

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ Ф3**

**«Экспериментальное исследование туннельного эффекта»**

**по дисциплине**  
**«Физические основы электронной техники»**  
**для студентов специальности**  
**1-36 04 02 «Промышленная электроника»**  
**очной и заочной форм обучения**

Брест 2018

УДК 538.91, 539.22.18, 548.73

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» очной (дневной, вечерней) и заочной форм обучения, выполняющих лабораторные работы по физическим основам электронной техники. Указания содержат теоретические сведения, описание лабораторной установки и методику измерений, а также задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: И. С. Янусик, старший преподаватель  
О. Ф. Савчук, ассистент  
М. М. Барковская, доцент

Рецензент: В. С. Секержицкий, к. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и теоретической физики учреждения образования «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина»

## Содержание

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Лабораторная работа Ф3<br>«Экспериментальное исследование туннельного эффекта» ..... | 4         |
| <b>Приложение 1. Туннельные диоды. Структура и принцип действия .....</b>            | <b>11</b> |
| <b>Список литературы.....</b>                                                        | <b>14</b> |

## «Экспериментальное исследование туннельного эффекта»

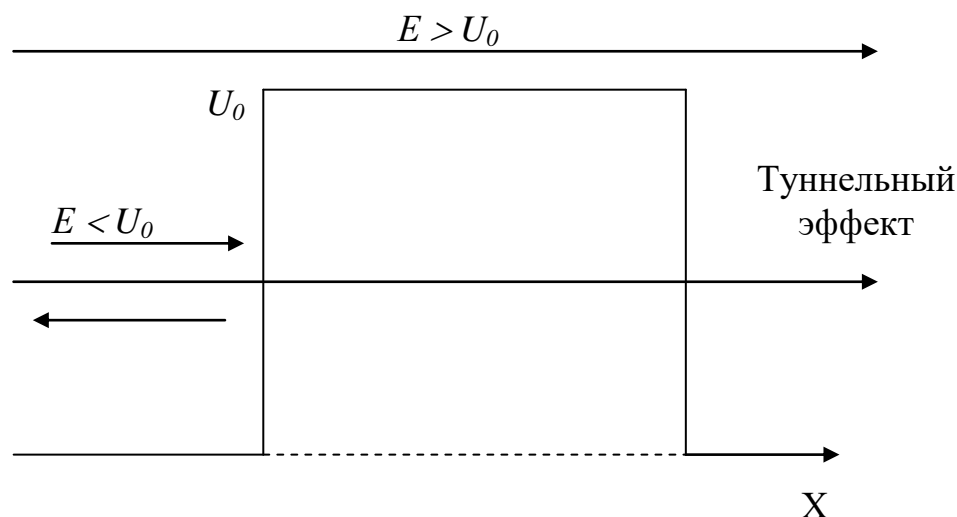
**1. Цель работы:** изучение элементов теории туннелирования носителей заряда в вырожденном  $p$ - $n$  полупроводнике; экспериментальное исследование проявлений туннельного эффекта на примере туннельного диода.

**2. Приборы и принадлежности:** осциллограф, генератор, магазин сопротивлений, туннельный диод.

### 3. Теоретические сведения

#### 3.1. Туннельный эффект

**Туннельным эффектом** называется эффект, заключающийся в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия меньше высоты барьера. Потенциальный барьер – это область пространства, в которой потенциальная энергия частицы в силовом поле имеет большее значение, чем в остальной части пространства. Примером простейшего потенциального барьера является барьер прямоугольной формы высотой  $U_0$  и шириной  $l$  (рисунок 1). На рисунке 1 показаны возможные варианты поведения микрочастицы при прохождении через прямоугольный потенциальный барьер.



**Рисунок 1 – Прохождение микрочастицы через прямоугольный потенциальный барьер (для случая одномерного движения частицы по оси  $X$ )**

С точки зрения классической физики туннельный эффект невозможен, поскольку микрочастица, вошедшая внутрь барьера, должна там иметь отрицательную кинетическую энергию (в туннеле  $E < 0$ ), что невозможно по смыслу кинетической энергии. В рамках классической механики прохождение частицы через такой барьер возможно лишь в том случае, когда её полная энергия  $E$  превышает высоту потенциального барьера  $U_0$ , т.е.  $E > U_0$ . В противоположном случае ( $E < U_0$ ) налетающая на барьер частица отражается от него, а сам барьер оказывается для неё «непрозрачной» стенкой. Совершенно иначе поведение частицы по законам квантовой физики, согласно которым микрочастица с энергией  $E < U_0$  может с некоторой вероятностью пройти сквозь потенциальный барьер.

