

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы
контроля качества и диагностики состояния объектов»
дневной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2020

УДК 621.38:53
ББК 32.85:22.3
Ф50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «15» октября 2020 г., протокол № 3

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

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

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

Учебно-методическое издание

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Часть 2

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
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:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика».....	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.....	19
3 Лабораторная работа № 2.2. Исследование влияния температуры на вольт-амперную характеристику $p-n$ -перехода.....	22
4 Лабораторная работа № 2.3. Исследование обратной ветви вольт-амперной характеристики $p-n$ -переходов с различной шириной запрещенной зоны полупроводника.....	26
5 Лабораторная работа № 2.4. Исследование проводимости МДП-структур.....	29
Список литературы.....	42

Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика»

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. Собранную 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*-типов

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, *a*), 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 $D_n = 38 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p = 13 \text{ см}^2/\text{с}$; 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.

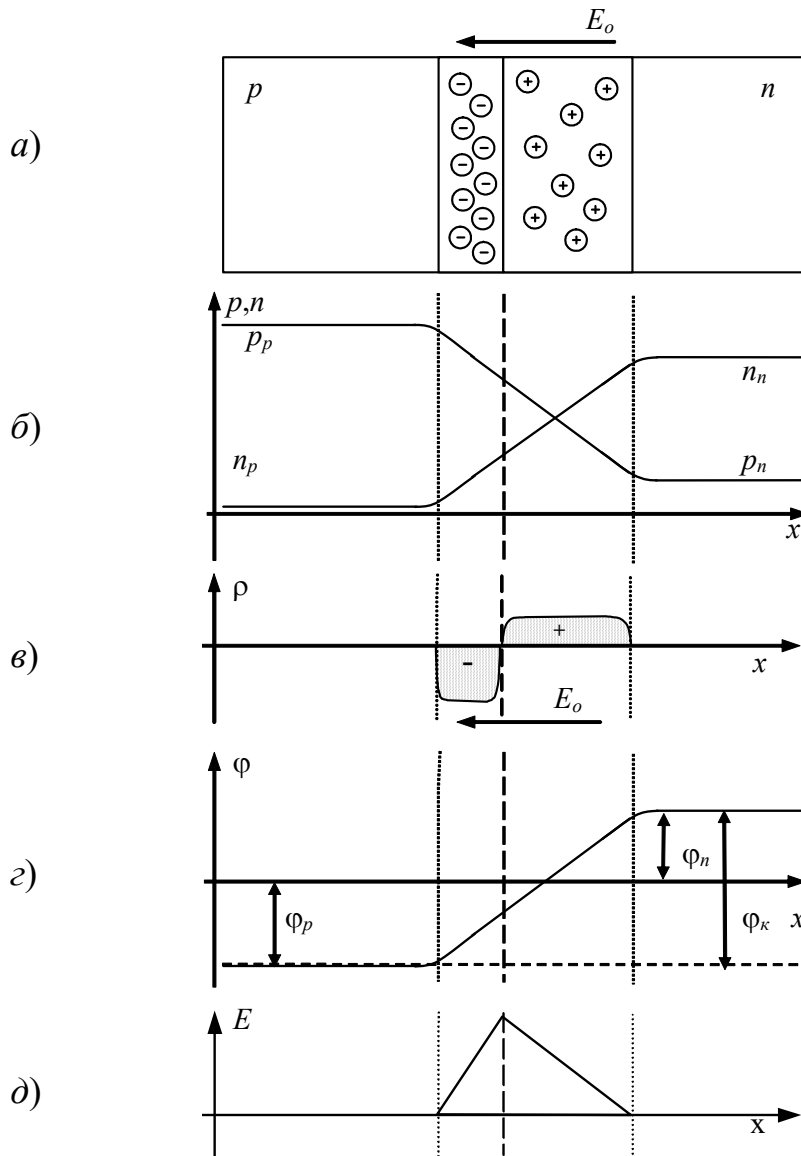


Рисунок 1.1 – Характеристики *p-n*-перехода

Между образовавшимися зарядами возникает **контактная разность потенциалов** $\phi_k = \phi_n - \phi_p$ и **электрическое поле** E_o , 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_o происходит их дрейф.

Плотность дрейфового тока

$$j_{\partial p} = j_{\partial pp} + j_{\partial pn} = q(p_n \mu_p E + n_p \mu_n E), \quad (1.2)$$

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:

$$j_{\text{диф}} + j_{\partial p} = 0.$$

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, ибо 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.

Таблица 1.1 – Контактная разность потенциалов для ряда материалов

Полупроводник	φ_k , В
Ge	0,3...0,4
Si	0,7...0,8
GaAs	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_0 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и воздуха соответственно.

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 вид:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \frac{\varphi_k}{N_d}}.$$

Это 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

$$I_{p-n} = I_{диф} + I_{др} = 0,$$

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).

