

## Введение.

Лектор — Крылов Игорь Ратмирович, комната Б101 физического факультета СПбГУ.

Интернет страница: [igor-krylov.ru](http://igor-krylov.ru)

Электронная почта: [igor-krylov@yandex.ru](mailto:igor-krylov@yandex.ru)

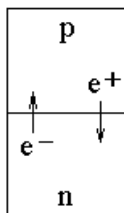
Литература.

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир. 1984.

## Полупроводниковый диод. Дифференциальное сопротивление.

Рассмотрим, что происходит при соприкосновении полупроводника n-типа и полупроводника p-типа.

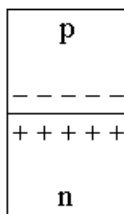
Электроны диффундируют через контакт двух полупроводников из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа. Дырки диффундируют во встречном направлении из p в n полупроводник.



Электроны в чужом для них полупроводнике p-типа называют неосновными носителями тока, как и дырки в полупроводнике n-типа. Неосновные носители тока в чужом для них полупроводнике встречаются с основными носителями и рекомбинируют. При рекомбинации пропадает один электрон и одна дырка. Освободившаяся энергия излучается в виде кванта света, поэтому каждый диод одновременно является светодиодом только обычно в инфракрасной области.

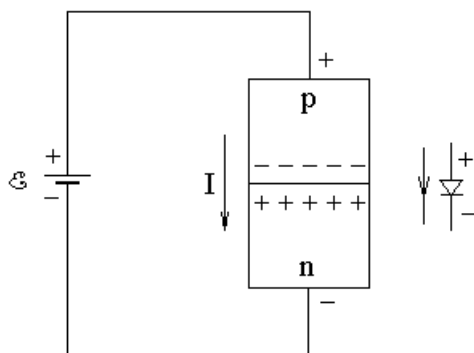
При диффузии в чужой полупроводник носители тока переносят через границу заряд. Электроны и дырки диффундируют навстречу друг другу, но силы тока при этом направлены в одну сторону и складываются.

В результате рекомбинации в области контакта уменьшается концентрация носителей тока и появляется слой, обедненный носителями.



Рекомбинируя в чужом полупроводнике, неосновные носители оставляют перенесенный через контакт заряд. В области контакта появляется двойной электрический слой, похожий на заряженный конденсатор. Как и на конденсаторе, на двойном слое происходит падение напряжения. Это

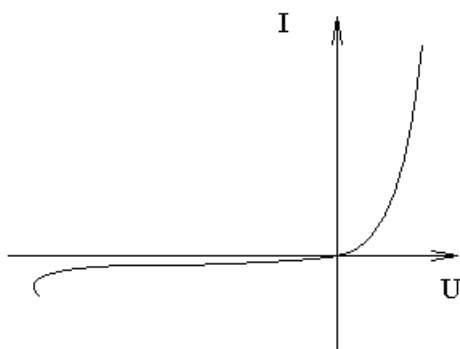
напряжение возрастает до тех пор, пока оно не останавливает диффузию оставшихся носителей тока через контакт.



Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое уменьшает контактное напряжение, то диффузия носителей тока возобновляется. Через контакт течет ток.

Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое увеличивает запирающее контактное напряжение, то тока нет.

То есть контакт двух полупроводников представляет собой диод. Он пропускает электрический ток в одну сторону и не пропускает в другую.



Отпирающее напряжение  $U > 0$  называют напряжением в прямом направлении, оно вызывает ток, который хорошо подчиняется формуле:

$$I(U) = I_0 \cdot \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $I_0$  зависит от температуры  $T$ , коэффициент  $e$  в показателе экспоненты — модуль заряда электрона,  $k$  — постоянная Больцмана.

$$\frac{kT}{e} \approx 25 \text{ мВ.}$$

При увеличении отпирающего напряжения на 25 мВ ток через диод возрастает в  $e$  раз.

