

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ
ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА**

Методические указания

**к лабораторной работе № 87
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2010

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ
ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА
(ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ)

Методические указания

к лабораторной работе № 87
по дисциплине «Физика»

Уфа 2010

Составитель С.Н. Сазонов

УДК
ББК

Изучение принципа работы туннельного диода (исследовательская): Методические указания к лабораторной работе № 87 дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: С.Н. Сазонов – Уфа, 2010. – 15 с.

Приведены краткие сведения по теории явления туннельного эффекта, изложен принцип работы туннельного диода, дана краткая схема экспериментальной установки, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 1. Ил. 9. Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доцент Михайлов Г.П.,
канд. тех. наук, доцент Иванов М.П.

©Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2010

Составитель САЗОНОВ Сергей Николаевич

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ
ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА
(ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ)

Методические указания
к лабораторной работе № 87
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2010. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отт. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.
Тираж 300 экз. Заказ №
ГОУВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12.

Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть	4
2.1. Туннельный эффект	4
2.2. Принцип работы туннельного диода	8
2.3. Туннельный диод в электрических цепях	13
3. Приборы и оборудование	13
4. Требования по технике безопасности	14
5. Порядок выполнения работы	14
6. Контрольные вопросы	15
Список литературы.....	15

Лабораторная работа № 87

Изучение принципа работы туннельного диода

1. Цель работы

Изучение явления туннельного эффекта, снятие и изучение вольт-амперной характеристики туннельного диода.

2. Теоретическая часть

2.1. Туннельный эффект

Принцип действия туннельного диода основан на квантовом эффекте туннельного прохождения электронов через тонкий потенциальный барьер. При встрече с потенциальным барьером особенно резко сказывается качественное различие свойств макроскопических частиц и микрочастиц. Рассмотрим это на примере простейшего одномерного потенциального барьера $U(x)$, изображенного на рис. 2.1.

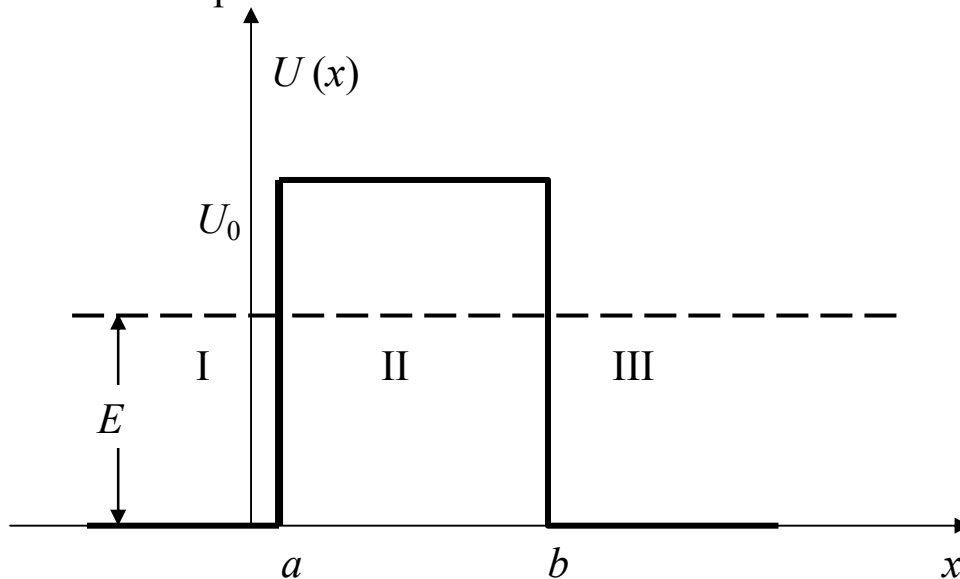


Рис. 2.1

Потенциальная энергия равна нулю для всех значений $x < a$ и $x > b$ и имеет постоянное значение U_0 для значений координаты x , заключенных в пределах $a \leq x \leq b$.

Если полная энергия частицы $E < U_0$, то с классической точки зрения, частица может двигаться либо в области I, где $x < a$, либо в области III, где $x > b$. Проникнуть в область барьера II она не может, так как ее кинетическая энергия $E_k = E - U_0$ оказалась бы отрицательной, что невозможно. Как следствие, частица, полная энергия которой меньше высоты потенциального барьера U_0 , не может с классической точки зрения перейти барьер из области I в область III.