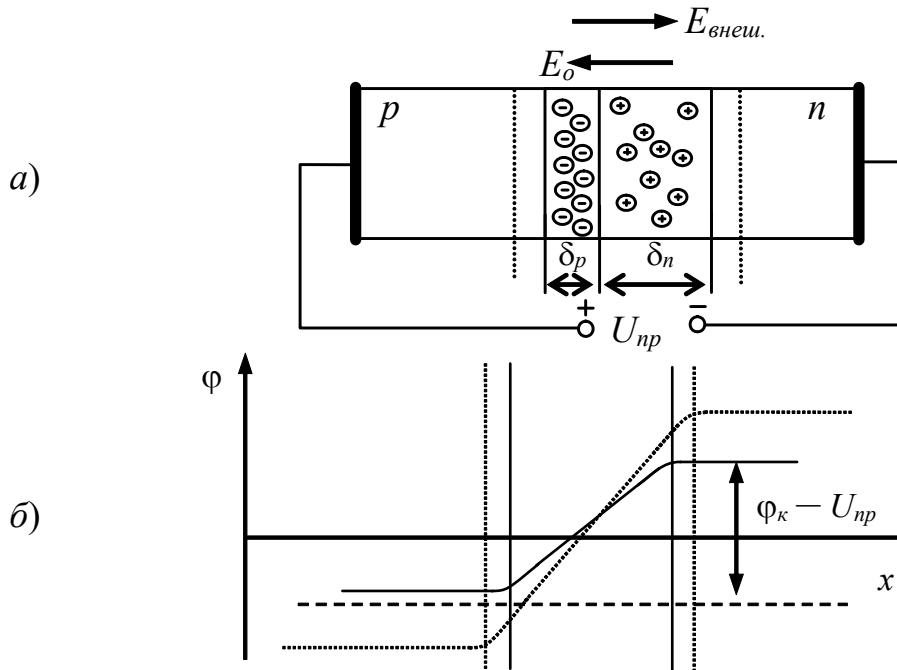


Рисунок 1.2 – Включение перехода в прямом направлении

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_0 , отчего результирующее поле в p - n -переходе ослабляется и потенциальный барьер снижается. Высота его становится $\phi = \phi_k - U_{np}$ (рисунок 1.2, б).

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:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \frac{\phi_k - U_{np}}{N_d}}. \quad (1.5)$$

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. Данный процесс называется **инжекцией**.

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

$$p_{no} = p_{po} e^{q\phi_k/(kT)};$$

$$n_p = n_{no} e^{q\phi_k/(kT)}.$$

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:

$$I_{диф} = I_{диф0} e^{qU_{np}/(kT)},$$

где $I_{диф0}$ – 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 $I_{dpo} = I_{диф0} = I_0$ в равновесном состоянии, получим, что при подключении к p – n -переходу прямого напряжения результирующий ток

$$I_{np} = I_{диф} - I_{dp} = I_0 e^{qU_{np}/kT} - I_0$$

или

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

где $q/kT = 26$ 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, *a*).

Высота потенциального барьера при обратном напряжении увеличивается до $\varphi = \varphi_k + U_{обр}$ (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.

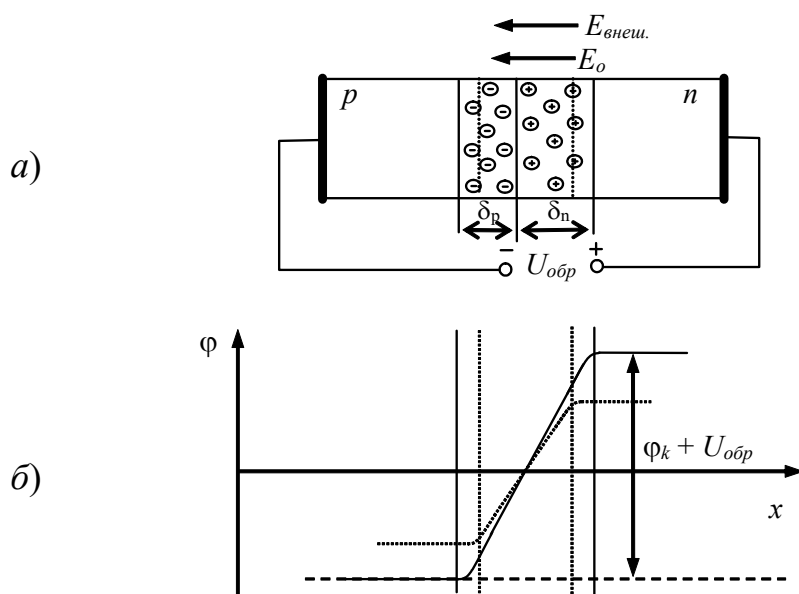


Рисунок 1.3 – Включение перехода в обратном направлении

Поскольку основные носители оттесняются от перехода, толщина его увеличивается:

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

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

$$p_n = p_{no} e^{-\frac{qU_{обр}}{kT}}; \quad n_p = n_{po} e^{-\frac{qU_{обр}}{kT}},$$

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** (при 300 К $U_T = 26$ мВ), $U_T = kT / q$;

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.

