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.)

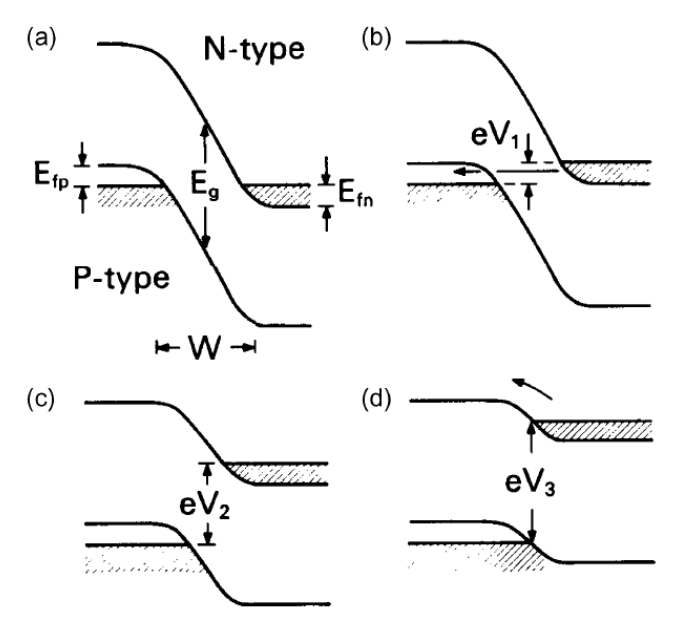


Рисунок 1. Схема туннельного диода Эсаки [1].

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

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.

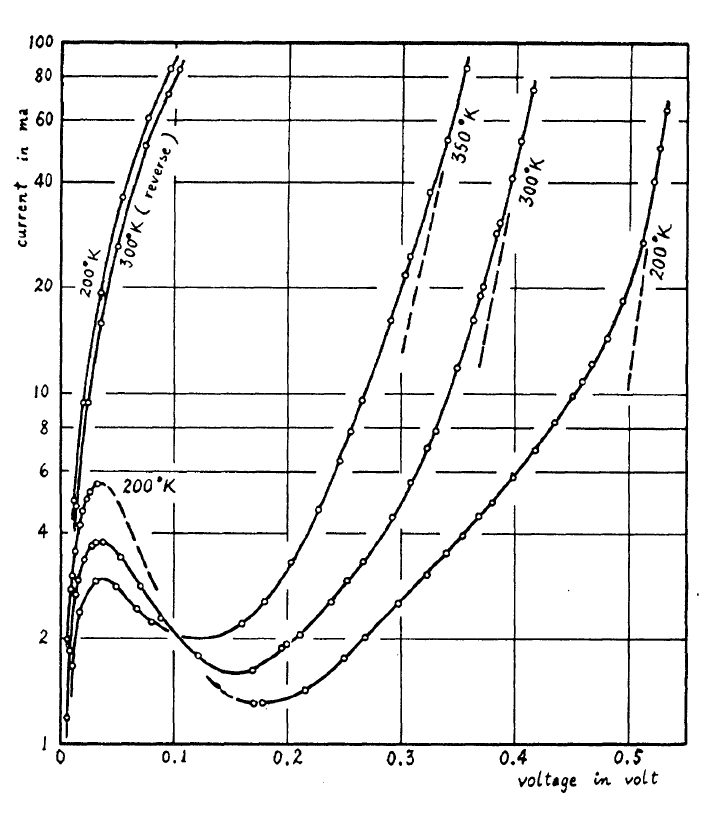


Рисунок 2. ВАХ туннельного диода [1].

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].

Где — вероятность (коэффициент) прохождения электронов через барьер, — кинетическая энергия электронов в направлении границы между P и N областями, которая отсчитывается от дна зоны проводимости .

