем левом положении, что соответствует минимальному выходному напряжению.

2.2 Порядок выполнения работы

1 Включить питание вольтметра и амперметра соответствующими тумблерами «Сеть».

2 Установить один из кремниевых диодов в соответствии со схемой. **При установке диода следить за правильным положением ключа.**

3 Включить источник постоянного тока в сеть и дать ему прогреться в течение 5 мин.

4 Поставить переключатель ПВ–ОВ в положение ПВ (прямая ветвь).

5 Увеличивая напряжение, подаваемое на схему от источника постоянного тока, снять зависимость между током I , текущим через переход, и напряжением U , действующим на нем, для кремниевого диода.

На прямой ветви ток должен изменяться в пределах от 0 до 100 мА.

Увеличение значений силы тока и напряжения производится с помощью реостата. Результаты измерений занести в таблицу 2.1. Количество измерений должно быть достаточным для точного построения нелинейных участков прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики.

6 После измерений вернуть регулятор реостата в положение «0».

7 Перевести переключатель ПВ–ОВ в положение ОВ (обратная ветвь). Снять обратные ветви вольт-амперных характеристик кремниевого перехода, варьируя по необходимости пределы измерения миллиамперметра мА и вольтметра V.

Ток должен изменяться в таких пределах, чтобы на обратной ветви был виден участок пробоа.

Увеличение значений силы тока и напряжения производится с помощью реостата перемещения регулятора по направлению стрелки. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Вольт-амперные характеристики кремниевого перехода

U_{np} , В									
I_{np} , мА									
$U_{обр}$, В									
$I_{обр}$, мкА									

8 После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

9 Выключить источник постоянного тока из сети. Установить германиевый диод в гнездо в соответствии со схемой.

При установке диода следить за правильным положением ключа.

10 Включить источник постоянного тока в сеть.

11 Аналогично пп. 4–8 снять вольт-амперную характеристику германиевого диода. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

Таблица 2.2 – Вольт-амперные характеристики германиевого перехода

U_{np} , В									
I_{np} , мА									
$U_{обр}$, В									
$I_{обр}$, мкА									

Построить прямые и обратные ветви вольт-амперных характеристик переходов в линейном масштабе.

Примечание – Для удобства сравнения полученных характеристик изобразите прямые ветви переходов двух типов на одном графике, а обратные – на другом.

Определить последовательное сопротивление перехода по наклону прямой ветви вольт-амперной характеристики на линейном участке. Оценить удельное

сопротивление германия и кремния при следующих допущениях: площадь диода $S = 1 \text{ мм}^2$; толщина базы $L = 500 \text{ мкм}$.

Построить прямые ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе $\ln I = f(U)$. Определить наклон прямой и сравнить его с величиной $q/(kT)$. Определить ток насыщения I_S по экстраполяции прямой до оси токов. Сравнить его с током на обратных ветвях характеристик.

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить образование p – n -перехода.
- 2 Какими параметрами принято характеризовать p – n -переход?
- 3 Для p – n -перехода изобразить и объяснить распределение подвижных и неподвижных носителей заряда для обратно смещенного перехода.
- 4 Как образуется контактная разность потенциалов?
- 5 Как и почему изменяется величина контактной разности потенциалов при подключении обратного напряжения?
- 6 Как и почему изменяется толщина p – n -перехода при подключении обратного напряжения?
- 7 Какова величина и природа тока, протекающего через p – n -переход при обратном включении?
- 8 Объяснить, как зависит величина обратного тока p – n -перехода от ширины запрещенной зоны полупроводника.
- 9 Объяснить влияние площади p – n -перехода на величину обратного тока через переход.
- 10 На одних осях изобразить вольт-амперные характеристики идеального и реального p – n -переходов. Объяснить, какие составляющие тока p – n -перехода не учитывались при построении идеального перехода.
- 11 Объяснить различия в характере зависимости обратного тока от напряжения для кремниевого и германиевого диода.
- 12 Вывести формулу вольт-амперной характеристики p – n -перехода.
- 13 Объяснить отличия хода прямой ветви вольт-амперной характеристики при малых и больших напряжениях.

3 Лабораторная работа № 2.2. Исследование влияния температуры на вольт-амперную характеристику p – n -перехода

Цель работы: изучение влияния температуры на функционирование p – n -перехода в температурном интервале $20...100 \text{ }^\circ\text{C}$. Сравнение результатов эксперимента с теорией p – n -перехода. Определение некоторых параметров p – n -перехода и полупроводникового материала, из которого он изготовлен.

В данной работе снимаются вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого переходов при трех разных температурах.



3.1 Описание установки

Установка состоит из измерительного стенда, внешнего многопредельного вольтметра V и многопредельного миллиамперметра mA . Принципиальная схема ее приведена на рисунке 3.1.

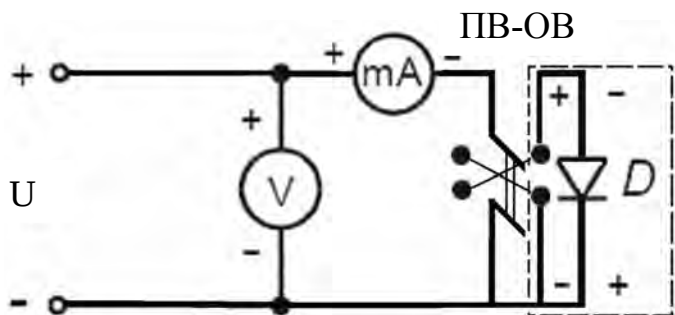


Рисунок 3.1 – Схема установки для исследования влияния температуры на вольт-амперную характеристику p - n -перехода

В состав стенда входят источник постоянного напряжения, источник питания печи, регулятор постоянного напряжения U , переключатель ПВ–ОВ («прямая ветвь – обратная ветвь»), переключатель напряжения печи, коммутационные гнезда, сигнальные лампочки и камера, в которую помещен исследуемый диод. Кроме того, в стенде имеется система измерения температуры в камере, состоящая из датчика, измерительного моста и индикатора. Индикатор T размещается на передней панели стенда. Он градуирован в градусах Цельсия и позволяет измерять температуру от 0 до 100 °С (на рисунке 3.1 измеритель температуры в камере не показан). Следует иметь в виду, что для правильной работы схемы измерения температуры она должна быть включена за 10...15 мин до измерения. Это необходимо для установления температуры элементов схемы.

Внимание! Перед включением приборов в сеть следует убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего входное напряжение источника постоянного тока, находится в крайнем левом положении, что соответствует минимальному выходному напряжению.

3.2 Порядок выполнения работы

Снятие вольт-амперных характеристик при комнатной температуре.

1 Установить переключатель печи в положение «0» (печь отключена).

2 Включить питание вольтметра и амперметра соответствующими тумблерами «Сеть». Подключить к схеме кремниевый диод с помощью переключателя КД–ГД, поставив его в положение КД.