Не так обстоят дела для микрочастиц. В 1923 году французский физик де-Бройль пришёл к выводу, что микрочастицы проявляют волновые свойства. Движение их описывается не перемещением точки по траектории $x = x(t)$, а перемещением волнового пакета, составленного из плоских волн. Эти волны называют волнами материи или волнами де-Бройля. Основной характеристикой микрочастицы становится волновая функция ψ . Величина ψ определяет вероятность dP нахождения частицы в интервале dx с центром в точке с заданной координатой x согласно формуле

$$|\psi(x)|^2 = \frac{dP}{dx}. \quad (2.1)$$

Для нахождения ψ необходимо решить волновое уравнение для волн де-Бройля, называемое уравнением Шредингера. В ситуации рис. 2.1, как показано в учебниках, например [1], решение уравнения Шредингера имеет вид

$$\psi_1 = e^{ikx} + Ae^{-ikx} \quad (\text{для области I}), \quad (2.2)$$

$$\psi_2 = B_1 e^{-\beta x} + B_2 e^{\beta x} \quad (\text{для области II}), \quad (2.3)$$

$$\psi_3 = C \cdot e^{ikx} \quad (\text{для области III}). \quad (2.4)$$

Здесь $k = \sqrt{2mE} / \hbar$, $\beta = \sqrt{2m(U_0 - E)} / \hbar$. Коэффициенты в (2.2 – 2.4) определяются из условий непрерывности и гладкости волновой функции ψ , которые имеют вид:

$$\text{а) } \psi(a - \delta) = \psi(a + \delta) \text{ и } \psi(b - \delta) = \psi(b + \delta),$$

$$\text{б) } \psi'(a - \delta) = \psi'(a + \delta) \text{ и } \psi'(b - \delta) = \psi'(b + \delta),$$

(δ – бесконечно малая величина).

В выражении (2.2) первый член представляет собой плоскую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси x (соответствует частице, движущейся в сторону барьера), а

второй – волну, распространяющуюся в противоположном направлении, то есть отраженную от барьера (соответствует частице, движущейся от барьера налево).

Волновая функция в области II уже не соответствует плоским волнам, распространяющимся в обе стороны, поскольку показатели степени экспонент не мнимые, как в случае ψ_1 и ψ_3 , а действительные. Тем не менее из соотношения (2.3) следует, что даже при $E < U_0$, ψ – функция не равна нулю и внутри барьера ($\psi_2 \neq 0$) и частица может находиться там вопреки классической физике.

В области III (за барьером) имеется только волна, прошедшая сквозь барьер и распространяющаяся слева направо, поэтому слагаемое в формуле (2.4) только одно. Эта волна де-Бройля имеет ту же частоту, но меньшую амплитуду. (Расчёты показывают, что при любых параметрах задачи, в равенстве (2.4) будет $|C| < 1$). Следовательно, существует отличная от нуля вероятность обнаружения микрочастицы за потенциальным барьером.

Это явление имеет специфически квантовую природу и носит название туннельного эффекта. В соответствии с основными положениями квантовой физики, если на барьер налетает не один, а N_0 электронов в секунду, доля отраженных электронов будет

$$N = N_0 \cdot |A|^2, \quad (2.5)$$

где коэффициент A надо брать из формулы (2.2). Доля же электронов, прошедших барьер, будет $D = N_0 - N$. Число D называется прозрачностью потенциального барьера. Квантовомеханические расчеты показывают, что для ситуации рис. 2.1 ($d = b - a$, D_0 – коэффициент, не зависящий от d)

$$D = D_0 e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}d}. \quad (2.6)$$

Из этого следует, что туннельный эффект возможен только для микрочастиц и размеров потенциального барьера, соизмеримых с атомными размерами. Например, при $(U_0 - E) \approx 10$ эВ и $d \approx 10^{-10}$ м для электрона ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг), из (2.6) получим $D \approx D_0/e$. Но если взять $d = 1$ мкм, то при прочих равных условиях $D \approx D_0 \cdot e^{-10^8}$. Увеличение массы частицы и повышение потенциального барьера ($U_0 - E$) ещё больше уменьшают прозрачность D барьера.