ер (туннельный эффект), и даже при  $E > U_0$  имеется вероятность того, что она отразится от него и полетит обратно (надбарьерное отражение). Таким образом, туннельный эффект – явление квантовой природы, которое не имеет аналога в классической механике и интерпретируется на основе принципа неопределенности Гейзенберга: произведение неопределенностей координаты и импульса не может быть меньше величины порядка постоянной Планка  $\hbar$  ( $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$ ). То есть координата и импульс частицы не могут одновременно иметь определенных значений и не могут одновременно точно определены кинетическая и потенциальная энергии. В квантовой механике полная энергия не может быть представлена как сумма потенциальной и кинетической энергий. Это не имеет смысла, так как противоречит принципу неопределённости. Действительно, тот факт, что частица обладает определенной кинетической энергией, был бы равнозначен тому, что частица имеет определенный импульс. Аналогично, тот факт, что частица имеет определенную потенциальную энергию, означал бы, что частица находится в точно заданном месте пространства. Таким образом, заключение об отрицательности кинетической энергии внутри туннеля становится беспочвенным. Фиксация микрочастицы в пространственной области внутри барьера делает неопределенным её импульс. Поэтому имеется отличная от нуля вероятность обнаружить частицу внутри запрещенной с точки зрения классической механики области.

Наличие этой вероятности делает возможным прохождение микрочастиц сквозь потенциальный барьер конечной толщины  $l$  (их туннелирование). Для её описания вводится термин **коэффициент прозрачности**, выраженный формулой:

$$D \approx \frac{4\varepsilon_m (U_0 - E)}{U_0^2} e^{-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m^*(U_0 - E)}} = D_0 e^{-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m^*(U_0 - E)}} \quad (1)$$

где  $D_0$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы барьера;  
 $l$  – ширина барьера;  
 $m^*$  – эффективная масса микрочастицы.

Вероятность туннельного эффекта увеличивается при уменьшении массы микрочастицы и разности между высотой потенциального барьера и энергией частицы. Особенностью туннельного эффекта является то, что при туннельном просачивании сквозь потенциальный барьер энергия микрочастицы не меняется: она покидает барьер с той же энергией, с какой в него входит.

Туннельный эффект лежит в основе множества важных процессов в атомной и молекулярной физике, в физике атомного ядра, твёрдого тела, играет большую роль в электронных приборах, лежит в основе работы туннельных диодов и туннельных транзисторов и т.д. Примерами проявлений туннельного эффекта могут служить выход электронов с поверхности металла под действием электрического поля большой напряжённости (автоэлектронная эмиссия), переход сверхпроводящих электронов через тонкий слой диэлектрика (эффект Джефферсона). При определённых условиях возможно туннельное прохождение электронов через потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода. Это явление также лежит в основе принципа работы туннельного диода.

### 3.2 Вырожденный полупроводник

В обычных полупроводниковых диодах с широкими электронно-дырочными  $p$ - $n$ -переходами и низкой напряжённостью электрического поля вероятность туннельного эффекта очень мала, поскольку в них концентрация легирующих примесей составляет порядка  $10^{14}$ – $10^{18}$   $\text{см}^{-3}$ . С увеличением напряжённости и уменьшением ширины  $p$ - $n$ -перехода создается возможность туннельного прохождения электронов. Эти условия обеспечиваются в туннельном диоде. Концентрация носителей в них достигает величины порядка  $5 \cdot 10^{23}$   $\text{см}^{-3}$ , близкой к металлам. Такие сильнолегированные полупроводники относятся к типу вырожденных, отличительной чертой которых является то, что уровень Ферми находится внутри либо зоны проводимости, либо валентной зоны. Поэтому знание свойств таких сильнолегированных материалов очень важно, поскольку они служат основой для создания туннельных диодов.

Рассмотрим  $p$ - $n$ -переход в сильно вырожденном полупроводнике, в котором уровень Ферми лежит выше дна зоны проводимости в  $n$ -области и ниже верхнего края валентной зоны в  $p$ -области. В равновесной системе уровень Ферми должен быть одинаковым, поэтому при переходе от  $n$ - к  $p$ -области энергетические зоны изгибаются так, как показано на рисунке 2. Пунктиром изображены энергии  $\varepsilon_m$ , соответствующие максимальной плотности распределения электронов и дырок. Занятые электронами энергетические уровни заштрихованы.

