

Лекция 8

Тема Лекции:

Характеристики идеального диода на основе p n перехода

к.ф.-м.н., PhD, ассоциированный профессор
Тулегенова Аида Тулегенкызы

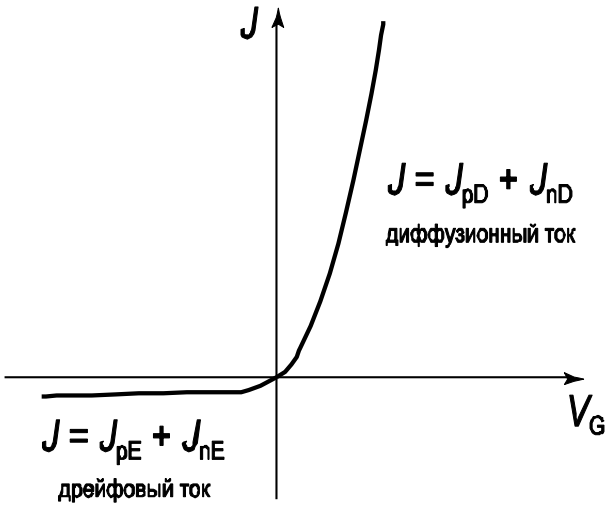
Цель лекции:

Рассмотреть основные физические процессы, определяющие вольтамперные характеристики идеального p–n перехода, вывести уравнение тока диода, обсудить прямое и обратное смещение, а также отклонения реальных диодов от идеализированной модели.

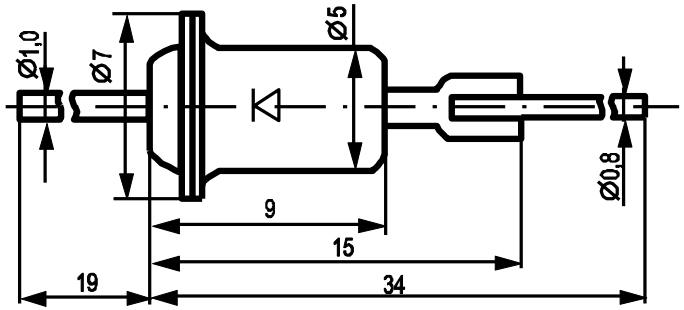
Основные вопросы:

1. Понятие идеального диода.
2. Физические процессы в p–n переходе
3. Уравнение тока идеального диода.
4. Прямое и обратное смещение диода.
5. Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеального диода.
6. Температурная зависимость характеристик

Основу *выпрямительного диода* составляет обычный электронно-дырочный переход. В прямом смещении ток диода инжекционный, большой по величине и представляет собой диффузионную компоненту тока основных носителей. При обратном смещении ток диода маленький по величине и представляет собой дрейфовую компоненту тока неосновных носителей. В состоянии равновесия суммарный ток, обусловленный *диффузионными и дрейфовыми токами электронов* и дырок, равен нулю.



