

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

# Туннелирование в полупроводниках

выполнила студентка 653 группы ФФКЭ

Карпова Татьяна

Долгопрудный, 2019 г.

# 1 Цель работы

Исследование принципа действия туннельного диода, измерение его вольт-амперной характеристики и основных параметров.

# 2 Физическая суть явления

В  $(p-n)$ -переходе, образованном двумя областями невырожденного электронного и дырочного полупроводников, ток обуславливается прохождением электронов над потенциальным барьером. В случае вырожденного полупроводника (концентрация примесей порядка  $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) переходный слой будет очень тонким (порядка 10 нм), и будет возможно прохождение электронов через  $(p-n)$ -переход в результате туннелирования. Поэтому ВАХ туннельного диода будет принципиально отличаться от ВАХ обычного полупроводникового диода. Так, наблюдается резкий рост тока при обратной полярности напряжения, а на участке прямого источника появляется область отрицательного дифференциального сопротивления.

Значительный туннельный ток возникает в  $(p-n)$ -переходах толщиной около 10 нм, когда при контактной разности потенциалов напряжённость поля в переходе приближается к  $10^6 \text{ В/см}$ . Такая толщина перехода, как уже было сказано, для большинства полупроводников наблюдается при большой концентрации примесей (диапазон указан выше), то есть при вырождении полупроводника.

# 3 Теория явления

Рассмотрим ВАХ диода на различных участках (рис. 1ж). Введём следующие обозначения для зонной структуры (рис. 1 а-е): расстояние от уровня Ферми до края зоны проводимости в полупроводнике  $n$ -типа (от  $\mu_n$  до  $E_c$ ) обозначим как  $\xi = \mu_n - E_c$ , расстояние от уровня Ферми до края валентной зоны в полупроводнике  $p$ -типа (от  $\mu_p$  до  $E_v$ ) -  $\eta = \mu_p - E_v$ .  $\xi$  и  $\eta$  определяют суммарное перекрытие разрешённых энергетических зон.

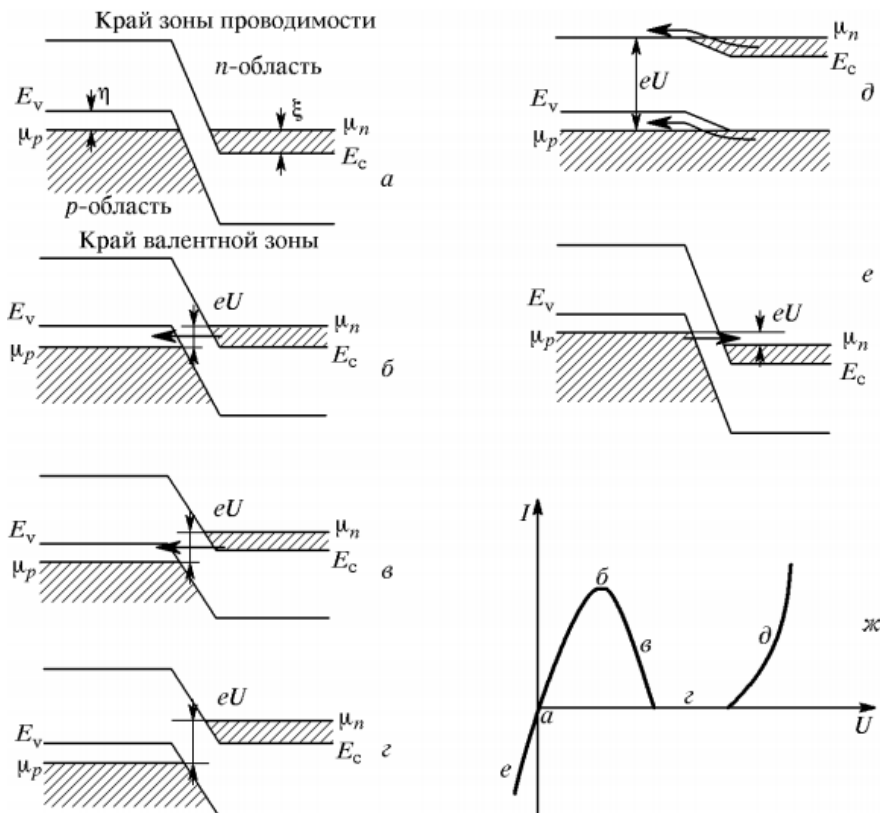


Рис. 1: Схема энергетических уровней и вольт-амперная характеристика идеального туннельного диода

