

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

АРЗАМАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(филиал)

Кафедра «Конструирование и технология РЭС»

БАРАНОВА А.В.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Для студентов всех форм обучения направления
211000 «Конструирование и технология электронных средств»*

Нижний Новгород 2012

УДК 621.382.+621.385
ББК 32.852.3
Б 241

Баранова А.В.

Б241 Физические основы микро- и нанoeлектроники: лабораторный практикум для студентов всех форм обучения направления 211000 «Конструирование и технология электронных средств» / Баранова А.В.; АПИ НГТУ. – Н.Новгород: НГТУ, 2012. – 39 с.

Приведены краткие теоретические сведения, порядок выполнения и оформления лабораторных работ, контрольные вопросы к каждой выполняемой работе.

Рис. 26. Табл. 7. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.382.+621.385
ББК 32.852.3

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2012
© Баранова А.В., 2012

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

о работе студентов в лаборатории

«Физические основы микроэлектроники»

По действующему учебному плану предусмотрено выполнение четырех лабораторных работ. Работы выполняются бригадами студентов (не более трех человек). Цель лабораторных работ – закрепить знания по курсу «Физические основы микро- и наноэлектроники», полученные студентами на лекциях, привить студентам навык самостоятельной работы.

Перед выполнением лабораторных работ студенты должны получить представление о цели работы, содержании эксперимента, форме отчета, ознакомиться с общими теоретическими сведениями. Обязательной является проработка теоретического материала, изложенного в лекциях и указанного в списке литературы. Для оформления отчета и рабочих записей у каждого студента должна быть индивидуальная рабочая тетрадь, в которой до начала лабораторных занятий студент подготавливает необходимые для заполнения формы таблиц, графиков и т.д.

Перед проведением цикла лабораторных работ студенты на первом занятии должны ознакомиться с правилами распорядка в лаборатории, с Положением о проведении лабораторных занятий и инструкцией по технике безопасности.

Неподготовленные студенты к выполнению работ не допускаются. Пропущенные работы выполняются в свободное от занятий время по расписанию работы лаборатории.

Результаты выполнения эксперимента студенты предъявляют преподавателю и в случае их удовлетворительной сходимости с теоретическими данными приступают к выполнению отчета по разработанной форме.

Отчет должен представлять собой краткий реферат о выполненных исследованиях (цель и задачи исследования, анализ полученных результатов, общие выводы). Оформленный отчет предъявляется преподавателю на проверку. После устранения замечаний (если таковые имеются) преподаватель делает отметку в журнале о полном выполнении работы.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы необходимо соблюдать правила техники безопасности:

1. Приступая к работе, следует ознакомиться с приборами, источниками электропитания, способами их включения и выключения.
2. Перед началом работы все имеющиеся в цепи реостаты полностью ввести, а потенциометры - вывести.
3. После окончания сборки схемы преподаватель или лаборант должен ее проверить и дать разрешение на ее включение.
4. Запрещается прикасаться руками к зажимам, находящимся под напряжением; наличие напряжения на зажимах приборов или элементов схемы следует проверять только измерительными приборами.
5. Все изменения в схеме или устранение причин и неисправностей можно производить только после полного отключения источников питания.
6. После окончания измерений, полученные результаты следует показать преподавателю и, получив разрешение, приступить к разборке исследуемой схемы; запрещается разбирать схему, если она не отключена от источников питания.

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы микро- и наноэлектроники» является базовой дисциплиной профессионального цикла, читаемого в третьем семестре после изучения курса общей физики, а так же химии и углубленно изучает физические процессы в полупроводниках, являющихся основными материалами в производстве современных полупроводниковых приборов и интегральных схем, и их зависимость от внешних факторов. Она является основой для изучения курсов «Материалы и компоненты электронных средств», «Электротехника и электроника», «Схемо- и системотехника», «Цифровые устройства и элементная база ИС».

Список выполняемых работ представлен ниже.

Первая работа – определение эффективного времени жизни полупроводников.

Вторая работа – определение высоты потенциального барьера p - n перехода.

Третья работа посвящена исследованию температурных свойств электронно-дырочных переходов.

Четвертая работа посвящена исследованию фотоэлектрических свойств полупроводников.

Цель работ: закрепление теоретического курса.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Цель работы

Определение эффективного времени жизни неосновных носителей тока в базе полупроводникового прибора по закону изменения «остаточной» ЭДС при включении прямого тока через диод;

Исследование температурной зависимости времени жизни.

2. Краткие теоретические сведения

Необходимым условием электрического тока в полупроводниках является существование электронов в зоне проводимости или дырок в валентной зоне. Так как состояние электронов в зоне проводимости при имеющемся вакантном нижерасположенном уровне энергетически невыгодно, то электрон будет проявлять тенденцию к переходу на этот пустой уровень. Следовательно, неизменная концентрация носителей может поддерживаться лишь непрерывно действующим механизмом, пополняющим электронами (дырками) зону проводимости (валентную зону) взамен перешедших с нее зарядов на донорные уровни, в валентную зону.

Таким механизмом являются тепловые колебания кристаллической решетки. Энергия колебаний передается электронам, в результате происходит переброс (генерация) последних в зону проводимости (или в состояние на акцепторных уровнях).

Одновременно с этим происходит обратный процесс – рекомбинация электронов и дырок. Непосредственная рекомбинация свободного электрона со свободной дыркой – редкое явление. Главную роль следует отвести механизму рекомбинации с помощью **центров** рекомбинации, которые часто называют ловушками. Ловушка описывается совокупностью энергетических уровней, расположенных глубоко в запрещенной зоне, близко к ее середине. Переход электрона из зоны проводимости на уровень ловушки и затем в валентную зону более вероятен, чем непосредственный переход через запрещенную зону при непосредственной рекомбинации.

Поскольку ловушка в равной степени облегчает переход электрона как из зоны проводимости в валентную зону, так и в обратном направлении, она представляет собой не только центр рекомбинации, но и центр генерации носителей. С физической точки зрения понятие ловушек столь же широко, как и понятие примесей; это могут быть и посторонние атомы, и различные подвижные частицы, и дефекты кристаллической решетки.

Это мы рассмотрели рекомбинацию в объеме полупроводника. Однако не менее, а часто более существенное значение имеет рекомбинация на поверхности. Это объясняется тем, что дефекты решетки неизбежны в первую

очередь на поверхности кристалла, где нарушена симметрия связей атомов, а также более вероятно наличие разного рода пленок (адсорбированные газы, влага).

При термодинамическом равновесии генерация и рекомбинация происходят с разной интенсивностью, так, что плотность носителей обоих знаков – равновесная, концентрация остается постоянной.

Концентрация носителей заряда, вызванная термическим возбуждением в состоянии теплового равновесия, называется **равновесной**.

Однако, помимо теплового возбуждения, появление свободных носителей заряда может быть связано с другими причинами, например, в результате облучения фотонами или частицами большой энергии, ударной ионизации и др. Возникшие таким образом избыточные носители заряда называются **неравновесными**.

Таким образом, полная концентрация носителей заряда равна:

$$\begin{aligned}n &= n_0 + \Delta n ; \\p &= p_0 + \Delta p ,\end{aligned}$$

где n_0 и p_0 – равновесная концентрация;

Δn и Δp – неравновесная концентрация электронов и дырок.

После прекращения действия механизма, вызвавшего появление неравновесной концентрации носителей, происходит постепенное возвращение к равновесному состоянию. Процесс установления равновесия заключается в том, что каждый избыточный электрон при встрече с вакантным местом (дыркой) занимает его, в результате чего неравновесные носители заряда исчезают.

Каждый неравновесный носитель заряда, возбужденный каким-либо образом, проводит в свободном состоянии некоторое время до рекомбинации, которое может быть различным для различных носителей заряда. Поэтому вводят **среднее** время жизни в возбужденном состоянии электрона τ_n (или дырки τ_p), величина которого может меняться для различных материалов в широких пределах.

Пусть с помощью какого-либо механизма в полупроводнике возникли избыточные носители с концентрацией $\Delta n_0 = \Delta p_0$ и к началу отсчета времени ($t = 0$) этот механизм выключается. Начиная с этого момента времени концентрация избыточных носителей за счет рекомбинации будет постепенно снижаться, причем скорость рекомбинации будет равна $\frac{\Delta n}{\tau_n}$, где Δn – текущая неравновесная концентрация.