При установке и смене диода следить за правильным положением ключа.

3 Включить источник постоянного тока в сеть и дать ему прогреться в течение 5 мин.

4 Поставить переключатель ПВ–ОВ в положение ПВ (прямая ветвь).

5 Увеличивая степенями напряжение, подаваемое на схему от источника постоянного тока, снять зависимость между током I , текущим через переход, и напряжением U , действующим на нем, для кремниевого диода.

На прямой ветви ток должен изменяться в пределах от 0 до 100 мА.

Увеличение значений силы тока и напряжения производится с помощью реостата перемещения регулятора по направлению стрелки. Результаты измерений занести в таблицу 3.1. Количество измерений должно быть достаточным для точного построения нелинейных участков прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики.

Таблица 3.1 – Кремниевый p – n -переход

T_1	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									
T_2	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									
T_3	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									

6 После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

7 Перевести переключатель ПВ–ОВ в положение ОВ (обратная ветвь). Снять обратные ветви вольт-амперных характеристик кремниевого перехода, варьируя по необходимости пределы измерения миллиамперметра мА и вольтметра В.

Увеличение значений силы тока и напряжения производится с помощью реостата перемещения регулятора по направлению стрелки. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

8 После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

9 Подключить к схеме германиевый диод с помощью переключателя КД–ГД, поставив его в положение ГД.

При установке диода следить за правильным положением ключа.

10 Аналогично пп. 4–8 снять вольт-амперную характеристику германиевого диода. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

11 После измерений повернуть регулятор U источника питания против часовой стрелки в крайнее положение.



Таблица 3.2 – Германиевый p – n -переход

T_1	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									
T_2	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									
T_3	U_{np} , В									
	I_{np} , мА									
	$U_{обр}$, В									
	$I_{обр}$, мкА									

Снятие вольт-амперных характеристик при различных значениях температуры.

1 Переключая переключатель печи в положение 2, а затем в 3, в соответствии с пп. 3–8 предыдущего раздела снять вольт-амперную характеристику германиевого и кремниевого диодов при двух повышенных температурах (например, при T равной 50 и 80 °С).

После перевода переключатель печи в положения 2 и 3 выждать время, необходимое для установления требуемой температуры.

2 По полученным данным построить семейство вольт-амперных характеристик кремниевого и германиевого p – n -переходов для разных температур. Объяснить влияние температуры на положение прямой и обратной ветвей вольт-амперных характеристик p – n -переходов.

3 Сравнить полученные температурные зависимости вольт-амперных характеристик. Объяснить различное влияние температуры на вид ВАХ германиевого и кремниевого p – n -переходов.

4 Определить температурный коэффициент напряжения для одного из переходов.

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить образование p – n -перехода.
- 2 Какими параметрами принято характеризовать p – n -переход?
- 3 Для p – n -перехода изобразить и объяснить распределение подвижных и неподвижных носителей заряда для обратно смещенного перехода.
- 4 Как образуется контактная разность потенциалов?
- 5 Как и почему изменяется величина контактной разности потенциалов при подключении обратного напряжения?
- 6 На одних осях изобразить вольт-амперные характеристики идеального и реального p – n -переходов. Объяснить, какие составляющие тока p – n -перехода

не учитывались при построении идеального перехода.

7 Объяснить механизм влияния температуры на величину обратного тока p – n -перехода.

8 Объяснить механизм влияния температуры на величину прямого тока p – n -перехода.

9 Объяснить, почему влияние температуры проявляется сильнее в германиевых p – n -переходах, чем в кремниевых.

10 Выведите формулу вольт-амперной характеристики p – n -перехода.

4 Лабораторная работа № 2.3. Исследование обратной ветви вольт-амперной характеристики p – n -переходов с различной шириной запрещенной зоны полупроводника

Цель работы: изучение функционирования p – n -перехода в режимах электрического пробоя.

В работе снимаются обратные ветви вольт-амперных характеристик с различным типом пробоя, проводится сравнение результатов эксперимента с теорией p – n -перехода.

4.1 Описание установки

Установка состоит из измерительного стенда, внешнего многопредельного вольтметра V и многопредельного миллиамперметра mA . Принципиальная схема ее приведена на рисунке 4.1.

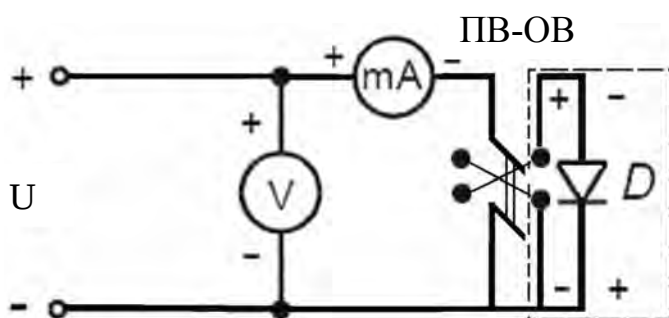


Рисунок 4.1 – Схема установки для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики диода

В состав стенда входят: источник постоянного напряжения с регулятором постоянного напряжения U , переключатель **ПВ-ОВ** («прямая ветвь – обратная ветвь»), коммутационные гнезда.

Внимание! Перед включением приборов в сеть следует убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего входное напряжение источника постоянного тока, находится в крайнем левом положении, что соответствует минимальному выходному напряжению.

4.2 Порядок выполнения работы

1 Включить питание вольтметра и амперметра соответствующими тумблерами «Сеть». Подключить к схеме Si-диод с помощью переключателя КД–ГД, поставив его в положение Si.

При установке и смене диода следить за правильным положением ключа.

2 Включить источник постоянного тока в сеть и дать ему прогреться в течение 5 мин.

3 Снять обратные ветви вольт-амперных характеристик кремниевых переходов, варьируя по необходимости пределы измерения вольтметра V и миллиамперметра mA.

Ток должен изменяться в таких пределах, чтобы на обратной ветви был виден участок пробоя.

Увеличение тока и напряжения производится ручкой реостата по направлению стрелки в интервале от 0 до 50 В с шагом 2 В. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Вольт-амперные характеристики кремниевого перехода

Номер диода	Кремниевый $p-n$ -переход								
1	$U_{обр}$, В								
	$I_{обр}$, мкА								
2	$U_{обр}$, В								
	$I_{обр}$, мкА								

4 После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

5 Подключить к схеме Ge-диод с помощью переключателя КД–ГД, поставив его в положение Ge.

6 Включить источник постоянного тока в сеть.

7 Аналогично п. 3 снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики германиевого $p-n$ -перехода. Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Вольт-амперные характеристики германиевого перехода

Номер диода	Германиевый $p-n$ -переход								
3	$U_{обр}$, В								
	$I_{обр}$, мкА								
4	$U_{обр}$, В								
	$I_{обр}$, мкА								

После измерений вернуть регулятор реостата в крайнее положение «0».