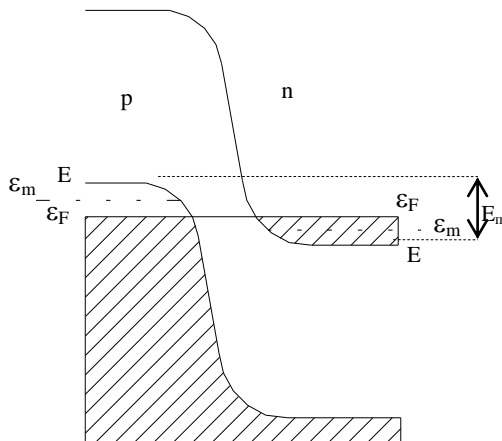


Рисунок 2 – Равновесное состояние  $p$ - $n$ -перехода

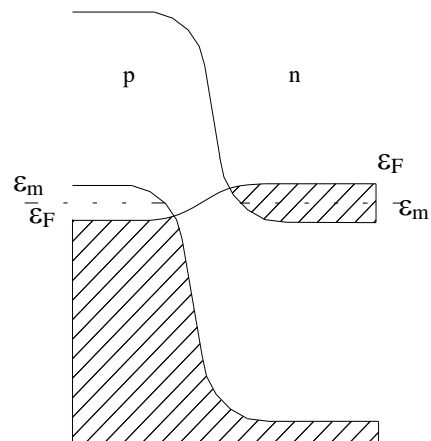


Рисунок 3 – Прямое смещение  $p$ - $n$  перехода

Возникновение электрического поля, приводящего к искривлению энергетических зон, можно пояснить следующим образом: после образования контакта электроны и дырки под действием градиентов электронной и дырочной концентрации, имеющих вблизи перехода, могут диффундировать в  $p$ - и  $n$ -области, соответственно. Следовательно, вблизи поверхности раздела возникает двойной электрический слой, который будет расти до тех пор, пока электрическое поле не окажется достаточным, чтобы препятствовать диффузионным потокам электронов и дырок, т.е. пока диффузионный и дрейфовый токи взаимно не компенсируются.

Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить малое прямое смещение  $U$ , то энергетическая схема изменяется согласно рисунку 3 (энергетические зоны в  $n$ -области

приподнимаются на величину  $eU$ ). При этом в дополнение к обычному току, возникающему из-за диффузии, появится ток, обусловленный квантово-механическим туннельным эффектом. Согласно законам квантовой механики частица имеет конечную вероятность туннелирования сквозь потенциальный барьер, даже если её энергия недостаточна для классического его преодоления. Поэтому при малом смещении электроны из  $n$ -области будут туннелировать в  $p$ -область. В процессе туннелирования энергия сохраняется, и поэтому для возникновения туннельного тока необходимо наличие незанятых состояний с другой стороны барьера. Из рисунка 2 видно, что высота барьера равна:

$$U = \varepsilon_F - \varepsilon_g, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_g$  – ширина запрещённой зоны;

$\varepsilon_F$  – энергия Ферми, отсчитанная от дна зоны проводимости.

Туннельный ток станет максимальным при условии, что максимум плотности занятых состояний в  $n$ -области совпадет с максимумом плотности свободных состояний в  $p$ -области. Это возможно при смещении  $U$  равным:

$$U_{\min} = \frac{2(\varepsilon_F - \varepsilon_m)}{e}. \quad (3)$$

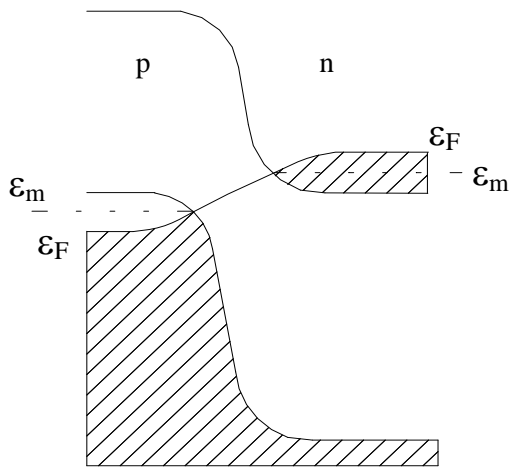


Рисунок 4 – Смещение зон при  $I_{\min}$

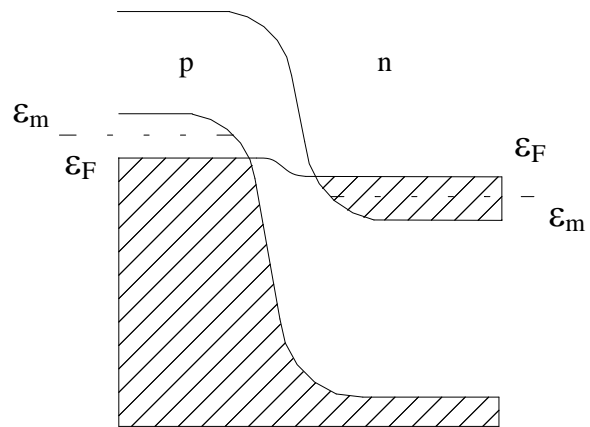


Рисунок 5 –  $p$ - $n$ -переход при обратном смещении

При увеличении прямого смещения  $U$  туннельный ток начнёт убывать, поскольку уменьшается количество незанятых состояний в  $p$ -области, куда электрон мог бы пройти. Туннельный ток будет минимальным в том случае, когда граница зоны проводимости в  $n$ -области совпадёт с границей валентной зоны в  $p$ -области (рисунок 4), т.е. при смещении равном:

$$U_{\max} = \frac{2\varepsilon_F}{e}. \quad (4)$$

При дальнейшем увеличении прямого смещения ток опять начинает возрастать. Однако этот рост будет обусловлен только активационным перебросом