Тогда можно составить следующее уравнение:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}.$$

Решая это уравнение при условии, что $\Delta n(t=0) = \Delta n_0$ получим:

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right).$$

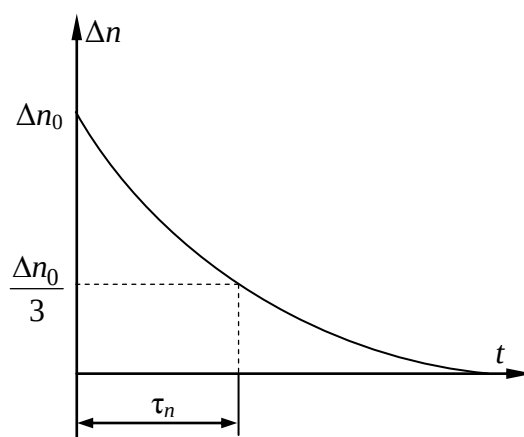


Рис. 1.1

Т.е. процесс рекомбинации описывается экспоненциальной зависимостью от времени, причем среднее время жизни представляет собой такой отрезок времени, за которое концентрация избыточных носителей изменится в e раз.

Время жизни электрона определяется как среднее время между двумя встречами электрона с дыркой.

Время жизни неравновесных носителей не является константой материала, а меняется с изменением температуры, концентрации примесей и дефектов решетки. В реальных условиях среднее время жизни носителей в полупроводниках составляет $10^{-2} - 10^{-8}$ сек.

Одним из методов определения эффективного времени жизни (термин «Эффективное» время жизни учитывает наличие как объемной, так и поверхностной рекомбинации) является наблюдение остаточной ЭДС на переходе, которая после выключения тока сохраняется на нем до тех пор, пока неравновесный заряд дырок в базе не исчезнет полностью (рис. 1.2).

Из теории перехода, известно выражение его вольтамперной характеристики:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

причем ток пропорционален величине накопленного в базе заряда дырок Q_p :

$$Q_p = \tau_p I. \quad (2)$$

При выключении тока заряд дырок будет исчезать вследствие рекомбинации по экспоненциальному закону, т.е.:

$$Q_p(t) = Q_{p\max} e^{-\frac{t}{\tau_p}}, \quad (3)$$

где τ_p - эффективное время жизни дырок, а

$Q_{p\max}$ - величина заряда в момент выключения тока.

Используя выражения (1) и (3) получим:

$$I_0 \left(e^{\frac{U_{\max}}{\varphi_T}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau_p}} = I(t),$$

или при $V_{\max} \gg \varphi_T$:

$$I = I_0 e^{\frac{1}{\varphi_T} \left[U_{\max} - \frac{\varphi_T t}{\tau_p} \right]}, \quad (4)$$

т.е.

$$U(t) = U_{\max} - \varphi_T \cdot \frac{t}{\tau_0}. \quad (5)$$

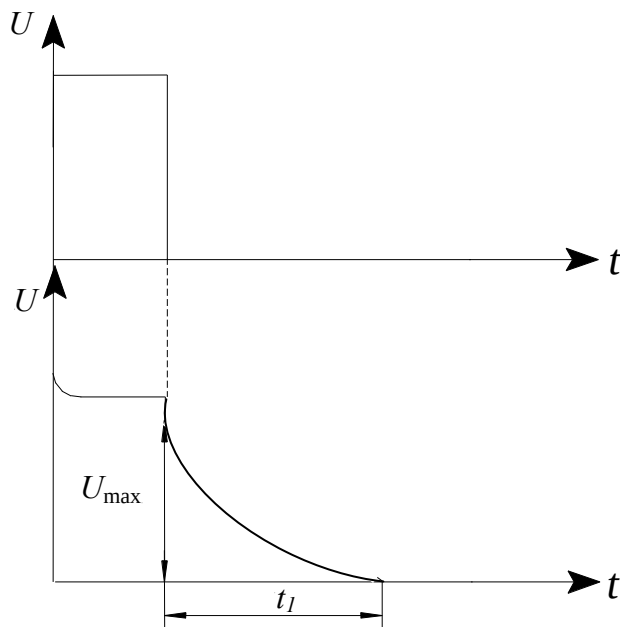


Рис. 1.2

Выражение (5) дает зависимость остаточной ЭДС на переходе при его отключении. Эта зависимость линейна и по ее наклону можно определить эффективное время жизни неравновесных носителей заряда:

$$\tau_p = \varphi_T \cdot \frac{t_1}{U_{\max}} = \frac{T}{11600} \cdot \frac{t_1}{U_{\max}}. \quad (6)$$

Этот метод может быть применен только для приборов, содержащих p - n переход. Для определения времени жизни носителей заряда в однородных проводниках используются более сложные методы.

3. Задание к лабораторной работе

1. Определить время жизни неосновных носителей заряда в базе диода, указанного преподавателем при комнатной температуре.
2. Определить время жизни неосновных носителей заряда в базе диода в диапазоне температур от 20°C до 80°C через 20°C.
3. Вычислить τ_p при разных температурах.
4. Построить графики зависимости τ_p от температуры.

4. Описание установки

Для измерения эффективного времени жизни используются образцы диодов, помещенные в термошкаф, генератор импульсов и осциллограф. Схема установки для измерения времени жизни приведена на рис. 1.3.

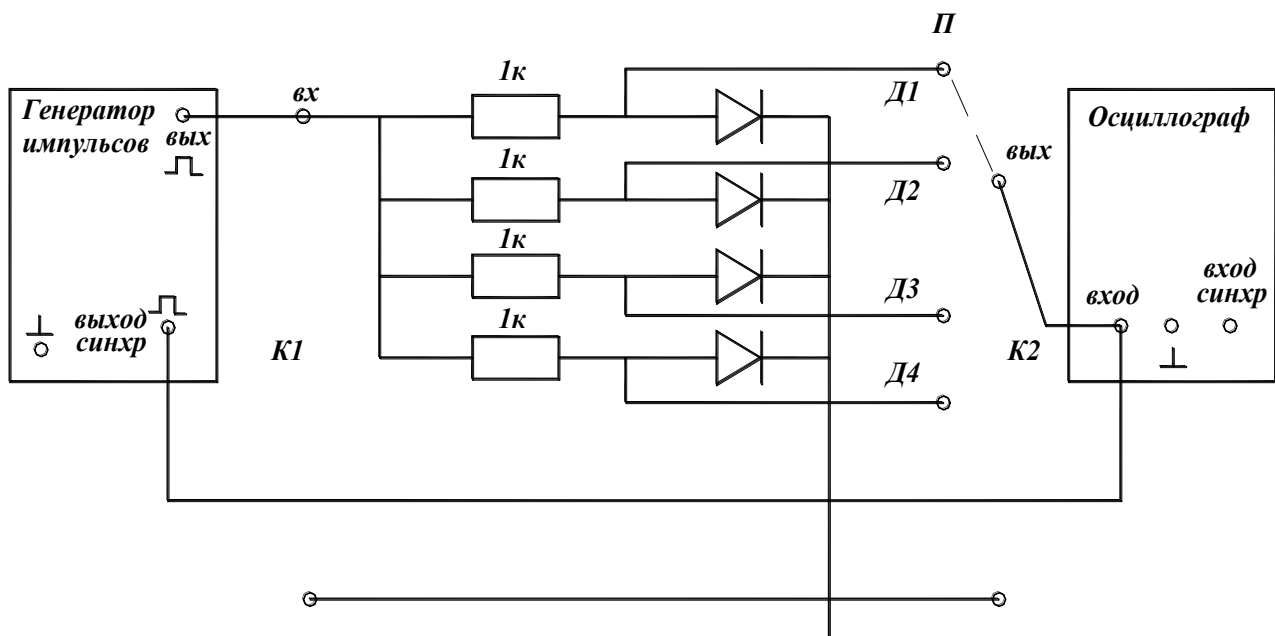


Рис. 1.3

Через клеммы вход с генератора импульсов на диод подаются импульсы положительной последовательности. С сопротивления нагрузки, подключенного последовательно диоду через клеммы выход сигналы подаются на осциллограф. Для более точного измерения параметров импульса на

осциллограф подается внешняя синхронизация с генератора импульсов. Переключение диодов осуществляется с помощью переключателя *П*.