8 По данным таблиц 4.1 и 4.2 построить семейство обратных ветвей вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого $p-n$ -переходов. Пояснить

влияние ширины запрещенной зоны полупроводника на вид полученных характеристик.

9 По данным таблицы построить обратные ветви вольт-амперных характеристик германиевого $p-n$ -перехода в режимах электрического пробоя. На графиках установить соответствие между характеристиками и типами пробоя. Объяснить свое решение.

Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой обратная ветвь вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода?
- 2 Как зависит положение ВАХ от площади перехода на участке обратного напряжения?
- 3 Как зависит положение ВАХ от ширины запрещенной зоны полупроводника на участке обратного напряжения?
- 4 Объяснить образование $p-n$ -перехода.
- 5 Какими параметрами принято характеризовать $p-n$ -переход?
- 6 Для $p-n$ -перехода, подключенного в обратном направлении, изобразить и объяснить распределение подвижных и неподвижных носителей заряда.
- 7 Как образуется контактная разность потенциалов?
- 8 Как и почему изменяется величина контактной разности потенциалов при подключении обратного напряжения?
- 9 Как и почему изменяется ширина $p-n$ -перехода при подключении обратного напряжения?
- 10 Какова величина и природа тока, протекающего через $p-n$ -переход при обратном включении?
- 11 Объяснить, как зависит величина обратного тока $p-n$ -перехода от ширины запрещенной зоны полупроводника.
- 12 Объяснить влияние площади $p-n$ -перехода на величину обратного тока через переход.



5 Лабораторная работа № 2.4. Исследование проводимости МДП-структур

Цель работы: исследование изменения проводимости полупроводника под действием поперечного электрического поля в структуре «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП).

5.1 Общие сведения

Принцип работы. В транзисторах со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП) принцип работы основан на модуляции сопротивления проводящего канала на поверхности полупроводника под воздействием эффек-

та поля. МДП-транзисторы, в которых в качестве диэлектрика используется окисел полупроводника (МОП-транзисторы), в настоящее время являются основными элементами интегральных схем. Они находят широкое применение также в мощных ключевых схемах. МДП-транзисторы являются униполярными приборами, работа которых основана на использовании только основных носителей заряда. Процессы инжекции в МДП-транзисторах не используются. На рисунке 5.1 схематически показана конструкция МДП-транзистора. В полупроводниковой подложке p -типа сформированы две высоколегированные n^+ -области – исток и сток.

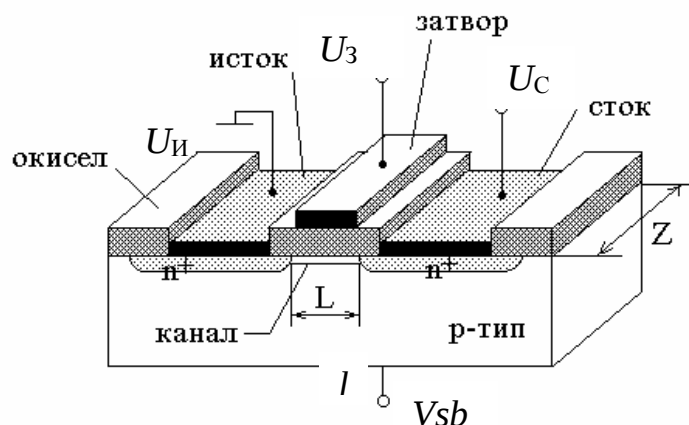


Рисунок 5.1 – Конструкция МДП-транзистора

Металлический электрод – затвор отделен от подложки тонким слоем диэлектрика. Основными параметрами МДП-структуры являются длина канала l , ширина канала b , толщина слоя диэлектрика d , глубина переходов n^+ -областей W_n и уровень легирования подложки N_A .

Управляющей цепью в МДП-транзисторах является цепь затвора, управляемой – цепь «исток – сток». Управляющая цепь почти не потребляет ток, поскольку в нее входит участок с диэлектриком, поэтому в МДП-транзисторах получается значительное усиление мощности – намного больше, чем в биполярных транзисторах.

Если напряжение на затворе отсутствует, то электрическая цепь «исток – сток» представляет собой два n^+p -перехода, включенных встречно друг другу. Поэтому при любой полярности напряжения «исток – сток» один из переходов смещается в обратном направлении и в выходной цепи будет протекать очень малый ток обратносмещенного перехода.

Если к затвору приложен достаточно большой положительный потенциал, в p -области у границы с диэлектриком образуется (индуцируется) *инверсный канал*, соединяющий n^+ -области стока и истока. Проводимость инверсного канала модулируется при изменении потенциала затвора. Напряжение на затворе, при котором образуется канал, называется пороговым напряжением U_0 .

На рисунке 5.2 приведена гидравлическая модель, иллюстрирующая принцип работы усилителя на МДП-транзисторе. Здесь функции затвора выполняет кран, заслонка которого за счет перемещения в вертикальном направлении

регулирует толщину канала h и поток жидкости (тока), поступающей от источника питания в нагрузку.

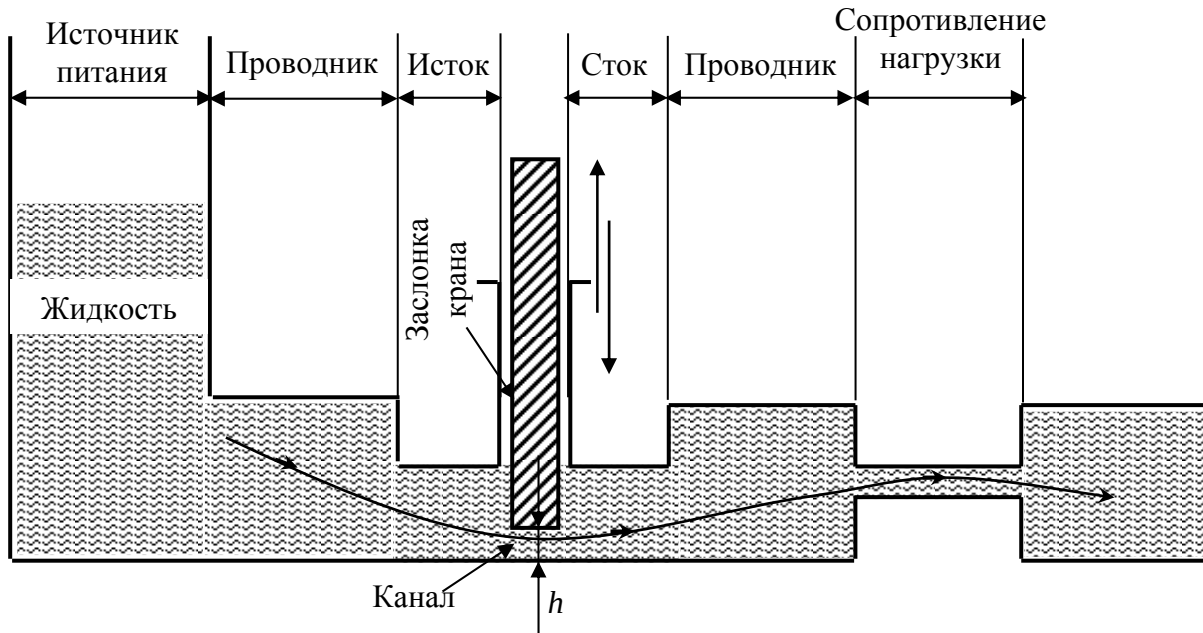


Рисунок 5.2 – Гидравлическая модель, иллюстрирующая принцип работы усилителя на МДП-транзисторе и на полевом транзисторе