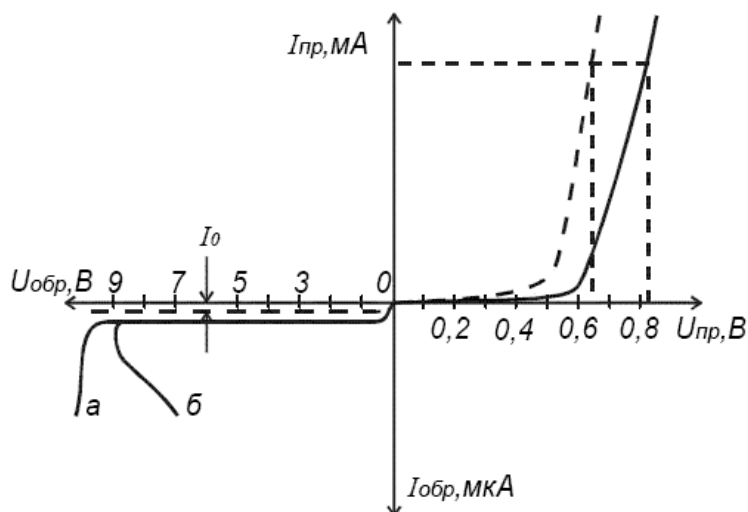


Рисунок 1.4 – Вольт-амперные характеристики p – n -перехода

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 $U_{пор}$ переход исчезает и зависимость между током и напряжением определяется величиной сопротивления $r_o = r_p + r_n$ (рисунки 1.5 и 1.6).

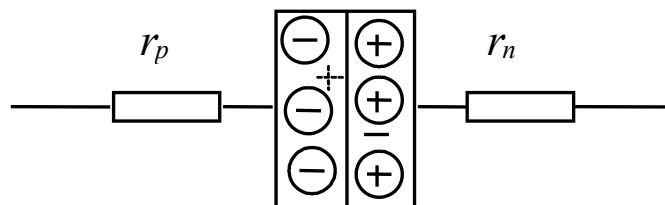


Рисунок 1.5 – Эквивалентная схема p – n -перехода

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

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

в отличие от идеального p - n -перехода, имеющего всего одну составляющую, определяемую выражением (1.9).

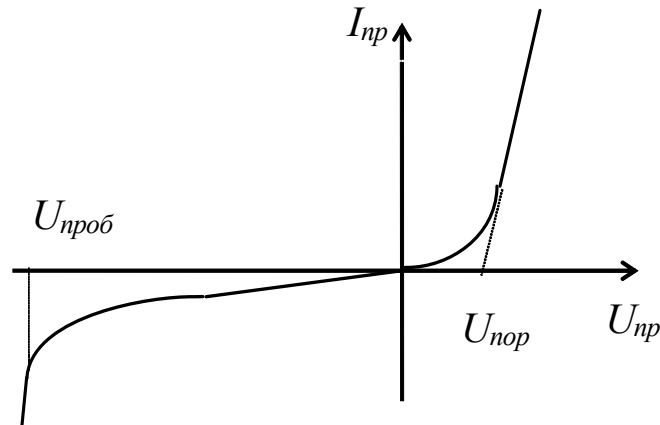


Рисунок 1.6 – Вольт-амперная характеристика реального p - n -перехода

Дело в том, что при анализе идеального перехода 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 практически 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 каналные 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 каналные 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 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:

$$I = I_o [e^{q(U_{np} - I r_6) / (kT)} - 1],$$

где r_6 – 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 также вызвать ионизацию атомов. Таким образом, будет происходить лавинообразное нарастание тока, приводящее к пробоем p - n -перехода (см. рисунок 1.4, характеристика a). При этом ток, протекающий через переход, превысит в M раз величину тока I_o , обусловленного потоком первоначальных носителей:

$$I = I_o M,$$

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 порядка 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.

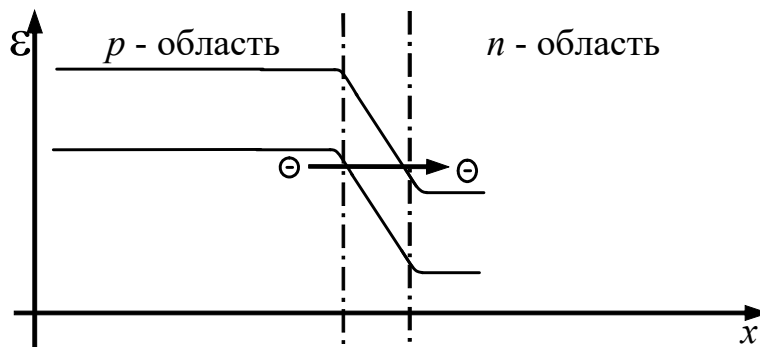


Рисунок 1.7 – Искривление энергетических зон при увеличении приложенного напряжения к p - n -переходу

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 происходит 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 b). 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):

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

где ΔT – некоторое изменение температуры окружающей среды;

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

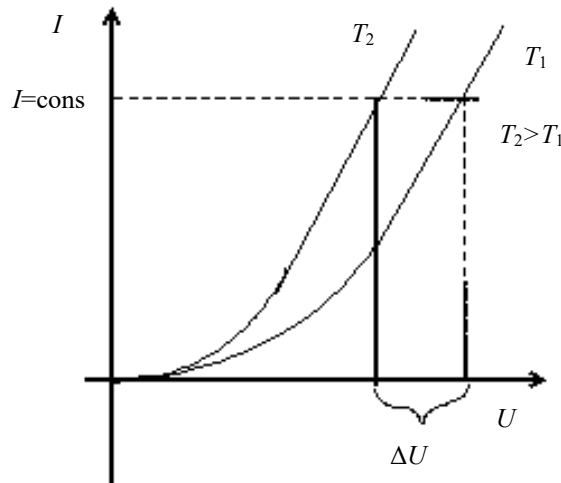


Рисунок 1.8 – К определению ТКН перехода

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, *a*) 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.