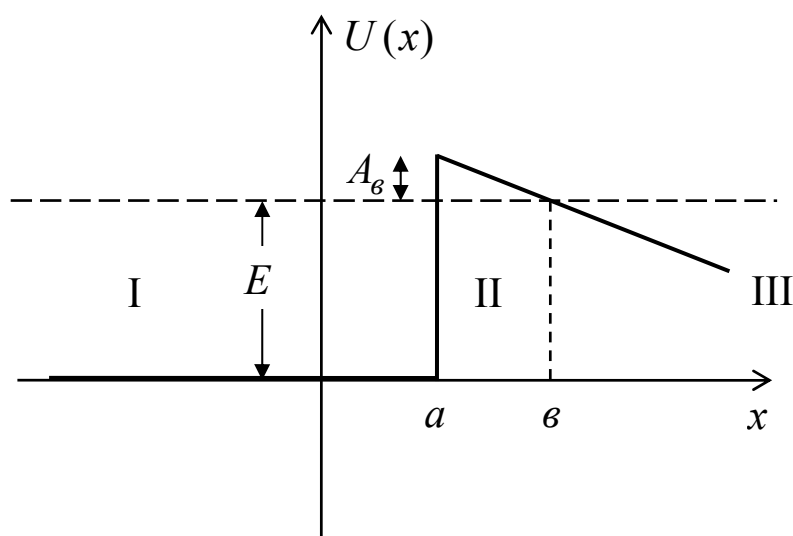


Рис. 2.2

Для туннелирования микрочастицы не обязательно, чтобы потенциальный барьер имел прямоугольную форму. Это явление имеет место, например, для треугольного барьера на рис. 2.2. Здесь налетающий слева на барьер электрон с энергией E , которому при $x < a$ соответствует того же вида (2.2) волновая функция, имеет вероятность быть обнаруженным и при $x > b$, хотя количественно вероятность туннелирования определяется уже не (2.6), а более сложной формулой. Если образец металла поместить в однородное электрическое поле, конфигурация потенциала в пространстве будет как раз соответствовать рис. 2.2 (металл займёт область $x < a$). В сильном поле, соответствующем большой крутизне наклонной линии на этом рисунке, из металла начинают вылетать электроны, хотя в обычных условиях им нужно для этого затратить энергию, равную работе выхода $A_{\text{в}}$. Данное явление, называемое холодной эмиссией, наблюдалось экспериментально.

Этот пример показывает, что такое, казалось бы, далёкое от практики явление, как туннельный эффект, может, в принципе, иметь технические применения.

2.2. Принцип работы туннельного диода

Для того, чтобы разобраться в работе туннельного диода, нужно, в общих чертах, вспомнить работу диода обычного.

Согласно зонной теории твёрдых тел, акцепторные атомы в полупроводнике **p**-типа в результате тепловых толчков захватывают электроны из валентной зоны (рис. 2.3, *a*). А в **n**-полупроводнике электроны, оторвавшись от атомов-доноров, занимают нижние уровни в зоне проводимости (рис. 2.3, *б*). Граничные энергии для валентной зоны и для зоны проводимости обозначены на рисунке как E_v и E_c соответственно. Между ними лежит запрещённая зона. В монокристалле полупроводникового диода специальными методами создают градиент концентрации примесных атомов: в одной половине монокристалла, при $x < 0$ – это акцепторы, а при $x > 0$ – доноры. Для простоты будем считать, что концентрация тех и других одинакова и равна n .