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством установки.
2. Включить в сеть генератор импульсов и осциллограф.
3. Подключить к осциллографу внешнюю синхронизацию, от генератора импульсов; добиться работы осциллографа в режиме внешней синхронизации.
4. Подать на вход Экспериментальной установки с генератора импульсов импульсы положительной полярности амплитудой 10 В, длительностью 10 мкс, частотой следования 10 кГц.
5. Подключить осциллограф на выход диода, указанного преподавателем.
6. Зарисовать на кальку полученную осциллограмму выходного импульса и определить t_1 и $U_{\max}$. Чтобы повысить точность, измеряемый участок установить в середине шкалы, по возможности симметрично центру экрана.
7. Вычислить величину времени жизни неосновных носителей заряда по формуле (6).
8. Включить термощкаф и повторить измерения при температурах, указанных преподавателем.
9. Данные измерений и расчетов занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Температура, °C	20°	40°	60°	80°
$U_{\max}$, В				
t_1 , мкс				
τ_p , мкс				

10. Построить зависимость τ_p от температуры.

6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) приборы, используемые в данной работе;
- 3) схему измерения;
- 4) таблицы результатов и осциллограммы;
- 5) расчет времени жизни;
- 6) график зависимости $\tau_p(T)$;
- 7) вывод.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое время жизни неосновных носителей заряда?
2. Пояснить механизмы рекомбинации зарядов.
3. Как учитывается процесс рекомбинации в уравнении непрерывности?
4. Вывести уравнение зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от концентрации неравновесных зарядов.
5. Какие существуют способы определения времени жизни в полупроводниках?
6. Что такое эффективное время жизни и что оно учитывает?
7. Какова физическая природа остаточной ЭДС на переходе?
8. Как зависит время жизни от температуры в собственных и примесных полупроводниках?

8. Литература

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: Учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, Обухов В.И. – М.: ИЦ «Академия», 2011.–240с.
2. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. /И.П. Степаненко – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. –488с.
3. Филачёв, А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы /А.М. Филачёв, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматкнига, 2007. – 384с.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА p - n ПЕРЕХОДА

1. Цель работы

1. Изучить зависимость барьерной емкости p - n перехода от обратного напряжения.
2. Изучить методы определения контактной разности потенциалов с помощью вольт-фарадной характеристики p - n перехода.
3. Ознакомить студентов с основными методами расчета параметров полупроводников p - n переходов.

2. Теоретические сведения

Параметры и характеристики перехода зависят от распределения концентрации примесей и геометрических размеров области. На рис. 1 показана структура кремниевого p - n перехода, полученного методом диффузии акцепторов в полупроводник n -типа через маску диоксида кремния и распределение концентрации доноров N_d и акцепторов N_a по вертикали.

Такая структура широко распространена в дискретных приборах и типична для интегральных схем.

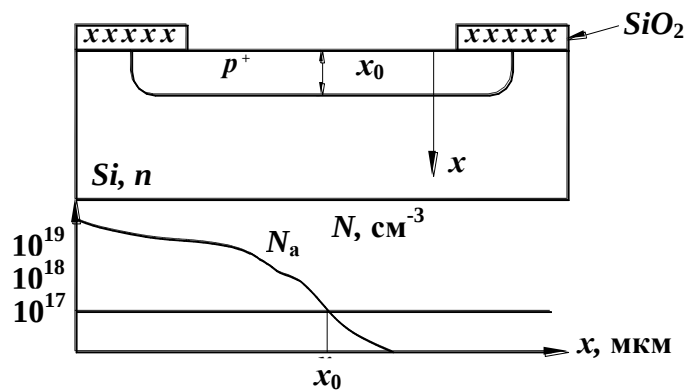


Рис. 2.1

Поверхность, на которой $N_a = N_d$, называется металлургической границей x_0 .

На рис. 2.2 изображен эпитаксиальный p - n переход и распределение примесей на нем.

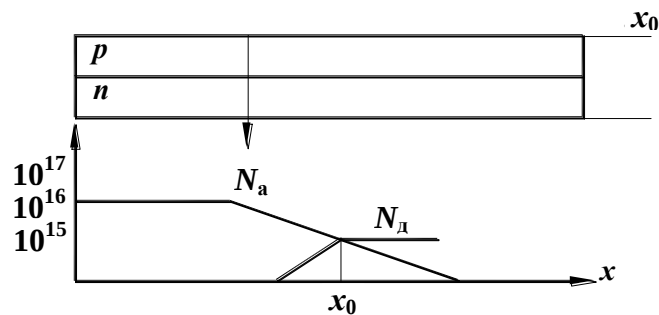


Рис. 2.2

Широко применяются в приборах несимметричные p - n переходы, в которых концентрация примесей в одной области много меньше, чем в другой. Электронно-дырочный переход, образующийся при контакте полупроводников с разным типом проводимости, представляет собой переходный слой, состоящий из ионов доноров и ионов акцепторов (рис. 2.3).

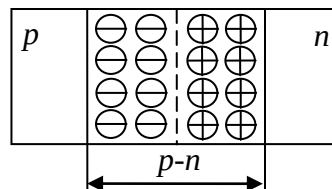


Рис. 2.3

Электронно-дырочный переход образуется вследствие существования разности концентрации одноименных носителей ($p_p \gg p_n$; $n_n \gg n_p$). В области p - n перехода существует электрическое поле, направленное из n - области в p -область. Оно пропускает через переход дрейфовые потоки неосновных зарядов и тормозит диффузионные потоки основных зарядов. В области p - n перехода очень мало основных носителей заряда, поэтому ее еще называют обедненной областью. Энергетическая диаграмма p - n перехода в равновесном состоянии представлена на рис. 2.4.

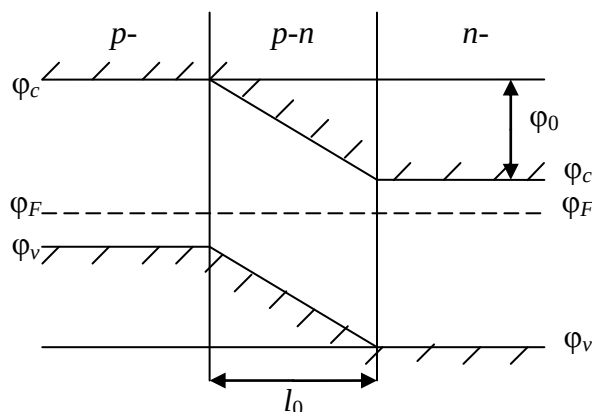


Рис. 2.4: ϕ_F - энергия уровня Ферми; ϕ_c - энергия дна зоны проводимости; ϕ_v - энергия потолка валентной зоны; ϕ_0 - высота потенциального барьера или контактная разность потенциалов

Высота потенциального барьера определяется из условия постоянства уровня Ферми и ее зависимость определяется формулой (1):

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{n_{n_0}}{n_{p_0}} = \varphi_T \ln \frac{p_{p_0}}{p_{n_0}}. \quad (1)$$

Применяя закон действующих масс $n \cdot p = ni^2$ и условие, что на участке рабочих температур $n_{n_0} = N_d$, $p_{p_0} = N_a$ получим формулу высоты потенциального барьера:

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{N_a N_d}{ni^2}. \quad (2)$$

L_0 - ширина p - n перехода в равновесном состоянии. Выражение для L_0 определено выражением (3):

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}. \quad (3)$$

Для резко несимметричного p - n перехода, например p^+ - n , когда база электронная, p - n располагается в области базы и

$$L_0 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_0}{qN_d}}. \quad (5)$$

При подключении p - n перехода к внешнему источнику возможны два случая:

а) $U > 0$ прямое включение представлено на рис. 2.5.

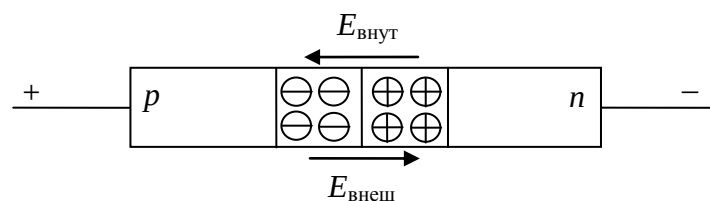


Рис. 2.5

Основные заряды смещаются в стороны p - n перехода и компенсируют частично заряд ионов доноров и ионов акцепторов. Область p - n перехода и величина заряда в нем уменьшается;

б) $U < 0$ обратное включение представлено на рис. 2.6.

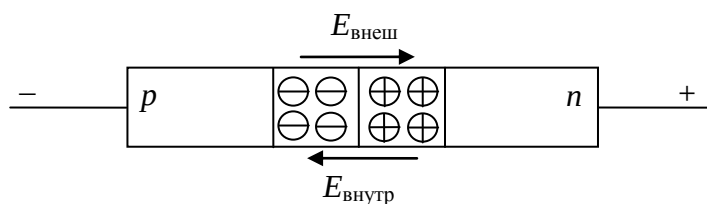


Рис. 2.6

Основные заряды смещаются от p - n перехода и увеличивают нескомпенсированный заряд ионов доноров и ионов акцепторов в области p - n перехода.

