

6.11.5 Туннельный диод.

Богатова Екатерина

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. 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 отсутствие 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.

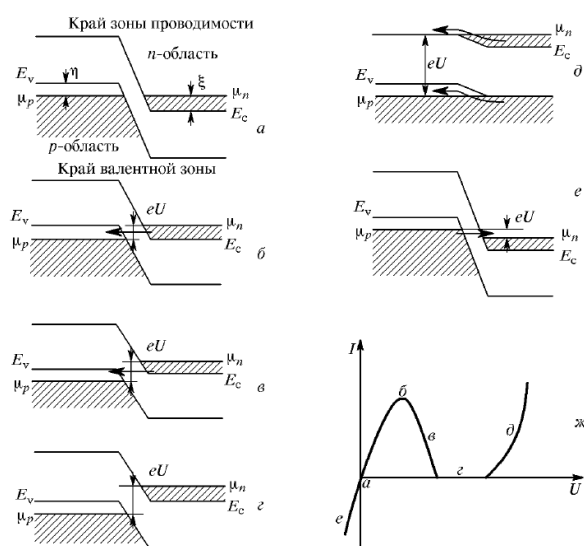


Рис. 1: Схема энергетических уровней и вольт-амперная характеристика идеального туннельного диода

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.

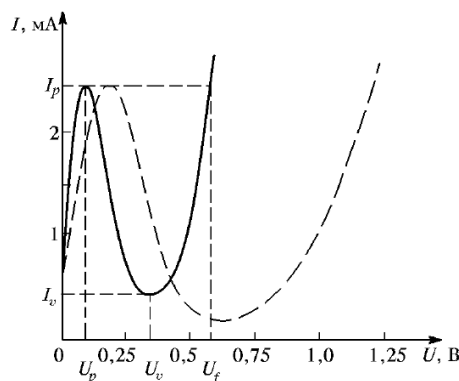


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика неидеальных туннельных диодов с меньшей (сплошная линия) и большей (пунктирная линия) шириной запрещенной зоны

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.

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:

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

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

Полученная осциллограмма для туннельного диода приведена на рисунке 4.

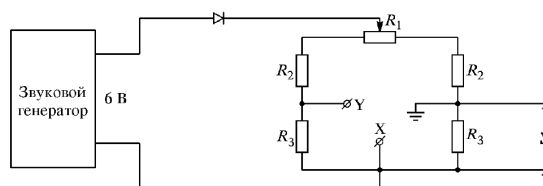


Рис. 3: Схема наблюдения вольт-амперной характеристики туннельного диода с помощью осциллографа

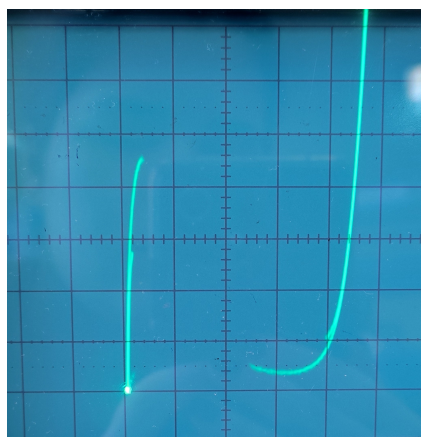


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика туннельного полупроводникового диода на экране осциллографа

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

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

$$U_v \approx 0.32 \pm 0.01 \text{ В}$$

$$U_f \approx 0.445 \pm 0.01 \text{ В}$$

3 Получение статической характеристики туннельного диода

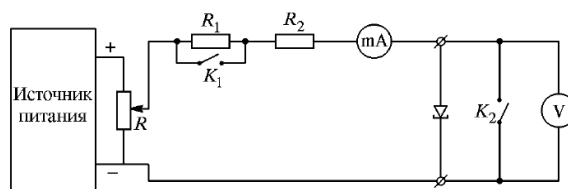


Рис. 5: Схема измерения параметров туннельного диода

Схема, используемая для получения статической характеристики диода, приведена на рисунке 5. Ток измеряется миллиамперметром, включенным последовательно с диодом, а напряжение на диоде — цифровым вольтметром.

Плавнo 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 6.

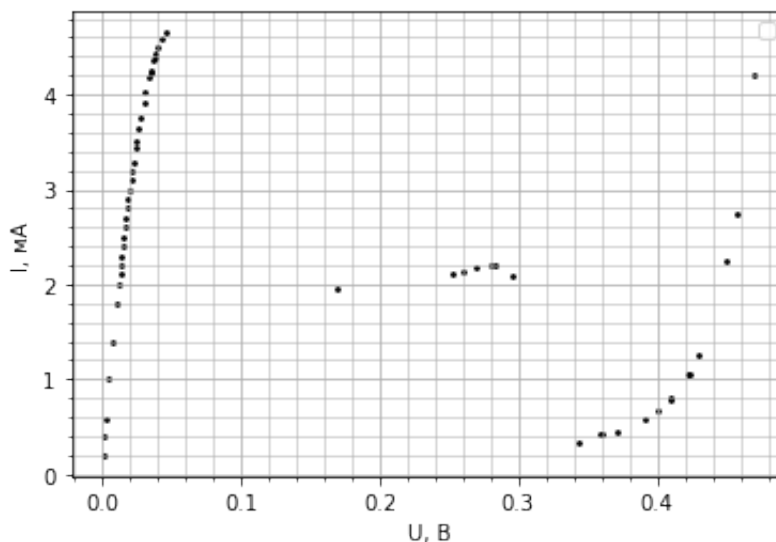


Рис. 6: Измерение вольт-амперной характеристики $I(U)$ туннельного диода

Из графика 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 $U_v \approx 2\mu_e$ 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 $U_p \approx (\mu_n - E_{n \max})/e$ получим энергию, соответствующую максимальной плотности распределения электронов $E_{n \max}$:

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

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.