

Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 6.11.5  
(Общая физика: квантовая физика)

## **Туннелирование в полупроводниках**

Работу выполнил:  
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный  
2019 год

**Цель работы:** исследовать принцип действия туннельного диода, измерить его вольт-амперную характеристику и основные параметры.

## 1. Теоретическое введение

Туннельным диодом называется сильно легированный полупроводник, уровень Ферми которого лежит в разрешенной зоне и становятся возможны туннельные переходы электронов в области узкого ( $p - n$ )-перехода.

Будем считать, что все состояния, лежащие ниже уровня Ферми, заполнены электронами, а выше — свободны. Энергетические диаграммы идеального туннельного диода и его вольт-амперная характеристика показаны на рисунке 1.  $\mu_n$  и  $\mu_p$  обозначены уровни Ферми в  $n$ - и  $p$ -области соответственно;  $E_c$  и  $E_v$  — границы зоны проводимости и валентной зоны. В отсутствии внешнего поля уровни Ферми  $\mu_n$  и  $\mu_p$  лежат на одной горизонтали; число дырок и электронов, туннелирующих в обе стороны, одинаково, и ток отсутствует (рисунок 1.а). При приложении напряжения в прямом направлении уровень Ферми в  $n$ -области «ползет» вверх по отношению к уровню Ферми в  $p$ -области, электроны туннелируют налево, ток растет. Он достигает максимума в точке  $b$  вольт-амперной характеристики (рисунок 1.жс), соответствующей наибольшему совпадению занятой зоны в отрицательной области и свободной в положительной. При дальнейшем увеличении внешнего напряжения перекрытие занятых уровней в  $n$ -области и свободных в  $p$ -уменьшается, и ток падает до нуля: это иллюстрирует рисунок 1.в. Предельное положение соответствует энергетической диаграмме г. При дальнейшем увеличении напряжения ток, возникающий за счет туннелирующих электронов, остается равным нулю, а диффузионный ток возникает при совпадении занятых уровней  $n$ -области с свободными уровнями зоны проводимости (рисунок 1.д). На диаграмме 1.е показан ток в обратном направлении.

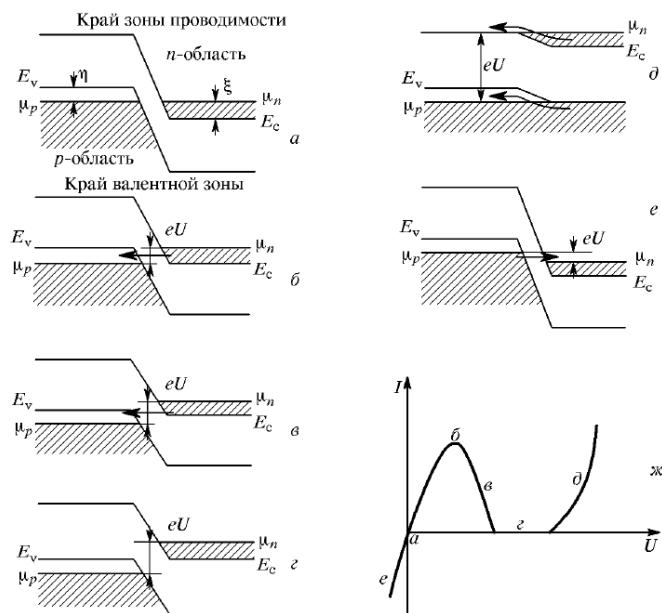


Рис. 1: Схема энергетических уровней и вольт-амперная характеристика идеального туннельного диода

Реальная вольт-амперная характеристика туннельного диода отличается от таковой для

идеального и представлена на рисунке 2. Она учитывает образование примесных зон и возможность их слияния с основными, что объясняет наличия ненулевого тока  $I_v$  в минимуме характеристики.

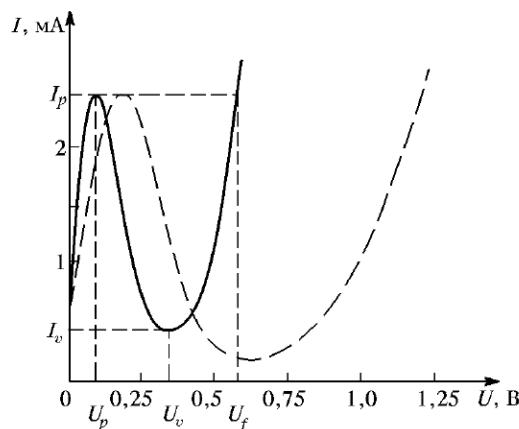


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика неидеальных туннельных диодов с меньшей (сплошная линия) и большей (пунктирная линия) шириной запрещенной зоны

Вольт-амперная характеристика реального туннельного диода (см. рисунок 2) описывается следующими значениями напряжения и тока.