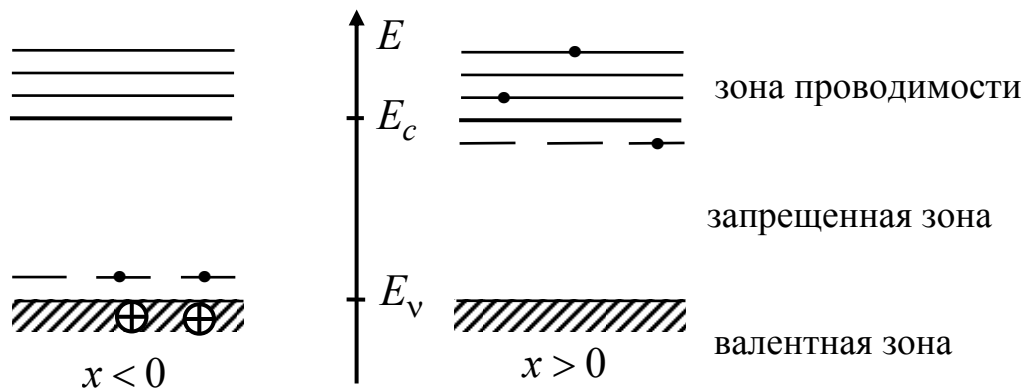


Рис. 2.3

Из-за диффузии, электроны из обеих зон донорной области перемещаются в область $x < 0$, принося с собой отрицательный заряд и оставляя при $x > 0$ нескомпенсированный положительный. Этот процесс продолжается до тех пор, пока возникшее вблизи области $x = 0$, соответствующей **p-n**-переходу, электрическое поле не начнет заворачивать назад даже самые быстрые электроны.

Равновесное распределение плотности заряда $\tau(x)$ и потенциальной энергии электрона $U(x)$ для разомкнутого диода, отключенного от источника ЭДС, показаны на рис. 2.4. Математический вывод этих графиков можно найти в [2]. Там же доказано, что толщина d области нескомпенсированного заряда, называемого «обедненным слоем»

$$d = \text{const} / \sqrt{n}, \quad (2.8)$$

то есть чем сильнее легирован материал, тем более узким становится потенциальный барьер. У первых диодов, изготовленных в 40-х гг XX века, было $n \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина **p-n**-перехода у таких диодов $d \geq 1 \text{ мкм}$. Подадим на **p-n**-переход обратное напряжение, при котором вектор электрического поля внутри обеднённого слоя сонаправлен вектору электрического поля источника ЭДС внутри кристалла. Из уравнений электростатики ([2]) следует, что при этом:

- а) значение величины d увеличится при $\tau_{\text{max}} = \text{const}$;
- б) значение величины ΔU увеличится при $E_c - E_v = \text{const}$.

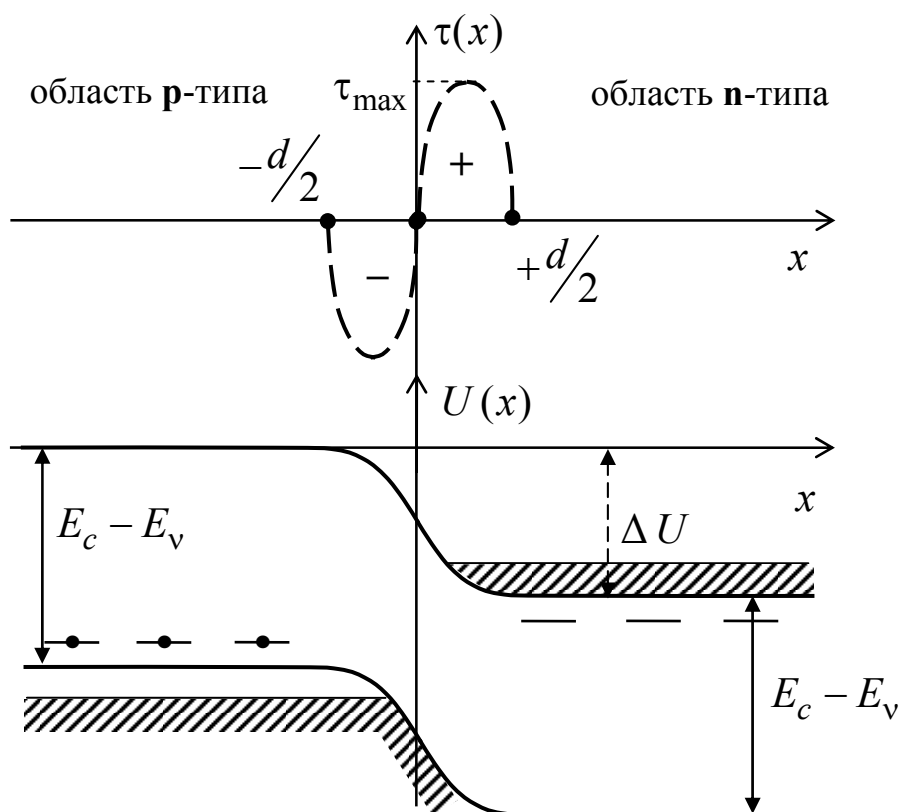


Рис. 2.4

Так как высота потенциального барьера ΔU для электронов зоны проводимости **n**-области возрастает, ток через диод при обратной полярности подключения батареи не идёт – основное свойство обычных диодов.

