

Лекция 8

Тема Лекции:
Влияние температуры на характеристики диодов

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

Цель лекции:

Изучить, как изменение температуры влияет на физические процессы в p–n переходе, определить зависимость вольтамперных характеристик (ВАХ) диода от температуры, рассмотреть основные температурные коэффициенты и механизмы деградации параметров диодов при нагревании.

Основные вопросы:

1. Физические основы температурной зависимости характеристик p–n перехода.
2. Температурная зависимость тока насыщения.
3. Обратные токи и пробой при повышенных температурах.
4. Температурная зависимость сопротивления и ёмкости p–n перехода
5. Температурная компенсация и практические применения.

Как уже отмечалось, при 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. Зависимость тока от напряжения определяется соотношением:

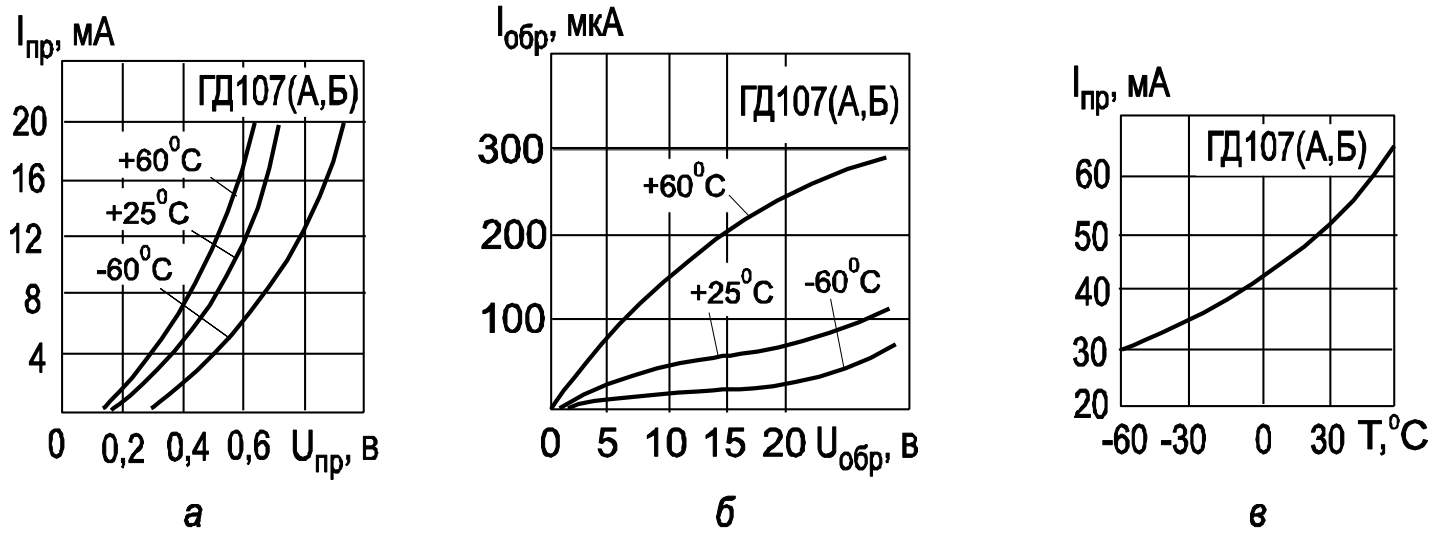
$$J = J_{\mathrm{s}}\left(e^{\beta V_{\mathrm{G}}} - 1\right)$$

Для несимметричного *p*-n^+ перехода $N_{\mathrm{A}} << N_{\mathrm{D}}$ концентрация неосновных носителей в *p*-области существенно выше, чем в *n*-области $n_{\mathrm{p0}} >> p_{\mathrm{n0}}$. Обратный ток в этом случае обусловлен дрейфовой электронной компонентой

$$n_{\mathrm{p0}} = \frac{n_i^2}{n_{\mathrm{n0}}} \sim e^{-\frac{E_{\mathrm{g}}}{kT}}$$

