

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИЗУЧЕНИЕ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

Цель работы: 1. Ознакомление с основными закономерностями туннельного эффекта на СВЧ-модели. 2. Исследование туннельного эффекта в туннельном диоде, оценка кинетической энергии туннельных электронов и параметров туннельного барьера.

Приборы и принадлежности: генератор СВЧ-колебаний, рупорные антенны, призмы из полистирола, СВЧ-детектор, измерительный прибор (микроамперметр); туннельный диод типа ЗИ-201Г; миллиамперметр (50 мА); вольтметр (2В); источник питания (1,3В); панель с электрической схемой включения туннельного диода.

ВВЕДЕНИЕ

Туннельный эффект — квантово-механическое явление, не имеющее прямого аналога в классической механике. Суть этого эффекта состоит в том, что микрочастица с энергией E может пройти сквозь потенциальный барьер, высота которого $U > E$.

Туннельный эффект наблюдается в следующих физических явлениях:

- туннелирование электронов при контакте двух металлов, приводящее к появлению контактной разности потенциалов;
- холодная эмиссия электронов из металлов, помещенных в сильное электрическое поле;
- альфа-распад радиоактивных ядер (объясняется подбарьерным прохождением альфа-частиц, входящих в состав ядра, через барьер, обусловленный кулоновским полем).

Кроме того, туннельный эффект играет важную роль в эффекте Джозефсона, ответственен за “квантовое испарение” черных дыр.

Квантово-механический расчет показывает, что при энергетической высоте барьера U , превышающей энергию E частицы, существует конечная вероятность прохождения частицы через такой барьер. Для характеристики этой вероятности вводится понятие прозрачности барьера D , равное отношению числа частиц, прошедших барьер, к полному числу частиц упавших на барьер.

Для свободного электрона и прямоугольного барьера шириной d прозрачность равна:

$$D = 16 \frac{E}{U} \left[1 - \frac{E}{U} \right] \cdot \exp \left[-\frac{2d}{h} \sqrt{2m_e(U - E)} \right]. \quad (1)$$

Рассмотрим явление, во многом сходное с квантово-механическим туннельным эффектом. Если электромагнитная волна падает на границу раздела двух сред (рис. 10.1.) с коэффициентом преломления n_1 и n_2 ($n_1 > n_2$) под углом φ таким, что

$$\sin \varphi \geq \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}, \quad (2)$$

то она не проходит во вторую среду и наблюдается явление полного внутреннего отражения.

Теоретически это явление было рассмотрено русским физиком Эйхенвальдом. Он пришел к выводу, что интенсивность I волны, прошедшей в среду 2 изменяется с расстоянием x в этой среде по закону:

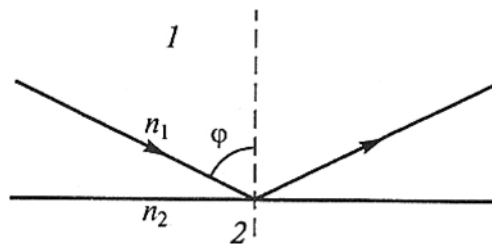


Рис. 10.1.

$$I = I_0 \exp \left(-\frac{2\pi x}{\lambda_1} \sqrt{\sin^2 \varphi - n_{2,1}^2} \right), \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность на границе раздела сред 1 и 2; φ – угол падения;

$n_{2,1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$ – относительный коэффициент преломления двух сред;

λ_1 – длина волны в среде 1, из которой волна падает на границу раздела.

Согласно теории Эйхенвальда, при полном внутреннем отражении поле заходит во вторую среду, так как оно на границе не прерывается. Поэтому *отражение электромагнитной волны происходит в некотором слое*. В свое время наличие такого слоя было продемонстрировано в оптике Вудом, Мандельштамом и Зелени, проводившими опыты по наблюдению волны, прошедшей через тонкий слой вещества в условиях полного внутреннего отражения.

Измерить изменение амплитуды (или интенсивности) волны за границей раздела при полном внутреннем отражении на волнах оптического диапазона практически невозможно, но на волнах сантиметрового диапазона (в области сверхвысоких частот) эти измерения проводятся сравнительно легко. Впервые такие опыты на длине волны 15 см были поставлены индийским физиком Бозе. Подобная методика используется и в настоящей работе.