Вернёмся теперь к явлению холодной эмиссии (рис. 2.2), считая, что в сильном электрическом поле находится не металл, а **p-n**-переход полупроводникового диода, что толщина d обедненного слоя очень мала и что диод подключен к источнику ЭДС в обратном направлении. Тогда мы получим ситуацию рис. 2.5, в которой на участке ABC присутствует треугольный барьер.

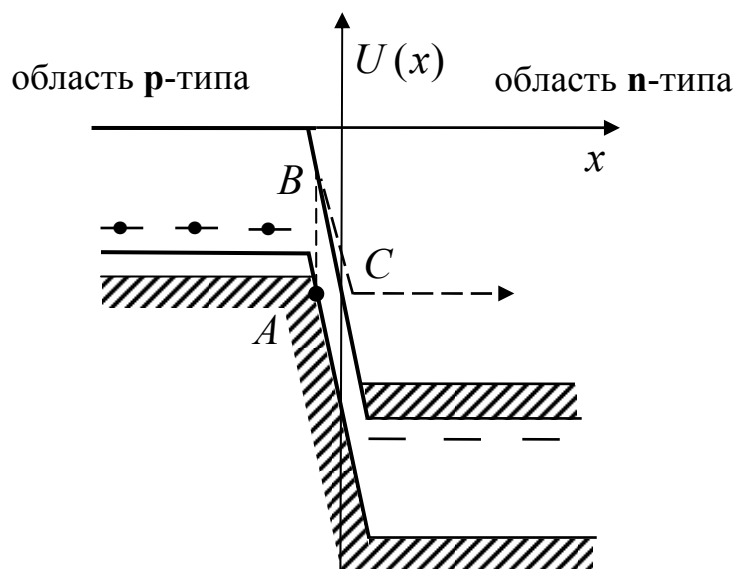


Рис. 2.5

С начала 30-х годов физиков интересовал вопрос, не может ли электрон с какого-то энергетического уровня валентной зоны ($x < 0$) просочиться через потенциальный барьер ABC аналогично тому, что происходит в металле на рис. 2.2. Ведь в сильном «обратном» поле уровни наверху валентной зоны р-полупроводника оказываются над заполненной частью зоны проводимости n-полупроводника. Соответствующий эффект, предсказанный в те годы, называется туннельным пробоем диода. Поиски его продолжались более 20 лет. Наконец в 1957 году [3], группа исследователей во главе с Л.Эсаки смогла уверенно констатировать:

- а) при некоторых условиях полупроводниковый диод может пропускать ток в обратном направлении;
- б) единственной причиной этого может быть только квантовомеханическое туннелирование.

Новизна работ Эсаки заключалась в том, что впервые были изготовлены диоды с $n > 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а при этом $d \approx 100 \text{ \AA}$, что, в отличие от случая $d \approx 1 \text{ мкм}$, достаточно для достижения заметной на опыте вероятности туннелирования. Можно сказать, что эффект туннельного пробоя сильнолегированного диода подтвердил наиболее фундаментальные принципы квантовой физики.

А как ведет себя диод с $n > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на прямой, а не на обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ)? Соответствующий график приведен на рис. 2.6 и отличается от ВАХ обычного диода наличием участка a в, где $\Delta V / \Delta I < 0$ (так называемое отрицательное дифференциальное сопротивление).