Напряжению  $U_p$  соответствует максимум тока  $I_p$ , при котором смещение энергетических зон одинаково, причем это напряжение связано с расстоянием  $\xi$  между уровнем Ферми в  $n$ -области и зоной проводимости и энергией  $E_{n \text{ max}}$ , соответствующей максимуму плотности распределения электронов, следующим отношением:

$$U_p \approx \frac{\xi - E_{n \text{ max}}}{e}$$

В точке  $U_v$  ток минимален, и, как следует из описания выше:

$$U_v \approx \frac{(\mu_n - E_c) + (E_v - \mu_p)}{e} = \frac{\xi + \eta}{e} \approx \frac{2\xi}{e} \approx \frac{2\eta}{e}$$

Напряжение  $U_f$  характеризует раствор вольт-амперной характеристики и определяется шириной запрещенной зоны.

## 2. Изучение вольт-амперной характеристики диода с помощью осциллографа

Схема установки представлена на рисунке 3. На вход  $Y$  осциллографа подается напряжение, пропорциональное току через диод, а на вход  $X$  — падение напряжения на диоде.

Ток  $I$  через диод зависит от напряжения  $U$  на нем по следующей формуле:

$$I = U \frac{R_1 + 2(R_2 + R_3)}{(R_1 + 2R_2) \cdot R_3}$$

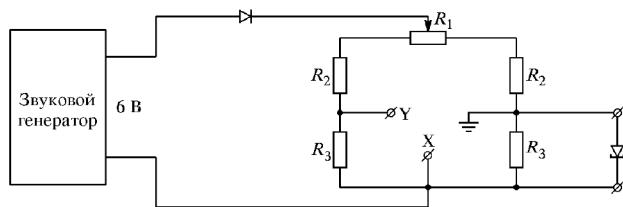


Рис. 3: Схема наблюдения вольт-амперной характеристики туннельного диода с помощью осциллографа

Здесь  $R_1, R_2, R_3$  — сопротивления соответствующих резисторов моста со схемы на рисунке 3.

Полученные осциллограммы для обычного и туннельного диода приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.

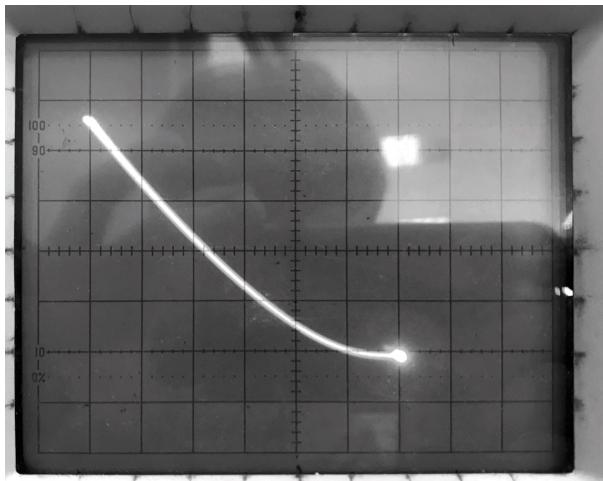


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика обычного полупроводникового диода на экране осциллографа

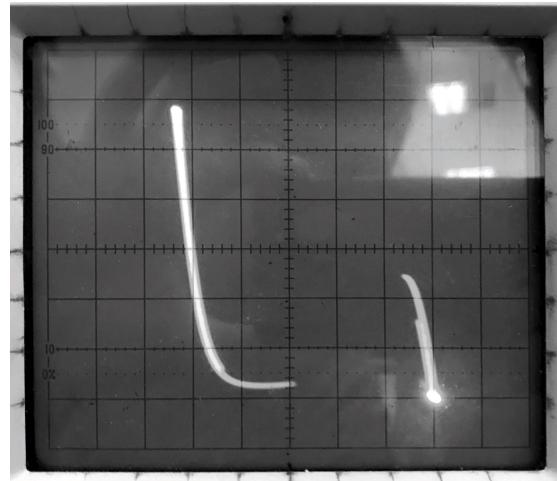


Рис. 5: Вольт-амперная характеристика туннельного полупроводникового диода на экране осциллографа

По осциллограмме для туннельного диода (см. рисунок 5) оценим искомые величины напряжений (начало вольт-амперной характеристики соответствует нулевому напряжению):

$$U_p \approx 0.07 \text{ В}$$

$$U_v \approx 0.4 \text{ В}$$

$$U_f \approx 0.5 \text{ В}$$

### 3. Получение статической характеристики туннельного диода

Схема, используемая для получения статической характеристики диода, приведена на рисунке 6. Ток измеряется миллиамперметром, включенным последовательно с диодом, а напряжение на диоде — цифровым вольтметром.