а

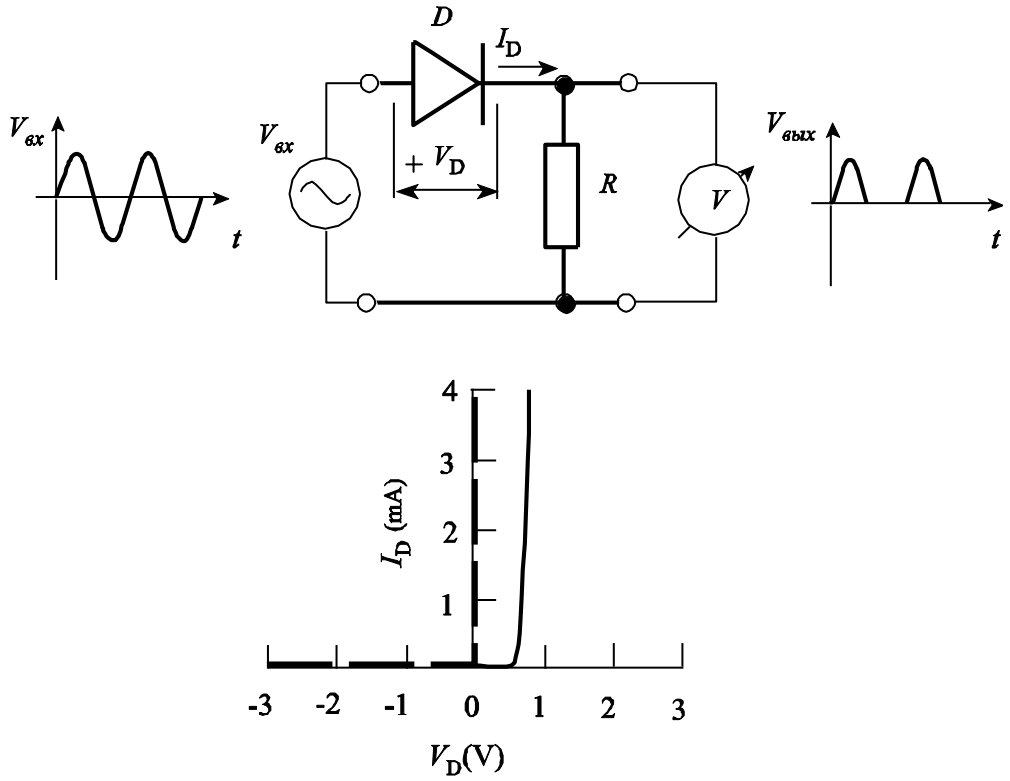


б

***а*) вольт-амперная характеристика;**
***б*) конструкция корпуса**

Выпрямление в диоде

Одним из главных свойств полупроводникового диода на основе p-n перехода является резкая асимметрия вольт-амперной характеристики: высокая проводимость при прямом смещении и низкая при обратном. Это свойство диода используется в выпрямительных диодах.



Схема, иллюстрирующая выпрямление переменного тока с помощью диода

Характеристическое сопротивление

Различают два вида характеристического сопротивления диодов: дифференциальное сопротивление r_D и сопротивление по постоянному току R_D.

Дифференциальное сопротивление определяется как

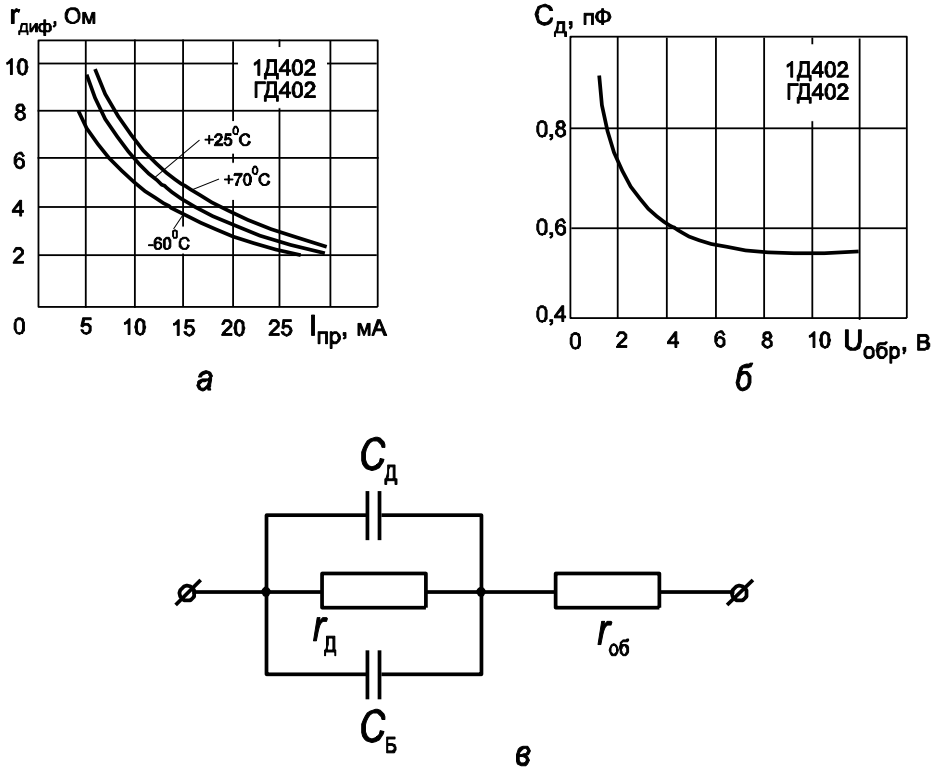
$$r_D = \frac{dU}{dI} = \left[\frac{dI}{dU}\right]^{-1} = \beta j_s e^{\beta V} + j_s - j_s = \left[\beta(I + I_s)\right]^{-1} = \frac{kT/q}{I + I_s}$$