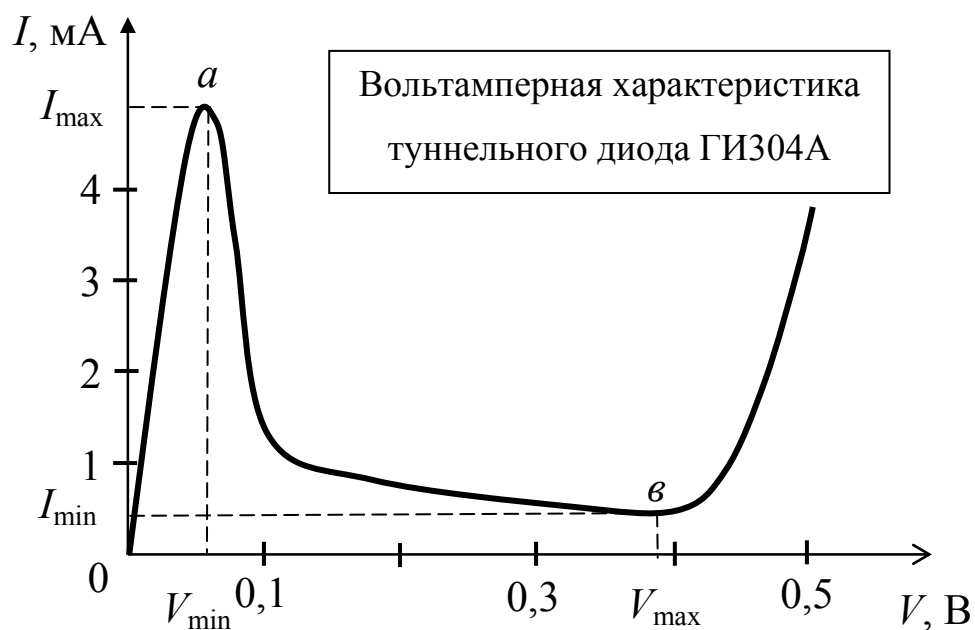


Рис. 2.6

Качественно объяснить его наличие можно так. Вернемся к рис. 2.3. Мы видим на нем отдельные энергетические уровни примесных атомов. Электроны, находящиеся на них, локализованы вблизи ядер примесей и не могут перемещаться по кристаллу. Но при увеличении n , расстояние между ядрами примесных атомов уменьшается, и электрон на одном примесном уровне начинает «чувствовать» потенциал и других примесей. Это означает, что примесные уровни сливаются в ещё одну зону, а электроны на них делокализуются и могут перемещаться по объёму монокристалла.

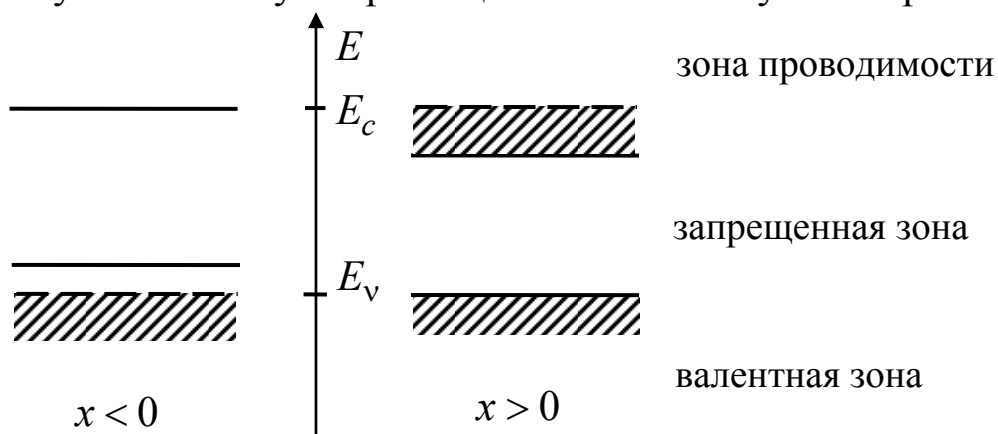


Рис. 2.7

При некоторой концентрации примесей $n_{\text{ср}}$ (для Si $n_{\text{ср}} = 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), ширина примесных зон возрастает настолько, что они перекрываются с основными. Такие полупроводники называются

вырожденными, а их энергетическая диаграмма приведена на рис. 2.7. Если два вырожденных **p**- и **n**-полупроводника находятся в контакте при отключенном источнике ЭДС, то получаем пространственное распределение потенциала, как на рис. 2.8, *a* (распределение заряда при этом такое же, как на рис. 2.4). Мы видим здесь, что зона проводимости **n**-полупроводника и валентная зона **p**-полупроводника частично перекрываются. Два встречных туннельных потока электронов компенсируют друг друга, так что $i = 0$.