- а) - перекрытия свободных и занятых уровней в  $p$ - и  $n$  областях нет. Волновая функция электрона внутри зоны экспоненциально затухает, число электронов, туннелирующих в обе стороны, одинаково,

поэтому ток в диоде отсутствует

- б) - к  $(p-n)$ -переходу приложено напряжение в прямом направлении. Возрастает количество электронов, туннелирующих из  $n$ -области в  $p$ -область при одновременном снижении встречного потока (участок а-б на ВАХ (рис. 1 ж)). При дальнейшем повышении прямого напряжения перекрытие разрешённых зон проходит через максимум (точка б на ВАХ).
- в) - после того, как перекрытие достигло максимума, при повышении прямого напряжения начинает уменьшаться (часть занятых состояний в  $n$ -области перекрывается с запрещённой зоной  $p$ -области). Увеличение входного напряжения до величины  $U = (\xi + \eta)/e$ , когда  $E_c$  совпадает с  $E_v$ , приведёт к уменьшению туннельного тока до нуля
- д) - по мере дальнейшего повышения прямого смещения на  $(p-n)$ -переходе высота потенциального барьера понижается и будет возрастать диффузионный ток основных носителей заряда, способных преодолеть снижающийся потенциальный барьер. Ток будет увеличиваться по тому же закону, что и в обычном диоде.
- е) - в случае обратного смещения все энергии в  $n$ -области снижаются относительно  $p$ -области, поток туннелирующих электронов (неосновных носителей) из  $p$ -области в  $n$ -область резко возрастает, так как увеличивается количество заполненных уровней в полупроводнике  $p$ -типа, против которых при той же энергии лежат свободные уровни в зоне проводимости материала  $n$ -типа. Поток электронов в обратном направлении при этом уменьшится. Увеличение обратного напряжения сопровождается ростом туннельного тока.

Реальная вольт-амперная характеристика туннельного диода представлена на рис. 2. Наибольшее различие в ВАХ, рассчитанной теоретически и измеренной экспериментально, проявляется в области минимума тока, где его реальная величина существенно превосходит сумму расчётных значений для туннельной и диффузионной составляющих (в и д на рис. 1 ж). В этой области существенное влияние оказывает изменение плотности состояний вблизи краёв запрещённой зоны вырожденного полупроводника. Этот эффект проявляется в возникновении хвостов плотности состояний, заходящих в запрещённую зону. При напряжении  $U = (\xi + \eta)/e$  ещё наблюдается перекрытие разрешённых состояний в  $n$ - и  $p$ -областях.

Вторым существенным фактором, объясняющим увеличение реального тока в области минимума ВАХ туннельного диода, является наличие (из-за большой донорных центров в  $n$ -полупроводнике и акцепторных центров в  $p$ -полупроводнике) в запрещённой зоне полупроводника глубоких примесных уровней, которые обеспечивают избыточный ток при прямом смещении. Протекающий туннельный ток зависит от суммарной концентрации примесных состояний и их расположения в запрещённой зоне полупроводника. Также оказывают влияние мелкие примесные уровни, сливающиеся с основными зонами.

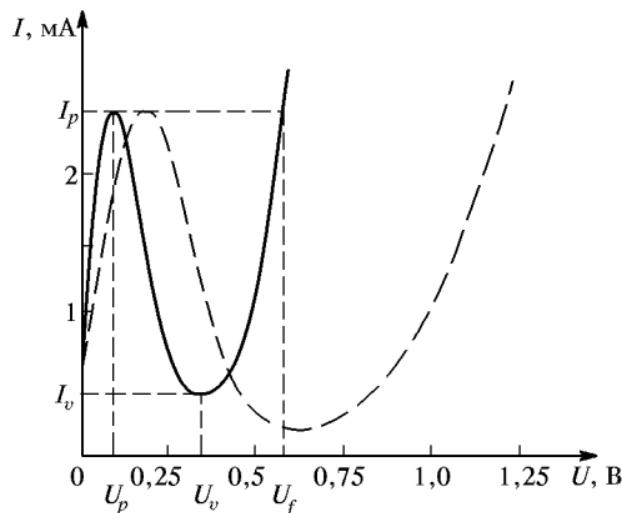


Рис. 2: Экспериментальные ВАХ туннельных диодов при  $T=300$  К (сплошная линия - германий, пунктирная - арсенид галлия)