Изменение заряда обедненного слоя под действием внешнего напряжения говорит о том, что обедненный слой обладает электрической емкостью. Эта емкость называется барьерной емкостью p - n перехода. Значение $C_{бар}$ определяется по формуле плоского конденсатора:

$$C_{бар} = \frac{S \epsilon \epsilon_0}{L_{об}(U)}, \quad (5)$$

где S – площадь p - n перехода;

ϵ – диэлектрическая проницаемость проводника;

$L_{об}(U)$ – ширина обедненного слоя p - n перехода при подключении напряжения, определяется по формуле (6) для ступенчатого p - n перехода:

$$L_{об}(U) \approx \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 (\varphi_0 \pm U)}{q N_d}}, \quad (6)$$

где $(\varphi_0 - U)$ – соответствует прямому включению;

$(\varphi_0 + U)$ – соответствует обратному включению.

Зависимость емкости от напряжения называется вольтфарадной характеристикой. Для p^+ - n перехода со ступенчатым распределением примесей вольтфарадная характеристика приведена на рис. 2.7.

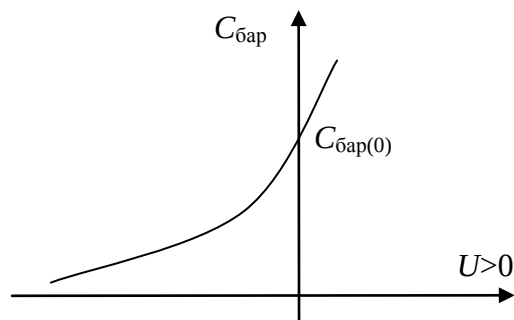


Рис. 2.7 – Вольтфарадная характеристика p - n -перехода

Форма вольт-фарадной характеристики в общем случае зависит от распределения концентрации примесей в p - n переходе и выражается сложными функциями, поэтому применяют аппроксимацию:

$$C_{\text{бар}}(U) = \frac{C_{\text{бар}}(0)}{\left(1 - \frac{U}{\Phi_0}\right)^m}, \quad (7)$$

где $m=0,3 \dots 0,5$.

Для плавного p - n перехода с линейным распределением примесей $m=0,3$.

Для ступенчатого p - n перехода $m=0,5$.

Для переходов со специальным распределением примесей $m>1$.

По вольт-фарадной характеристике можно определить тип перехода.

Величина $(1/C_{\text{бар}})^{\frac{1}{m}}$ является линейной функцией напряжения.

На рис. 2.8 приведена зависимость $(1/C_{\text{бар}})^2$ для ступенчатого p - n перехода.

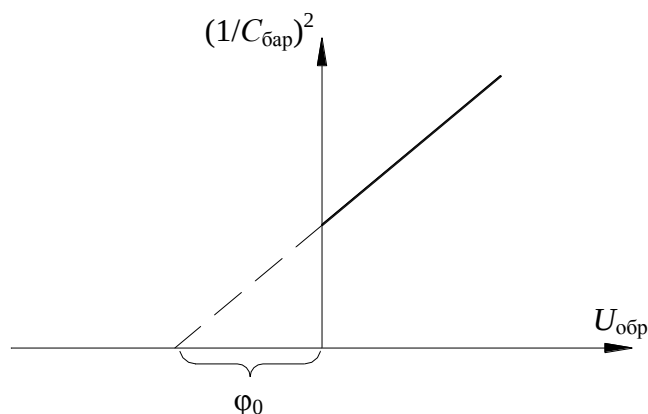


Рис. 2.8

Величина, отсекаемая этой прямой от оси напряжения, равна высоте потенциального барьера Φ_0 .

3. Задание к лабораторной работе

1. Снять зависимость барьерной емкости варикапа Д901Е от обратного напряжения.

2. Построить график зависимости барьерной емкости от обратного напряжения.

3. Построить график зависимости $(1/C_{\text{бар}})^2$ от обратного напряжения и определить по нему высоту потенциального барьера или контактную разность потенциалов.

4. Вычислить параметры $p-n$ перехода: ширину при равновесном состоянии, концентрацию примесей в базе и эмиттере.

4. Описание установки

Для измерения барьерной емкости используется лабораторный макет, генератор высокой частоты и ламповый вольтметр. Схема измерения приведена на рис. 2.9.



Рис. 2.9.

Лабораторный макет имеет внешние клеммы для подключения варикапа, установленного на специальной панельке, и регулировочные ручки для изменения напряжения на варикапе. Измерение емкости варикапа осуществляется резонансным методом. Принципиальная схема измерения приведена на рис. 2.10.

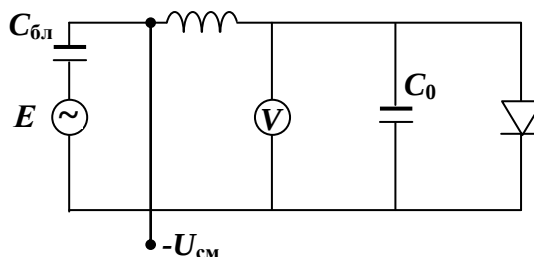


Рис. 2.10: E - генератор высокой частоты; $C_{бл}$ - блокировочный конденсатор

Перед измерением резонансный контур настраивается в резонанс; критерием настройки служит максимум показаний высокочастотного вольтметра V . Калибровочный конденсатор C_0 устанавливается в начале работы преподавателем и задается студенту. Значение частоты f_0 соответствует настройке контура в отсутствие варикапа. Затем к схеме подключают варикап и задают необходимый режим по постоянному току. С помощью генератора высокой частоты устанавливается резонанс в контуре и фиксируется значение резонансной частоты f_p . Значение емкости определяется по формуле (8):

$$C_B = C_0 \left[\left(\frac{f_0}{f_p} \right)^2 - 1 \right]. \quad (8)$$

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой и методикой измерения.
2. Собрать схему согласно рис. 2.9.
3. Установить переключатель П1 в положение C_{p-n} ; переключатель П5 в положение «откл». Получить от преподавателя значение емкости C_0 .
4. Подать с генератора высокой частоты напряжение $U_{\text{вых}} = 20$ мВ и частотой $f = 1,8 \dots 2$ МГц (5 диапазон).
5. Установить резонанс, вращая ручку изменения частоты на генераторе. Резонанс определять по максимальным показателям вольтметра. Зафиксировать значения резонансной частоты f_0 .
6. Включить варикап. Изменяя напряжение на варикапе от 0 до 15 В с помощью ручки потенциометра R , расположенного на лицевой панели лабораторной установки, через 2 вольта снять зависимость $C_{\text{бар}}$ от обратного напряжения. Изменяя частоту генератора, устанавливать максимальные показания вольтметра, вращая ручку настройки частоты, фиксировать новые значения резонансной частоты.
7. Результаты измерений занести в табл. 2.1.
8. Вычислить значения емкости C_f по формуле (8), данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$U_{\text{обр}}$	0	0,1	0,2	1,0
f				
$C_{\text{бар}}$				

9. Построить зависимость емкости варикапа от обратного напряжения.
10. Построить зависимость $\frac{1}{C_{\text{бар}}^2}$ от обратного напряжения и определить Φ_0 .
11. Получить от преподавателя параметры полупроводникового прибора и рассчитать L_0 по формуле (5), N_6 по формуле (4), N_9 по формуле (2).

6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Приборы, используемые в работе.
3. Схемы измерения.
4. Таблицы результатов измерений.
5. Графики зависимости $C_{\text{бар}} = f(U_{\text{обр}})$, $\frac{1}{C_{\text{бар}}^2} = f(U_{\text{обр}})$.

6. Значения φ_0 , определенные по результатам измерений.
7. Расчет L_0 , N_6 , N_9 .
8. Вывод.

7. Контрольные вопросы

1. Что называется p - n переходом?
2. Объяснить физические процессы в p - n переходе при равновесии.
3. Нарисовать энергетическую диаграмму p - n перехода в равновесии.
4. Какие параметры характеризуют p - n переход в равновесии?
5. Что такое барьерная емкость p - n перехода?
6. Нарисовать зависимость $C_{\text{бар}}$ от обратного напряжения.
7. Как можно определить φ_0 с помощью измерения $C_{\text{бар}}$?
8. Объяснить резонансный метод измерения емкости варикапа.

