



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

М.А. Бутюгин,
С.М. Новиков

**ФИЗИКА. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ**

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы КС-6
«Измерение характеристик туннельного диода»**

для студентов II-III курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения

Москва
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

Кафедра физики

М.А. Бутюгин, С.М. Новиков

ФИЗИКА

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы КС-6
«Измерение характеристик туннельного диода»**

*для студентов II-III курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва
2019

ББК 53
Б93

Рецензент:

Камзолов С.К. – д-р техн. наук, профессор

Бутюгин М.А.

Б93 Физика. Физические основы современных технологий. Дополнительные главы физики: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы КС-6 «Измерение характеристик туннельного диода»./ М.А. Бутюгин, С.М. Новиков. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика», «Физические основы современных технологий» и «Дополнительные главы физики» по учебному плану для студентов II курса всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 07.03.2019 г. и методического совета 28.03.2019 г.

Учебно-методическое пособие издается в авторской редакции.

Подписано в печать 17.04.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 0,75 Усл. печ. л. 0,70

Заказ 459/2873 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр т 119 А, лит. Я, оф. 215

© Московский государственный
технический университет ГА, 2019

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КС-6 ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

1. Цель работы

Изучение физических основ работы туннельного диода, экспериментальное измерение его вольтамперной характеристики, определение характерных точек вольтамперной характеристики, оценка положения уровня Ферми и концентрации электронов в n -области, расчет дифференциального сопротивления "падающего" участка вольтамперной характеристики.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебнику [1, 2]: туннельный эффект, энергетические зоны в кристаллах, энергетическая диаграмма туннельного диода в состоянии равновесия и при приложении напряжения смещения. Прочитайте разделы 3 и 4 методического описания. Ознакомьтесь с устройством лабораторного стенда, порядком проведения измерений и обработки их результатов по методическому описанию. Подготовьте проект отчета по лабораторной работе, а также ответы на вопросы из раздела 7 данного описания.

3. Краткая теория

Туннельным эффектом называют квантовое явление прохождения микрочастиц через потенциальный барьер в случае, когда кинетическая энергия частиц E меньше величины потенциальной энергии барьера U_0 (рис. 1).

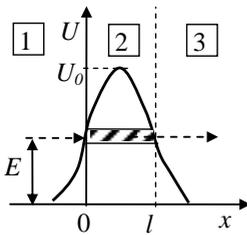


Рис. 1. Туннельный эффект

По *классическим* представлениям частица, движущаяся в области 1 слева направо, пройдет в область 3 без отражения только в том случае, если ее кинетическая энергия E больше высоты барьера ($E > U_0$). Совершенно иная ситуация складывается для частиц, подчиняющихся **квантовым** закономерностям. Для них есть вероятность отражения от барьера при любой энергии и вероятность проникновения в область 3 даже при $E < U_0$. Важно отметить, что вероятность туннелирования существенно увеличивается при уменьшении ширины потенциального барьера l .

Туннельный эффект широко используется в современной микро- и наноэлектронике, в том числе и при работе туннельного диода. В нем, как и в обычных диодах, на границе контакта полупроводников n - и p -типа возникает энергетический барьер в виде двойного электрического слоя (рис. 2а). Его ширина уменьшается при увеличении концентрации атомов донорных и акцепторных примесей. В туннельных диодах их концентрация в 10^4 - 10^6 раз больше, чем в

обычных диодах. В результате уменьшения ширины потенциального барьера ($l < 10$ нм) существенно увеличивается вероятность туннелирования носителей зарядов.