Основные параметры реальной ВАХ туннельного диода:

- Величина напряжения  $U_p$ , которое соответствует максимуму тока  $I_p$

- Величина напряжения  $U_v$  при минимальной величине тока  $I_v$
- Величина напряжения  $U_f$ , при котором ток через диод равен  $I_p$

Измерив  $U_v$ , можно оценить положение уровней Ферми

$$U_v \simeq \frac{\xi + \eta}{e} \quad (1)$$

Если принять, что оба полупроводника вырождены одинаково, то

$$U_v \simeq \frac{2\xi}{e} \simeq \frac{2\eta}{e} \quad (2)$$

Зная величину  $U_p$ , можно определить энергетический промежуток между уровнем Ферми и максимумом плотности распределения электронов, отсчитываемым от границы зоны проводимости:

$$U_p \simeq \frac{\xi - E_{nmax}}{e} \quad (3)$$

Благодаря наличию участка отрицательного дифференциального сопротивления, туннельный диод может быть использован для усиления и генерации СВЧ-колебаний

## 4 Экспериментальная установка

Для измерения основных параметров туннельного диода используется монтажная плата, на которой собраны три схемы: схема для снятия вольт-амперной характеристики, схема для наблюдения ВАХ на экране осциллографа и схема генератора электромагнитных колебаний на туннельном диоде.

### 4.1 Снятие вольт-амперной характеристики туннельного диода

При снятии вольт-амперной характеристики и определении параметров туннельного диода ток измеряется миллиамперметром, включенным последовательно с туннельным диодом, а напряжение на диоде измеряется цифровым вольтметром. Питание схемы осуществляется от источника постоянного тока с малым внутренним сопротивлением. Регулирование тока через диод производится переменным сопротивлением  $R$ . Ключи  $K_1$  и  $K_2$  используются при уточнении основных параметров диода

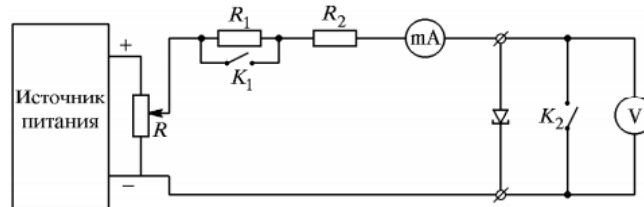


Рис. 3: Принципиальная схема измерения параметров ВАХ туннельного диода

### 4.2 Наблюдение вольт-амперной характеристики туннельного диода с помощью осциллографа

Характеристики диода можно измерить с меньшей точностью с помощью осциллографа и мостовой схемы, изображенной на рис.4. На вход Y осциллографа подается напряжение, пропорциональное току, протекающему через диод, а на вход X – падение напряжения на диоде. На одну из диагоналей моста подается переменное напряжение от звукового генератора через диод Д223. Диод служит для того, чтобы исключить большие обратные токи через туннельный диод. Для количественной оценки наблюдаемой характеристики необходимо получить соотношение между напряжением  $U_Y$  на входе Y осциллографа и током  $I$  через диод. Поскольку сопротивления плеч моста одинаковы, формула для тока принимает вид

$$I_d = U_Y \frac{R_1 + 2(R_2 + R_3)}{(R_1 + 2R_2)R_3}, \quad (4)$$

где  $R_1=680$  Ом,  $R_2=100$  Ом и  $R_3=120$  Ом – сопротивления соответствующих резисторов в плечах моста. Напряжение  $U_Y$  определяется с помощью калибровочных коэффициентов отклонения луча осциллографа.