На рисунке 5.1 представлена конструкция n -канального МДП-транзистора. Если использовать n -подложку, а области истока и стока выполнить с электропроводностью p^+ -типа, то получится p -канальный МДП-транзистор. Электронные схемы, в которых используется сочетание n - и p -канальных транзисторов, называются *комплементарными*. МДП-транзисторы, у которых канал появляется только после приложения к затвору потенциала, большего порогового напряжения, называются транзисторами с индуцированным каналом.

Существуют МДП-транзисторы с встроенным каналом в виде тонкого приповерхностного слоя, который обычно изготавливают методами ионного легирования. Проводимость встроенного канала модулируется при обеих полярностях напряжения на затворе. Поскольку в таких транзисторах канал существует при нулевых напряжениях на затворе, величина порогового напряжения для них теряет смысл. Для транзисторов с встроенным каналом вместо порогового напряжения вводят параметр «напряжение отсечки». Это напряжение, при котором равновесные электроны уходят из встроенного канала, в результате чего цепь «исток – сток» разрывается. В дальнейшем рассматриваются только транзисторы с индуцированным n -каналом как наиболее распространенные.

Пороговое напряжение. Положительный потенциал затвора индуцирует в полупроводнике тем больший удельный заряд, чем больше удельная ёмкость между металлом затвора и полупроводником.

Следовательно, удельная ёмкость «затвор – полупроводник» определяет степень модуляции проводимости канала, т. е. управляющую способность затвора. Поэтому удельная ёмкость «затвор – полупроводник» является важнейшим параметром затвора и определяется выражением

$$C_{OX} = \varepsilon_{II} \varepsilon_0 / d .$$

С целью повышения удельной емкости стремятся уменьшить толщину d подзатворного диэлектрика, что ограничено его пробоем. Типичные значения $d = 0,1 \dots 0,15$ мкм.

В исходном состоянии в подзатворном диэлектрике обычно присутствует равновесный заряд, приводящий к изгибу зон (рисунок 5.3, *а*). Поэтому пороговое напряжение можно разделить на две составляющие:

$$U_0 = U_{0F} + U_{0B}.$$

Величина U_{0F} – *напряжение спрямления зон*, т. е. напряжение, которое нужно приложить к затвору для ликвидации исходного искривления зон (рисунок 5.3, *б*):

$$U_{0F} = \varphi_0 + Q_{0S}/C_{OX},$$

где φ_0 – контактная разность потенциалов между металлом затвора и диэлектриком;

Q_{0S} – равновесный удельный заряд поверхности.

На рисунке 5.3, *а* показано исходное искривление зон, противоположное тому, при котором образуется канал.

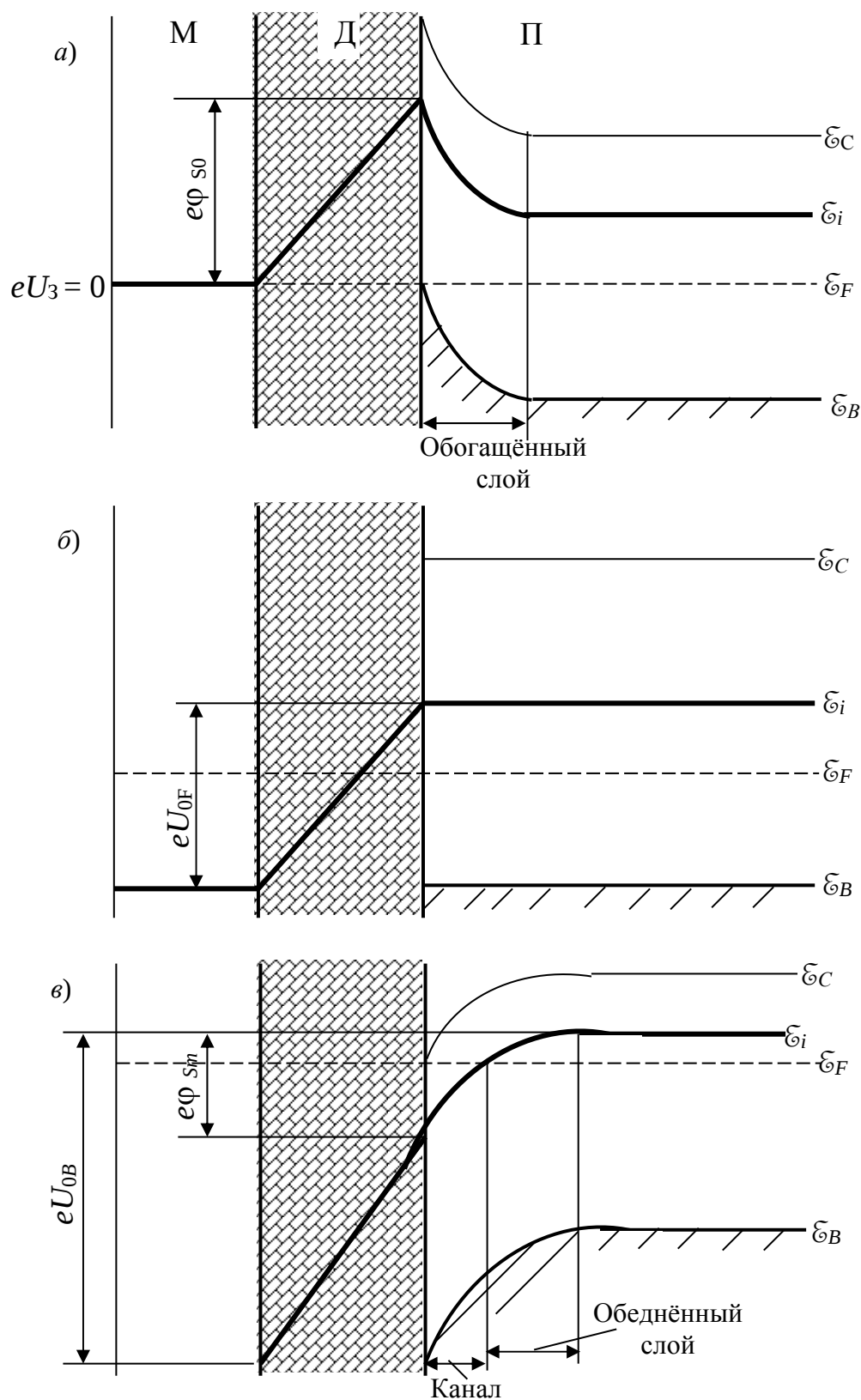
Величина U_{0B} – *напряжение изгиба зон*, т. е. напряжение, которое требуется приложить к затвору для изгиба зон в сторону, необходимую для образования проводящего канала (рисунок 5.3, *в*):

$$U_{0B} = \varphi_{0S} + \frac{a}{C_{OX}} \sqrt{\varphi_{Sm}} ,$$

где a – параметр, характеризующий влияние объемного заряда в подложке.