$$n_i = \sqrt{N_{\mathrm{C}} N_{\mathrm{V}}}\, e^{-\frac{E_{\mathrm{g}}}{2kT}}$$

Вольт-амперные характеристики диода ГД107



Вольт-амперные характеристики диода ГД107

***а*) при прямом смещении;**

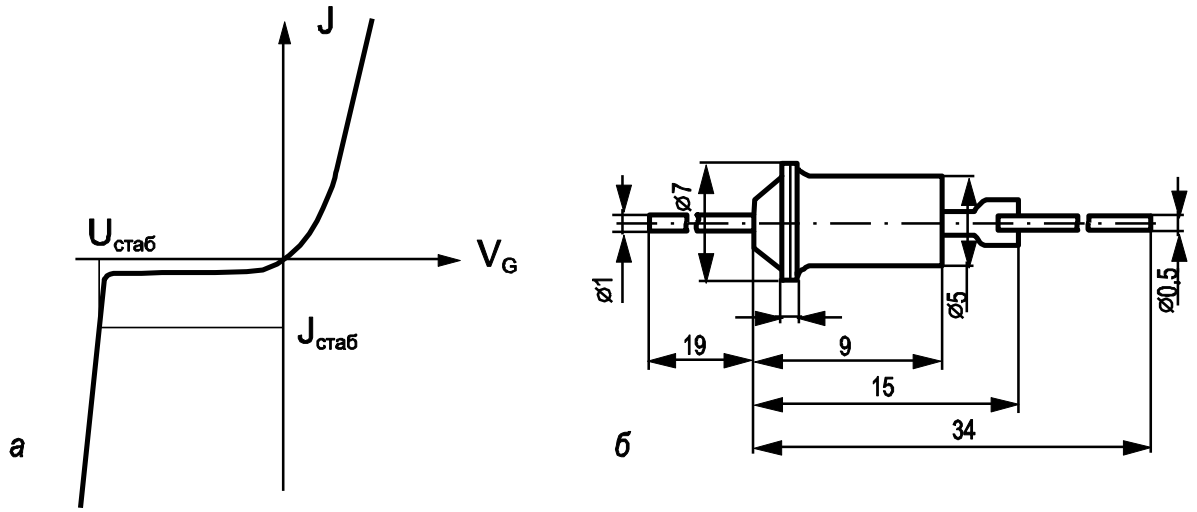
***б*) при обратном смещении;**

***в*) температурная зависимость прямого тока диода**

Стабилитроны

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого имеет область резкой зависимости тока от напряжения на обратном участке вольт-амперной характеристики.

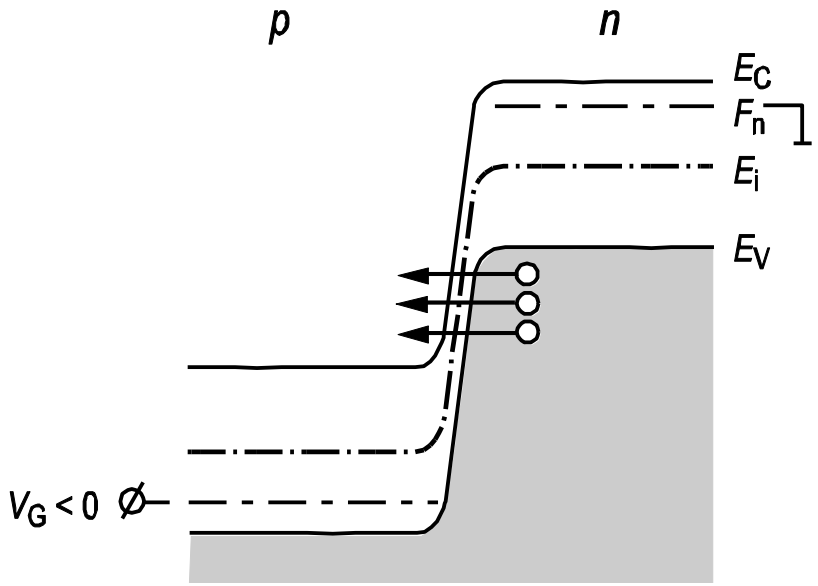
ВАХ стабилитрона имеет вид, представленный на рисунке



Вольт-амперная характеристика (*а*) и конструкция корпуса (*б*) стабилитрона

Туннельный пробой в полупроводниках

Рассмотрим зонную диаграмму диода с *p-n* переходом при обратном смещении при условии, что области эмиттера и базы диода легированы достаточно сильно