На туннельном эффекте основано действие современных полупроводниковых приборов – туннельных диодов, для создания которых применяют сильно легированные полупроводники (*Ge, GaAs*), содержащие примеси в количестве 10^{18} - 10^{21} см⁻³. Это позволяет уменьшить ширину *p-n*-перехода до 50-150 Å, и, соответственно, увеличить напряженность поля внутри перехода (до 10^8 В/м). В этих условиях имеется вероятность того, что электроны, которые движутся к очень узкому *p-n*-переходу, пройдут сквозь него и займут свободное состояние с такой же энергией по другую сторону от барьерного слоя.

Вид вольт-амперной характеристики туннельного диода представлен на рис. 10.2. В отсутствии напряжения

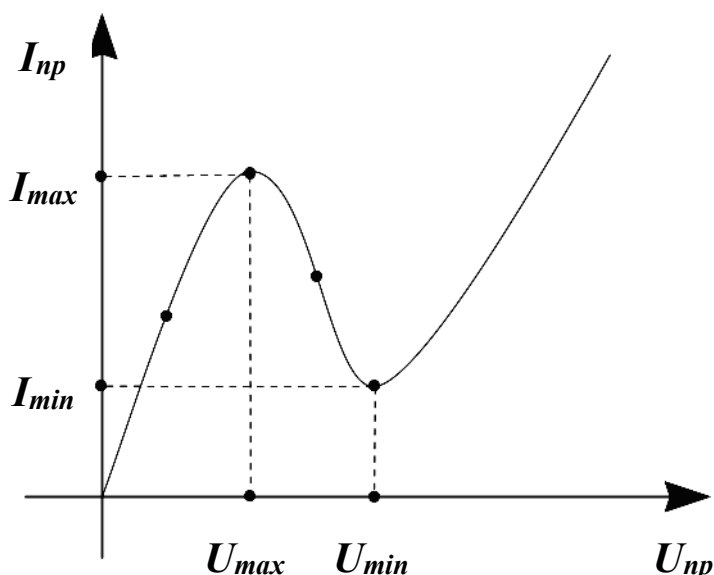


Рис.10.2

большинство занятых электронных состояний (то есть состояний свободных от дырок) в p -области лежит против занятых электронных состояний в n -области, что делает практически невозможным обмен электронами. Как только будет приложено прямое напряжение, некоторые занятые электронные состояния в n -области окажутся напротив пустых электронных состояний (занятых дырочных) в p -области, что приведет к плавному росту прямого тока. Этот процесс будет продолжаться с ростом напряжения до тех пор, пока энергетические состояния, заполненные дырками в p -области, не перекроются полностью состояниями, заполненными электронами в n -области, то есть у электронов, переходящих из n -области в p -область, будут свободны электронные состояния с той же энергией. При этом туннельный ток достигнет максимального значения I_{max} . Дальнейшее увеличение напряжения приведет к уменьшению этого перекрытия, и туннельный ток будет довольно резко убывать до некоторого минимального значения I_{min} . Отличие от нуля I_{min} и дальнейшее возрастание тока объясняется тем, что полный ток через туннельный диод в прямом направлении состоит из суммы туннельного тока и диффузионного тока, и, начиная с напряжения U_{min} , механизм прохождения электронов через p - n -переход обуславливается только обычным тепловым «перебросом» электронов через потенциальный барьер.

Из вольт-амперной характеристики туннельного диода можно оценить параметры потенциального барьера: ширину D и высоту U .

Согласно определению коэффициента прозрачности барьера:

$$D = \frac{\delta N}{N^*}, \quad (4)$$

где δN - число электронов, прошедших через барьер в единицу времени;

N^* - число электронов, побывавших у барьера в единицу времени.

Выразим N^* через полное число электронов в n -области. Для этого воспользуемся соотношением: $\frac{I}{6} n \nu S = N^*$, где $n = \frac{N}{V}$ - концентрация электронов проводимости в n -области (V – объем n -области); S – поперечное сечение диода; ν – средняя скорость электронов: $\nu = \sqrt{\frac{2E_\Phi}{m^*}}$; $E_\Phi = kT$ - энергия Ферми (максимальная кинетическая энергия электронов при $T=0K$); m^* - эффективная масса электрона.