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.

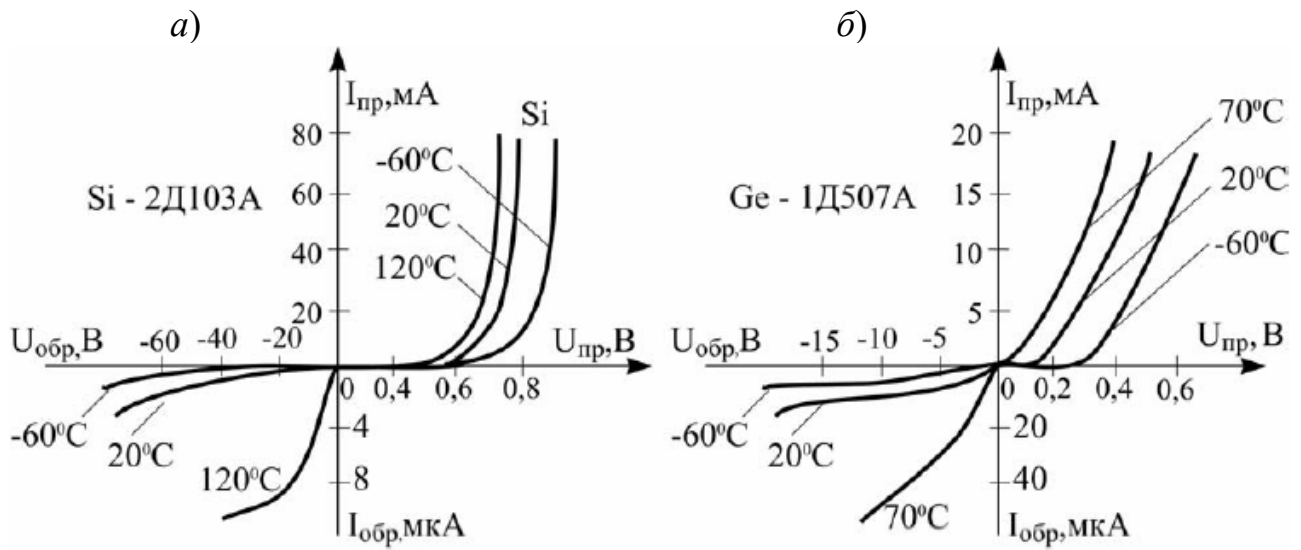


Рисунок 1.9 – Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого переходов

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.

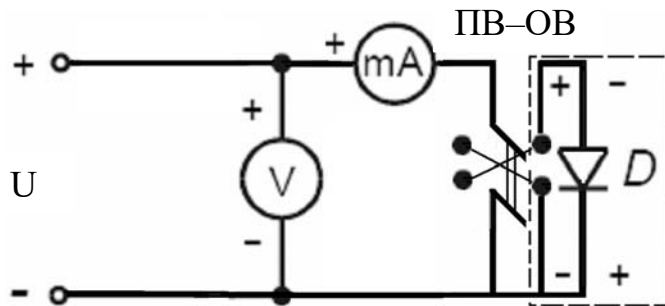


Рисунок 2.1 – Схема установки для снятия прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики диода

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 в 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 пробоя.

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 пунктам 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 диодов.
- 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 $20...100$ °С. 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.

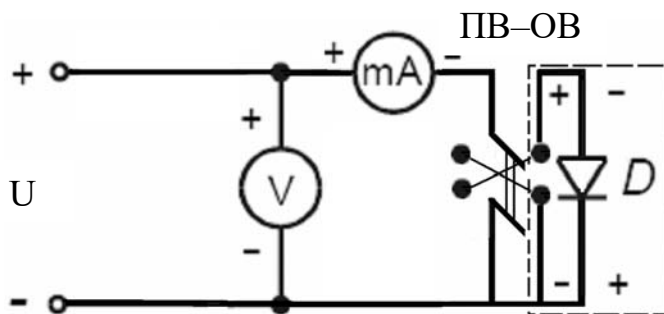


Рисунок 3.1 – Схема установки для исследования влияния температуры на вольт-амперную характеристику $p-n$ -перехода

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; 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 ступенями 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 mA и вольтметра V .

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 пунктам 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 Перевода переключатель печи в положение 2, а затем в 3, в соответствии с пунктами 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 Вывести 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.