Для анализа работы схем с транзисторами нам понадобится понятие динамического сопротивления  $R_{\text{дифф}} = \frac{dU}{dI}$ . Если пренебречь единицей в правой части формулы (1), то дифференциальное сопротивление в Омах диода

в прямом направлении равно отношению 25 мВ и силы тока через диод в миллиамперах. Например, если ток через диод равен 1 мА, то дифференциальное сопротивление диода равно  $\frac{25\text{ мВ}}{1\text{ мА}} = 25\text{ Ом}$ . Если ток через

диод равен 5 мА, то дифференциальное сопротивление  $\frac{25\text{ мВ}}{5\text{ мА}} = 5\text{ Ом}$ . Эта

простая формула для величины дифференциального сопротивления диода в прямом направлении нам понадобится в дальнейшем для анализа работы транзисторных схем.

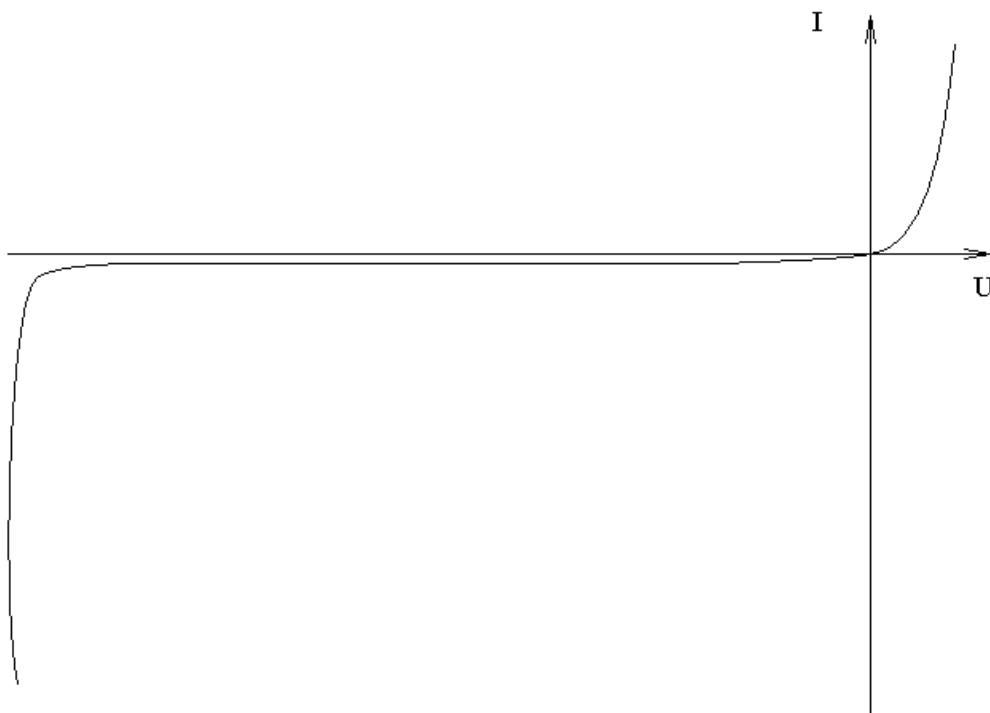
Заметим, что при постоянном токе через диод  $I = \text{const}$  величина  $I_0$  зависит от температуры так, что  $U(T) \sim \frac{1}{T}$ .

Характерное напряжение отпираия для кремниевых диодов 0.6 Вольт, для германиевых диодов — 0.3 Вольта.

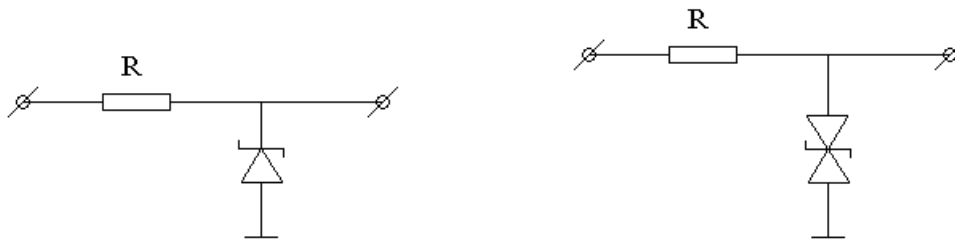
При большом запирающем напряжении происходит электрический пробой диода и, как правило, его тепловое разрушение.

