

Отчёт по лабораторной работе №6.11.5
Туннелирование в полупроводниках

Плюскова Н.А. Б04-004

17 сентября 2023 г.

1. Аннотация

В работе исследуется принцип действия туннельного диода, измеряется его вольт-амперная характеристики и основные параметры.

2. 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. μ_n и μ_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 μ_n и μ_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 б вольт-амперной характеристики (рисунок 1.ж), 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.

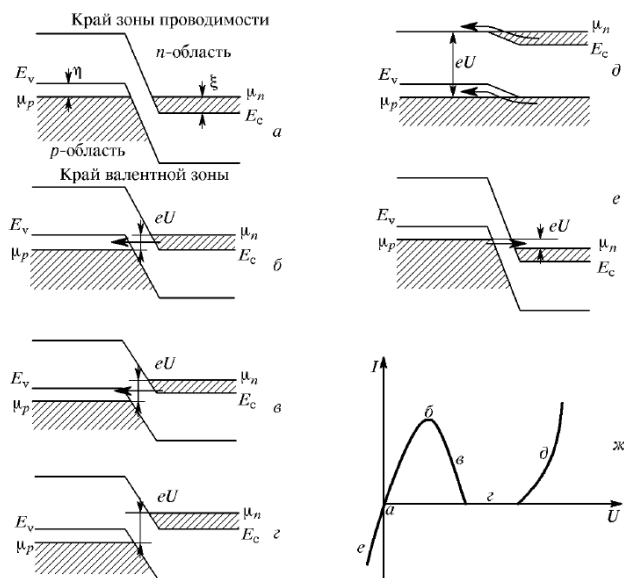


Рис. 1: Схема энергетических уровней и вольт-амперная характеристика идеального туннельного диода

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.

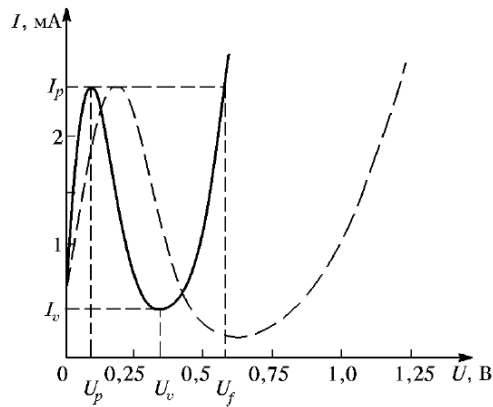


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика неидеальных туннельных диодов с меньшей (сплошная линия) и большей (пунктирная линия) шириной запрещенной зоны

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 ξ между уровнем Ферми в n -области и зоной проводимости и энергией $E_{n \max}$, соответствующей максимуму плотности распределения электронов, следующим отношением:

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

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 разворот вольт-амперной характеристики и определяется шириной запрещенной зоны.

3. Экспериментальная установка

Для изучения принципа действия туннельного диода и измерения его характеристик используется установка, изображенная на рис.3, рис.4, рис.5