Сопротивление по постоянному току R_D определяется как отношение приложенного напряжения V_G к протекающему току I через диод:

$$R_D = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_0(e^{\beta U} - 1)}$$

Эквивалентная схема диода

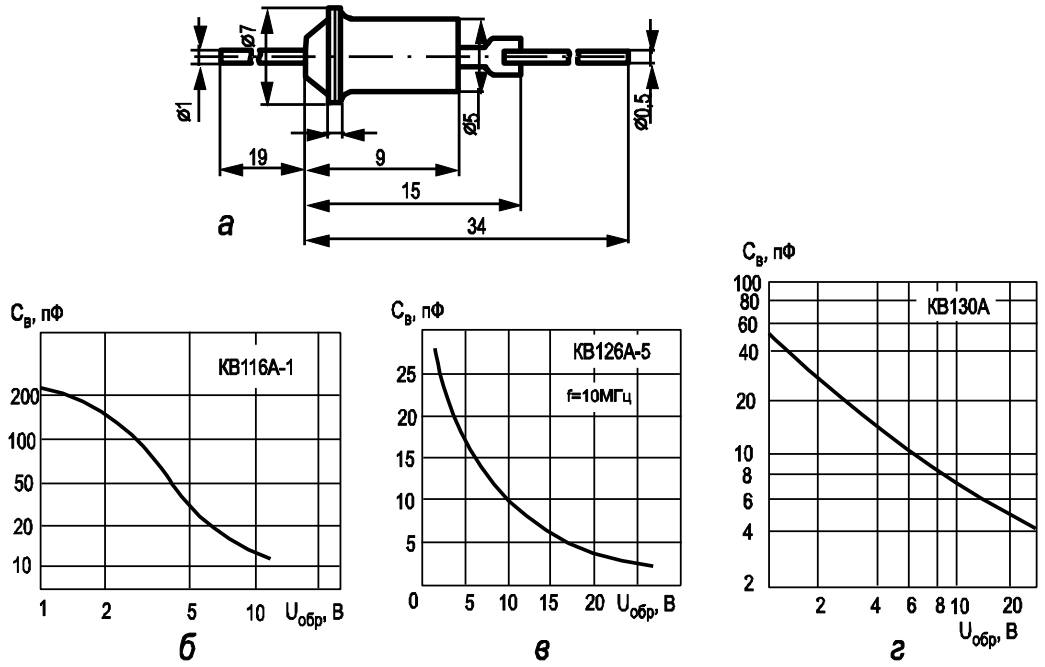
Сопротивление квазинейтрального объема эмиттера можно не учитывать, поскольку в диодах эмиттер обычно легирован существенно более сильно, чем база



Приборные характеристики и эквивалентная малосигнальная схема для выпрямительных диодов

Варикапы

Зависимость барьерной емкости $C_Б$ от приложенного обратного напряжения V_G используется для приборной реализации. Полупроводниковый диод, реализующий эту зависимость, называется *варикапом*. Максимальное значение емкости варикап имеет при нулевом напряжении V_G. При увеличении обратного смещения емкость варикапа уменьшается. Функциональная зависимость емкости варикапа от напряжения определяется профилем легирования базы варикапа. В случае однородного легирования емкость обратно пропорциональна корню из приложенного напряжения V_G



Конструкция варикапа (*а*) и зависимость емкости варикапа от напряжения для различных варикапов (*б* – КВ116А, *в* – КВ126А, *г* – КВ130А)

Зависимость генерационного **тока $J_{ген}$** от **напряжения V_G** будет определяться зависимостью ширины области **пространственного заряда W** от напряжения V_G. Поскольку ширина области пространственного заряда W определяется как