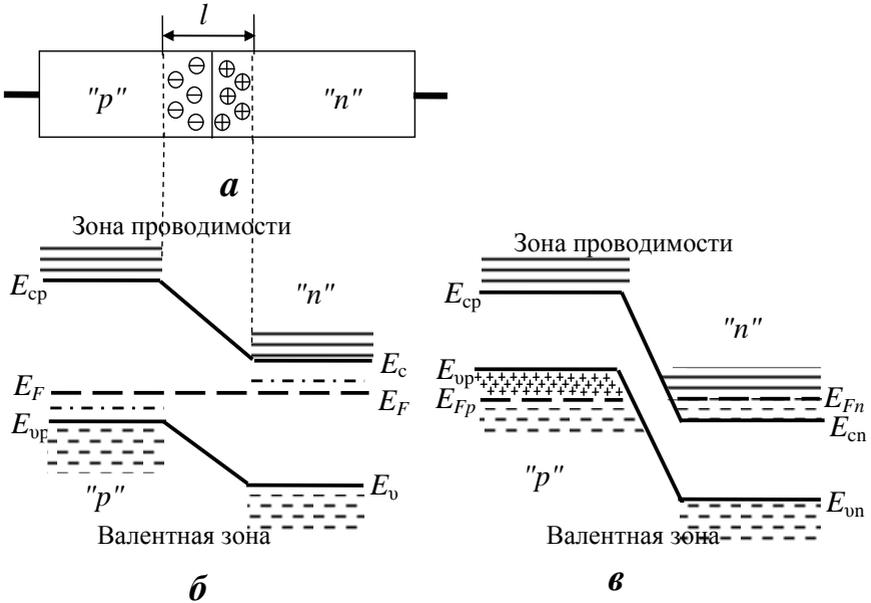


Рис. 2. а) Энергетический барьер на границе двух полупроводников разного типа в виде двойного электрического слоя шириной l .

б) Энергетическая диаграмма обычного диода при нулевом смещении и температуре вблизи абсолютного нуля. Уровни акцепторной и донорной примесей обозначены горизонтальными штрихпунктирными линиями.

в) Энергетическая диаграмма туннельного диода при нулевом смещении и температуре вблизи абсолютного нуля.

Обозначения: E_F – уровень Ферми, E_{vn} и E_{vp} – верхние границы (потолок) валентных зон, E_{cn} и E_{cp} – нижние границы (дно) зон проводимости соответственно в n и p областях.

Кроме того, при повышении концентрации атомов примесей уменьшаются расстояния между ними, а возникшее вследствие этого взаимодействие приводит к тому, что уровни примесей превращаются в минизоны. При этом донорная минизона в полупроводниках n -типа объединяется с зоной проводимости, а акцепторная минизона в полупроводниках p -типа объединяется с валентной зоной (рис. 2в и 3). Штриховкой в виде горизонтальных штриховых линий (типа знаков отрицательного заряда "-") обозначены энергетические уровни за-

полненные электронами. Горизонтальной сплошной штриховке соответствуют свободные энергетические уровни (без электронов). Штриховкой в виде знаков положительного заряда "+" в валентной зоне p -области обозначены состояния, занятые дырками.

В результате нижний край (дно) зоны проводимости в полупроводнике n -типа оказывается ниже верхнего края (потолка) валентной зоны в полупроводнике p -типа. Соответственно и **уровень Ферми**¹ в полупроводниках n -типа располагается в зоне проводимости, а в полупроводниках p -типа в валентной зоне (горизонтальные штриховые линии на рис. 2в и 3). Это существенное отличие от энергетической диаграммы обычного диода, где нижний край (дно) зоны проводимости в полупроводнике n -типа выше верхнего края (потолка) валентной зоны в полупроводнике p -типа, а уровень Ферми расположен в запрещенной зоне (рис.2б).

Эти особенности зонной диаграммы туннельного диода приводят к характерному виду его вольтамперной характеристики (ВАХ) с "падающим" участком 3-4-5 (рис. 4б). Для объяснения физических процессов ответственных за необычный вид ВАХ необходимо проанализировать энергетические диаграммы p - n -перехода туннельного диода при различных значениях приложенного напряжения смещения.

На рис. 3а-д такие диаграммы приведены при температурах вблизи абсолютного нуля. На рис. 3а показана энергетическая диаграмма в состоянии термодинамического равновесия (внешнее электрическое поле отсутствует). Условием равновесия в этом случае является равенство уровней Ферми. В области n -типа электроны заполняют зону проводимости вплоть до уровня Ферми E_{Fn} , который находится на $\Delta_n = E_{Fn} - E_{cn}$ выше края (дна) зоны E_{cn} . В области p -типа электроны заполняют валентную зону ниже уровня Ферми E_{Fp} , который расположен на $\Delta_p = E_{vp} - E_{Fp}$ ниже края (потолка) E_{vp} валентной зоны. При равенстве уровней Ферми число туннельных переходов электронов слева направо и справа налево одинаково, и ток через переход отсутствует (стрелки на рис. 3а). Этому состоянию соответствует точка 0 на типичной вольтамперной характеристике туннельного диода (рис. 4б).