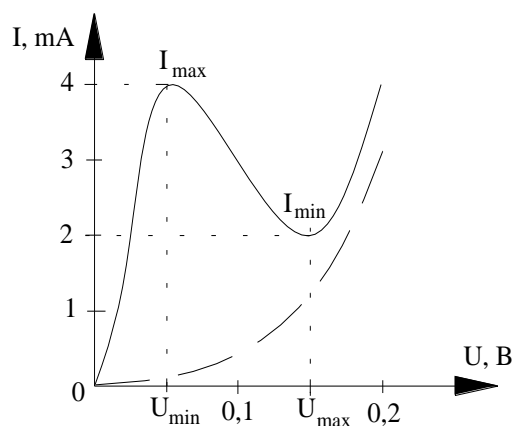
основных носителей через барьер (ток рекомбинации), как это имеет место в обычном невырожденном  $p$ - $n$ -переходе.

При обратном смещении  $U$  электроны из валентной зоны  $p$ -области могут туннелировать в свободное состояние  $n$ -области (рисунок 5). Возможность туннелирования частиц в обратном направлении такая же, как и в прямом. Поэтому обратный туннельный ток получается такого же порядка, как и ток при прямом напряжении.

Рассмотренные диаграммы поясняет вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного диода, приведенная на рисунке 6. Пунктиром показан экспоненциальный участок ВАХ невырожденного  $p$ - $n$ -перехода. Как видно, при  $U=0$  ток равен нулю. Увеличение прямого напряжения до  $U_{min}$  дает возрастание прямого туннельного тока до максимума  $I_{max}$ . Дальнейшее увеличение прямого напряжения сопровождается уменьшением туннельного тока. Поэтому в точке, где напряжение  $U_{max}$ , получается минимальный ток  $I_{min}$ . Отличительной особенностью характеристики туннельного диода является наличие падающего участка (в интервале напряжений  $U_{max} \dots U_{min}$ ), для которого характерно отрицательное дифференциальное сопротивление:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0. \quad (5)$$

После этого участка ток снова возрастает за счёт прямого диффузионного тока. Обратный ток получается такой же, как прямой, т.е. во много раз больше, нежели у обычных диодов.



**Рисунок 6 – ВАХ туннельного диода**

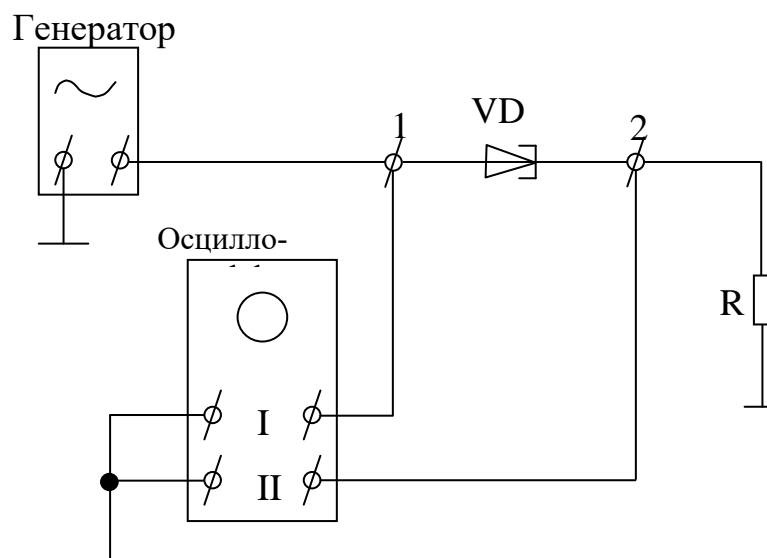
Таким образом, перекрытие зон и чрезвычайно малая ширина перехода и приводят к возникновению туннельного эффекта и появлению аномалии в вольт-амперной характеристике  $p$ - $n$ -перехода. Поэтому туннельный диод не является диодом в обычном смысле этого слова (на туннельном участке своей ВАХ).