8. Литература

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: Учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, Обухов В.И. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 240с.
2. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. /И.П. Степаненко – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488с.
3. Филачёв, А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы /А.М. Филачёв, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматкнига, 2007. – 384с.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ

1. Цель работы

1. Изучение свойств плоскостных p - n переходов путем практического снятия и исследования их вольтамперных характеристик.
2. Исследование влияния на свойства p - n перехода температуры.

2. Краткие теоретические сведения

Электронно-дырочный переход создается в кристалле полупроводника, одна часть которого легирована акцепторными примесями (p -область), а другая донорными примесями (n -область). Поскольку выполняется условие $n_n \gg n_p$ и $p_p \gg p_n$, то на границе возникают диффузионные потоки дырок из p -области в n -область и электронов из n -области в p -область.

Из-за ухода электронов в n -область остается нескомпенсированный заряд положительных ионов примеси, а в p -области из-за ухода дырок остается нескомпенсированный заряд отрицательных ионов примеси. Поэтому вблизи контакта полупроводников с разным типом проводимости образуется двойной электрический слой, поле которого создает потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии основных носителей заряда, но пропускает потоки неосновных носителей через переход. Структурная схема p - n перехода; энергетическая диаграмма; распределения объемных зарядов и напряженности электрического поля в переходе приведены на рис. 3.1

Основные параметры p - n перехода:

- высота потенциального барьера

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \varphi_T \ln \frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \varphi_3 - \varphi_T \ln \frac{N_c N_v}{N_a N_q}; \quad (1)$$

- ширина p – n перехода

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_q} \right)} \quad (2)$$

когда $N_a \gg N_q$,

где n_{n0} , n_{p0} – равновесная концентрация электронов в n и p полупроводниках соответственно;

p_{p0} , p_{n0} – равновесная концентрация дырок в n и p областях соответственно;

φ_T – температурный потенциал;

N_c , N_v – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и

валентной зоне соответственно;

N_a , N_q – концентрация примеси в n и p областях соответственно.

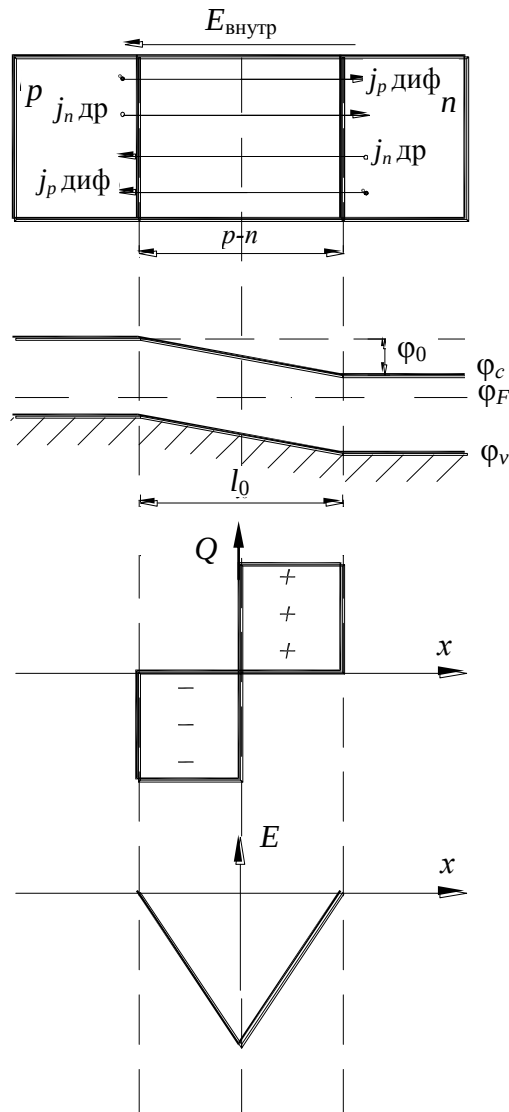


Рис. 3.1

При подключении внешнего напряжения через $p-n$ переход течет ток разный в прямом и обратном направлении.

Прямое включение $U > 0$, соответствует включению, приведенному на рис. 3.2,а.

Высота потенциального барьера уменьшается на величину приложенного напряжения и через $p-n$ переход течет большой ток, образованный диффузионным потоком основных носителей (ток инжекции).

Обратное включение $U < 0$, соответствует включению, приведенному на рис. 3.2,б.

Высота потенциального барьера увеличивается на величину приложенного напряжения и диффузионный поток основных носителей равен 0, через диод течет только малый, обратный ток, образованный дрейфовым потоком неосновных носителей. ВАХ $p-n$ перехода приведен на рис. 3.3.

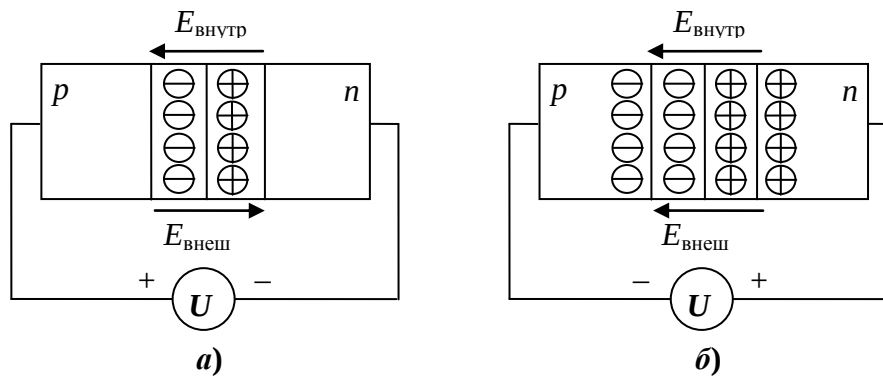


Рис. 3.2: Прямое (а) и обратное (б) включение p - n -перехода

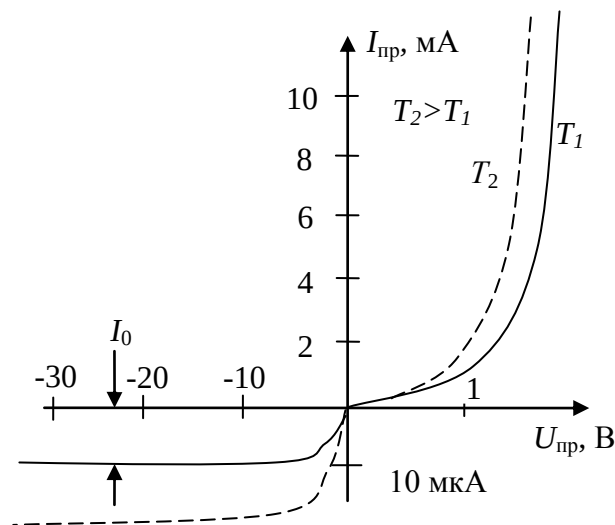


Рис. 3.3 – Вольтамперная характеристика идеального p - n -перехода при двух температурах T_1 и T_2

Уравнение ВАХ p – n перехода

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right). \quad (4)$$

I_0 – обратный ток p – n перехода, он не зависит от напряжения, но сильно меняется от температуры, поэтому его называют тепловым током. Температурная зависимость теплового тока следующая:

$$I_0(T) = I_0(T_0) \exp^{\alpha \Delta T}. \quad (5)$$

Можно использовать формулу удвоения:

- для кремния:
$$I_0(T) = I_0(T_0) 2^{\frac{\Delta T}{5}}; \quad (6)$$

- для германия:
$$I_0(T) = I_0(T_0) 2^{\frac{\Delta T}{8}}. \quad (7)$$

С ростом температуры ток возрастает, так как увеличивается концентрация неосновных носителей, образующих обратный ток. График температурной зависимости теплового тока приведен на рис. 3.4.

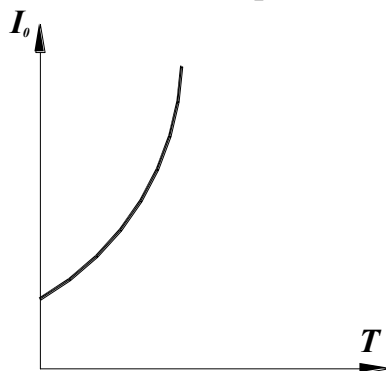


Рис. 3.4

Прямой ток также увеличивается с ростом температуры, хотя и незначительно. Это объясняется тем, что уменьшается высота потенциального барьера $p-n$ перехода с ростом температуры и увеличивается диффузионный поток основных носителей.