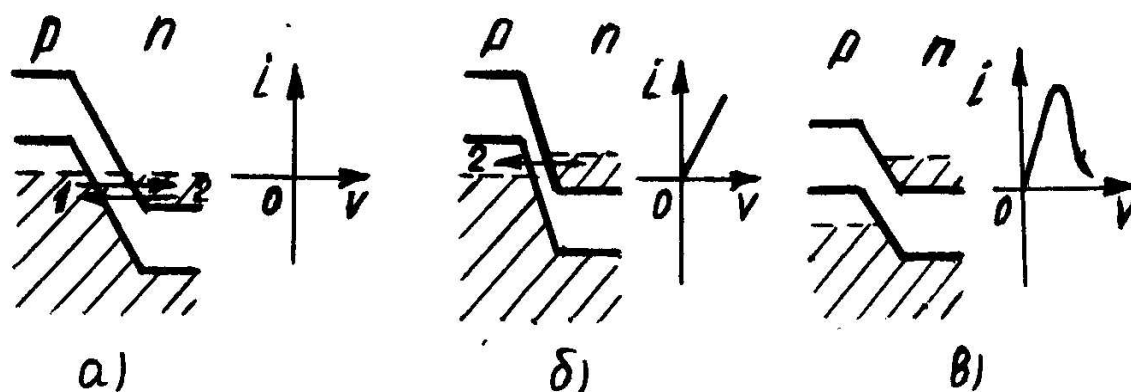


Рис. 2.8

При приложении небольшого прямого напряжения V (рис. 2.8, *б*) появляется дисбаланс двух туннельных токов и через диод потечет результирующий ток, равный разности их модулей. В результате у туннельного диода на начальном участке ВАХ ток i пропорционален V , как у обычного резистора. Но при дальнейшем возрастании V возникает ситуация, когда электронам некуда туннелировать (рис. 2.8, *в*): на энергетической диаграмме напротив разрешенной зоны одного полупроводника – запрещенная зона другого.

При таком напряжении туннельный ток через диод отсутствует. Здесь есть только небольшой ток перескока электронов **n**-полупроводника на примеси **p**-полупроводника, уровни которых по какой-то причине лежат глубоко в запрещенной зоне. Это и есть участок *ав* на рис. 2.6. Наконец, в области больших внешних напряжений, туннельный диод ведет себя как обычный: потенциальный барьер на рис. 2.8, *в* уменьшается и у электрона **n**-полупроводника уже достаточно энергии для его преодоления и создания, тем самым, тока в цепи.

2.3. Туннельный диод в электрических цепях

Наличие падающего участка ВАХ позволяет конструировать с туннельным диодом радиосхемы, которые на других электронных приборах выглядят гораздо сложнее. Особенно просты генераторы электрических колебаний на туннельном диоде. Рассмотрим следующую схему.

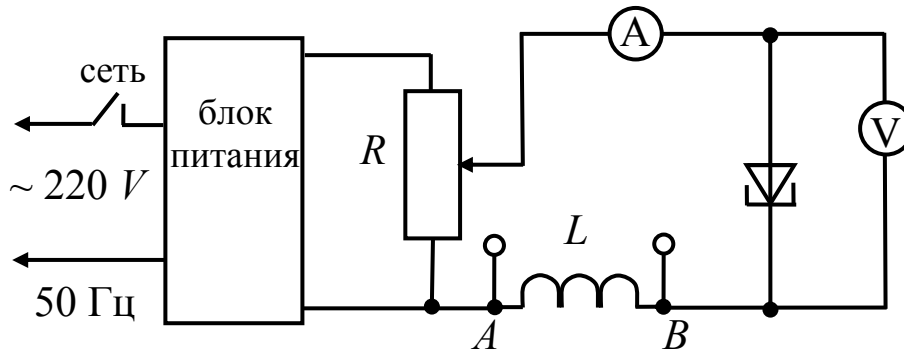


Рис. 2.9

Будем количественно характеризовать диод величиной

$$-R_D = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (2.9)$$

называемой дифференциальным сопротивлением диода. В курсе электроники показано, что если величина $-R_D$ превышает суммарное сопротивление остальной цепи, в данной схеме возникнет генерация колебаний на частоте, определяемой индуктивностью L и суммарной ёмкостью проводов схемы. Если же $L \rightarrow 0$, как в данной лабораторной работе, то – же схему можно использовать для снятия ВАХ диода.