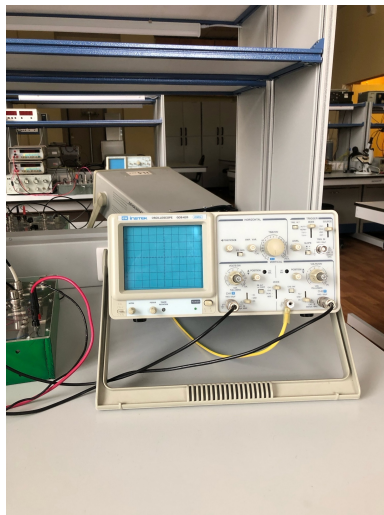


Рис. 3: Осциллограф

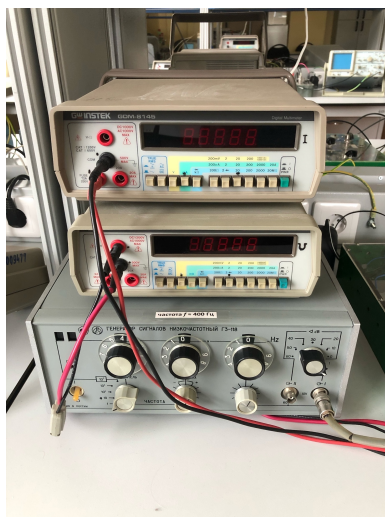


Рис. 4: Вольтметр и амперметр

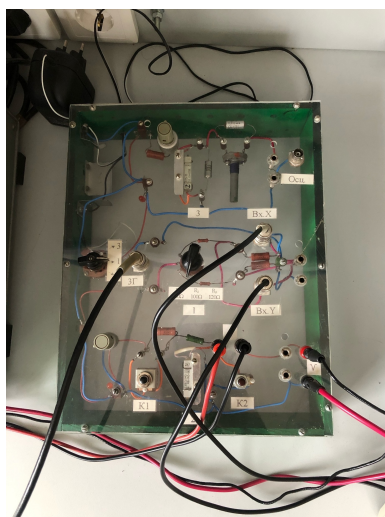


Рис. 5: Функциональная часть установки

4. Результаты эксперимента и обработка данных

4.1. Изучение ВАХ туннельного диода с помощью осциллографа

Схема установки представлена на рисунке 6. На вход Y осциллографа подается напряжение, пропорциональное току через диод, а на вход X — падение напряжения на диоде.

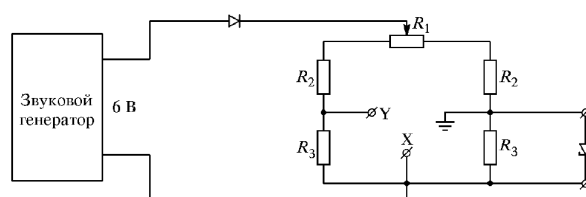


Рис. 6: Схема наблюдения вольт-амперной характеристики туннельного диода с помощью осциллографа

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

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

Здесь R_1 , R_2 , R_3 — сопротивления соответствующих резисторов моста со схемы на рисунке 6.

Полученная осциллограмма для туннельного диода приведена на рисунке 7.

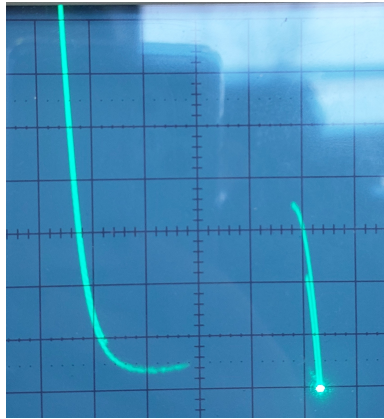


Рис. 7: Вольт-амперная характеристика туннельного полупроводникового диода на экране осциллографа

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

$$U_p \approx 0.05 \pm 0.01 \text{ В}$$

$$U_v \approx 0.33 \pm 0.01 \text{ В}$$

$$U_f \approx 0.455 \pm 0.01 \text{ В}$$

Получение статической характеристики туннельного диода

Схема, используемая для получения статической характеристики диода, приведена на рисунке 8. Ток измеряется миллиамперметром, включенным последовательно с диодом, а напряжение на диоде — цифровым вольтметром.

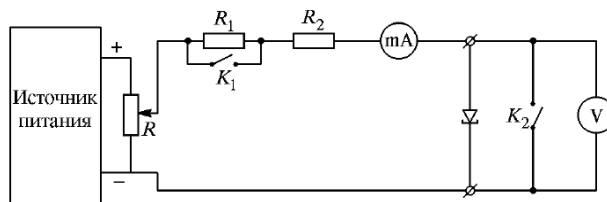


Рис. 8: Схема измерения параметров туннельного диода

Плавно меняя сопротивление резистора R и тем самым повышая напряжение на диоде, получим вольт-амперную характеристику туннельного диода $I(U)$. Погрешность величин напряжения U и тока I оценим двумя единицами последнего разряда. Построим график зависимости $I(U)$. Он изображен на рисунке 9.