Из рисунка 5.3, *в* видно, что для уменьшения значения величины U_{0B} , а следовательно, и порогового напряжения U_0 нужно уменьшать уровень легирования p -подложки. Действительно, с уменьшением концентрации акцепторов в подложке уровень ε_F (энергия Ферми) будет подниматься вверх, а расстояние между уровнями ε_I (середина запрещенной зоны) и ε_F – уменьшаться. Поэтому будет уменьшаться также напряжение U_{0B} , которое следует приложить для образования инверсного канала.

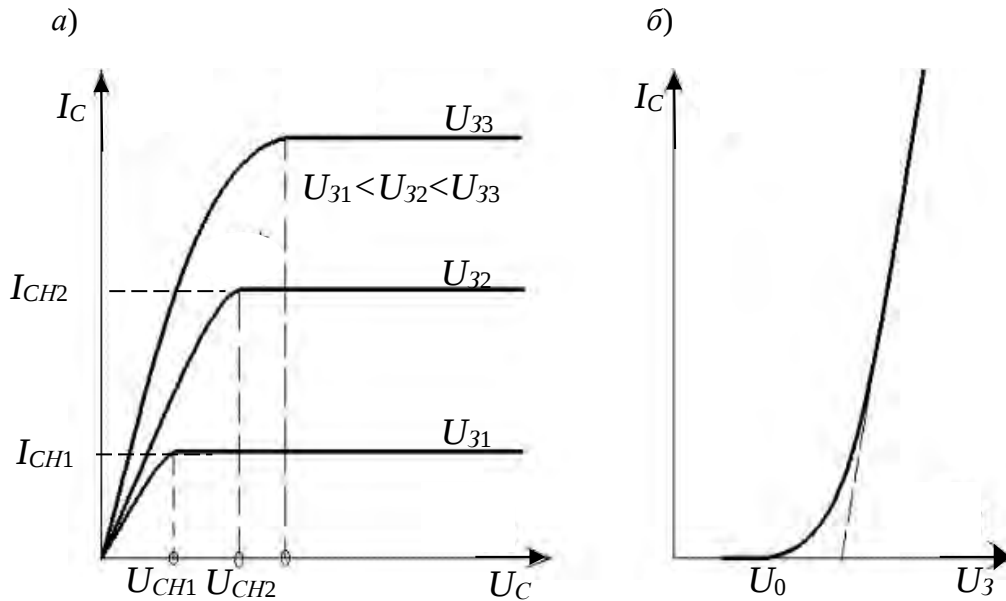
Когда на поверхности полупроводника сформировался инверсионный канал, величина концентрации неосновных носителей заряда (электронов) в инверсионных каналах равна концентрации основных носителей (дырок) в объеме полупроводника. При этом величина поверхностного потенциала $\psi_s = \varepsilon_c/e$ (ε_c – энергия низшего уровня зоны проводимости) равна $\varepsilon_c/e = 2\varphi_{Sm}$, (φ_{Sm} – расстояние от середины запрещенной зоны до уровня Ферми в квазинейтральном объеме). Изменяя величину напряжения на затворе, можно менять концентрацию электронов в инверсионном канале, и тем самым модулировать его проводимость. При этом электроны в канале отделены от свободных носителей в объеме полупроводника областью пространственного заряда.



а – исходное состояние; б – состояние после подачи напряжения спрямления зон U_{0F} ; в – состояние после подачи напряжения изгиба зон U_{0B}

Рисунок 5.3 – Энергетические диаграммы МДП-транзистора

Статические характеристики. Соотношения между напряжениями и токами в МДП-транзисторах определяются с помощью выходных и передаточных характеристик (рисунок 5.4).



a – выходные; *б* – передаточная

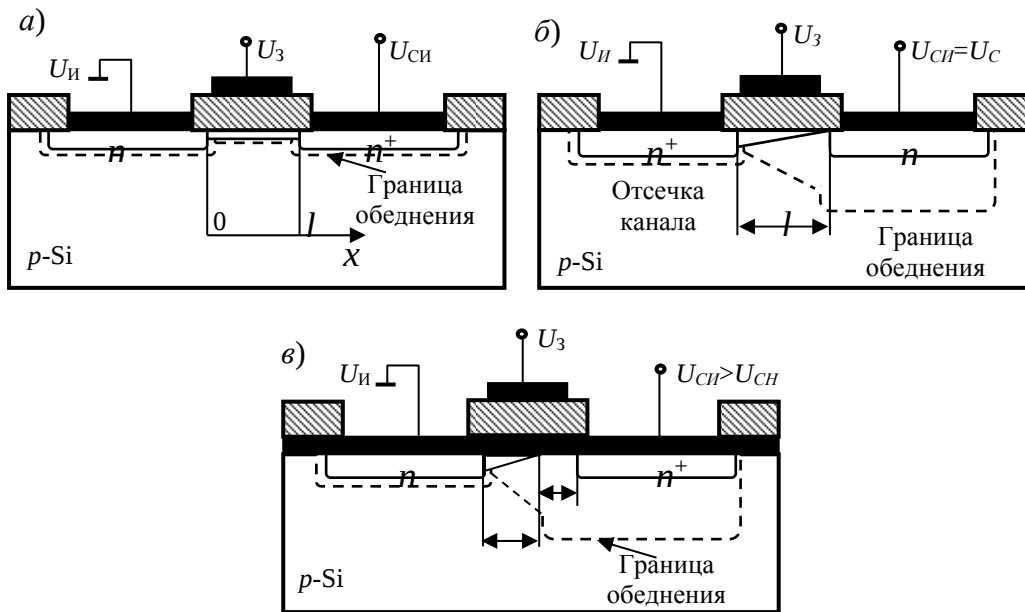
Рисунок 5.4 – Статические характеристики МДП-транзистора

На выходные ВАХ существенное влияние оказывают изменения в структуре канала, возникающие в результате токопрохождения. Если напряжения $U_H = U_C = 0$, то поле в диэлектрике однородное и толщина образовавшегося канала будет одинаковой на всем протяжении l (рисунок 5.5, *a*).