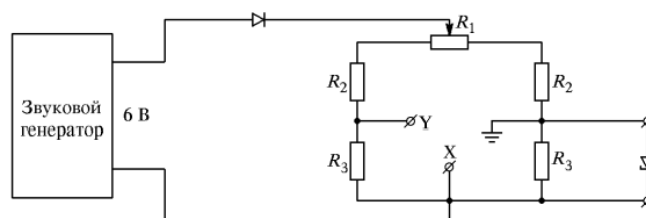


Рис. 4: Принципиальная схема наблюдения ВАХ туннельного диода с помощью осциллографа

### 4.3 Генератор колебаний на туннельном диоде

Генератор электромагнитных колебаний на туннельном диоде собран по схеме с параллельным контуром (рис. 5). Резистор  $R$  и конденсатор  $C_1$  служат для развязки источника питания и генератора по переменному напряжению. Резистор  $R_1$  служит для выведения рабочей точки туннельного диода на нужную ветвь вольт-амперной характеристики.

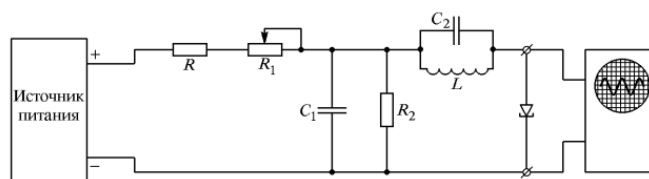


Рис. 5: Принципиальная схема генератора на туннельном диоде

## 5 Ход работы

### 5.1 Изучение вольт-амперной характеристики туннельного диода с помощью осциллографа

1. Соберём схему, изображённую на рис. 4. Установим на звуковом генераторе напряжение 5-6 В и получим изображение прямой линии на осциллографе. Далее с помощью резистора  $R_1$  установим изображение линии в горизонтальной положение.
2. Поместим головку с туннельным диодом в соответствующее гнездо монтажной платы, получим на экране осциллографа вольт-амперную характеристику туннельного диода (рис. 6, изображение зеркально отражено).
3. Проанализируем полученное изображение. Масштаб: 0,1 В/дел по шкале X, 0,1 В/дел по шкале Y. Определим величины  $U_p$ ,  $U_v$ ,  $U_f$ , а также с помощью формулы (4) определим соответствующие токи  $I_p$ ,  $I_v$

$$\begin{aligned} U_p &= 0.03 \pm 0.02 \text{ В} & I_p &= 3.18 \pm 0.11 \text{ мА} \\ U_v &= 0.28 \pm 0.02 \text{ В} & I_v &= 0.53 \pm 0.11 \text{ мА} \\ U_f &= 0.48 \pm 0.02 \text{ В} \end{aligned}$$

### 5.2 Получение статической характеристики туннельного диода

1. Для получения статической характеристики туннельного диода соберём схему, изображённую на рис. 3. Ручку потенциометра  $R$  поставим на минимальное напряжение. Включим в схему миллиамперметр, вольтметр, туннельный диод. Плавно повышая напряжение на диоде с помощью потенциометра, снимем показания миллиамперметра и вольтметра. Результаты занесём в таблицу 1.
2. По полученным результатам измерений построим вольт-амперную характеристику  $I(U)$  исследуемого диода (рис. 7) Определим по графику параметры диода:

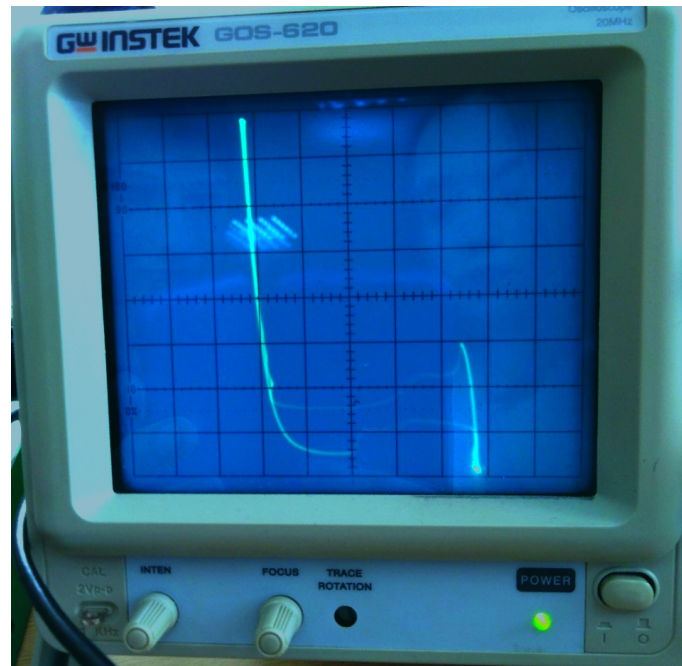


Рис. 6: Вольт-амперная характеристика туннельного диода, полученная на экране осциллографа

Таблица 1: Вольт-амперная характеристика туннельного диода

V, мВ	460,1	458,4	457,9	457,3	456,4	455,6	454,8	452,3	451,8	451,0	448,5	443,8
I, мА	5,102	4,826	4,742	4,653	4,5200	4,394	4,286	3,954	3,885	3,789	3,493	2,962
V, мВ	440,1	437,8	433,1	431,4	428,0	422,8	419,9	413,6	409,2	408,8	393,2	391,7
I, мА	2,692	2,517	2,194	2,081	1,895	1,646	1,524	1,302	1,169	1,142	0,839	0,815
V, мВ	387,8	381,7	379,6	362,8	<b>348,9</b>	<b>241,2</b>	215,3	195,7	182,3	172,0	169,8	162,0
I, мА	0,751	0,691	0,670	0,552	<b>0,492</b>	<b>2,117</b>	2,063	2,042	2,015	2,012	2,006	1,971
V, мВ	<b>150,0</b>	<b>24,9</b>	24,6	23,8	23,6	23,2	19,2	18,7	17,4	16,6	15,6	15,2
I, мА	<b>1,898</b>	<b>3,601</b>	3,576	3,501	3,486	3,443	3,017	2,966	2,812	2,709	2,579	2,529
V, мВ	14,4	13,6	13,4	12,9	12,6	12,1	11,9	14,4	11,0	10,5	10,3	9,4
I, мА	2,430	2,329	2,283	2,222	2,188	2,105	2,067	2,004	1,942	1,857	1,831	1,694
V, мВ	8,9	7,9	7,4	6,7	6,0	5,3	4,9	4,0	3,0	2,0	0,3	0
I, мА	1,605	1,451	1,356	1,240	1,122	0,990	0,921	0,755	0,572	0,384	0,0042	7E-4

$$\begin{aligned}
 U_p &= 0.025 \pm 0.01 \text{ В} & I_p &= 3.601 \pm 0.1 \text{ мА} \\
 U_v &= 0.349 \pm 0.01 \text{ В} & I_v &= 0.492 \pm 0.1 \text{ мА} \\
 U_f &= 0.450 \pm 0.01 \text{ В}
 \end{aligned}$$

3. Оценим положение уровня Ферми  $\mu_n = \xi = \eta$  и максимума распределения электронов в зоне проводимости полупроводника туннельного диода, используя формулы (2) и (3) и полученные значения  $U_p$  и  $U_v$

$$\begin{aligned}
 \xi = \eta &= \frac{U_v e}{2} = 0.1573 \text{ эВ} \approx 6k_B T \quad (k_B T = 0.0259 \text{ эВ}) \\
 E_{nmax} &= \xi - U_p e = 0.13225 \text{ эВ} \approx 5k_B T
 \end{aligned}$$

### 5.3 Изучение генератора на основе туннельного диода

1. Соберём схему генератора, изображённую на рис. 5. Включим осциллограф и источник постоянного тока в сеть 220 В. Изменяя сопротивление R и перемещая тем самым рабочую точку диода на спадающий участок ВАХ, получим генерацию, наблюдая её на экране осциллографа.
2. Измерим с помощью осциллографа амплитуду и диапазон частоты генерации при различных значениях сопротивления. Результаты занесём в таблицу 2.