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Описание лабораторной установки

Общий вид установки приведен на рисунке 7. Экспериментальная установка состоит из генератора гармонических колебаний, туннельного диода, магазина сопротивлений  $R$  и осциллографа.





**Рисунок 7 – Принципиальная схема лабораторной установки**

В настоящей работе снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного диода производится осциллографическим методом. Суть метода состоит в том, что на вход «X» осциллографа подается сигнал, пропорциональный напряжению на исследуемом туннельном диоде, а на вход «Y» – снимаемый резистором  $R$  сигнал, пропорциональный току, протекающему через туннельный диод. При этом на экране осциллографа возникает изображение ВАХ туннельного диода. На туннельный диод подается синусоидальное напряжение низкой частоты с амплитудой  $U$  от генератора. При этом мгновенное напряжение на диоде:  $U_{тд}(t) = U_{\sim} \cos(\Omega t)$ .

Таким образом, при определенном значении амплитуды синусоидального напряжения  $U_{\sim}$  можно наблюдать различные участки ВАХ туннельного диода.

## 4.2. Проведение измерений

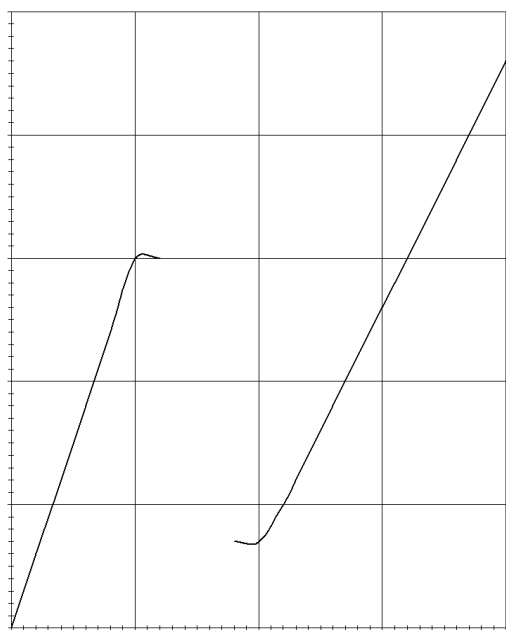
### Построение вольт-амперной характеристики

Перед построением вольт-амперной характеристики, получите на экране осциллографа зависимость  $U_Y(U_X)$ . Для этого необходимо:

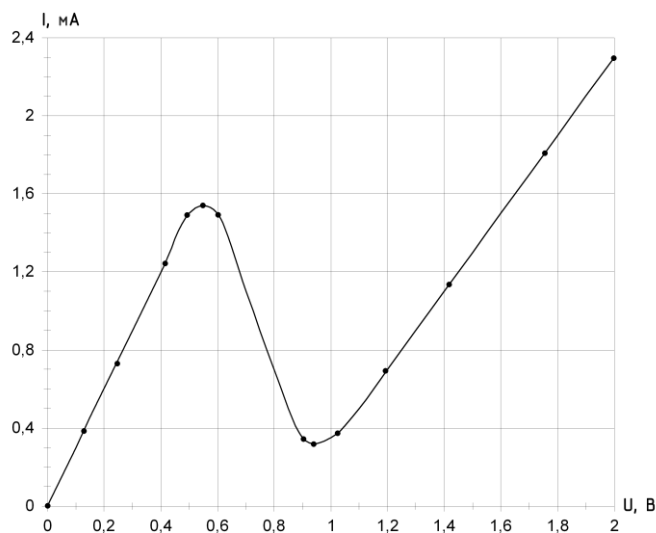
- собрать установку согласно схеме, представленной на рисунке 7;
- включить генератор и осциллограф в сеть напряжением 220 В;
- установить переключатель коэффициента ослабления сигнала генератора в положение 20 dB;
- задать амплитуду выходного сигнала и сопротивление  $R$  равными 0;
- установить с помощью ручек « $\leftrightarrow$ » и « $\updownarrow$ » на осциллографе светящуюся точку в начало координат;
- задать амплитуду и частоту сигнала, а также сопротивление  $R$  по указанию преподавателя;
- задать с помощью переключателей на осциллографе масштабные коэффициенты для напряжений по осям  $X$  и  $Y$  таким образом, чтобы осциллограмма заняла большую часть экрана.

В результате на экране осциллографа получается искомая зависимость  $U_Y(U_X)$ , представленная на рисунке 8а.

Снять координаты пика ( $U_{пх}$ ,  $U_{пу}$ ) и впадины ( $U_{вх}$ ,  $U_{ву}$ ).