Прямое падение напряжения $p-n$ перехода:

$$U = \varphi_T \ln \frac{I}{I_0}. \quad (8)$$

С ростом температуры прямое падение напряжения уменьшается, как показано на рис. 3.5.

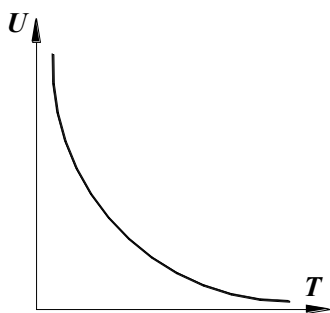


Рис. 3.5

Одним из параметров, характеризующих ВАХ $p-n$ перехода, является коэффициент выпрямления, равный отношению прямого тока к обратному, измеренный при одном значении величины напряжения

$$K = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}}. \quad (9)$$

С ростом температуры выпрямительные свойства $p-n$ перехода

ухудшаются, т.к. обратный ток растет с температурой много быстрее прямого. График температурной зависимости коэффициента выпрямления приведен рис. 3.6.

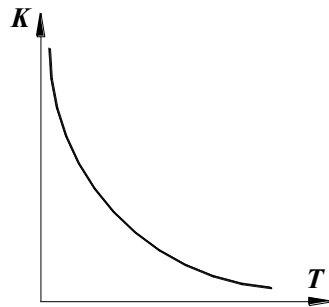


Рис. 3.6

3. Задание к лабораторной работе

1. Снять ВАХ германиевого и кремниевого p - n перехода при комнатной температуре.
2. Снять ВАХ германиевого или кремниевого p - n перехода при других температурах в диапазоне от 20°C до 60°C через 20°C .
3. Построить ВАХ германиевого или кремниевого p - n перехода при 20°C , 40°C , 60°C .
4. Построить зависимость обратного тока от температуры.
5. Определить коэффициент выпрямления и его зависимость от температуры.

4. Описание лабораторной установки

Лабораторный макет выполнен в едином корпусе и питается от сети переменного тока напряжением 220В 50Гц.

Все органы управления и измерительные приборы размещены на передней панели. Исследуемые диоды размещены в термошкафу.

На передней панели лабораторной установки размещены:

- * вольтметр V с переключателем П1 пределов измерения напряжения 1,10;
- * микроамперметр с переключателем П3 пределов измерения 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 5,0 для измерения тока диода;
- * тумблер переключения полярности П2 напряжения, подаваемого на диод «прямое»-«обратное»;
- * переключатель П4 для подключения исследуемого диода - «германий»-«кремний»;
- * ручка потенциометра $R1$ для регулировки напряжения, подаваемого на диод.

Внимание ! Перед включением макета и проведением измерений установить ручку потенциометра $R1$ в крайнее левое положение. Диоды расположены в термошкафу.

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным макетом и его описанием.

2. Снятие прямой ветви ВАХ p - n перехода. Для проведения измерений необходимо провести следующие подготовительные работы.

Установить:

- * переключатель П1 в положение 1В;
- * потенциометр $R1$ в крайнее левое положение;
- * переключатель П2 в положение «пр»;
- * переключатель П3 в положение «5 мА»;
- * переключатель П4 в положение «германий».

Схема измерения для снятия прямой ветви приведена на рис. 3.7,а.

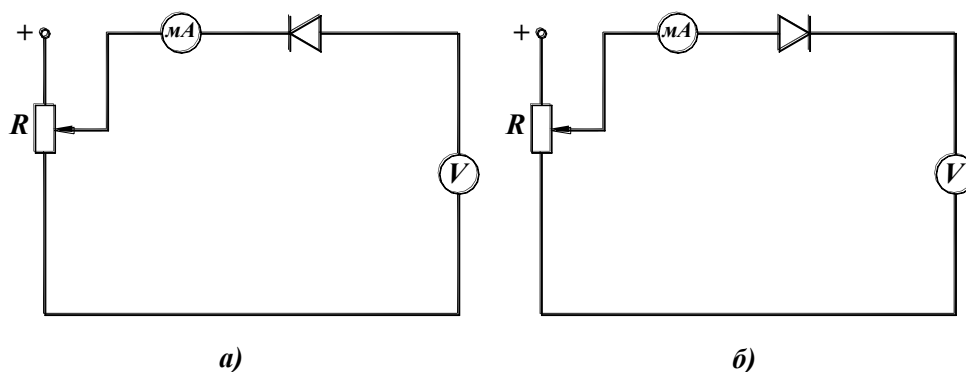


Рис. 3.7

Изменяя ручкой потенциометра $R1$ прямое напряжение на диоде от 0 до 1 В через 0,1 В, измерять ток диода по миллиамперметру. Данные занести в табл. 3.1. Внимание: прямой ток диода не должен превышать 5 мА.

Таблица 3.1

$U(B)$	0,1	0,2	0,3	0,4
$I(мА)$				

3. Снятие обратной ветви ВАХ германиевого p - n перехода. Для проведения измерений необходимо провести следующие подготовительные работы.

Установить:

- * потенциометр $R1$ в крайнее левое положение;
- * переключатель П1 в положение 10В;
- * переключатель П2 в положение «обр»;

- * переключатель ПЗ в положение «0,1»;
- * переключатель П4 в положение «германий».

Схема измерения для снятия прямой ветви приведена на рис. 3.7,б.

Изменяя ручкой потенциометра $R1$ обратное напряжение на диоде от 0 до 10 В через 1 В, измерять обратный ток диода по миллиамперметру. Данные занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

$U(B)$	1	3	5	7	9
$I(мА)$					

4. Снятие прямой ветви ВАХ кремниевого $p-n$ перехода. Измерения проводить по п.2, установив переключатель П4 в положение «кремний».

5. Снятие обратной ветви ВАХ кремниевого $p-n$ перехода. Измерения проводить по п.3, установив переключатель П4 в положение «кремний».

6. Исследование температурных свойств $p-n$ перехода. Включить термошкаф. Изменяя температуру от комнатной до 80°C через 20°C снять ВАХ согласно п.п. 2, 3, 4, 5.

7. Построить графики ВАХ кремниевого и германиевого $p-n$ переходов. Прямую и обратную ветви строить на одном графике ВАХ, соответствующие разным температурам для одного диода построить на одном графике.

8. Построить зависимость $I_{обр} = f(T)$ и $U_{пр} = f(T)$ для кремниевого и германиевого $p-n$ переходов.

9. Построить зависимость коэффициента выпрямления от температуры для кремниевого и германиевого $p-n$ переходов.

6. Содержание отчета

1. Цель работы, приборы, используемые в работе.
2. Схема снятия прямой и обратной ветви $p-n$ перехода.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Графики зависимости $I = f(U)$ при разных температурах; $I_{обр} = f(T)$; $K = f(T)$.
5. Выводы по результатам испытаний.

7. Контрольные вопросы

1. Что называется $p-n$ переходом?
2. Как получают $p-n$ переход?
3. Какими свойствами обладает $p-n$ переход в равновесном состоянии?
4. Нарисовать энергетическую диаграмму $p-n$ перехода в равновесии.
5. Какими основными параметрами характеризуется $p-n$ переход в состоянии равновесия и от чего они зависят?

6. Объясните ВАХ идеального $p-n$ перехода.
7. Чем отличается ВАХ реального $p-n$ перехода от идеального?
8. Объясните температурные свойства $p-n$ перехода.

8. Литература

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: Учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, Обухов В.И. – М.: ИЦ «Академия», 2011.–240с.
2. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. /И.П. Степаненко – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. –488с.
3. Филачёв, А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы /А.М. Филачёв, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматкнига, 2007. – 384с.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Цель работы

Изучение фотоэлектрической зависимости электропроводимости полупроводников методом экспериментального исследования вольтамперных и люксамперных характеристик фоторезисторов.

2. Краткие теоретические сведения.

Источником энергии, способствующим образованию свободных носителей заряда в полупроводниках, кроме теплового излучения, могут быть и другие процессы: столкновения с быстрыми электронами, частицами, ионизация под действием света (фоторезистивный эффект) или других излучений и др. Так как свободные носители в этом случае возникают за счет непосредственного поглощения энергии, то тепловая энергия решетки практически остается неизменной. Нарушается тепловое равновесие между решеткой и свободными носителями заряда. Электроны и дырки проводимости, не находящиеся в термодинамическом равновесии, называются неравновесными носителями заряда. Концентрация неравновесных носителей заряда определяется выражением (1) и (2):

$$n = n_0 + \Delta n; \quad (1)$$

$$p = p_0 + \Delta p, \quad (2)$$

где n, p – неравновесные носители заряда;

n_0, p_0 – равновесные носители заряда;

$\Delta n, \Delta p$ – избыточные носители заряда, получаемые за счет поглощения света или какого-либо излучения.

