

Tunnel diode 2024

YDS

2024-06-10

Введение

Туннельные диоды были открыты учёным Эсаки и используют эффект квантового туннелирования электронов через потенциальный барьер.

Этот эффект связан с волновой природой электронов, благодаря которой они могут попадать в классически запрещённые области.

Существует несколько видов туннельных диодов. Наиболее типичные сделаны на основе PN-переходов (рис. 1), но есть и другие (например, резонансно-туннельные диоды, диоды на основе свехрешёток и т.д.)

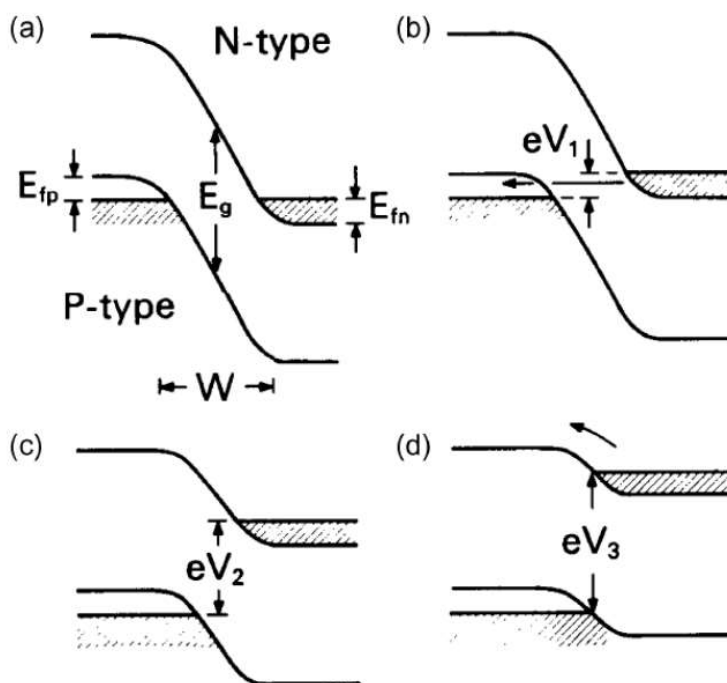


Рисунок 1. Схема туннельного диода Эсаки [1].

Туннельные диоды известны тем, что на их ВАХ наблюдается область отрицательного дифференциального сопротивления (отрицательной дифференциальной проводимости — ОДП). Дифференциальная проводимость определяется как:

$$\Omega_d = \frac{dI}{dV}$$

Обычная проводимость — отношение тока к напряжению — не может быть отрицательной, а дифференциальная может. При этом ток положительный, но начинает падать при росте напряжения. Это можно видеть на рис. 2.

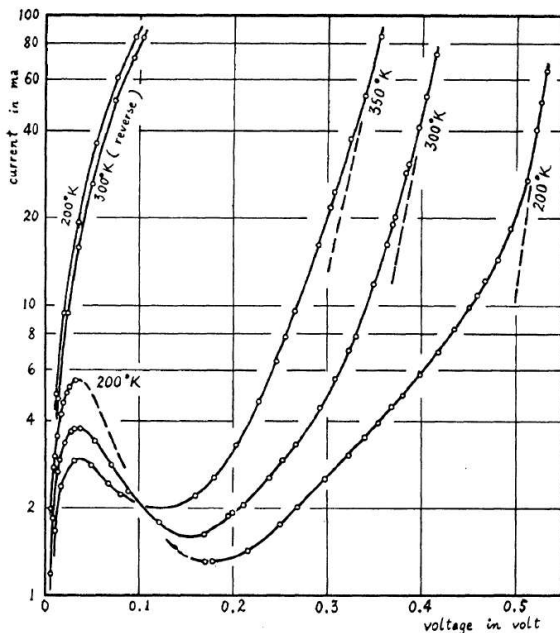


Рисунок 2. ВАХ туннельного диода [1].

Участок ОДП может быть использован для генераторов переменного тока (генераторов колебаний), потому что он позволяет компенсировать внутреннее сопротивление цепи и избежать затухания колебаний.

Обзор литературы

Ток через туннельный диод можно рассчитать по формуле Эсаки [2].

$$I(V) = \frac{em_e kT}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty T_c(E_\perp) \left[\ln \left(1 + \exp \frac{E_{Fn} + eV - E_\perp}{kT} \right) - \ln \left(1 + \exp \frac{E_{Fp} - E_\perp}{kT} \right) \right] dE_\perp$$

Где T_c — вероятность (коэффициент) прохождения электронов через барьер, E_\perp — кинетическая энергия электронов в направлении границы между Р и N областями, которая отсчитывается от дна зоны проводимости E_c .