а



б

**Рисунок 8 – Зависимость  $U_Y(U_X)$ , полученная на осциллографе, (а) и вольт-амперная характеристика туннельного диода после обработки (б)**

Для построения вольт-амперной характеристики туннельного диода  $I(U_X)$  необходимо учесть, что напряжение по вертикальной оси  $Y$  пропорционально току через туннельный диод и снимается с резистора  $R$ , т.е. сила тока  $I$  рассчитывается по формуле  $I=U_Y/R$ . Полученные точки наносятся на координатную сетку. Приблизительный вид ВАХ туннельного диода изображен на рисунке 8б.

### 5. Задания для самостоятельной работы

1. По результатам измерений п.4.2 постройте на миллиметровой бумаге ВАХ туннельного диода, используя полученную осциллограмму.

2. Из графика найдите экспериментальные значения  $U_n$ ,  $I_n$  и  $U_b$ ,  $I_b$ , что соответствует  $U_{min}$ ,  $I_{max}$  и  $U_{max}$ ,  $I_{min}$ .

3. По полученным экспериментальным результатам оцените энергию уровня Ферми  $\varepsilon_F$  по формуле:

$$U_B = \frac{2\varepsilon_F}{e}.$$

4. Определите энергию, соответствующую максимуму функции распределения электронов в зоне проводимости по формуле:

$$U_{\Pi} = \frac{2(\varepsilon_F - \varepsilon_m)}{e}.$$

5. Предполагая, что потенциальный барьер прямоугольной формы имеет высоту  $U_0 = \varepsilon_F + \varepsilon_g$  и ширину  $l=20 \text{ \AA}$  оцените коэффициент прозрачности барьера для диода:

$$D \approx \frac{4\varepsilon_m (U_0 - \varepsilon_m)}{U_0^2} e^{-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m^*(U_0 - \varepsilon_m)}}$$

где  $\varepsilon_g$  – ширина запрещенной зоны, равная 0,67 эВ;

$m$  – эффективная масса электрона, равная  $1,6m_0$  ( $m_0$  – масса покоя электрона).

6. Оцените концентрацию электронов проводимости по формуле:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m_0} \left( 3\pi^2 n \right)^{\frac{2}{3}}$$

7. Вычислите эффективную площадь  $S$  р-n-перехода, исходя из формулы для пика туннельного тока:

$$I_{\Pi} = e n \mathcal{G} D S$$

где  $\mathcal{G} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_m}{m}}$

8. Найдите дифференциальное сопротивление туннельного диода для различных участков ВАХ по формуле (5).

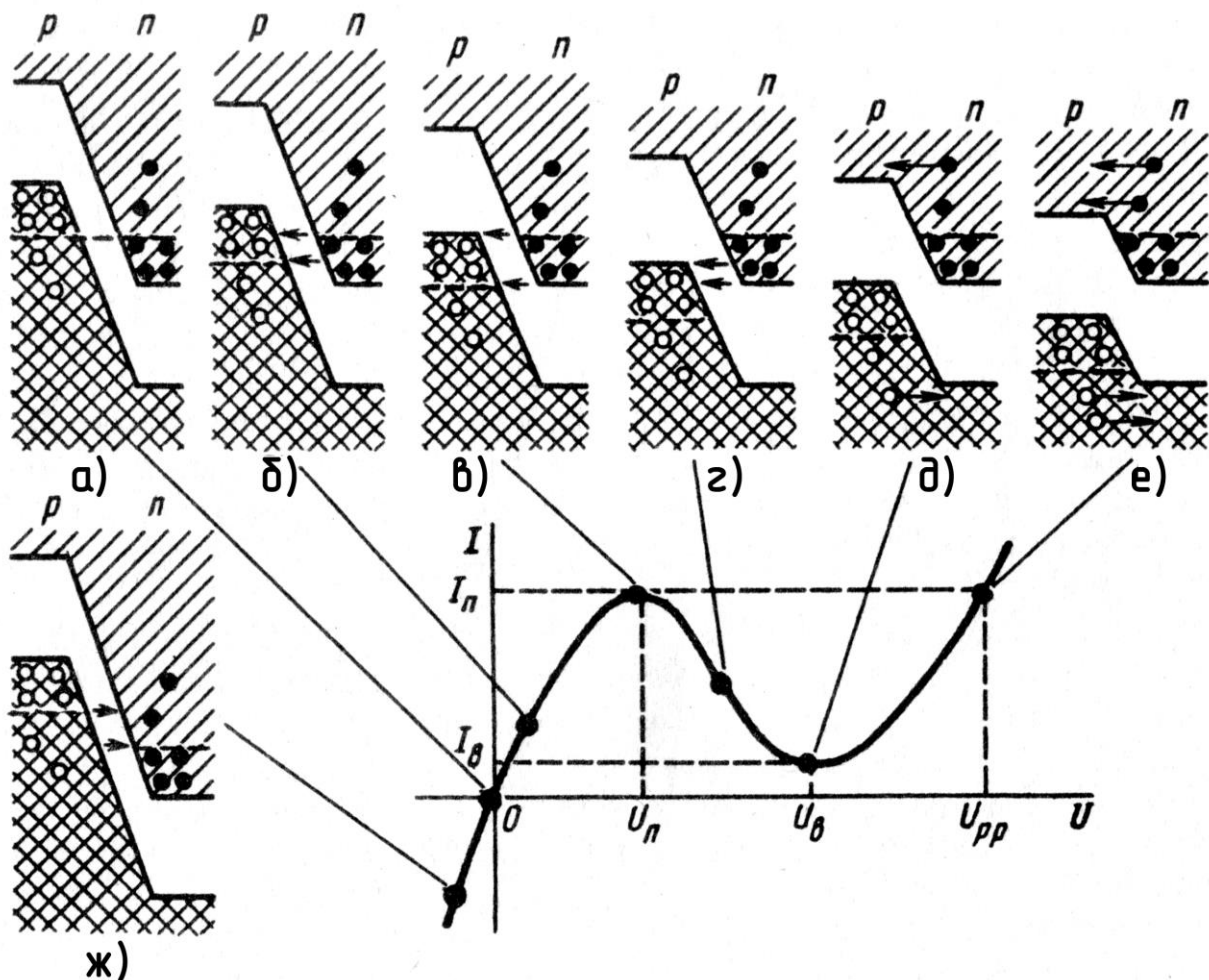
### Приложение 1. Туннельные диоды. Структура и принцип действия