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

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

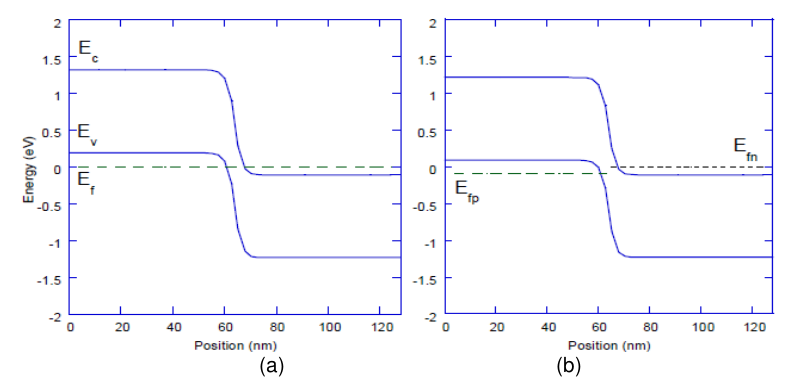


Рисунок 3. Зонная структура туннельного диода при а) и b) [3].

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 P и N областями будет уменьшаться (рис. 3b).

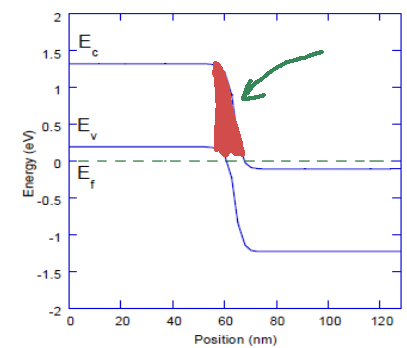


Рисунок 4. Энергетический барьер.

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

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

Для неё вероятность прохождения имеет вид:

# Основные формулы

## Константы

| Обозначение | Формула | Переменная | Значение | Единицы |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | k\_boltzmann | 8.62e-5 | эВK |
|  |  | e\_h | 2.43e-4 | АэВ |
|  |  | h2\_m0 | 0.0762 | эВнм |
|  |  | e2\_4pieps0 | 1.44 | эВнм |

## Исходные параметры

| Величина | Обозначение | Переменная | Диапазон | Значение | Единицы |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ширина запр. зоны |  | band\_gap | 0.2 – 2 | 1.12 | эВ |
| Эфф. масса эл. |  | eff\_mass\_e | 0.01 – 1 | 0.19 |  |
| Эфф. масса дыр. |  | eff\_mass\_h | 0.01 – 1 | 0.49 |  |
| Диэлектр. прониц. |  | dielectric\_eps | 1 – 15 | 11.7 | - |
| Температура |  | temperature | 4 – 400 | 300 | К |
| Конц. доноров |  | donor\_conc | 1e-4 – 0.1 | 0.1 | нм |
| Конц. акцепторов |  | accept\_conc | 1e-4 – 0.1 | 0.1 | нм |
| Минимальное напряжение |  | voltage\_min | -2 – 0 | -0.5 | В |
| Максимальное напряжение |  | voltage\_max | 0 – 5 | 2 | В |

Примечание: т.к. напряжение указываетс в волтах, а энергия — в электрон-вольтах, везде где в формулах присутствует можно использовать просто , на заряд электрона умножать не нужно.

## Вторичные параметры

| Обозначение | Формула | Переменная | Единицы |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | n\_c | нм |
|  |  | n\_v | нм |
|  |  | fermi\_n | эВ |
|  |  | fermi\_p | эВ |
|  |  | delta\_phi | эВ |
|  |  | transmission\_parameter | эВ |
|  |  | richardson\_constant | Aнм |
|  |  | w\_0 | - |
|  |  | s\_0 | - |

### Пояснение параметров

## Окончательные формулы

### Общий ток

### Туннельный ток

### Диодный ток

### Предел интегрирования

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

Для численного интегрирования удобнее заменить переменную следующим образом:

Тогда верхний предел интегрирования станет равен 1, и интеграл пример вид:

Теперь можно использовать методы численного интегрирования, к примеру квадратуры Гаусса-Лежандра или квадратуры Гаусса-Кронрода.

# 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>
4. D. Mtn, M. PATIL, J. CHEN. Solid-State ElectronicsVol. 32, No. 1I, pp. 1025-1031, 1989