### Стабилитрон.

Стабилитрон — это диод, предназначенный для стабилизации напряжения. На диод подается через резистор запирающее напряжение, которое превышает напряжение пробоя диода.



При этом через диод протекает ток, и избыток напряжения падает на резисторе. Стабилитрон как бы перераспределяет ток резистора  $R$  через стабилитрон и полезную нагрузку, которая на рисунке не изображена.



На правом рисунке стабилитрон состоит из двух диодов включенных последовательно навстречу друг другу. Такой стабилитрон одинаково ограничивает напряжение обеих полярностей.

Стабилитрон стабилизирует напряжение не идеально. При небольших колебаниях напряжения на входе схемы  $\Delta U_{вх}$  колебание напряжения на выходе схемы  $\Delta U_{вых}$  зависит от дифференциального сопротивления стабилитрона

$$R_{дифф} = \frac{dU}{dI}.$$

$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{вх} \frac{R_{дифф}}{R + R_{дифф}}$$

При большом обратном токе дифференциальное сопротивление диода может стать даже отрицательным, но при таких токах наступает тепловое разрушение диода.

### **Однополупериодное и двухполупериодное выпрямление. Трансформатор.**

Схема однополупериодного выпрямления синусоидального или импульсного сигнала:

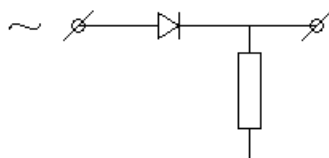


Схема двухполупериодного выпрямления:

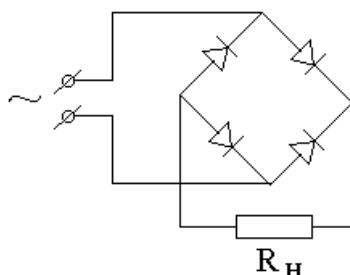
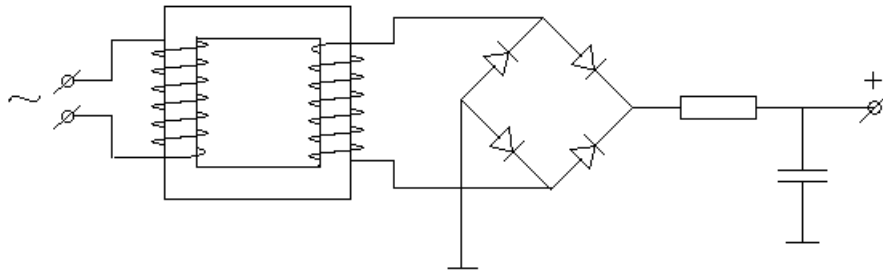
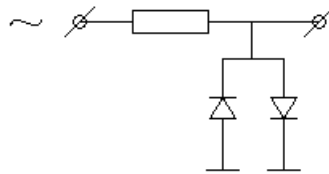


Схема двухполупериодного выпрямления со сглаживанием:



Напряжение на каждой обмотке трансформатора пропорционально числу витков в обмотке.

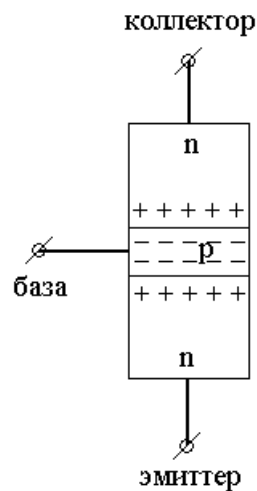
### Двусторонний ограничитель на диодах.



### Биполярный полупроводниковый транзистор.

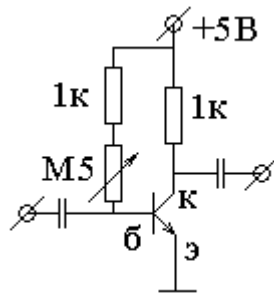
Биполярные транзисторы бывают n-p-n типа и p-n-p типа. n-p-n транзисторы имеют лучшие характеристики, поэтому чаще используются.