Равновесие можно нарушить, приложив к переходу напряжение смещения V . Если положительный полюс источника напряжения присоединен к материалу p -типа, а отрицательный к материалу n -типа, то такое включение диода называется прямым (положительным). При этом энергетические состояния в области n -типа смещаются вверх по отношению к энергетическим состояниям

¹ **Уровень Ферми** E_F – это уровень, соответствующий максимальной энергии электронов в кристалле при температуре $T = 0$ К. Энергию, соответствующую этому уровню называют энергией Ферми. При абсолютном нуле температуры в кристаллах все состояния с энергией $E < E_F$ заняты электронами, а состояния с $E > E_F$ – свободны. Условием равновесия между соприкасающимися металлами (а также между полупроводниками или металлом и полупроводником) является равенство энергий, соответствующих уровням Ферми.

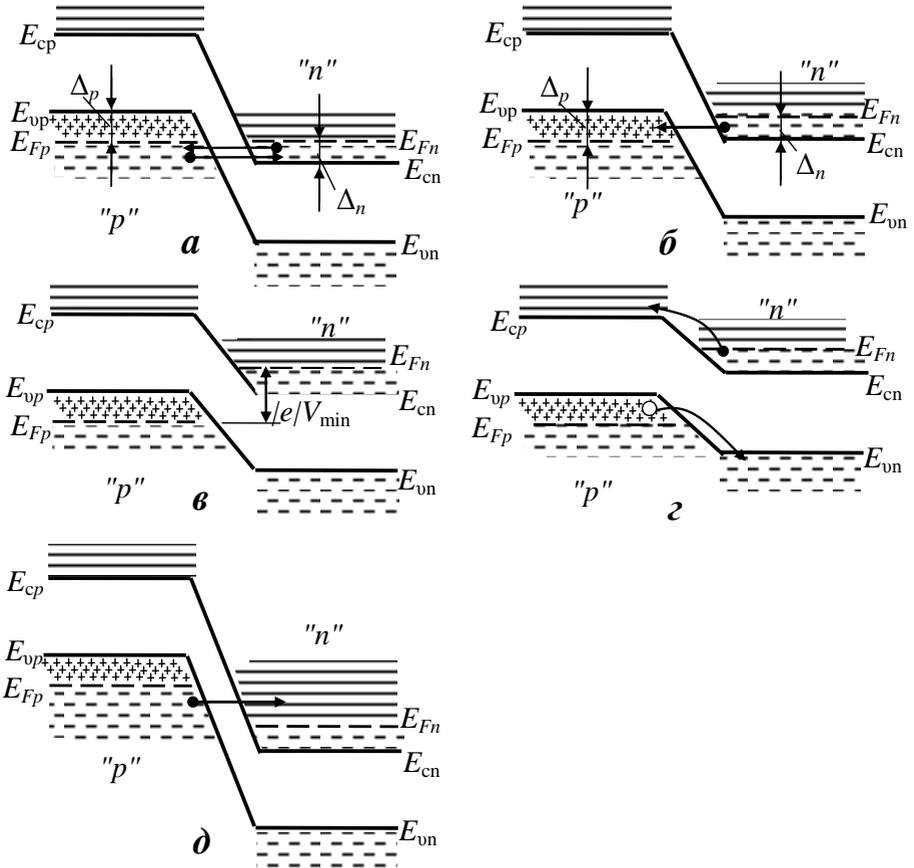


Рис. 3. Энергетические диаграммы туннельного диода при нулевом (*a*), прямом (*б*, *в*, *г*) и обратном смещении (*д*). Обозначения: E_{Fn} и E_{Fp} – уровни Ферми, E_{vn} и E_{vp} – верхние границы (потолок) валентных зон, E_{cn} и E_{cp} – нижние границы (дно) зон проводимости соответственно в *n* и *p* областях.