Если напряжение $U_{CH} > 0$ и не слишком велико, то канал проявляет себя как обычное сопротивление, при этом ток стока будет увеличиваться пропорционально напряжению стока. Эта область на выходных ВАХ называется *линейной областью работы транзистора*.

С увеличением напряжения U_{CH} будут возрастать ток стока и потенциал поверхности полупроводника в направлении от истока к стоку. Поэтому разность потенциалов между затвором и поверхностью полупроводника будет уменьшаться в направлении к стоку.

Соответственно, уменьшаются напряженность поля в диэлектрике и концентрация электронов в канале. В результате сечение канала начинает сужаться в направлении к стоку. По достижении напряжением на стоке значения, равного *напряжению насыщения* U_{CH} в точке $x = l$, становятся *равными нулю* разность потенциалов между затвором и поверхностью полупроводника, напряженность поля в диэлектрике и концентрация электронов. Поэтому толщина канала оказывается равной нулю (рисунок 5.5, *б*). Эти условия соответствуют началу *режима отсечки канала* (образование «горловины» канала).



а – в линейном режиме (малые напряжения на стоке); *б* – в начале насыщения (отсечка канала на границе со стоком); *в* – в режиме насыщения

Рисунок 5.5 – Структура канала и области объёмного заряда МДП-транзистора

Напряжение насыщения определяется выражением

$$U_{сн} = U_{зи} - U_0.$$

При $U_{си} > U_{сн}$ точка отсечки сдвигается к истоку и происходит укорочение канала на величину Δl . При этом обеднённый слой обратнорасположенного перехода «сток – подложка», который при $U_{си} < U_{сн}$ отделялся от поверхности каналом, выходит на поверхность полупроводника на участке Δl (рисунок 5.5, в). Потенциал в точке $x = l'$ сохраняет значение $U_{сн}$, которое было в начале насыщения. После отсечки канала ток стока практически перестает зависеть от потенциала стока. Эта область на выходных ВАХ называется областью насыщения тока стока. Насыщение тока стока объясняется следующим. В точке $x = l'$ на острие канала концентрируется электрическое поле, напряженность которого $E > E_{кр}$. В результате наступает режим насыщения скорости дрейфа электронов, инжектированных из острия канала в слой объёмного заряда. Поэтому ток через канал $I_n = e\mu_n n E_{кр}$ при $V_{др} = \mu_n E_{кр} = \text{const}$ и $n = \text{const}$ перестает зависеть от напряжения.

Вывод аналитических выражений для выходных ВАХ. Ток в канале МДП-транзистора, изготовленного на подложке p -типа, обусловлен свободными электронами, концентрация которых n . Электрическое поле E_x обусловлено напряжением между стоком и истоком $U_{си}$. Согласно закону Ома плотность тока канала

$$j(x, y, z) = en(y)\mu_n \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (5.1)$$

где e – заряд электрона;

μ_n – подвижность электронов в канале;

$n(y)$ – концентрация электронов в канале.

Проинтегрируем (5.1) по ширине b и глубине W_n канала. Тогда интеграл в левой части (5.1) дает полный ток канала I_C , а для правой получим

$$I_C = W_n \mu_n \frac{\partial U}{\partial x} \int_0^b e n(y) dy. \quad (5.2)$$

Величина под интегралом есть полный заряд электронов Q_e в канале на единицу площади. Тогда

$$I_C = W_n \mu_n Q_e \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (5.3)$$

Найдем величину заряда электронов Q_e . Запишем уравнение электро-нейтральности для зарядов на единицу площади в виде

$$Q_M = Q_{OX} + Q_e + Q_A. \quad (5.4)$$

Согласно (5.4) заряд на металлическом электроде Q_M уравнивается суммой зарядов на полупроводнике: свободных электронов Q_e , ионизованных доноров Q_A и встроенных зарядов в окисле Q_{OX} . На рисунке 5.6 приведена схема расположения этих зарядов. Из определения ёмкости следует, что полный заряд на металлической обкладке Q_M конденсатора

$$Q_M = C_{OX} U_{OX}, \quad (5.5)$$

где U_{OX} – падение напряжения на окисном слое;

C_{OX} – удельная ёмкость подзатворного диэлектрика.

Поскольку полное приложенное напряжение $U_{3И}$ есть сумма падений напряжения в окисле U_{OX} и в полупроводнике U_S , то

$$U_{OX} = U_{3И} - \Delta\phi_{Sm} - \psi_S - U(x), \quad (5.6)$$

где $\Delta\phi_{Sm}$ – разность работ выхода металл-полупроводник;

ψ_S – величина поверхностного потенциала в равновесных условиях, т. е. при $U_{3И} = 0$.

Из (5.4)–(5.6) следует

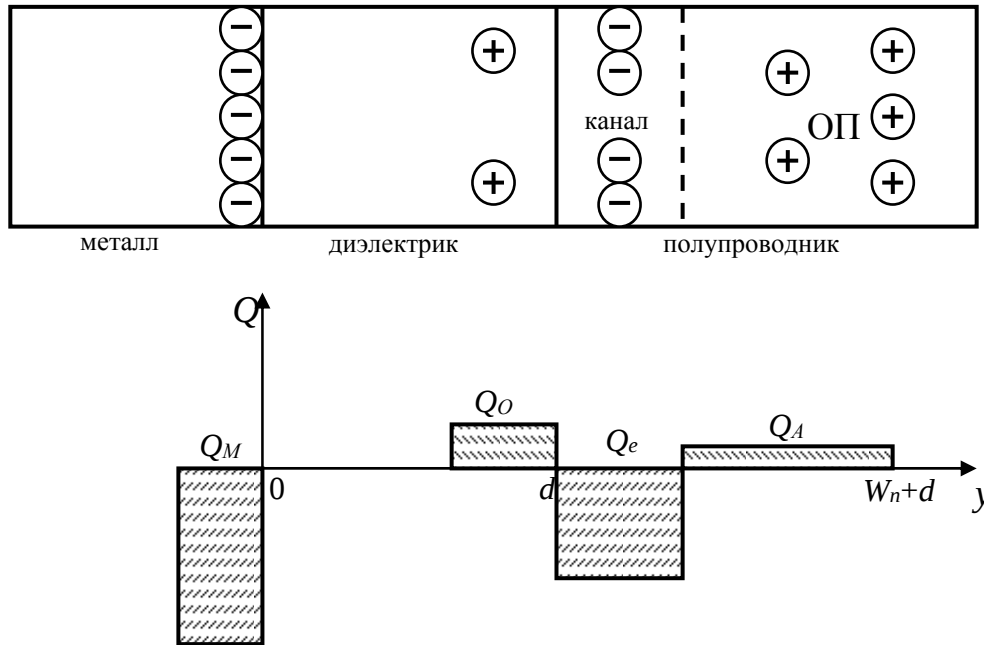
$$Q_e = C_{OX} (U_{3И} - \Delta\phi_{Sm} - \psi_S - U(x)) - Q_{OX} - Q_A. \quad (5.7)$$