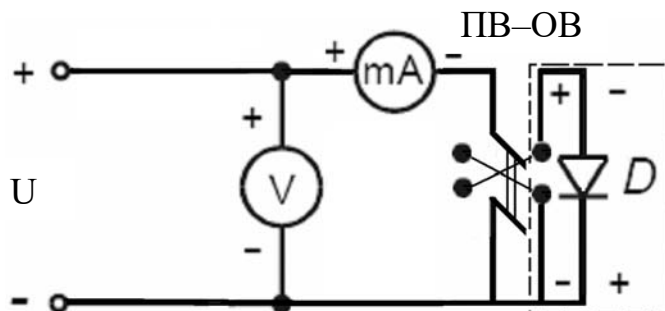


Рисунок 4.1 – Схема установки для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики диода

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 кремниевых переходов

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

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 пункту 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	$U_{обр}, В$							
$I_{обр}, мА$									
4	$U_{обр}, В$								
	$I_{обр}, мА$								

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 кремниевых $p-n$ -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 эффекта 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.

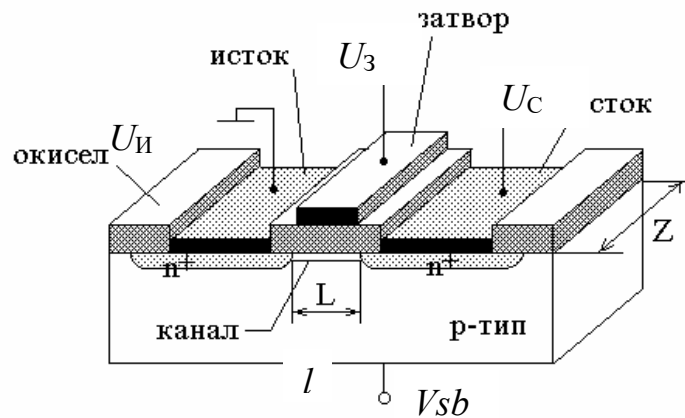


Рисунок 5.1 – Конструкция МДП-транзистора

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 практически 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 обратно смещенного 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.

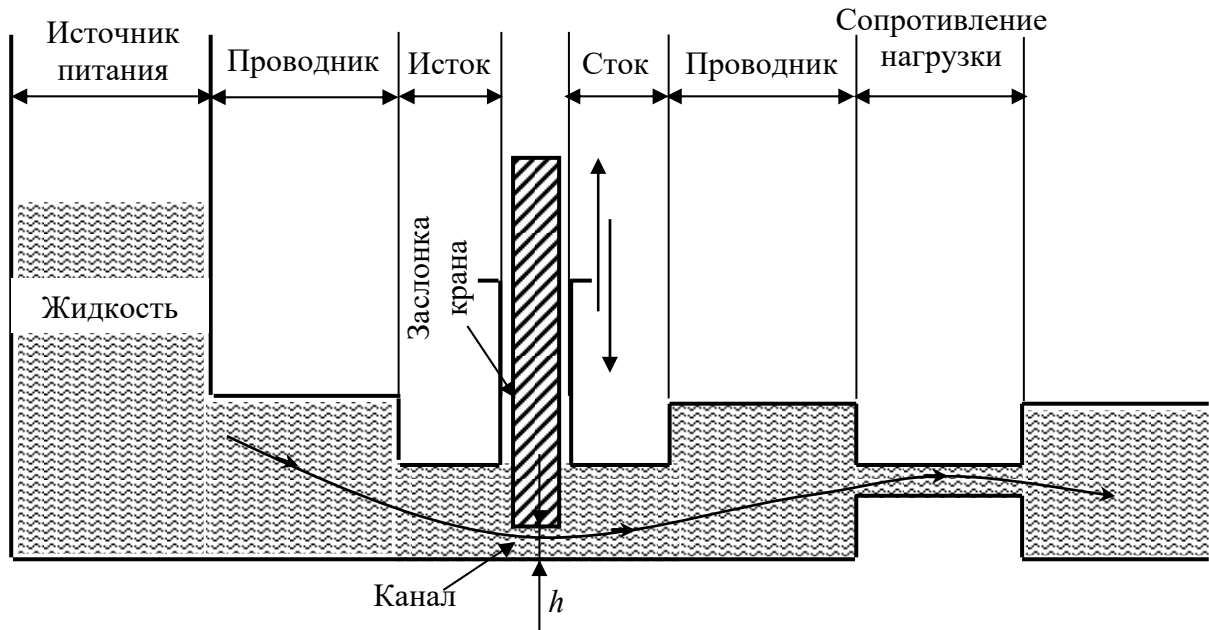


Рисунок 5.2 – Гидравлическая модель, иллюстрирующая принцип работы усилителя на МДП-транзисторе и на полевом транзисторе

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 со 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 со 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 емкость между металлом затвора и полупроводником.

