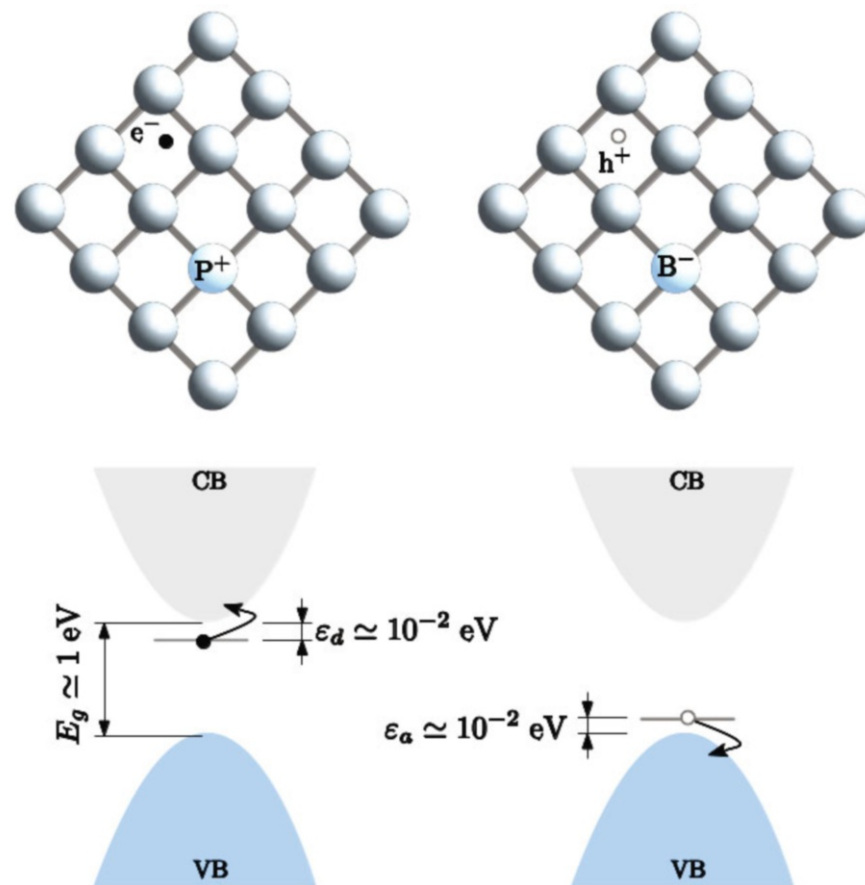




Полупроводниковые устройства

Лекция 11
2019 г.