**Туннельный диод** – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике участка отрицательной дифференциальной проводимости при прямом напряжении.

Туннельный диод впервые предложен японским учёным Л. Ёсаки в 1958 году и изготавливается из германия или арсенида галлия с высокой концентрацией примесей ( $10^{19}$ – $10^{20}$  см<sup>-3</sup>), т.е. с очень малым удельным сопротивлением, в сотни или тысячи раз меньшим, чем в обычных диодах. Электронно-дырочный переход в таком диоде получается в десятки раз тоньше ( $10^{-6}$  см), чем в обычных диодах, а потенциальный барьер примерно в два раза выше. В обычных полупроводниковых диодах высота потенциального барьера равна примерно половине ширины запрещённой зоны, а в туннельных диодах она несколько больше этой ширины. Вследствие малой толщины перехода напряжённость поля в нём даже при отсутствии внешнего напряжения достигает  $10^6$  В/см.

Рассмотрим процессы, происходящие в туннельном диоде, и его вольт-амперную характеристику. Процессы в туннельном диоде поясним с помощью энергетических диаграмм, показывающих уровни энергии валентной зоны и зоны проводимости в  $n$ - и  $p$ -областях.

Из-за большой концентрации примесей происходит расщепление примесных энергетических уровней с образованием примесных энергетических зон, примыкающих к зоне проводимости в  $n$ -области и к валентной зоне в  $p$ -области. При этом уровни Ферми расположены в разрешённых зонах (рисунок 9).



**Рисунок 9 – ВАХ и энергетические диаграммы туннельного диода при:**  
*а – отсутствии напряжения; б – небольшом прямом напряжении;*  
*в – пиковом напряжении; г – напряжении, соответствующем отрицательному*  
*дифференциальному сопротивлению; д – напряжению впадины;*  
*е – напряжению раствора, вызывающем значительный инжекционный ток;*  
*ж – обратном напряжении*

Без внешнего напряжения в диоде существует туннелирование электронов из  $n$ -области в  $p$ -область и обратно. Встречные потоки электронов равны, поэтому суммарный ток через диод равен нулю (рисунок 9 а).

При небольшом прямом напряжении на туннельном диоде происходит уменьшение высоты потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода или смещение энергетической диаграммы  $n$ -области относительно энергетической диаграммы  $p$ -области. Свободные энергетические уровни  $p$ -области (занятые дырками), расположенные непосредственно над уровнем Ферми, оказываются на одной высоте по энергетической диаграмме или при одних и тех же значениях с энергетическими уровнями  $n$ -области, занятыми электронами (рисунок 9 б). Поэтому будет происходить преимущественное туннелирование электронов из  $n$ -области в  $p$ -область. При прямом напряжении на диоде, когда свободные энергетические уровни валентной и примесной зон  $p$ -области окажутся на одной высоте с занятыми электронами энергетическими уровнями зоны проводимости и примесной зоны  $n$ -области, туннельный ток через диод будет максимальным (рисунок 9 в).

При дальнейшем увеличении прямого напряжения на диоде туннельный ток через диод будет уменьшаться, так как из-за смещения энергетических диаграмм будет уменьшаться количество электронов, способных туннелировать из  $n$ -области в  $p$ -область (рисунок 9 г).