3. Приборы и оборудование

Блок питания, туннельный диод ГИ103Б и потенциометр R смонтированы в установку, подключаемую к сети шнуром и тумблером «Сеть». Амперметр и вольтметр расположены отдельно и соединены с установкой проводами. Подробная схема установки приведена на её верхней панели. В отчёт достаточно зарисовать рис. 2.9, упростив его: так как исследование колебаний в данной работе не проводится, катушку не перерисовывают, замкнув на рисунке точки A и B .

4. Требования по технике безопасности

1. Перед включением прибора в сеть убедиться в исправности электрического шнура, соединяющего установку с сетью.
2. Проверить, чтобы сетевой тумблер установки был отжат.
3. По окончании работы отключите питание установки и приведите рабочее место в порядок.

5. Порядок выполнения работы

1. Проверьте соответствие подключения проводов к приборам рис. 2.9. Включите цифровой вольтметр, настроив его на измерение постоянного напряжения.

2. Ручку потенциометра поставить в крайнее положение «против часовой стрелки», что будет соответствовать току $I = 0$ после включения установки.

3. Проверить диапазон работы стрелочного амперметра: если правый из двух переключателей – в положении «0,75 мА», то левый **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должен быть в положении «*4». Вся шкала в таком режиме соответствует 3 мА, что несколько больше значения I_{\max} для данного диода. (Положение на левом переключателе «*2» и тем более «*1» вызовет зашкаливание прибора при увеличении напряжения.) Можно работать в положении правого переключателя «7,5 мА». Тогда зашкаливания не будет при любом положении левого, но шкала при этом используется не полностью.

3. Включить установку нажатием сетевого тумблера и дать ей прогреться одну – две минуты.

4. Ручкой потенциометра постепенно увеличивать напряжение, подводимое к туннельному диоду примерно до 450 мВ. Измерить с помощью амперметра значения силы тока с шагом 10 мВ до достижения V_{\min} и с шагом $(20 \div 25)$ мВ – при $V > V_{\min}$. Измерения проводить в обе стороны: при увеличении (I_1) и уменьшении (I_2) напряжения на диоде. Всего получится два значения силы тока, соответствующих одному и тому же значению напряжения. Эти два значения усреднить. Результаты измерений представить в виде таблицы.

5. По результатам измерений построить график вольт-амперной характеристики диода, выполненный на миллиметровой бумаге. Из графика найти значения V_{\max} , V_{\min} , I_{\max} , I_{\min} (рис. 2.6). Пользуясь ими,

вычислить среднее отрицательное сопротивление диода по формуле (2.9).

6. Оцените погрешность определения величины $-R_D$. (Проще всего – логарифмическим методом.) При этом погрешности V_{\max} , V_{\min} можно считать равными соответствующему шагу изменения V . Погрешность измерения тока вычисляется по обычным формулам для прямых измерений.

Таблица

V (мВ)	I_1 (мА)	I_2 (мА)	I_{cp} (мА)

6. Контрольные вопросы

1. В чем суть явления туннельного эффекта?
2. Каков физический смысл коэффициента прозрачности D потенциального барьера?
3. Какой вид имеет волновая функция для областей внутри и вне потенциального барьера на рис. 2.1?
4. Что означает $A = 1$ в формуле (2.3)?
5. Чем вырожденные полупроводники отличаются от невырожденных?
6. В чем заключаются основные отличия туннельного диода от обычного полупроводникового? Почему в обычных диодах нет туннелирования электронов?
7. Какова схема энергетических уровней электронов в **p-n**-переходе в сильно легированных полупроводниках при различных значениях внешнего напряжения?

Список литературы

1. *Калашников, Н.П.* Основы физики. / Н.П. Калашников, М.А. Смандырев – М.: Дрофа, 2004, том 2, гл. 30, § 7–8, стр. 103–110.
2. <http://publ.lib.ru//ARCHIVES> (*Левинштейн, М.Е.* Барьеры. / М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин – М.: Наука, 1987. Библиотечка журнала «Квант»).
3. <http://www.ufn.ru> (*Эсаки Л.* Путешествие в страну туннелирования – журнал «Успехи физических наук», 1975, том 116, № 4, стр. 569).