Возникновение неравновесных носителей заряда приводит к изменению проводимости (сопротивления) полупроводника:

$$\sigma = \sigma_T + \Delta\sigma = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p) + q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p), \quad (3)$$

где σ_T – темновая проводимость;

$\Delta\sigma$ – неравновесная проводимость:

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p).$$

Изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием электромагнитного излучения и не связанное с его нагреванием, называется фоторезистивным эффектом или

внутренним фотоэлектрическим эффектом. При возникновении неравновесных носителей заряда изменяется полная концентрация носителей, а следовательно, и положение уровня Ферми. По аналогии с равновесным состоянием можно записать концентрацию неравновесных носителей заряда:

$$n = N_C \exp \frac{\varphi_{F_n} - \varphi_c}{\varphi_T}, \quad (4)$$

$$p = N_V \exp \frac{\varphi_v - \varphi_{F_p}}{\varphi_T}, \quad (5)$$

где φ_{F_n} , φ_{F_p} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Они играют такую же роль, что и уровни Ферми в равновесном состоянии.

Уровни Ферми для электронов и дырок в неравновесном состоянии не одинаковы, т.е. $\varphi_{F_n} \neq \varphi_{F_p}$.

Для равновесного состояния $\varphi_{F_n} = \varphi_{F_p} = \varphi_F$.

На рис. 4.1 показано положение уровня Ферми на энергетической диаграмме при тепловом равновесии (а) и при стационарном оптическом возбуждении (б).

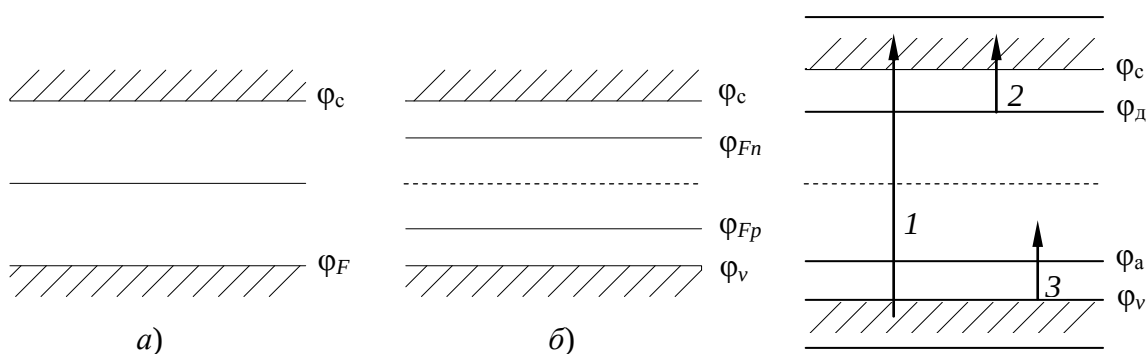


Рис. 4.1

Рис. 4.2

При наличии нетермического возбуждения свободных носителей заряда закон действующих масс не выполняется: $p_0 n \neq n_i^2$.

При поглощении квантов света возможны три типа переходов, приводящих к появлению фотопроводимости (рис. 4.2):

- переход 1 соответствует собственному поглощению света (основными атомами кристалла), что приводит к образованию свободного электрона и свободной дырки на каждый поглощенный фотон. Собственная проводимость $\Delta n = \Delta p$;

- переходы 2, 3 соответствуют поглощению света локальными дефектами в кристалле (донорами или акцепторами), при этом на каждый поглощенный фотон образуется свободный электрон или дырка. При

фотоионизации локальных состояний типа примесных атомов (переходы 2 и 3) возрастает концентрация носителей заряда только одного типа (примесная проводимость).

Для возбуждения собственных атомов полупроводника фотон должен обладать энергией $h\nu \geq \varphi_3$, а для возбуждения примесных атомов $h\nu \geq \varphi_{сд} = (\varphi_c - \varphi_d)$ или $h\nu \geq \varphi_{ав} = \varphi_a - \varphi_v$, где φ_3 – ширина запрещенной зоны; $\varphi_{сд}$ – энергия ионизации донора; $\varphi_{ав}$ – энергия ионизации акцептора.

Максимальная длина волны (красная граница фотопроводимости), при которой свет еще является фотоактивным и определяется соотношениями:

для собственной проводимости:

$$\lambda_{\max_i} = \frac{ch}{\varphi_3}, \quad (6)$$

для примесной проводимости:

$$\lambda_{\max_d} = \frac{ch}{\varphi_{сд}}; \quad (7)$$

$$\lambda_{\max_{ак}} = \frac{ch}{\varphi_{ав}}, \quad (8)$$

где c – скорость света.

Поглощение света может и не приводить непосредственно к появлению свободных носителей заряда в следующих случаях:

1) экситонное поглощение, приводящее к возбуждению электрона и переходу его на свободный уровень запрещенной зоны;

2) поглощение света свободными носителями заряда;

3) поглощение света колебаниями решетки, может привести к возрастанию концентрации свободных носителей заряда лишь в результате вторичного эффекта – поглощение света увеличивает концентрацию фотонов, которые отдают свою энергию на возбуждение носителей заряда.

Явление фотопроводимости применяется в различных полупроводниковых приборах. Простейший из них – фоторезистор. Это полупроводниковый прибор, сопротивление которого зависит от освещенности. Основная часть фоторезистора – фоточувствительный слой из монокристаллического или поликристаллического полупроводника, который наносят на диэлектрическую подложку.

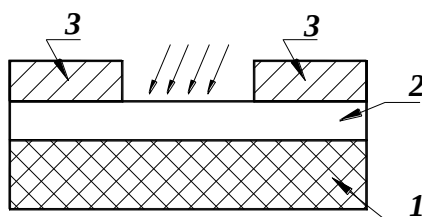


Рис. 4.3: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – фоточувствительный слой; 3 – металлические электроды

Поверхность, расположенная между электродами, является рабочей частью фоторезистора. Основными характеристиками фоторезистора являются вольтамперная и люксамперная характеристики.

Вольтамперная характеристика фоторезистора есть зависимость фототока от напряжения на резисторе при постоянной освещенности. Она представлена на рис. 4.4.

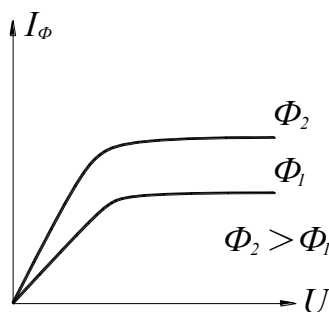


Рис. 4.4

Вольтамперная характеристика линейна только на начальном участке, т.е. в области слабых полей. Здесь выполняется закон Ома для фоторезистора. В области сильных полей характеристика становится нелинейной и стремится к насыщению.

Носители заряда активируемые светом за время жизни проходят расстояния:

$$l_{\text{ср}} = \mu \tau E, \quad (9)$$

где μ – подвижность свободного заряда;
 τ – время жизни;
 E – напряженность электрического поля.
 Фототок:

$$I_{\phi} = q n_{\phi} \frac{l_{\text{ср}}}{l_0}, \quad (10)$$

где n_{ϕ} – число первичных носителей, освобождаемых фототоком;
 l_0 – расстояние между электродами.

В начале фототок линейно возрастает с полем:

$$I_{\phi} = q n_{\phi} \frac{\mu \tau}{l_0} E.$$

Когда сдвиг носителей $l_{\text{ср}}$ под действием электрического поля становится соизмеримым с расстоянием между электродами l_0 , то возрастание фототока замедляется, а при больших напряжениях поля фототок доходит до насыщения, определяемого из условия $l_{\text{ср}} = l_0$, фототок насыщения $I_{\phi} = qn$.

Люксамперная или световая характеристика – это зависимость величины фототока от освещенности при постоянном напряжении и температуре. Вид этой характеристики представлен на рис. 4.5.