Поскольку $\delta N = \frac{J_{max}}{e}$, где $J_{max} = \frac{I_{max}}{S}$ - плотность тока в максимуме вольт-амперной характеристики (рис. 10.2), то

$$D = \frac{6I_{max}}{en\nu S^2}. \quad (5)$$

С другой стороны, можно воспользоваться соотношением (1) для прозрачности барьера. Приравнявая (1) и (5), получаем:

$$\frac{6I_{max}}{enS^2 \sqrt{\frac{2E_\Phi}{m^*}}} = 16 \frac{E}{U} \left[1 - \frac{E}{U} \right] \cdot \exp \left[-\frac{2d}{h} \sqrt{2m^* (U - E)} \right]. \quad (6)$$

Из этого выражения можно найти d :

$$d = \frac{h}{2\sqrt{2m^* (U - E)}} \cdot \ln \left[\frac{8(U - E)EenS^2 \sqrt{\frac{2E_\Phi}{m^*}}}{3U^2 I_{max}} \right]. \quad (7)$$

В данной работе используется туннельный диод из германия Ge со следующими характеристиками: $m^* = 0,15m_e$; $n = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $S = 25 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

Величины U , E и I_{max} можно найти из вольт-амперной характеристики туннельного диода. Действительно, средняя энергия электрона равна

$$E = eU_{max}, \quad (8)$$

а высота барьера

$$U = eU_{min}. \quad (9)$$

Лабораторная работа состоит из двух частей.

- в первой части работы проводится ознакомление с основными закономерностями туннельного эффекта на СВЧ-модели;
- вторая часть работы посвящена изучению туннельного эффекта с помощью туннельного диода.

ЧАСТЬ 1.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема измерительной установки представлена на рис. 10.3, общий вид установки – на рис. 10.4.

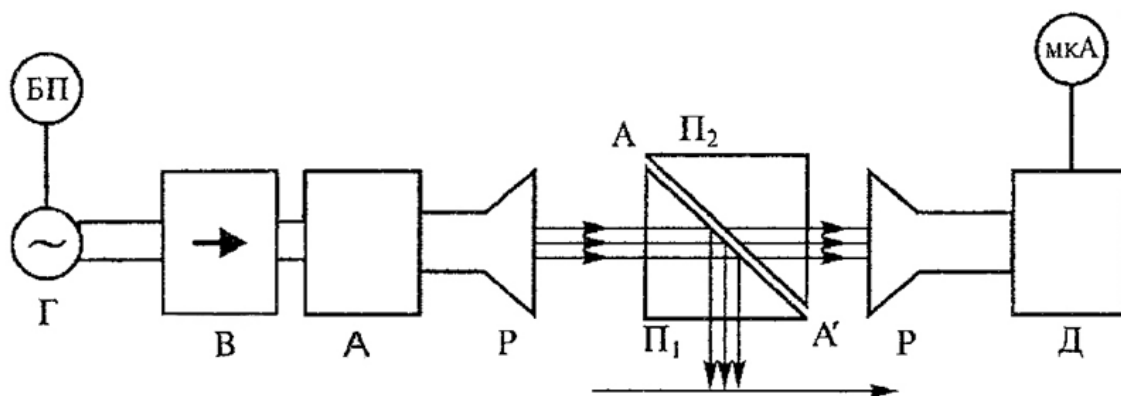


Рис. 10.3.