Примесные полупроводники

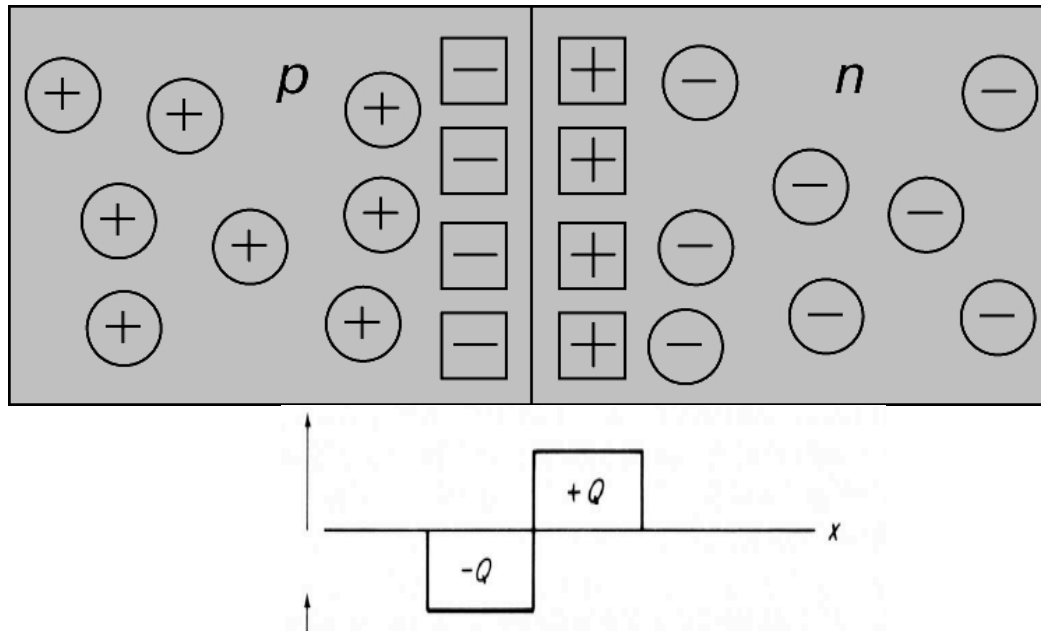


Получение *p-n* перехода

1. Получить ***p-n* переход** простым соприкосновением полупроводников *p*- и *n*-типа практически не возможно из-за качества поверхности.
2. Можно получить методом сплавления. На кристалл германия *n*-типа кладут кусочек индия. Расплавляют при 500-600 °С. После охлаждения на поверхности германия *n*-типа образуется германий, насыщенный индием с проводимостью *p*-типа.
3. Диффузионный метод получения. Диффузия из газообразной, жидкой или твердой фазы.
4. Эпитаксиальный метод. Метод заключается в осаждении на пластину кремния (например, пластину кремния *n*-типа) за счет химических реакций пленки кремния *p*-типа.
5. CVD-метод – метод осаждения из плазмы.
6. Метод ионного легирования – легирование пучком ионов.

Равновесное состояние р-п перехода

- Для n -области основными носителями заряда являются электроны, для p -области – дырки.



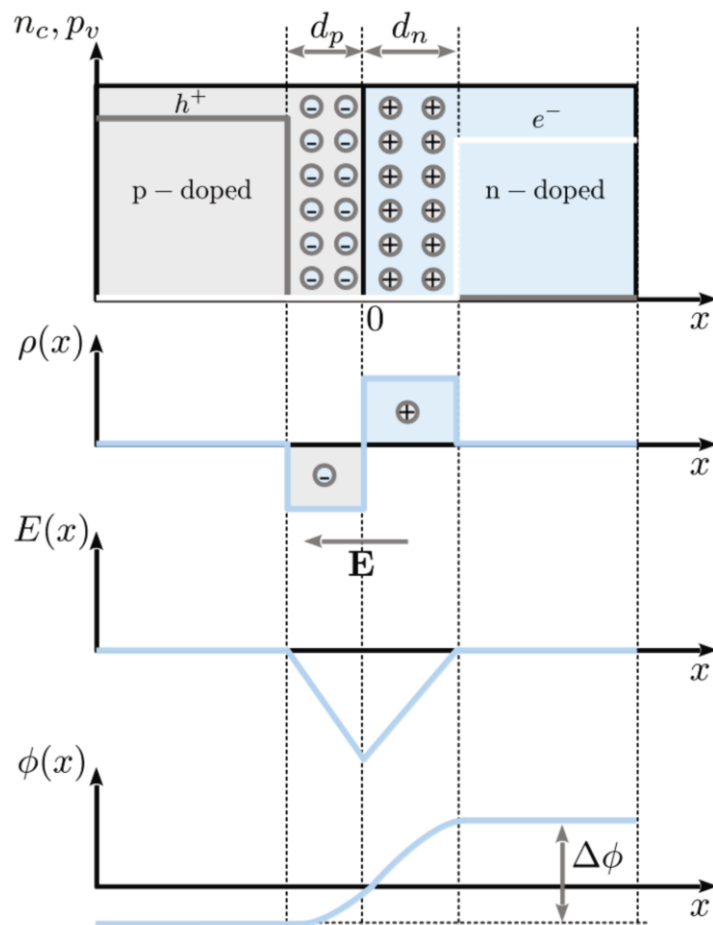
Сразу возникает запирающий *двойной электрический* слой.

Упрощенная модель p - n перехода

- Основные носители возникают почти исключительно путем ионизации примесей. При не слишком низких температурах примеси практически полностью ионизированы, поэтому концентрация основных носителей заряда (n_n или p_p) приблизительно равна концентрации примесных атомов:

$$n_n = N_d \qquad p_p = N_a$$

- Неосновные носители будем обозначать следующим образом: концентрацию дырок в n -области как p_n , концентрацию электронов в p -области как n_p .



Математическое описание

- То же самое можно описать математически:

$$N_d(x) = \begin{cases} N_d & \text{for } x > 0 \\ 0 & \text{for } x < 0 \end{cases}$$

$$N_a(x) = \begin{cases} N_a & \text{for } x < 0 \\ 0 & \text{for } x > 0 \end{cases},$$

Диффузионные и дрейфовые потоки

- В рабочем диапазоне температур $p_p \gg n_p$ и $n_n \gg p_n$.

Диффузионные потоки: ΔP_p – поток дырок из p -слоя, ΔN_n – поток электронов из n -слоя.

Дрейфовые потоки: ΔN_p – поток электронов из p -слоя, ΔP_n – поток дырок из n -слоя, $\Delta \phi_0$ – контактная разность потенциалов на p – n -переходе.