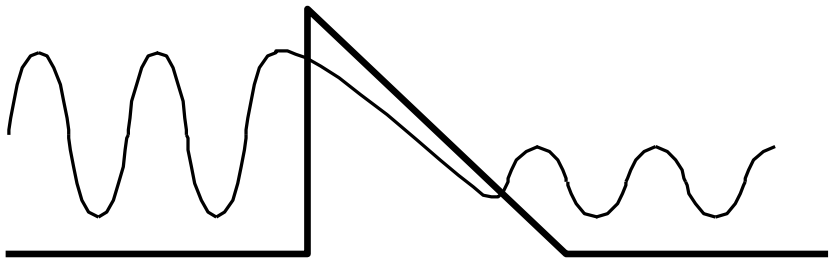


Зонная диаграмма диода на базе сильнолегированного *p-n* перехода при обратном смещении

Туннельный пробой в полупроводниках

Квантово-механическое рассмотрение туннельных переходов для электронов показывает, что в том случае, когда геометрическая ширина потенциального барьера сравнима с дебройлевской длиной волны электрона, возможны туннельные переходы электронов между заполненными и свободными состояниями, отделенными потенциальным барьером.

Форма потенциального барьера обусловлена полем *p-n* перехода. На рисунке схематически изображен волновой пакет при туннелировании через потенциальный барьер треугольной формы.



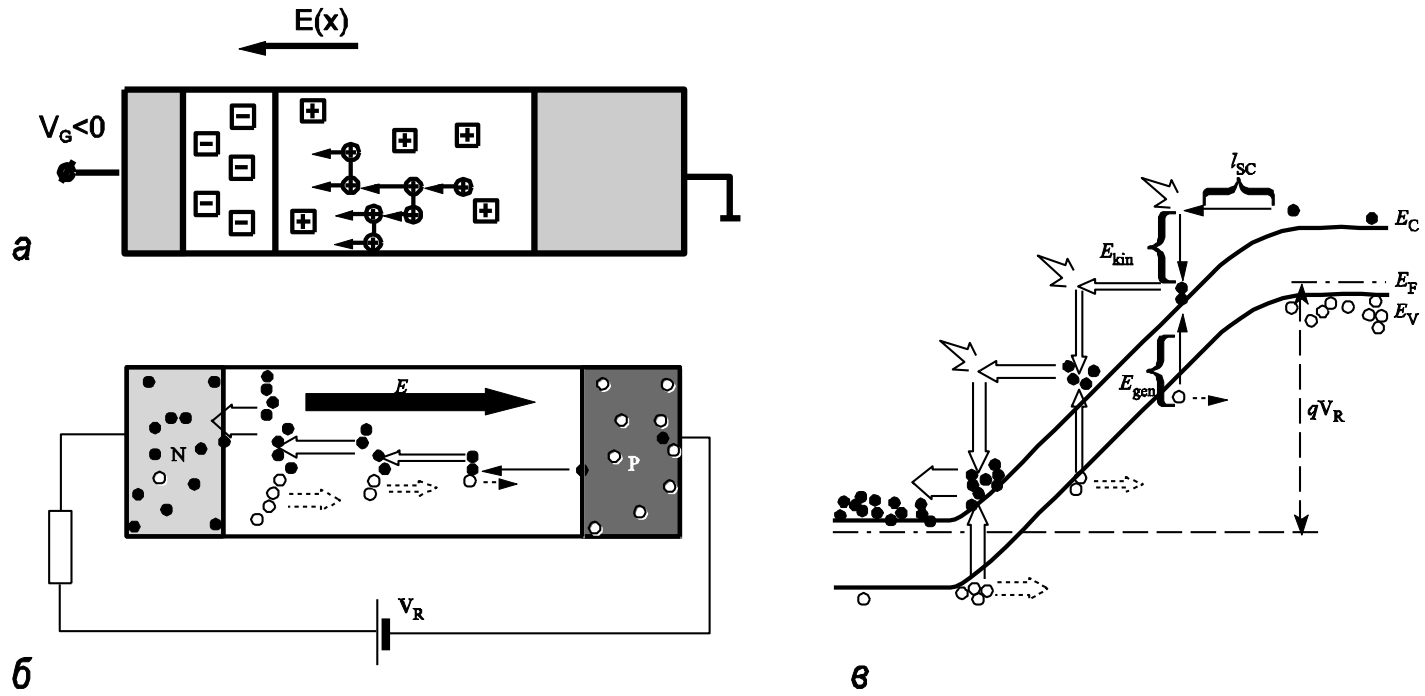
Схематическое изображение туннелирования волнового пакета через потенциальный барьер