Следовательно, удельная емкость затвор–полупроводник определяет степень модуляции проводимости канала, т. е. управляющую способность затвора. Поэтому удельная емкость 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, *a*). 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*):

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

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

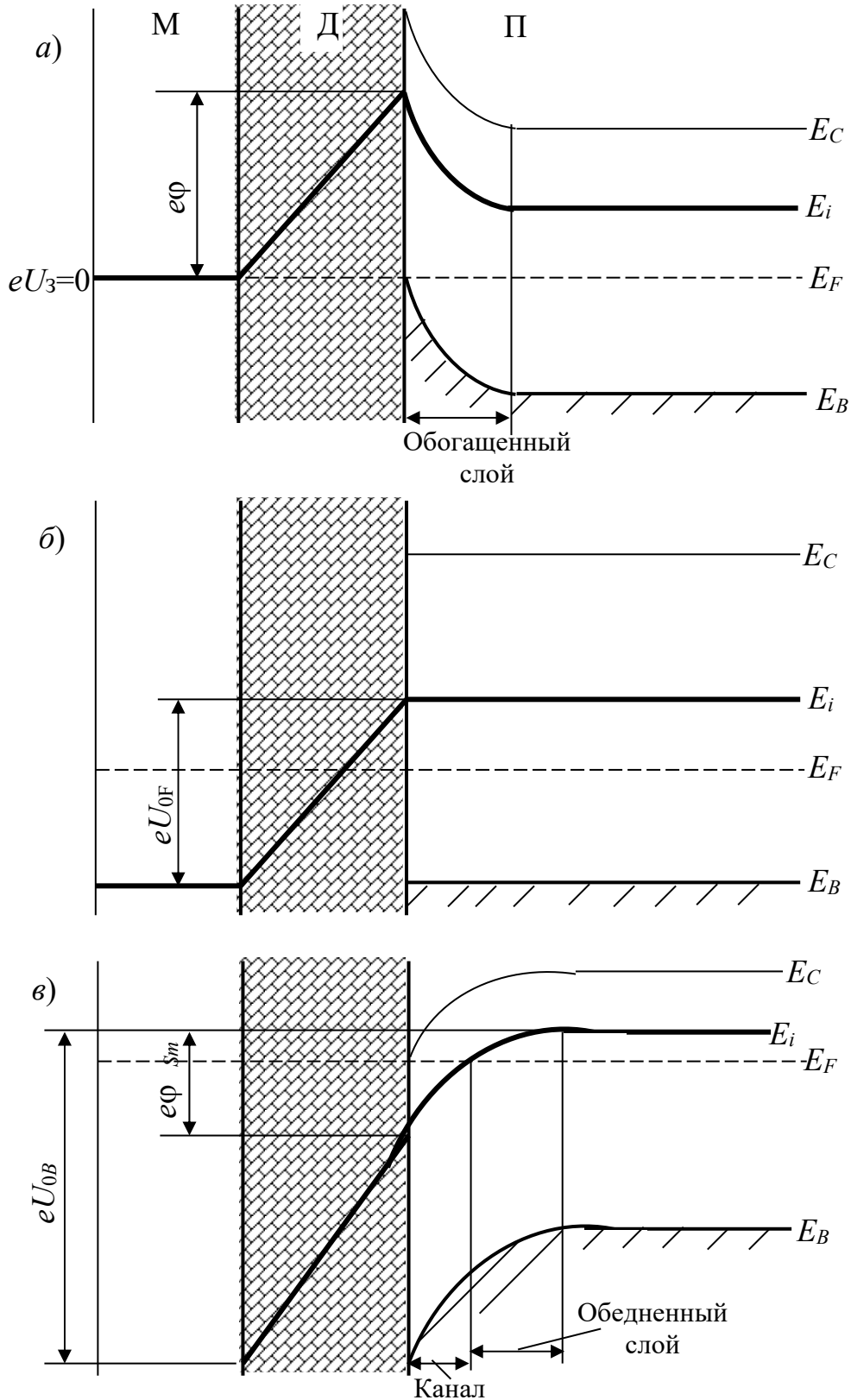
Q_{OS} – равновесный удельный заряд поверхности.

На рисунке 5.3, *a* 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.



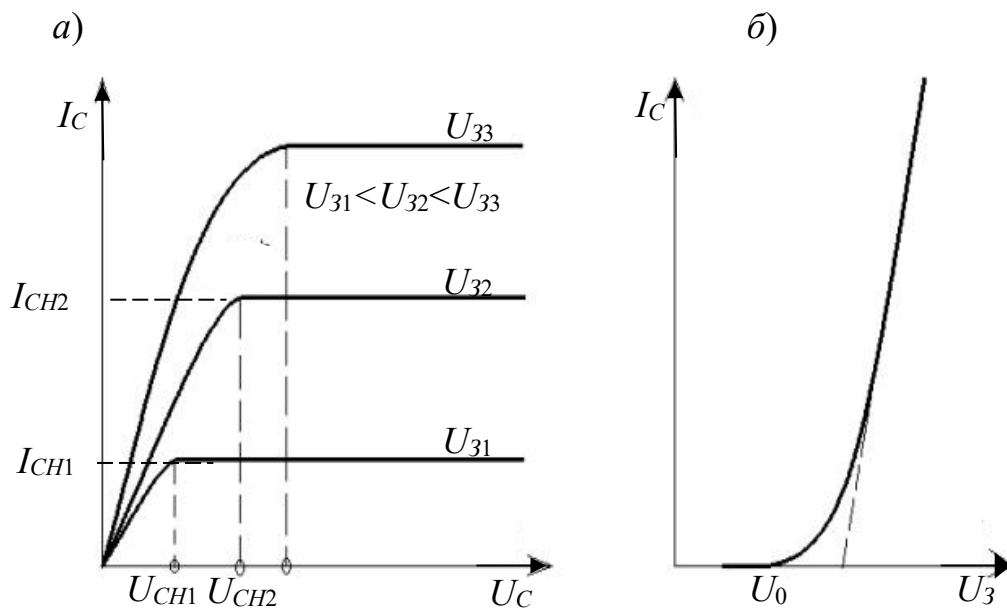
a – исходное состояние; *б* – состояние после подачи напряжения спрямления зон U_{0F} ; *в* – состояние после подачи напряжения изгиба зон U_{0B}