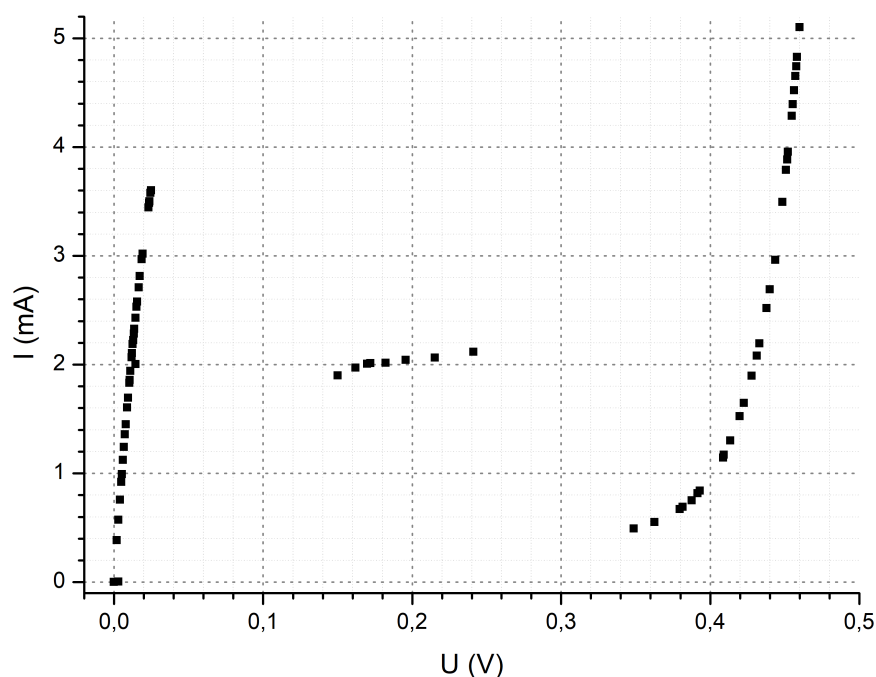


Рис. 7: Экспериментальная вольт-амперная характеристика исследуемого диода

Таблица 2: Генерация колебаний с помощью туннельного диода

Амплитуда, В	0.8	0.88	0.92	0.72	0.56	0.48
Период, мкс	6.5	6.0	5.5	6.0	6.0	6.0
Частота, МГц	0.154	0.167	0.182	0.167	0.167	0.167

## 6 Анализ результатов

1. Сравним значения параметров диода, полученные динамическим и статическим методами

Таблица 3: Сравнение результатов, полученных разными методами

	Динамический	Статический	Отличие, %	Германий
$U_p$ , В	$0.030 \pm 0.02$	$0.025 \pm 0.01$	16.7	0.1
$U_v$ , В	$0.280 \pm 0.02$	$0.349 \pm 0.01$	19.8	0.32
$U_f$ , В	$0.480 \pm 0.02$	$0.450 \pm 0.01$	6.3	0.6
$I_p$ , мА	$3.180 \pm 0.11$	$3.601 \pm 0.1$	11.7	2.5
$I_v$ , мА	$0.530 \pm 0.11$	$0.492 \pm 0.1$	7.2	0.5

Значения, полученные разными способами, различаются на 10-20%, но погрешность статического метода гораздо меньше. Эти значения схожи с параметрами, типичными для туннельного диода из германия.

2. Для туннельного диода из германия положение уровня Ферми составляет  $\xi \simeq \eta \simeq 7k_B T$ , нами в работе было получено значение положения уровня Ферми, равное примерно  $6k_B T$ .
3. Анализируя результаты, можно предположить, что исследуемый диод изготовлен из германия.

## 7 Вывод

В ходе работы был изучен принцип действия туннельного полупроводникового диода. Динамическим и статическим методами была исследована вольт-амперная характеристика диода, с её помощью определены основные параметры диода. Использование обоих методов дало примерно одинаковые результаты, различающиеся не более чем на 20% и аналогичные значениям параметров германиевого диода. Также в ходе работы были оценены положение уровня Ферми и максимума распределения электронов в зоне проводимости полупроводника. Значение положения уровня Ферми практически совпало с соответствующим значением для германиевого диода, приведённым в описании к работе. Наконец, был изучен генератор на основе туннельного диода. Генерация происходит в сверхвысоком диапазоне частот ( $\simeq 0.17$  МГц) с амплитудой от 0.5 до 0.9 В.