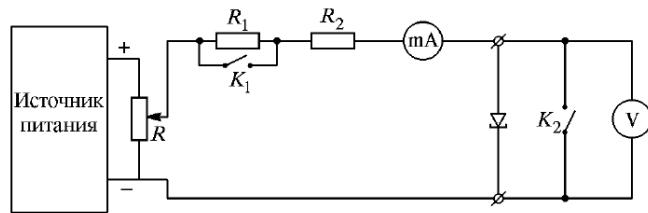
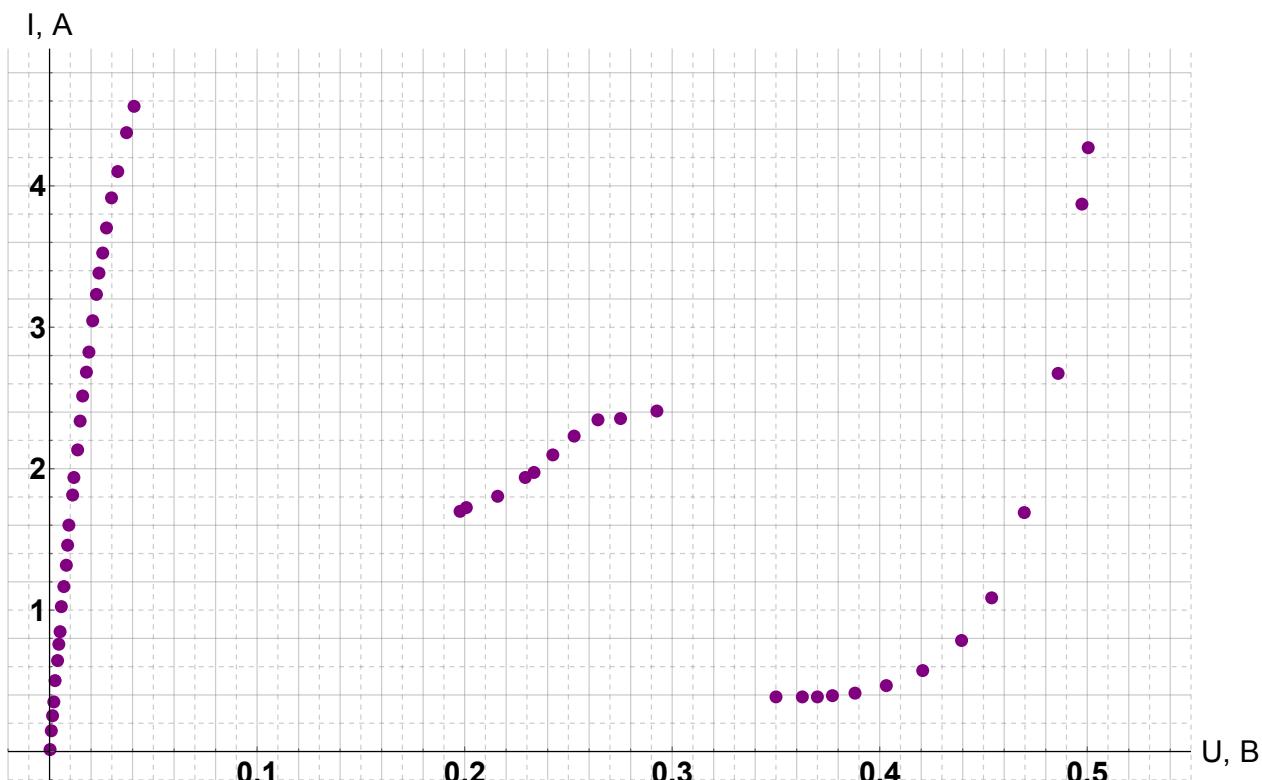


Рис. 6: Схема измерения параметров туннельного диода

Плавно меняя сопротивление резистора  $R$  и тем самым повышая напряжение на диоде, получим вольт-амперную характеристику туннельного диода  $I(U)$ . Измерения приведены в таблице. Погрешность величин напряжения  $U$  и тока  $I$  оценим двумя единицами последнего разряда. По данным в таблице 1 построим график зависимости  $I(U)$ . Он изображен на рисунке 7.