Поскольку в области сильной инверсии при значительном изменении $U_{3И}$ величина ψ_S меняется слабо (условие плавного канала), будем в дальнейшем считать ее постоянной и равной потенциалу начала области сильной инверсии $\psi_S = 2\phi_0$. Пороговое напряжение $U_0 = U_{3И} - U(x)$ как напряжение на затворе,



соответствующее открытию канала в равновесных условиях $Q_e(U_{CH} = 0) = 0$. Из (5.7) следует, что

$$U_0 = \Delta\phi_{sm} + 2\phi_0 + \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + \frac{Q_A}{C_{OX}}. \quad (5.8)$$



Q_A – заряд ионизованных доноров; Q_e – заряд свободных электронов; Q_{OX} – заряд, встроенный в окисле; Q_M – заряд на металлическом электроде

Рисунок 5.6 – Схема расположения зарядов в активной области МДП-транзистора

Тогда с учетом (5.8)

$$Q_e = C_{OX}[U_{3И} - U_0 - U(x)]. \quad (5.9)$$

Подставляя (5.9) в (5.3) и проводя интегрирование вдоль канала, при изменении x от 0 до l , а $U(x)$ от 0 до U_{CH} получаем

$$I_C = \frac{W_n}{l} \mu_n C_{OX} \left[(U_{3И} - U_0) U_{CH} - \frac{U_{CH}^2}{2} \right]. \quad (5.10)$$

Уравнение (5.10) описывает вольт-амперную характеристику полевого транзистора в области плавного канала. Как следует из (5.9), по мере роста U_{CH} в канале может наступить такой момент, когда произойдет отсечка канала, т. е. $Q_e = 0$. Это соответствует условию

$$U(x) = U_{CH}^{sat} = U_{3И} - U_0. \quad (5.11)$$

Напряжение на стоке U_{CH} , необходимое для смыкания канала вблизи стока, называется напряжением отсечки U_{CH}^{sat} (на рисунке 5.5, а, б показаны состояния:

плавного и отсечённого каналов).

С ростом напряжения стока U_{CH} точка канала, соответствующая отсечке, сдвигается от стока к истоку. В первом приближении при этом на участке плавного канала от истока до точки отсечки падает одинаковое $U_{CH}^{sat} = U_{3H} - U_0$ напряжение, не зависящее от напряжения «исток – сток» U_{CH} . Поскольку эффективная длина канала l и $\Delta l = l - l' \ll l$, это обуславливает в первом приближении не зависящий от напряжения стока U_{CH} ток стока I_C . Подставив (5.11) в (5.10) вместо U_{CH} , получаем для области отсечки

$$I_C = m \frac{W}{l} \mu_n C_{OX} (U_{3H} - U_0)^2 = m S_0 (U_{3H} - U_0)^2, \quad (5.12)$$

где $m \approx 1/2$,

$$S_0 = \frac{W_n}{l} \mu_n C_{OX} = \frac{W_n}{l} \mu_n \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{II}}{d}.$$

Параметр S_0 называется **удельной крутизной** МДП-транзистора.

При приложении напряжения «канал – подложка» U_{bs} , расширяющего область пространственного заряда, меняется размер области ионизованных доноров. Из теории p – n -перехода следует, что величина заряда Q_A при смещении «канал – подложка» U_{bs}

$$Q_A = \sqrt{2q\varepsilon_S \varepsilon_0 N_A (2\phi_0 - U_{bs})}. \quad (5.13)$$

Поскольку величина Q_A входит в выражение для порогового напряжения U_0 , то изменение U_{bs} вызовет соответствующее изменение U_0 .

При этом

$$\Delta U_0 = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_S \varepsilon_0 N_A}}{C_{OX}} (\sqrt{2\phi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\phi_0}). \quad (5.14)$$

Зная толщину окисла d_{OX} и примерное значение N_A (с точностью до порядка), определяем ϕ_0 :

$$\phi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad (5.15)$$

где $n_i^2 = n \cdot p$;

n и p – концентрация электронов и дырок в канале соответственно.

Для германия $n_i = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; для кремния $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; для GaAs $n_i = 1,79 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Зная угол наклона зависимости (5.14), можно рассчитать величину (уровень) легирующей примеси в подложке МДП-транзистора.

$$N_A = \frac{C_{OX}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 q}, \quad (5.16)$$

где $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial(\Delta U_0)}{\partial(\sqrt{2\varphi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\varphi_0})}$.

5.2 Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.7.

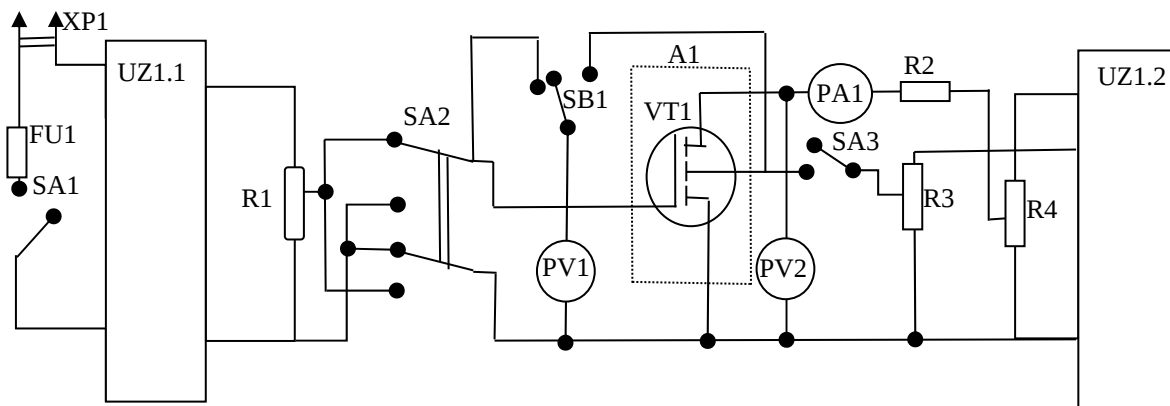


Рисунок 5.7 – Схема лабораторной установки

Регулировка напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$ и U_{bs} осуществляется ручками потенциометров, смонтированных на панели, R_1 , R_4 и R_3 соответственно. Кнопочный выключатель SB1 управляет измерением напряжения на затворе $U_{зи}$ или подложке U_{bs} (в нажатом состоянии на подложке). Тумблер SA1 подключает стенд к сети, SA2 меняет полярность $U_{зи}$, SA3 подключает подложку к источнику.