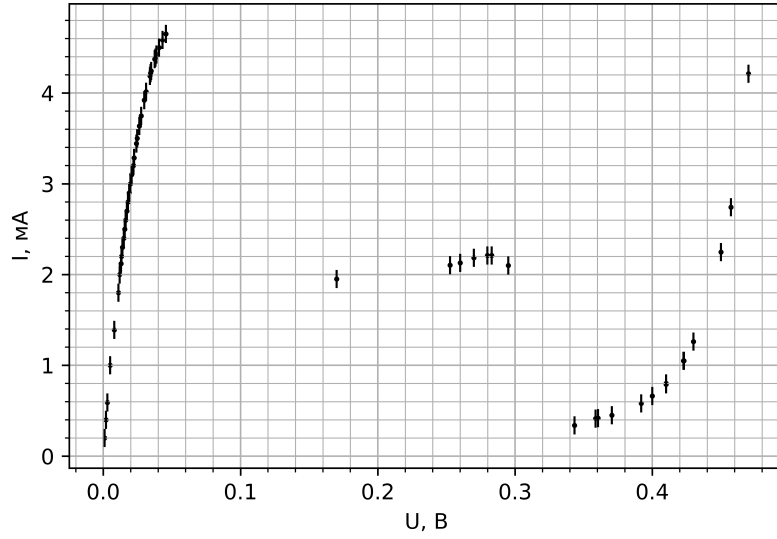


Рис. 9: Измерение вольт-амперной характеристики $I(U)$ туннельного диода

По графику определим искомые значения токов и напряжений:

- $U_p = 0.04 \pm 0.02$ В, $I_p = 4.63 \pm 0.02$ мА
- $U_v = 0.32 \pm 0.02$ В, $I_v = 3.57 \pm 0.02$ мА
- $U_f = 0.47 \pm 0.02$ В

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

$$\mu_n \approx \mu_p \approx eU_v/2 \approx 0.16 \text{ эВ}$$

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

$$E_{n \text{ max}} = \mu_n - eU_p \approx 0.12 \text{ эВ}$$

5. Вывод

В работе исследован принцип действия туннельного диода, а также получена вольт-амперная характеристика на осциллографе, затем измерена непосредственно, снимая зависимость тока от напряжения. По результатам измерений были получены параметры диода, которые в пределах погрешности совпадают с грубой оценкой, полученной благодаря наблюдению на осциллографе.

6. Приложение

I , мА	U , В
0.2	0.001
0.4	0.002
0.59	0.003
1	0.005
1.39	0.008
1.8	0.011
2	0.012
2.12	0.013
2.2	0.0133
2.3	0.014
2.4	0.015
2.5	0.0156
2.6	0.0163
2.7	0.0172
2.8	0.018
2.9	0.0189
3	0.0198
3.1	0.0207
3.2	0.022
3.285	0.0225
3.443	0.0241
3.5	0.0247
3.636	0.0263
3.748	0.0276
3.921	0.0299
4.014	0.0312
4.188	0.034
4.218	0.0345

I , мА	U , В
4.242	0.0349
4.372	0.0375
4.389	0.038
4.424	0.0387
4.5	0.0406
4.585	0.0432
4.65	0.0456
2.103	0.2526
2.128	0.26
2.185	0.27
2.210	0.2798
2.21	0.283
2.1	0.295
0.8	0.41
1.05	0.423
1.95	0.17
0.338	0.3433
0.413	0.3586
0.418	0.3604
0.45	0.3705
0.58	0.3919
0.662	0.4
0.79	0.41
1.049	0.4227
1.262	0.43
2.247	0.45
2.742	0.4573
4.212	0.47

Таблица 1: Результаты измерений ВАХ туннельного диода