Туннельный ток через диод окажется равным нулю при некотором еще большем прямом напряжении, когда из-за относительного смещения энергетических диаграмм  $n$ - и  $p$ -областей для свободных электронов  $n$ -области не будет свободных энергетических уровней в  $p$ -области (рисунок 9 д). Однако при этом через диод будет проходить прямой ток, обусловленный переходом носителей заряда через понизившийся потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода, т.е. ток, связанный с инжекцией.

С дальнейшим увеличением прямого напряжения в связи с уменьшением высоты потенциального барьера прямой ток через туннельный диод будет возрастать, как и в обычных выпрямительных диодах (рисунок 9 е).

При обратном напряжении на туннельном диоде опять возникают условия для туннелирования электронов (рисунок 9 ж). Только теперь электроны туннелируют из валентной зоны  $p$ -области в зону проводимости  $n$ -области. Возникающий при этом обратный ток будет расти с увеличением обратного напряжения по абсолютному значению. Туннельный диод обладает относительно высокой проводимостью при обратном напряжении. Можно считать, что у туннельного диода при ничтожно малых обратных напряжениях происходит туннельный пробой.

Таким образом, туннельный диод обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением в некотором диапазоне прямых напряжений. Это и является самым интересным свойством туннельного диода, так как всякий прибор с отрицательным дифференциальным сопротивлением может быть использован для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в переключающих схемах.

### Параметры

Туннельные диоды характеризуются следующими специфическими параметрами (рисунок 9):

1. *Пиковый ток*  $I_{\text{п}}$  – прямой ток в точке максимума ВАХ, при котором значение  $di/du$  равно нулю. Этот ток различен для туннельных диодов разного назначения. Его значение может составлять от десятых долей до сотен миллиампер.

2. *Ток впадины*  $I_{\text{в}}$  – прямой ток в точке минимума ВАХ, при котором значение  $di/du$  равно нулю.

3. *Отношение токов туннельного диода*  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$  – отношение пикового тока к току впадины. Для туннельных диодов из арсенида галлия  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}} > 10$ , для германиевых туннельных диодов  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}} = 3 \dots 6$ .

4. *Напряжение пика*  $U_{\text{п}}$  – прямое напряжение, соответствующее пиковому току. Для туннельных диодов из арсенида галлия  $U_{\text{п}} = 100 \dots 150$  мВ, для германиевых  $U_{\text{п}} = 40 \dots 60$  мВ.

5. *Напряжение впадины*  $U_{\text{в}}$  – прямое напряжение, соответствующее току впадины. У туннельных диодов из арсенида галлия  $U_{\text{в}} = 400 \dots 500$  мВ, у германиевых  $U_{\text{в}} = 250 \dots 350$  мВ.

6. *Напряжение раствора*  $U_{pp}$  – прямое напряжение больше напряжения впадины, при котором ток равен пиковому значению тока.

7. *Удельная емкость туннельного диода*  $C_d/I_p$  – отношение емкости туннельного диода к пиковому току.

8. *Предельная резистивная частота*  $f_R$  – расчетная частота, на которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из *p-n*-перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль.

9. *Резонансная частота туннельного диода*  $f_0$  – расчетная частота, на которой общее реактивное сопротивление *p-n*-перехода и индуктивности корпуса туннельного диода обращается в нуль.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните вид ВАХ туннельного диода в области малых прямых напряжений?

2. Какой вид имеет ВАХ при малых обратных смещениях?

3. Как изменится ВАХ диода при понижении температуры?

4. Предложите схему генератора на туннельном диоде и объясните принцип его работы.

5. Чем отличается ВАХ туннельного диода от ВАХ выпрямительного при обратном смещении?

6. Как изменятся характеристики диода при уменьшении (увеличении) ширины потенциального барьера?

7. Возможна ли работа диода Шоттки в режиме туннелирования?

8. Какой вид имеет потенциальный барьер для диэлектрического слоя в металле?

### **Список литературы**

1. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – СПб. : Издательство «Лань», 2003. – 480 с.

2. Гусев, В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.

3. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.

4. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.

5. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792 с.

Учебное издание

**Составители:**

*Янусик Ирина Семёновна*

*Савчук Оксана Федоровна*

*Барковская Марина Михайловна*

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ Ф3**

**«Экспериментальное исследование туннельного эффекта»**

по дисциплине

**«Физические основы электронной техники»**

для студентов специальности

**1-36 04 02 «Промышленная электроника»**

**очной и заочной форм обучения**

*Текст печатается в авторской редакции,  
пунктуации и орфографии*

Ответственный за выпуск: Янусик И.С.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

---

Подписано в печать 19.12.2018 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 1540. Тираж экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.