Логарифмы описывают распределение электронов по энергиям в Р и N областях.

Для работы туннельного диода области N и Р должны быть сильно легированы, то там должно быть очень много примесей. Тогда при $V = 0$ уровни Ферми будут находится внутри зоны проводимости в N области и внутри валентной зоны в Р области, как изображено на рис. 3а.

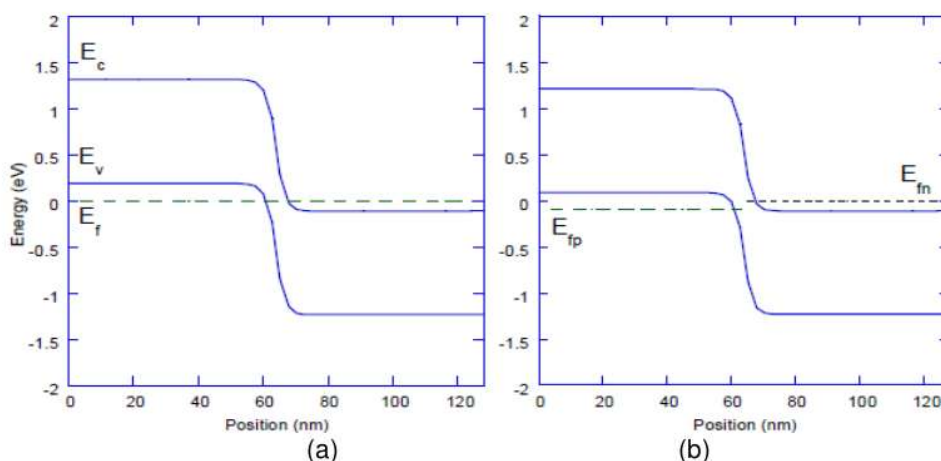


Рисунок 3. Зонная структура туннельного диода при а) $V = 0$ и б) $V > 0$ [3].

Вероятность прохождения барьера может быть рассчитана с помощью квантовой механики для барьеров любой формы. В данном случае барьер похож на треугольный (рис. 4), но можно его считать и прямоугольным. При повышении напряжения уровни Ферми будут смещаться друг относительно друга и барьер между Р и N областями будет уменьшаться (рис. 3б).

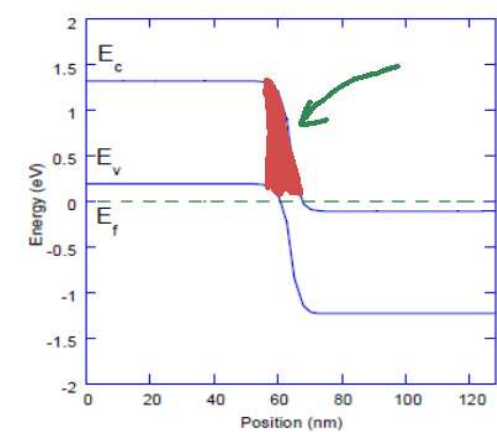


Рисунок 4. Энергетический барьер.

Самый простой вид имеет коэффициент прохождения для очень узкого барьера в виде дельта-функции:

$$U(x) = \alpha \delta(x), \quad \alpha = Ha \tag{2}$$

где H — высота барьера в единицах энергии (эВ), а a — ширина барьера (например, в нм).

Для неё вероятность прохождения имеет вид:

$$T_c(E) = \frac{E}{E + \frac{m_e \alpha^2}{2\hbar^2}} \tag{3}$$

Основные формулы

Константы

| Обозначение | Формула | Переменная | Значение | Единицы |
|-------------|------------------------------|-------------|----------|--------------------|
| k | k | k_boltzmann | 8.62e-5 | эВ·К ⁻¹ |
| q | $\frac{e}{\hbar}$ | e_h | 2.43e-4 | А·эВ ⁻¹ |
| K | $\frac{\hbar^2}{m_0}$ | h2_m0 | 0.0762 | эВ·нм ² |
| C | $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$ | e2_4pieps0 | 1.44 | эВ·нм |