Рис. 7: Измерение вольт-амперной характеристики  $I(U)$  туннельного диода

Из графика определим искомые значения токов и напряжений:

- $U_p \approx 0,04$  В,  $I'_p \approx 4,6$  А
- $U_v \approx 0,39$  В,  $I_v \approx 0,4$  А
- $U_f \approx 0,51$  В

Примем  $E_v = 0$ . Тогда из выражения для  $U_v \approx 2\mu e$  можно найти энергию Ферми  $\mu_n \approx \mu_p$ :

$$\mu_n \approx \mu_p \approx eU_v/2 \approx 0,195 \text{ эВ}$$

Из выражения для напряжения  $U_p \approx (\mu_n - E_{n \max})/e$  получим энергию, соответствующую максимальной плотности распределения электронов  $E_{n \max}$ :

$$E_{n \max} = \mu_n - eU_p \approx 0,155 \text{ эВ}$$

## 4. Вывод

В работе исследован принцип действия туннельного диода; мы наблюдали его вольт-амперную характеристику на осциллографе и затем измерили ее непосредственно, снимая зависимость тока от напряжения.

По результатам измерений мы получили параметры диода, которые совпадают с грубой оценкой, полученной благодаря наблюдению на осциллографе.

Одной из задач LHC является поиск новых тяжелых (содержащих  $b$ - или  $c$ -кварки) адронов или их возбужденных состояний. Это может быть весьма полезным как для лучшего понимания природы сильного взаимодействия в теориях Стандартной Модели и квантовой хромодинамики, так и для поиска Новой Физики. Настоящий доклад посвящен вопросу обнаружения возбужденных состояний  $\Xi_b$  барионов. В работе сначала представлен краткий обзор состояния дел в секторе прелестных барионов и их возбуждений и проведены параллели с очарованными барионами. На основе статьи arXiv:0804.1575 приведены предсказания масс возбужденных состояний  $\Xi_b$  по аналогии с  $\Xi_c$ . Это дает мотивацию для самостоятельного поиска орбитального возбуждения  $\Xi_b^-$ , восстановливая его в канале с пионами. Представлены результаты начальных этапов работы — самостоятельный отбор кандидатов и восстановления основного состояния  $\Xi_b^-$  на данных CMS 2017 года. В дальнейшем предстоит набрать как можно большее число сигнальных событий  $\Xi_b^-$  для восстановления с одним пионом сначала уже наблюдаемого CMS и LHCb возбуждения  $(\Xi_b(5945)^0)$  и затем поисков орбитального возбуждения, добавляя еще один пион к  $\Xi_b(5945)^0$ .

В гибридной схеме Федоренко для участников с большим градиентом численного решения  $|\frac{\partial u}{\partial x}|$  используется схема первого порядка аппроксимации, а для участков гладкого решения с малым  $|\frac{\partial u}{\partial x}|$  — схема второго порядка. Гибридная схема, построенная выше для аппроксимации линейного уравнения переноса, уже нелинейная — коэффициенты переключения зависят от локальных свойств решения. Таким образом, в соответствие линейному дифференциальному оператору ставится нелинейный. Для таких схем не обязана выполняться теорема С.К.Годунова, и можно ожидать, что на пути введения нелинейности для гиперболических систем и уравнений можно построить монотонные или близкие к монотонным схемам высокого порядка аппроксимации.

Таблица 1: Результаты измерений

№	$U$ , В	$I$ , А	№	$U$ , В	$I$ , А
1	0.0001	0.01	27	0.0326	4.105
2	0.0009	0.145	28	0.0371	4.378
3	0.0015	0.255	29	0.0405	4.563
4	0.002	0.348	30	0.1978	1.7
5	0.0029	0.504	31	0.2011	1.724
6	0.0036	0.639	32	0.2161	1.808
7	0.0043	0.761	33	0.2295	1.934
8	0.0048	0.845	34	0.2332	1.975
9	0.0059	1.028	35	0.2425	2.095
10	0.0068	1.169	36	0.2528	2.233
11	0.0078	1.32	37	0.2645	2.347
12	0.0087	1.46	38	0.2749	2.352
13	0.0096	1.604	39	0.2928	2.405
14	0.011	1.817	40	0.3498	0.385
15	0.0119	1.94	41	0.3628	0.386
16	0.0133	2.135	42	0.3698	0.39
17	0.0148	2.333	43	0.377	0.397
18	0.0162	2.511	44	0.3881	0.416
19	0.0175	2.68	45	0.4034	0.464
20	0.0187	2.823	46	0.421	0.57
21	0.0207	3.042	47	0.4393	0.785
22	0.0225	3.231	48	0.4537	1.091
23	0.024	3.384	49	0.4699	1.692
24	0.0254	3.521	50	0.4858	2.672
25	0.0274	3.703	51	0.4974	3.871
26	0.03	3.912	52	0.5005	4.267