Рассмотрим n-p-n транзистор.



Транзистор — это два диода, которые включены последовательно навстречу друг другу, но включены так, что средний слой полупроводника p-типа очень тонкий. Толщина слоя гораздо меньше его ширины.

Два крайних полупроводника n-типа называются эмиттер (испускатель электронов) и коллектор (собиратель электронов). Средний полупроводник — база или управляющий электрод.



Рассмотрим типичную схему включения транзистора. Пусть эмиттер соединен с общим проводом схемы. На коллектор подадим положительное напряжение, например +5 Вольт, через небольшое (1 кОм) сопротивление. На базу относительно общего провода подадим небольшое положительное напряжение, для этого соединим базу с тем же источником напряжения, что и коллектор, но через заметно большее сопротивление (порядка 0.1 МОм). Буквы 'к' и 'М' в обозначении сопротивлений имеют смысл приставок "кило" и "мега" и одновременно имеют смысл десятичной запятой.

Напряжение между коллектором и базой запирает верхний р-п переход. Напряжение база – эмиттер отпирает нижний диод.

База — очень узкий слой полупроводника, поэтому большинство электронов по дороге от эмиттера на базовый электрод в своем случайном диффузном движении иногда близко подходят к контакту между базой и коллектором.

Переход база – коллектор заперт приложенным напряжением для основных носителей тока, но электроны из эмиттера на базе являются неосновными носителями, и для них напряжение база – коллектор не только не препятствует переходу через контакт, но и, наоборот, втягивает в верхний р-п переход.

В результате ток коллектора в десятки, а то и сотни раз, превышает ток базы. Это и есть усиление транзистора по току.

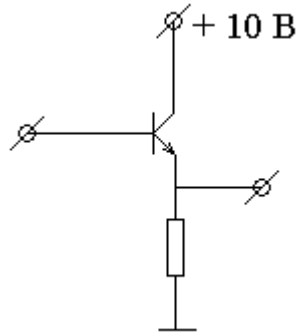
Величину сопротивления в цепи базы обычно подбирают так, чтобы половина напряжения источника питания падала на сопротивлении в цепи коллектора, а другая половина — между коллектором и эмиттером.

Недорогой и достаточно универсальный (дежурный) биполярный транзистор российского или советского производства — КТ3102. Цена одного транзистора в розничной продаже в несколько раз меньше цены разового проезда в метро.

### Эмиттерный повторитель.

Предположим, что источник полезного сигнала имеет большое внутреннее сопротивление по сравнению с сопротивлением нагрузки. Если нагрузку подключить к такому источнику, то почти все напряжение полезного сигнала выделится на внутреннем сопротивлении источника. Чтобы избежать потери большей части сигнала хотелось бы усилить ток источника сигнала, а не напряжение.

Этой цели соответствует эмиттерный повторитель. Здесь ток в нагрузке (эмиттерный ток транзистора) больше тока источника сигнала (ток базы транзистора) в  $(1 + \beta)$  раз, где  $\beta$  — коэффициент усиления транзистора по току (табличная величина, своя для каждого типа транзисторов). По этой причине эмиттерный повторитель называют еще усилителем тока.



Изменение напряжения на эмиттере повторяет изменение напряжения на базе транзистора, так как напряжение на базе больше на 0.6 Вольта, на напряжение открытого диода база-эмиттер.

Можно сказать, что эмиттерный повторитель согласует нагрузку с источником сигнала в том смысле, что с точки зрения источника сигнала величина сопротивления нагрузки увеличивается в  $(1 + \beta)$  раз, а с точки зрения нагрузки величина внутреннего сопротивления источника сигнала уменьшается в  $(1 + \beta)$  раз. Эмиттерный повторитель делает сопротивление нагрузки как бы больше внутреннего сопротивления источника сигнала, так чтобы большая часть полезного сигнала падала на сопротивлении нагрузки, а не на внутреннем сопротивлении источника сигнала.