Рисунок 5.3 – Энергетические диаграммы МДП-транзистора

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 E_F (энергия Ферми) будет подниматься вверх, а расстояние между уровнями E_I (середина запрещенной зоны) и E_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 $\varphi_s = Ec/e$ (E_C – энергия низшего уровня зоны проводимости) равна $Ec/e = 2\varphi_{sm}$ (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.

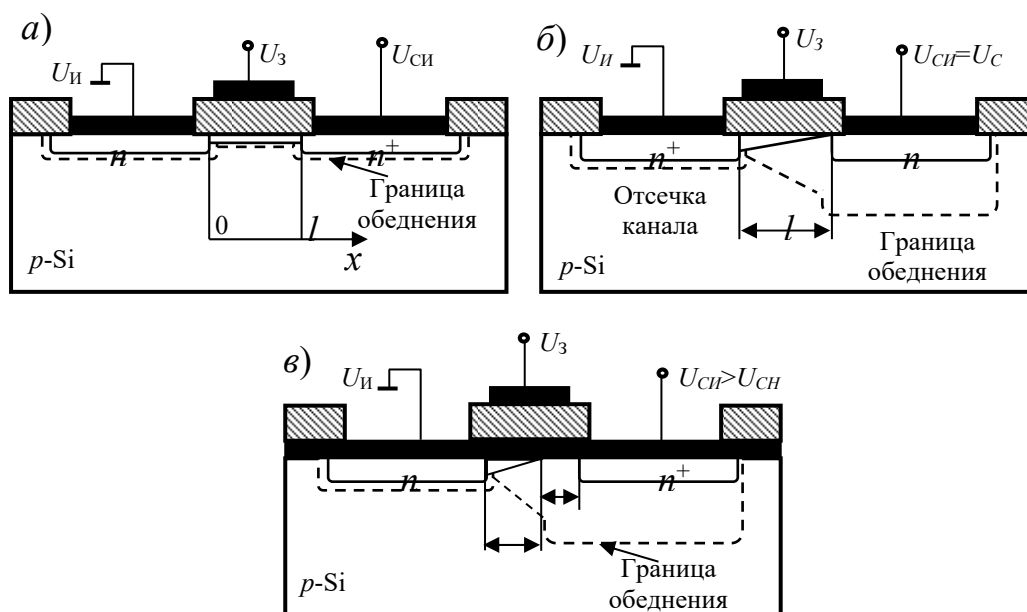
Статические характеристики. Соотношения между напряжениями и токами в МДП-транзисторах определяются с помощью выходных и передаточных характеристик (рисунок 5.4).



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*).



a – 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 объемного заряда МДП-транзистора

Если напряжение $U_{си} > 0$ 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 $U_{си}$ 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** $U_{сн}$ 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).

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 обедненный слой обратного смещенного 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_{CH} , 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 объемного 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

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

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 электронейтральности для зарядов на единицу площади в виде

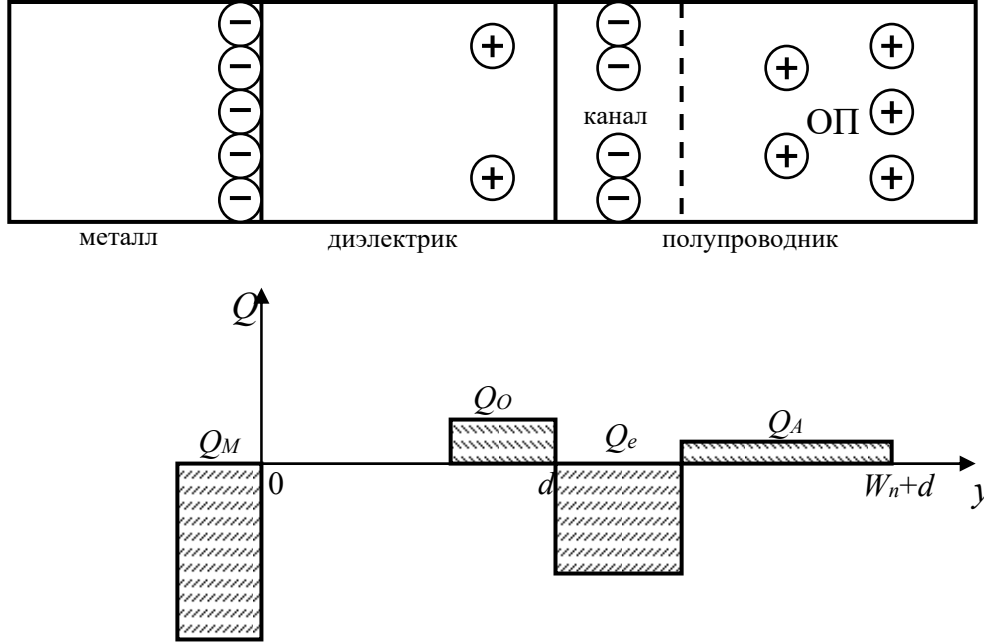
$$Q_M = Q_{OX^+} + Q_e + Q_A. \quad (5.4)$$

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 емкость подзатворного диэлектрика.