3. Рассмотрим несимметричный p – n -переход, при котором концентрация акцепторов N_a и концентрация доноров N_d неодинаковы. Такой переход обычно формируют в полупроводниковых диодах. Например, пусть $N_a = 100 \dots 1000 N_d$. Тогда при активации примеси $P_p \gg N_n$. Низкоомный p -слой, содержащий много основных носителей тока, называют эмиттером (Э), а более высокоомный n -слой называют базой (Б).

Закон действующих масс и концентрации носителей тока

- Из закона действующих масс следует, что $p_p n_p = n_n p_n$
- Поскольку мы приняли, что $p_p \gg n_n$, то

$$p_p \gg n_n \gg p_n \gg n_p$$

- Тепловое движение приводит к самопроизвольной диффузии электронов и дырок на границе р и n-слоев.

Объёмные заряды в переходной области p - n перехода

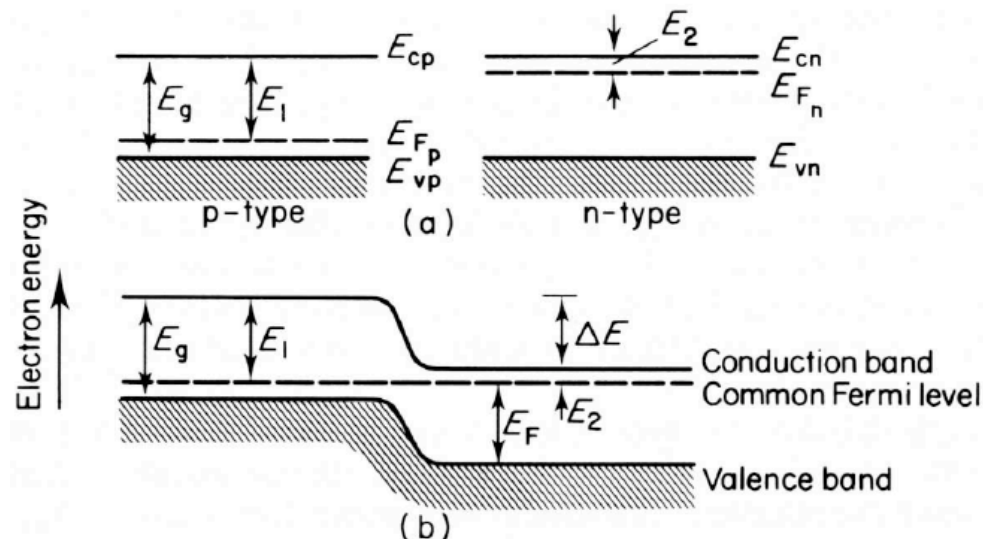
- Вследствие рекомбинации на границе образуются заряды, сформированные ионами примесей: донорные ионы образуют заряд $q_n = eN_d l_n S$. Акцепторные ионы дают заряд $q_p = -eN_a l_p S$
- В силу электронейтральности имеем, что $q_n = -q_p$.

Так как $q_p = -q_n$, то $N_a l_{p_0} = N_d l_n$. При несимметричном p - n -переходе ($N_a \gg N_d$) имеем $l_p \ll l_n$. Таким образом $l_0 \approx l_n$ и p - n -переход размещен в основном в высокоомной базе.

Схема энергетических зон для *p-n* перехода

- В условиях равновесия уровни Ферми выравниваются по всему объёму полупроводника.

Относительно «горизонтального», общего для всего объема, уровня Ферми строятся валентная зона и зона проводимости, которые в области *p-n*-перехода оказываются «наклонными».



Дрейфовые и диффузионные потоки электронов и дырок

- Высота потенциального барьера: $\Delta E = e\Delta\phi$.

При температуре $T = 300 \text{ K}$ высота барьера $\Delta E_0 \approx 0,35 \text{ эВ}$ ($\Delta\phi_0 = 0,35 \text{ В}$) для Ge и $\Delta E_0 \approx 0,65 \text{ эВ}$ ($\Delta\phi_0 \approx 0,65 \text{ В}$) для Si.

Так как дырочный газ в валентной зоне – невырожденный, его концентрация при $T = \text{const}$ распределяется по закону Больцмана

$$p_n = p_p e^{-\Delta E / k_B T}$$

- Отсюда

$$\Delta E = k_B T \ln \frac{p_p}{p_n}$$

Поскольку в равновесном состоянии $p_p \gg p_n$, то диффузионный поток Δp_p не прекращается, но компенсируется встречным дрейфовым потоком дырок Δp_n :

$$\Delta p_p = \Delta p_n$$

Величина дрейфового потока не зависит от высоты потенциального барьера ΔE , а зависит от концентрации дырок p_n — неосновных носителей тока в n -слое. В соответствии с формулой, она сильно зависит от температуры.