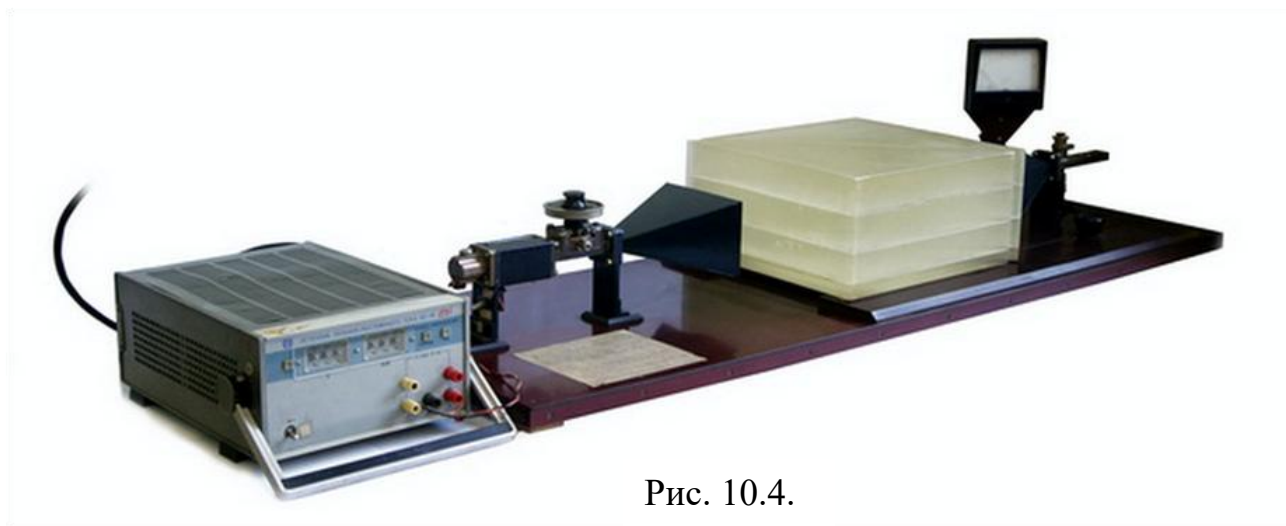


Рис. 10.4.

Ее основными частями являются генератор СВЧ-колебаний Г ($\lambda = 3$ см), блок питания БП (источник питания постоянного тока Б5-49), клапан В, предотвращающий попадание отраженных волн обратно в генератор, аттенюатор А для регулировки мощности выходящего СВЧ-излучения, рупорные антенны Р, с помощью которых излучение выводится из волновода и подается на детектор Д, регистрирующий излучение. Регистрация ведется с помощью стрелочного микроамперметра «мкА». В условиях опыта можно считать, что ток в цепи пропорционален мощности СВЧ-излучения, падающего на детектор. Между передающим и приемным рупором на столике помещаются две трехгранные призмы Π_1 и Π_2 из полистирола, которые можно раздвигать с помощью специального винта. Толщина воздушного зазора x между призмами измеряется по шкале, нанесенной на столике.

Материал призмы представляет собой первую среду с коэффициентом ε_1 . Слой воздуха является второй средой с коэффициентом ε_2 . Излучение падает на грань первой призмы под углом $\varphi = 45^\circ$, большим критического, поэтому на этой грани должно происходить полное внутреннее отражение. Если вторую призму отодвинуть на значительное расстояние от первой, то падающая волна будет полностью отражаться от грани первой призмы. Если призмы сдвинуты так плотно, что практически они представляют собой сплошной куб, то интенсивность прошедшей волны должна быть примерно равной интенсивности падающей волны. При раздвигании призм, пока толщина воздушного слоя между ними невелика, значительная часть волны все же проходит через границу раздела и может быть зарегистрирована детектором.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

З а д а н и е 1 . Измерение интенсивности прошедшей волны в зависимости от толщины воздушной прослойки.

1. Снимите защитный кожух с призм и установите перед призмами со стороны экспериментатора защитный металлический экран.

2. Включите сначала источник питания постоянного тока Б5-49 (тумблер 1), а затем питание генератора (тумблер 2).



Рис. 10.5.

3. При плотно сомкнутых призмах, поворачивая ручку аттенюатора (рис.10.5), добейтесь значения тока $I_0 = 85 - 90$ мкА.

4. Меняя с помощью винта толщину воздушного слоя x между призмами, снимите зависимость $I = f(x)$ интенсивности прошедшей волны от толщины слоя с шагом 0,1см; 0,2см и 1см на интервалах соответственно $0 < x < 1$ см, $1 < x < 3$ см и $3 < x < 10$ см.

5. По окончании измерений выключите оба тумблера и закройте призмы защитным кожухом.

6. Постройте график зависимости $I = f(x)$ и $\ln \frac{I_0}{I} = f(x)$ в удобном для анализа результатов масштабе. Объясните полученную зависимость.

З а д а н и е 2 . Расчет диэлектрической проницаемости материала призм.

1. Пользуясь формулой Эйхенвальда и приняв длину волны в полистироле равной $\lambda_1 = \frac{\lambda_2}{\sqrt{\epsilon_1 / \epsilon_2}}$, получите выражение для расчета диэлектрической проницаемости полистирола ϵ_1 . Длина волны в воздухе $\lambda_2 = 3$ см, диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_2 = 1$.