Лавинный пробой в полупроводниках

Рассмотрим случай однородного электрического поля в полупроводнике. Если, двигаясь вдоль силовых линий электрического поля электрон на расстоянии, равном **длине свободного пробега *λ*,** наберет энергию, равную либо большую, чем ширина запрещенной зоны, то, неупруго рассеиваясь, этот электрон может вызвать генерацию еще одной электронно-дырочной пары. *Дополнительно нагенерированные свободные носители также будут участвовать в аналогичном процессе. Это явление лавинного размножения свободных носителей в условиях сильного электрического поля получило название лавинного пробоя.*

Размеры геометрической области полупроводника *W*, в которой происходит лавинное умножение, должны быть существенно больше длины свободного пробега электрона *λ*. Соотношения, определяющие условие лавинного пробоя, будут следующие:

$$q\lambda E_{\text{їð}} \geq E_g; \quad W >> \lambda$$



Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в однородном полупроводнике

а) распределение электрического поля, доноров и акцепторов и свободных носителей;

б) распределение токов;

в) зонная диаграмма, иллюстрирующая лавинное умножение в ОПЗ

Выводы лекции:

Температурная зависимость характеристик p–n перехода определяется ростом концентрации собственных носителей $n_i^2 \propto \exp(-Eg/kT)$, сужением запрещённой зоны при нагреве и изменением подвижности носителей. Поэтому ток насыщения резко растёт с температурой: у кремния он примерно удваивается на каждые 8–10 °C, у германия — на каждые 10 °C.

Обратный ток реальных диодов складывается из диффузионной и генерационной составляющих, причём у кремния при умеренных температурах преобладает генерационный ток ($I \propto n_i$, удвоение на каждые 10 °C), а при нагреве всё больший вклад даёт диффузионный. Напряжение пробоя также зависит от температуры, и по знаку этой зависимости можно различить механизм пробоя: при лавинном пробое напряжение с нагревом растёт (рассеяние на фононах усиливается), при туннельном (зенеровском) — уменьшается.

Прямое напряжение при заданном токе падает примерно на 2 мВ/К, что используется в полупроводниковых датчиках температуры и в схемах на основе ширины запрещённой зоны (bandgap reference). Дифференциальное сопротивление перехода **rd = kT/qI** прямо пропорционально температуре, барьерная ёмкость слабо зависит от неё через контактную разность потенциалов, а диффузионная ёмкость растёт вместе с током.

Главная практическая опасность — тепловой разгон: нагрев увеличивает ток, ток усиливает выделение тепла, и процесс может стать лавинообразным. Поэтому в схемах применяют температурную компенсацию (термисторы, согласованные пары диодов и транзисторов, токовые зеркала) и **обеспечивают отвод тепла.**

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Как изменение температуры влияет на концентрацию носителей в полупроводнике?
2. Почему с ростом температуры увеличивается ток насыщения?
3. Как изменяется форма ВАХ диода при нагревании?
4. Что такое температурный коэффициент прямого напряжения?
5. Как температура влияет на обратный ток и область пробоя?
6. Объясните причины теплового пробоя и термической нестабильности диодов.
7. Какие меры применяются для термостабилизации характеристик диодов?
8. В каких приборах используется температурная зависимость ВАХ диодов?

Список литературных источников:

1. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
2. Трифонов Е. Н. Электронные процессы в твёрдых телах. — М.: Наука, 2015.
3. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007.
4. Pierret, R. F. Semiconductor Device Fundamentals. — Addison-Wesley, 1996.
5. Streetman, B. G., Banerjee, S. Solid State Electronic Devices. — Prentice Hall, 2016.
6. Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2018.
7. Millman, J., Halkias, C. Electronic Devices and Circuits. — McGraw-Hill, 2010.