5.3 Порядок выполнения работы

1 Схема для снятия статических характеристик МДП-транзистора реализована в корпусе стенда. Исследуемый транзистор с изолированным затвором КП301Б находится в блоке А1, подключенном к стенду.

Внимание! Во избежание пробоя статическим электричеством подзатворного диэлектрика запрещается прикасаться к выводам затвора руками без предварительного заземления затворной цепи.

2 Снять семейство $I_C = f(U_{си})$ при изменении напряжения на стоке от 0 до 12 В через 1 В в крутой части и через 2 В в пологой части вольт-амперной характеристики. Устанавливаемое напряжение на затворе составляет: –5, –7, –10, –12 В.

Результаты измерений занести в таблицу 5.1. Построить график зависимости $I_C = f(U_{си})$ и определить из графика напряжение отсечки $U_{си}^{sat}$.

Таблица 5.1 – Зависимость тока стока от напряжения «сток – исток» при фиксированном напряжении на затворе

$U_{зи}$, В	$U_{си}$, В	0	1	2	3	4	6	8	10	12
5	I_C , мА									
7	I_C , мА									
10	I_C , мА									
12	I_C , мА									

3 Снять семейство переходных характеристик МДП-транзистора $I_C = f(U_{зи})$ при различных значениях напряжения «сток – исток». Величину напряжения на затворе изменять в диапазоне от -1 до -12 В через 1 В.

3.1 Выставить напряжение на стоке $U_{си} = -0,1$ В и снять $I_C = f(U_{зи})$ в области *плавного канала*.

3.2 Последовательно выставляя $U_{си} = -5$ и -10 В, снять характеристики МДП-транзистора в области *отсечки*.

При проведении измерений учесть, что увеличение тока $I_{си}$ оказывает влияние на $U_{си}$, поэтому в области отсечки $U_{си}$ необходимо контролировать при каждом измерении.

Занести результаты измерений в таблицу 5.2, построить графики $I_C = f(U_{зи})$.

Таблица 5.2 – Зависимость тока стока от напряжения на затворе при различных значениях напряжения «сток – исток»

$U_{си}$, В	$U_{зи}$, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$-0,1$	$I_{си}$, мА													
-5	$I_{си}$, мА													
-10	$I_{си}$, мА													

По формулам (5.10) и (5.12) рассчитать значения порогового напряжения U_0 и подвижности дырок μ_n . Для этого на графике зависимости $I_C = f(U_{зи})$ в области *плавного канала* проэкстраполировать прямолинейный участок зависимости к значению $I_C = 0$. Значение U_0 при этом, как следует из формулы (5.11), будет $U_0 = U_{зи} - U_{си}/2$. Величина подвижности μ_n определить из тангенсов угла наклона зависимости $I_C = f(U_{си})$ и $I_C = f(U_{зи})$.

Необходимые для расчета параметры транзистора КП301Б $W_n = 100$ мкм, $l = 20$ мкм, $d_{ох} = 100$ нм, $\varepsilon_s = 11,8$, $\varepsilon_{ох} = 3,82$, $\varphi_0 = 0,3$ В, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

4 Вывести все потенциометры в минимальное положение. Подать тумблером SA3 на подложку напряжение смещения U_{bs} , противоположное по полярности напряжению стока $U_{си}$. Снять семейство характеристик $I_C = f(U_{зи})$ в области *плавного канала* ($U_{си} = -0,1$ В) при различных U_{bs} . Результаты занести в таблицу 5.3.



Таблица 5.3 – Зависимость тока стока от напряжения на затворе при различных значениях напряжения смещения

U_{bs} , В	$U_{3П}$, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	$I_{сн}$, мА													
1	$I_{сн}$, мА													
4	$I_{сн}$, мА													
9	$I_{сн}$, мА													
12	$I_{сн}$, мА													

Построить графики зависимости $I_C = f(U_{3П})$ при различных значениях U_{bs} и определить по формуле (5.11) значения порогового напряжения U_0 . Построить график зависимости

$$\Delta U_0 = U_0(U_{bs}) - U_0(U_{bs} = 0) = f(\sqrt{2\phi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\phi_0})$$

по (5.15) и (5.16) рассчитать величину N_A и сравнить теоретическое и практическое значения уровня легирования подложки.

Отчет о работе должен содержать:

- схему для снятия характеристик МДП-транзистора;
- таблицы результатов измерений;
- графики переходных $I_C = f(U_{3П})$ и проходных $I_C = f(U_{сн})$ характеристик МДП-транзистора, графики зависимости $I_C = f(U_{3П})$ при различных напряжениях U_{bs} , $\Delta U_0 = f(\sqrt{2\phi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\phi_0})$;
- найденные из графика $I_C = f(U_{сн})$ значения напряжения отсечки и сравнение их с расчетными по (5.11);
- рассчитанные значения порогового напряжения U_0 , подвижности электронов μ_n и уровня легирования подложки N_A .

Контрольные вопросы

- 1 В чем состоит физический принцип работы полевого МДП-транзистора?
- 2 Дать определение основных структур, топологических и электрофизических параметров МДП-транзисторов.
- 3 Почему в области отсечки ток стока I_C не зависит от напряжения на стоке $U_{сн}$?
- 4 Чем объяснить влияние напряжения подложки U_{bs} на характеристики МДП-транзистора?
- 5 Каким образом из экспериментальных характеристик транзистора можно определить его электрофизические параметры?



Список литературы

- 1 **Марголин, В. И.** Физические основы микроэлектроники : учебник для втузов / В. И. Марголин, В. А. Жабреев, В. А. Тупик. – Москва : Академия, 2008. – 400 с.
- 2 **Гуртов, В. К.** Твердотельная электроника : учебное пособие / В. К. Гуртов. – 2-е изд., доп. – Москва : Мир техносферы, 2005. – 408 с.
- 3 **Пасынков, В. В.** Полупроводниковые приборы : учебное пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 8-е изд., испр. – Москва : Лань, 2006. – 480 с.
- 4 **Валенко, В. С.** Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / В. С. Валенко ; под ред. А. А. Ровдо. – Москва : Додэка-XXI, 2001. – 366 с.
- 5 **Епифанов, Г. И.** Физика твердого тела : учебное пособие для втузов / Г. И. Епифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1977. – 288 с.
- 6 **Нахалов, В. А.** Электронные твердотельные приборы : учебное пособие в 2 ч. / В. А. Нахалов. – Хабаровск : ДВГУПС, 2006. – Ч. 1. – 68 с.
- 7 **Митрофанов, О. В.** Физические основы функционирования изделий микроэлектроники : учебное пособие / О. В. Митрофанов, Б. М. Симонов, Л. А. Коледов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 168 с.