2. Пользуясь графиками $I = f(x)$ и $\ln \frac{I_0}{I} = f(x)$, а также полученным выражением для ε_1 , вычислите величину диэлектрической проницаемости полистирола.
3. Сравните экспериментальное значение ε_1 с табличным ($\varepsilon_{\text{полистирола}} = 2,56$).

ЧАСТЬ 2.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Приборы для снятия вольтамперной характеристики туннельного диода собраны по схеме, приведенной на рис. 10.6.

Ключ К (тумблер на измерительной панели) служит для включения установки. С помощью потенциометра П можно регулировать напряжение, подаваемое на туннельный диод ТД (ЗИ-301Г) от стабилизированного источника питания (1,5 В).

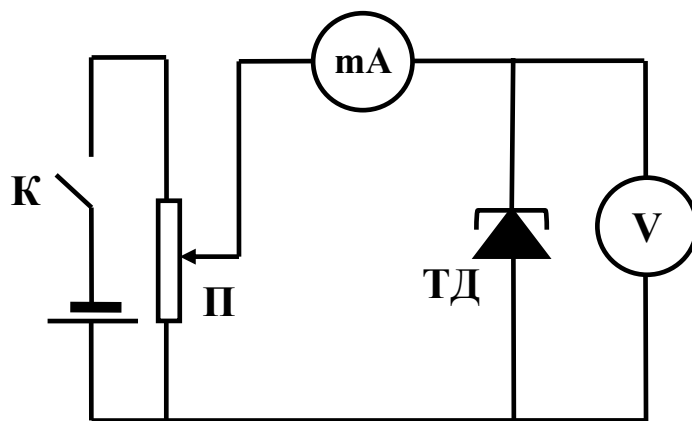


Рис. 10.6

Миллиамперметр служит для измерения тока через диод, вольтметр - для измерения напряжения.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

З а д а н и е 1 . Снятие вольтамперной характеристики туннельного диода.

1. Ознакомьтесь со схемой и установкой для снятия вольтамперной характеристики туннельного диода.
2. Проверьте, чтобы потенциометр R регулировки напряжения был установлен на «0».

3. Включите измерительную установку.
4. Меняя напряжение на диоде от 0 до 1,2 В с шагом в 0,05 В, снимите вольтамперную характеристику диода (*Внимание:* напряжение более 1,2 В может повредить диод.)
5. Данные измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1.

№	1	...										
$U, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25		...		...	...	1,2
$I, мкА$												

6. Постройте график зависимости $I=f(U)$.

З а д а н и е 2 . Оценка высоты и ширины потенциального барьера и средней кинетической энергии электронов.

По графику вольтамперной характеристики и формулам (7), (8) и (9), рассчитайте высоту и ширину потенциального барьера в туннельном диоде, а также среднюю кинетическую энергию электронов.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В чем заключается туннельный эффект?
2. Назовите явления, для объяснения которых нужно привлекать туннельный эффект.
3. Обоснуйте аналогию между туннельным эффектом и явлением полного внутреннего отражения электромагнитных волн на границе раздела.
4. Запишите уравнение Шредингера – общее и для стационарных состояний.
5. Какие ограничения накладываются на волновую функцию, являющуюся решением уравнения Шредингера?

6. Решите задачу о частице, налетающей на прямоугольный одномерный потенциальный барьер. Чем отличается поведение классических и квантовых частиц, налетающих на барьер высотой U с энергией $E < U$; $E > U$?
7. Найдите приближенное решение для прозрачности прямоугольного одномерного потенциального барьера высотой U . Оцените прозрачность барьера для электрона и протона, если $E - U = 1 \text{ эВ}$, ширина барьера равна а) $l = 0,1 \text{ нм}$; б) 1 нм .
8. Чем различаются обычный и туннельный полупроводниковый диоды?
9. Каков вид вольтамперной характеристики туннельного диода? Почему у туннельного диода есть падающий участок характеристики?
10. Известно, что в p - n -областях концентрации свободных носителей электронов различны. Это означает, что в отсутствии напряжения на диоде ток должен быть отличен от нуля. Почему в действительности этот эффект не наблюдается?