в p -области (рис. 3б). Напротив состояний, занятых электронами в n -области (штриховка в виде горизонтальных штриховых линий в зоне проводимости), оказываются состояния, занятые дырками в p -области (штриховка в виде знаков "+" в валентной зоне). Электроны из зоны проводимости n -области туннелируют через потенциальный барьер на свободные состояния (дырки) в p -области. При увеличении напряжения туннельный ток через переход возрастает (участок 0-2-3 на рис. 3) и достигает максимума при напряжении V_{\max} , когда на рис. 3б перекрытие областей $\Delta_n = E_{Fn} - E_{cn}$ и $\Delta_p = E_{vp} - E_{Fp}$ максимально (область с горизонтальными штриховыми линиями в виде знаков "-" в правой части оказывается целиком напротив области со штриховкой в виде знаков "+" в левой части).

При дальнейшем увеличении напряжения энергетические состояния в области n -типа продолжают смещаться вверх, и ток через переход уменьшается, поскольку «перекрытие» заполненных состояний в зоне проводимости n -области $\Delta_n = E_{Fn} - E_{cn}$ и состояний с дырками в валентной зоне p -области $\Delta_p = E_{vp} - E_{Fp}$ становится все меньше и меньше. При совпадении уровней границ зоны проводимости E_{cn} n -области и валентной зоны E_{vp} p -области туннельный ток практически прекращается, так как напротив энергетических состояний, занятых электронами в n -области, находятся запрещенные состояния в p -области (рис. 3в).

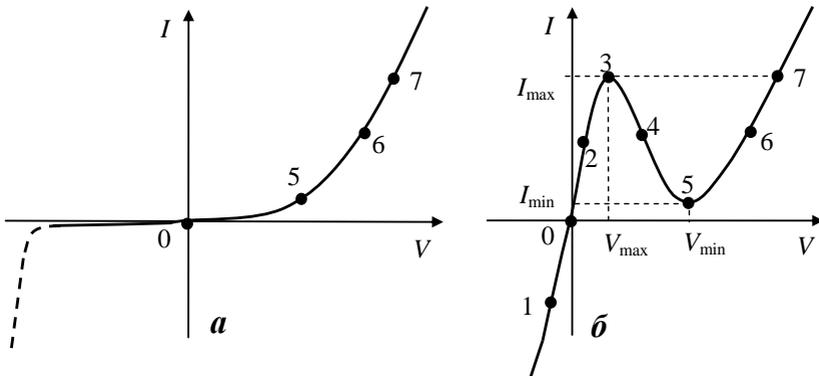


Рис. 4. Вольтамперные характеристики обычного (а) и туннельного (б) диодов. Точки 5 – 7 соответствуют одинаковым механизмам образования электрического тока

При соответствующем напряжении $V = V_{\min}$ через p - n -переход протекает только обычный ток p - n -перехода, смещенного в прямом направлении (рис. 4). Дальнейшее увеличение напряжения (рис. 3з) приводит снова к увеличению диодного тока (точки 5-7 на рис. 4) за счет обычного преодоления потенциального барьера как в обычном переходе (рис. 4а).

При подаче на p - n -переход отрицательного смещения, через него протекает туннельный ток, обусловленный переходами электронов из p -области на пустые состояния n -области (стрелка на рис. 3д). На ВАХ (рис. 4б) этому участку соответствует точка 1.

Как видно на рис. 3в,

$$|e|V_{\min} \approx \Delta_n + \Delta_p, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $\Delta_n = E_{Fn} - E_{cn}$ и $\Delta_p = E_{vp} - E_{Fp}$.

Теоретические оценки показали, что напряжение V_{\max} , при котором туннельный ток достигает максимума, определяется соотношением

$$|e|V_{\max} \approx \Delta_n, \quad (2)$$

а концентрацию электронов в n -области можно рассчитать с помощью формулы

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E_{Fn} - E_{cn})^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где m^* – эффективная масса электрона.

Наличие в вольтамперной характеристике туннельного диода "падающего" участка с отрицательным **дифференциальным сопротивлением** ($r_g = dV/dI$, ток уменьшается с ростом напряжения) позволяет успешно использовать его для генерации и детектирования сверхвысокочастотных колебаний вплоть до частот 10^{11} Гц в различных устройствах приемопередающей аппаратуры и радиолокационных станциях. Высокая скорость переключения (около 10^{-10} с) дает возможность широко использовать туннельные диоды в импульсных схемах ЭВМ и различных устройствах автоматики.