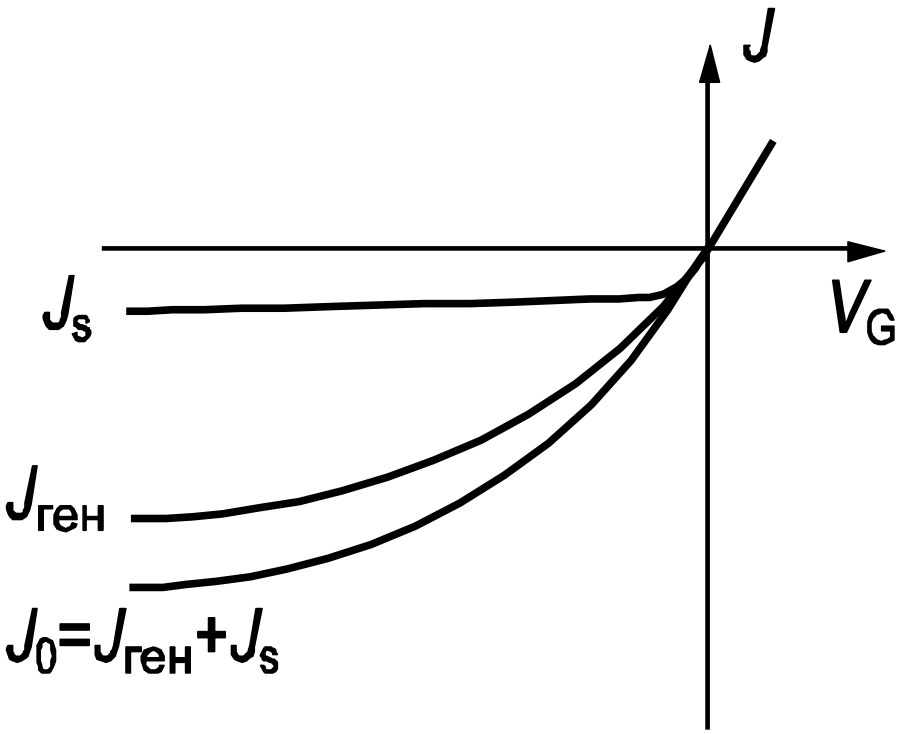
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0(U_{îáð} + \varphi_0)}{qN_D}}$$

то **генерационный ток $J_{ген}$** будет пропорционален корню из напряжения

$$J_{ãåí} \sim \sqrt{V_G}$$

Сделаем оценку отношения теплового J_0 и генерационного $J_{ген}$ токов для диодов, изготовленных из различных полупроводников:

$$\frac{J_{ãåí}}{J_0} = \frac{W}{L_n}\frac{N_D}{n_i}$$



Вклад генерационного тока $J_{ген}$ в обратный ток *p-n* перехода

Выводы лекции:

Идеальный диод описывается моделью Шокли. В ней предполагается:

-резкий p–n переход;

-низкий уровень инжекции;

-отсутствие генерации и рекомбинации в области пространственного заряда;

-ток определяется диффузией неосновных носителей в квазинейтральных областях.

При прямом смещении барьер понижается и происходит инжекция носителей. При обратном смещении барьер повышается, и через переход течёт лишь малый ток насыщения, создаваемый неосновными носителями. Ток идеального диода описывается уравнением $\mathbf{I = I_0 \cdot [\exp(qU/kT) - 1]}$. Поэтому ВАХ резко несимметрична: прямая ветвь растёт экспоненциально, обратная ветвь выходит на насыщение ($-I_0$).

Ток насыщения пропорционален $n_i^2 \propto \exp(-Eg/kT)$, поэтому он сильно растёт с температурой: у кремния он примерно удваивается при нагреве на каждые 10 °C. Прямое напряжение при заданном токе с ростом температуры уменьшается, примерно на 2 мВ/К. Реальные диоды отклоняются от идеальной модели из-за ряда эффектов:

-генерационно-рекомбинационного тока в области пространственного заряда (коэффициент идеальности n = 1–2);

-последовательного сопротивления базы;

-высокого уровня инжекции;

-поверхностных утечек;

-пробоя при большом обратном напряжении (лавинного или туннельного).

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что понимается под идеальным диодом?
2. Как формируется p–n переход и область пространственного заряда?
3. Выведите уравнение тока идеального диода (закон Шокли).
4. Как изменяется барьерная высота при прямом и обратном смещении?
5. Объясните физический смысл тока насыщения.
6. Нарисуйте типичную вольтамперную характеристику идеального диода.
7. Какие факторы вызывают отклонения реальных диодов от идеальных?

Список литературных источников:

1.Соколова Т. Н. Физика конденсированного состояния. — М.: Лань, 2020.
2.Китаев В. П. Физика твёрдого тела. — М.: Физматлит, 2021.
3.Капустин А. П. Кристаллография, минералогия и физика твёрдого тела. — М.: МИСиС, 2020.
4.Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2022.
5.Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. Solid State Physics. — Cengage, 2019.