Исходные параметры

| Величина | Обозначение | Переменная | Диапазон | Значение | Единицы |
|-------------------|---------------|-------------|------------|----------|------------------|
| Ширина запр. зоны | E_g | band_gap | 0.2 – 2 | 1.12 | эВ |
| Эфф. масса эл. | m_e | eff_mass_e | 0.01 – 1 | 0.19 | m_0 |
| Эфф. масса дыр. | m_h | eff_mass_h | 0.01 – 1 | 0.49 | m_0 |
| Диэлектр. прониц. | ε | dielectric | 1 – 15 | 11.7 | - |
| Температура | T | temperature | 4 – 400 | 300 | K |
| Конц. доноров | N_d | donor_conc | 1e-4 – 0.1 | 0.1 | нм ⁻³ |
| Конц. акцепторов | N_a | accept_conc | 1e-4 – 0.1 | 0.1 | нм ⁻³ |

Вторичные параметры

| Обозначение | Формула | Переменная | Единицы |
|----------------|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|
| N_c | $2 \cdot \left(\frac{m_e kT}{2\pi K} \right)^{3/2}$ | n_c | нм ⁻³ |
| N_v | $2 \cdot \left(\frac{m_h kT}{2\pi K} \right)^{3/2}$ | n_v | нм ⁻³ |
| $E_{Fn} - E_c$ | $kT \ln \left(\frac{N_d}{N_c} \right)$ | fermi_n | эВ |
| $E_{Fp} - E_v$ | $kT \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right)$ | fermi_p | эВ |
| $\Delta\Phi$ | $E_{Fn} - E_c - (E_{Fp} - E_v) + E_g$ | delta_phi | эВ |
| W^3 | $\frac{\pi C K kT}{m_e} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}$ | transmission_parameter | эВ ³ |
| A | $\frac{q m_e k^2 T^2}{2\pi^2 K}$ | richardson_constant | A·нм ⁻² |

Пояснение параметров

$$2 \cdot \left(\frac{m_e m_0 kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = 2 \cdot \left(\frac{m_e kT}{2\pi K} \right)^{3/2}$$
$$2 \cdot \left(\frac{m_h m_0 kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = 2 \cdot \left(\frac{m_h kT}{2\pi K} \right)^{3/2}$$

$$E_{Fn} - E_{Fp} = E_{Fn} - E_c - (E_{Fp} - E_v) + E_c - E_v = E_{Fn} - E_c - (E_{Fp} - E_v) + E_g$$

$$W^3 = \frac{e^2}{4\varepsilon_0\varepsilon} \frac{\hbar^2 kT}{m_e} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}$$

$$A = \frac{1}{2\pi^2} \frac{e}{\hbar} \frac{m_e k^2 T^2}{\hbar^2} = \frac{qm_e k^2 T^2}{2\pi^2 K}$$

Окончательные формулы

Общий ток

$$I(V) = I_1(V) + I_2(V)$$

Туннельный ток

$$I_1(V) = A \int_0^b \frac{u \ln(1 + w_0 e^{-u})}{u + (\Delta\Phi - eV)^3/W^3} du$$

Диодный ток

$$I_2(V) = A \cdot s_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Параметры

$$w_0 = \exp \frac{E_F - E_c}{kT}$$

$$s_0 = \exp \frac{E_F - E_c - \Delta\Phi}{kT}$$

Верхний предел интегрирования туннельного тока станет равным нулю для предельного значения напряжения, после которого туннелирование полностью прекратится. После этого надо учитывать только диодный ток.

$$b = \frac{\Delta\Phi - E_g - eV}{kT} > 0, \quad eV < \Delta\Phi - E_g$$

Литература

1. Leo Esaki. Long Journey into Tunneling. Science, 22 March 1974, Volume 183, Number 4130.
2. N. Moulin, Mohamed Amara, F. Mandorlo, M. Lemiti. Tunnel junction I (V) characteristics: Review and a new model for p-n homojunctions. Journal of Applied Physics, 2019, 126 (3), pp.033105. 10.1063/1.5104314. hal-03035269
3. Messaadi Lotfi and Dibi Zohir. A Spice Behavioral Model of Tunnel Diode: Simulation and Application. International Journal of Control and Automation Vol. 9, No. 4 (2016), pp. 39-50
<http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2016.9.4.05> (<http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2016.9.4.05>)
4. D. Mtn, M. PATIL, J. CHEN. Solid-State Electronics Vol. 32, No. 11, pp. 1025-1031, 1989