Туннельные диоды значительно менее чувствительны к ионизирующему излучению по сравнению с обычными полупроводниковыми приборами. Это свойство крайне важно при проектировании аппаратуры, работающей в условиях повышенного фона ионизирующего излучения (бортовая аппаратура спутников, приборы автоматики ядерной энергетики и др.).

4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Для экспериментального измерения ВАХ в данной работе используется установка, электрическая схема и внешний вид которой приведены на рис. 5.

Исследуемый туннельный диод ТД подключен в прямом направлении к регулируемому источнику постоянного тока (ИПТ) с низким внутренним сопротивлением. Изменение напряжения на туннельном диоде осуществляется с помощью реостата R . На передней панели прибора этот реостат обозначен как "РЕГ. ТОКА". Величина тока и напряжение на диоде измеряются миллиамперметром mA и вольтметром V .

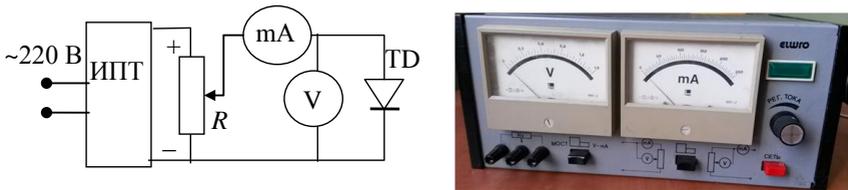


Рис. 5

5. Порядок выполнения работы

Плавно и без усилий поверните ручку "РЕГ. ТОКА" против часовой стрелки до упора. Включите вилку питания установки в сетевую розетку 220 В. Нажмите красную кнопку "СЕТЬ" на передней панели установки. Последующие измерения можно проводить после прогрева установки в течение не менее 3-х минут.

Плавно поворачивая ручку регулировки силы тока по часовой стрелке, установите напряжение на диоде 0,05 В. Запишите показание миллиамперметра в соответствующую ячейку табл. 1.

ВНИМАНИЕ: для повышения точности измерений миллиамперметр модернизирован так, что вместо 250 мА предел измерения стал 25 мА (одно деление соответствует току 0,5 мА).

Проведите аналогичные измерения для других значений напряжения на диоде, указанных в табл. 1. (При необходимости можно сделать продолжение табл.1).

Выключите установку нажатием красной кнопки "СЕТЬ" и выньте вилку питания из сетевой розетки.

7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- 7.1. В какой области на энергетической диаграмме располагается уровень Ферми в обычном полупроводнике n -типа?
- 7.2. В какой области на энергетической диаграмме располагается уровень Ферми в полупроводнике p -типа, используемом в туннельных диодах?
- 7.3. В какой области на энергетической диаграмме располагается уровень Ферми в полупроводнике n -типа, используемом в туннельных диодах?
- 7.4. Как напряжение минимума на ВАХ связано с «перекрытие» заполненных состояний в зоне проводимости n -области и пустых состояний в валентной зоне p -области?
- 7.5. На каком участке ВАХ туннельного диода наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление?
- 7.6. Поясните с помощью энергетической диаграммы туннелирование электронов при отрицательном смещении.
- 7.7. Какая ситуация на энергетической диаграмме соответствует точке максимума на ВАХ?
- 7.8. Каково условие равновесия контактирующих полупроводников?
- 7.9. Опишите порядок проведения измерений в лабораторной работе.

8. Литература

- 8.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: Наука (или другие издательства), 2012 – 2018 г.г.
- 8.2. Шишкин Г.Г., Агеев И.М. Нанoeлектроника. Элементы, приборы, устройства: Пособие–М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2012–408 с.

Содержание

	Стр.
1. Цель работ.....	3
2. Подготовка к работам.....	3
3. Краткая теория	3
4. Методика проведения эксперимента и описание установки..	9
5. Порядок выполнения работы	9
6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта	10
7. Вопросы для допуска к лабораторной работе	11
8. Литература	11