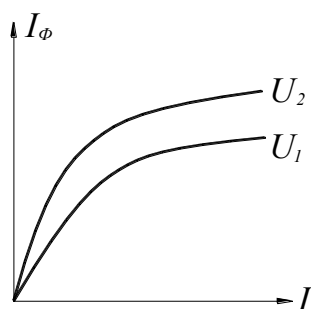


Рис. 4.5

При малой освещенности имеет место низкий уровень инжекции и число возбуждаемых фотоэлектронов равно

$$\Delta n_{cm} = \beta \alpha \tau \frac{I}{h\nu},$$

где I – интенсивность излучения;

β – квантовый выход, определяемый числом пар носителей заряда, образуемых одним поглощенным фотоном;

α – коэффициент поглощения света полупроводником.

При высоком уровне инжекции, которая создается большой освещенностью:

$$\Delta n_{cm} = \sqrt{\frac{\beta \alpha I}{\gamma_r h\nu}},$$

где γ_r – коэффициент рекомбинации.

Поэтому люксамперная характеристика в начале линейная, а затем – нелинейная.

3. Задание к лабораторной работе

1. Снять семейство вольтамперных характеристик фоторезистора при разных уровнях освещенности, соответствующих напряжению накалов 10, 15, 20 В.

2. Снять семейство люксамперных характеристик фоторезистора при разных значениях напряжения на резисторе 10, 15, 20 В.

3. Построить семейство вольтамперных и люксамперных характеристик.

4. Вычислить фотосопротивление фоторезистора при разных значениях освещенности.

5. Построить зависимость фотосопротивления от освещенности.
6. Измерить темновое сопротивление фоторезистора.

4. Описание установки

Для снятия вольтамперной и люксамперной характеристик используется лабораторный макет, на передней панели которого расположены приборы для измерения фототока (A), напряжения на резисторе (V_1) и напряжения накала (V_2), результирующее уровень освещенности. С помощью потенциометра R_1 регулируют уровень напряжения на резисторе, а с помощью потенциометра R_2 – уровень освещенности. Схема электрическая принципиальная измерительной установки приведена на рис. 4.6.

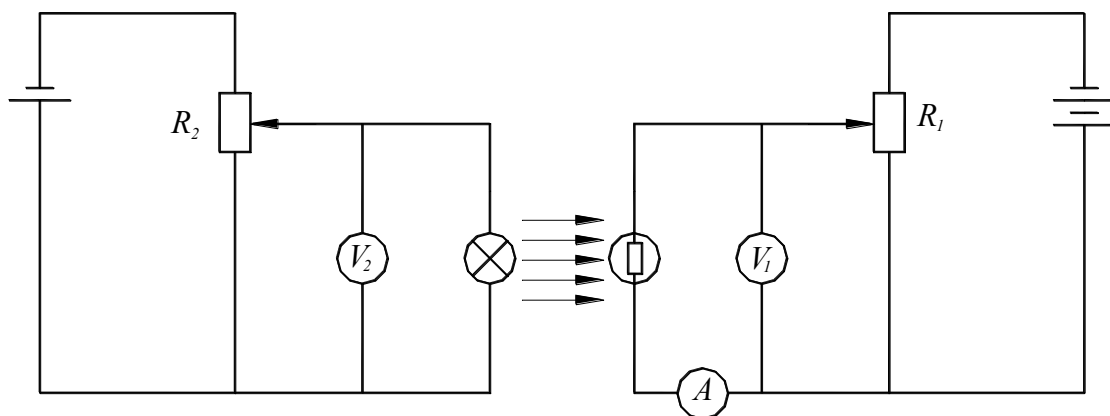


Рис. 4.6

5. Порядок выполнения работы

1. Снять семейство вольтамперных характеристик фоторезистора при различных световых потоках.

а) Установить на вольтметре V_2 напряжение 10 В (20 люкс освещенности) с помощью потенциометра $ПЗ$. Изменяя потенциометром $П2$ напряжение ФСК от 0 до 50 В через 5 В, определить значение тока через ФСК с помощью миллиамперметра. Напряжение на ФСК определить по вольтметру V_2 . Данные занести в таблицу 4.1.

б) Установить на вольтметре V_2 напряжение 15 В (85 люкс освещенности), снять вольтамперную характеристику как в пункте а).

в) Установить на вольтметре V_2 напряжение 20 В (170 люкс освещенности), снять вольтамперную характеристику как в пункте а). Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

$U_2 =$										
U_{ϕ}										
I_{ϕ}										

2. Построить семейство вольтамперных характеристик при разной освещенности. Определить сопротивление фоторезистора при разных освещенностях по вольтамперным характеристикам.

3. Снять семейство люксамперных характеристик фоторезистора при различных напряжениях на приборе.

а) Установить на вольтметре V_1 напряжение 10 В с помощью потенциометра $П2$. Изменяя потенциометром $П3$ напряжение на V_2 от 0 до 30 В через 5 В, определить значение тока через ФСК с помощью миллиамперметра. Данные занести в таблицу 4.2.

б) Установить на вольтметре V_1 напряжение 20 В, снять вольтамперную характеристику прибора как в пункте а. Данные занести в таблицу 4.2.

в) Установить на вольтметре V_1 напряжение 30 В, снять вольтамперную характеристику прибора как в пункте а. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.2

Параметр	$V_1 = 10В$	$V_1 = 20В$	$V_1 = 30В$
$V_2, В$			
$I, \text{люкс}$			
$I_{\phi}, \text{мА}$			

В табл. 4.3 приведена зависимость освещенности от напряжения.

Таблица 4.3

$V_2, В$	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
$I, \text{люкс}$	10	10.2	20	50	85	128	170	220	280

4. Построить семейство люксамперных характеристик при различных напряжениях. Для этого напряжение накала V_2 пересчитать в освещенность в соответствии с таблицей 4.3.

5. Определить темновое сопротивление фоторезистора. Омметр подключить к клеммам $K1-K2$ на макете. Включить освещение; для этого необходимо вывернуть потенциометр $П3$ влево до отказа. Измерение производить через 30 секунд после включения освещения.

6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Таблицы результатов измерения.
4. Графики семейств вольтамперных и люксамперных характеристик.
5. Значения темнового сопротивления резистора.
6. Выводы по результатам измерений.

7. Контрольные вопросы

1. Какие виды поглощения света являются активными?
2. Как зависит проводимость полупроводников от освещенности?
3. Какие виды поглощения света являются неактивными?
4. Как определяется красная граница собственного поглощения?
5. Нарисовать структуру фоторезистора и объяснить принцип его действия.
6. Нарисовать вольтамперную характеристику фоторезистора.
7. Объяснить зависимость фототока от напряжения на фоторезисторе.
8. Нарисовать люксамперную характеристику.
9. Объяснить зависимость фототока от освещенности.

8. Литература

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: Учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, Обухов В.И. – М.: ИЦ «Академия», 2011.–240с.
2. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. /И.П. Степаненко – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. –488с.
3. Филачёв, А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы /А.М. Филачёв, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматкнига, 2007. – 384с.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	3
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Лабораторная работа № 1	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ	
ПОЛУПРОВОДНИКОВ	6
1. Цель работы	6
2. Краткие теоретические сведения.....	6
3. Задание к лабораторной работе	10
4. Описание установки.....	10
5. Порядок выполнения работы	11
6. Содержание отчета.....	11
7. Контрольные вопросы	12
8. Литература	12
Лабораторная работа № 2	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА p - n ПЕРЕХОДА	
.....	13
1. Цель работы	13
2. Теоретические сведения	13
3. Задание к лабораторной работе	17
4. Описание установки.....	18
5. Порядок выполнения работы	19
6. Содержание отчета.....	19
7. Контрольные вопросы	20
8. Литература	20
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ	
ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ.....	21
1. Цель работы	21
2. Краткие теоретические сведения.....	21
3. Задание к лабораторной работе	25
4. Описание лабораторной установки.....	25
5. Порядок выполнения работы	26
6. Содержание отчета.....	27
7. Контрольные вопросы	27
8. Литература	28
Лабораторная работа №4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	
ПОЛУПРОВОДНИКОВ	29
1. Цель работы	29

2. Краткие теоретические сведения.....	29
3. Задание к лабораторной работе	33
4. Описание установки.....	34
5. Порядок выполнения работы	34
6. Содержание отчета.....	36
7. Контрольные вопросы	36
8. Литература	36

Для заметок

БАРАНОВА АЛЬБИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**Физические основы
микро- и наноэлектроники
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Компьютерный набор и верстка **Е.В. Второва**

Подписано в печать 10.12.2012. Формат 60 x 90¹/₁₆.
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,4.
Уч.-изд. л. 2,4. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.