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

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

$$U_{OX} = U_{ЗИ} - \Delta\phi_{Sm} - \phi_S - U(x), \quad (5.6)$$

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

ϕ_S – величина поверхностного потенциала в равновесных условиях, т. е. при $U_{СИ} = 0$.

Из (5.4)–(5.6) следует

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

Поскольку в области сильной инверсии при значительном изменении $U_{ЗИ}$ величина ψ_S меняется слабо (условие плавного канала), будем в дальнейшем считать ее постоянной и равной потенциалу начала области сильной инверсии: $\phi_S = 2\phi_0$. Пороговое напряжение $U_0 = U_{ЗИ} - U(x)$ как напряжение на затворе, соответствующее открытию канала в равновесных условиях $Q_e (U_{СИ} = 0) = 0$. Из (5.7) следует, что

$$U_0 = \Delta\varphi_{sm} + 2\varphi_0 + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{Q_A}{C_{ox}}. \quad (5.8)$$

Тогда с учетом (5.8)

$$Q_e = C_{ox}[U_{зи} - U_0 - U(x)]. \quad (5.9)$$

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

$$I_C = \frac{W_n}{l} \mu_n C_{ox} \left[(U_{зи} - U_0) U_{си} - \frac{U_{си}^2}{2} \right]. \quad (5.10)$$

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

$$U(x) = U_{си}^{sat} = U_{зи} - U_0. \quad (5.11)$$

Напряжение на стоке $U_{си}$, необходимое для смыкания канала вблизи стока, называется напряжением отсечки $U_{си}^{sat}$ (на рисунке 5.5, а, б показаны оба состояния: плавного и отсеченного каналов).

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

$$I_C = m \frac{W_n}{l} \mu_n C_{ox} (U_{зи} - U_0)^2 = m S_0 (U_{зи} - U_0)^2, \quad (5.12)$$

где $m \approx \frac{1}{2}$,

$$S_0 = \frac{W_n}{l} \mu_n C_{ox} = \frac{W_n}{l} \mu_n \frac{\epsilon_0 \epsilon_{II}}{d}.$$

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}

$$Q_A = \sqrt{2q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_A (2\varphi_0 - U_{bs})}. \quad (5.13)$$

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

При этом

$$\Delta U_0 = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_A}}{C_{OX}} (\sqrt{2\varphi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\varphi_0}). \quad (5.14)$$

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

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad (5.15)$$

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:

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

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

5.2 Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.7.

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.

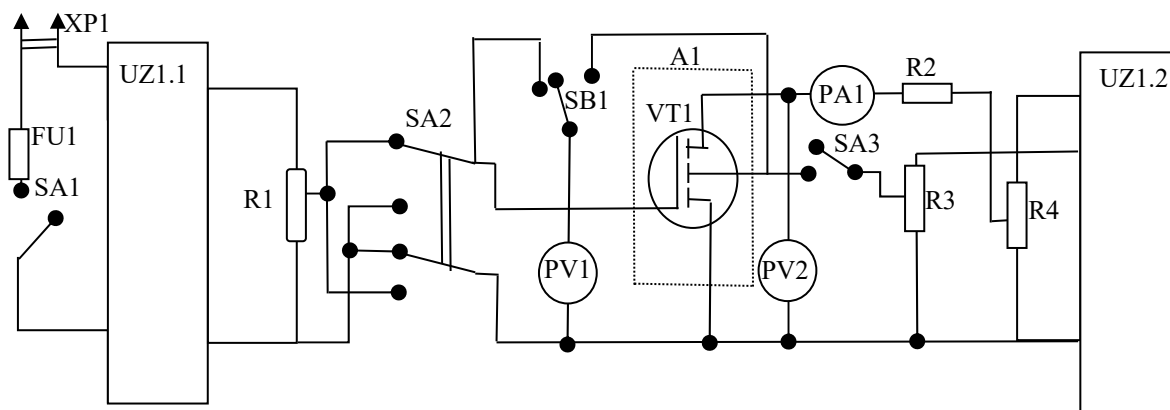


Рисунок 5.7 – Схема лабораторной установки

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.

Построить графики зависимости $I_C = f(U_{3И})$ 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 $I_C = f(U_{3И})$ и проходных $I_C = f(U_{СИ})$ характеристик МДП-транзистора, графики зависимости $I_C = f(U_{3И})$ при различных напряжениях U_{bs} , $\Delta U_0 = f(\sqrt{2\phi_0 + U_{bs}} - \sqrt{2\phi_0})$;
- найденные из графика $I_C = f(U_{СИ})$ 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 $U_{СИ}$?
- 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.