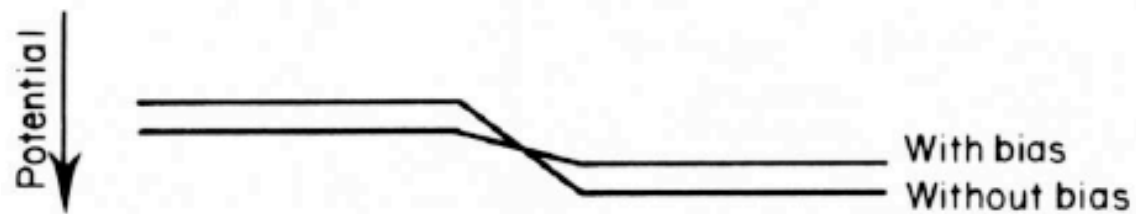
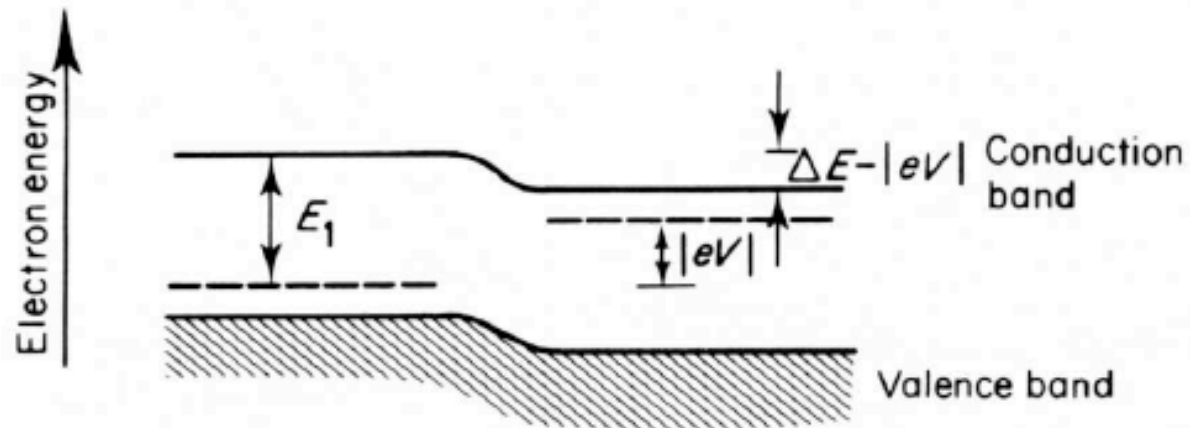
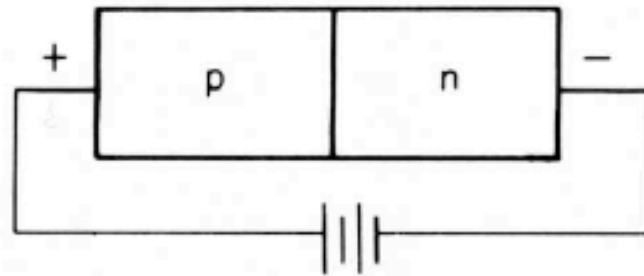
Прямое смещение *p-n* перехода

- Разность потенциалов $\Delta\varphi$ на границе *p-n* перехода можно изменять относительно контактной разности потенциалов $\Delta\varphi_0$ с помощью внешнего напряжения V , подаваемого на клеммы Э и Б.

Если напряжение U приложено так, что $\Delta\varphi < \Delta\varphi_0$, оно называется напряжением «прямого смещения» *p-n*-перехода или прямым напряжением на полупроводниковом диоде. В рассматриваемом здесь случае полярность прямого напряжения должна иметь плюс на Э и минус на Б.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - V$$

$$\Delta E = e\Delta\varphi = \Delta E_0 - eV$$



6. При «прямом смещении» и при $T = \text{const}$ концентрация неосновных носителей – дырок в n -слое P_n и дрейфовый поток ΔP_n дырок из n -слоя практически остаются такими же, как и в состоянии равновесия.

Диффузионный же поток дырок ΔP_p из p -слоя, зависящий от высоты ΔE барьера, существенно возрастает по сравнению с равновесным значением: $\Delta P_p \gg \Delta P_{p0}$. В n -слое за счет этого потока появляются «избыточные неосновные носители тока» – дырки. Этот процесс нагнетания из эмиттера в базу неосновных носителей называют инжекцией.

Примечание. Если p – n -переход симметричный, аналогичным образом рассматриваются электронные потоки в зоне проводимости, инжекция электронов из n -слоя, диффузионный электронный ток, соответствующий формуле (4), но содержащий тепловой ток электронов I_{on} . Прямой ток является суммой дырочного и электронного токов.

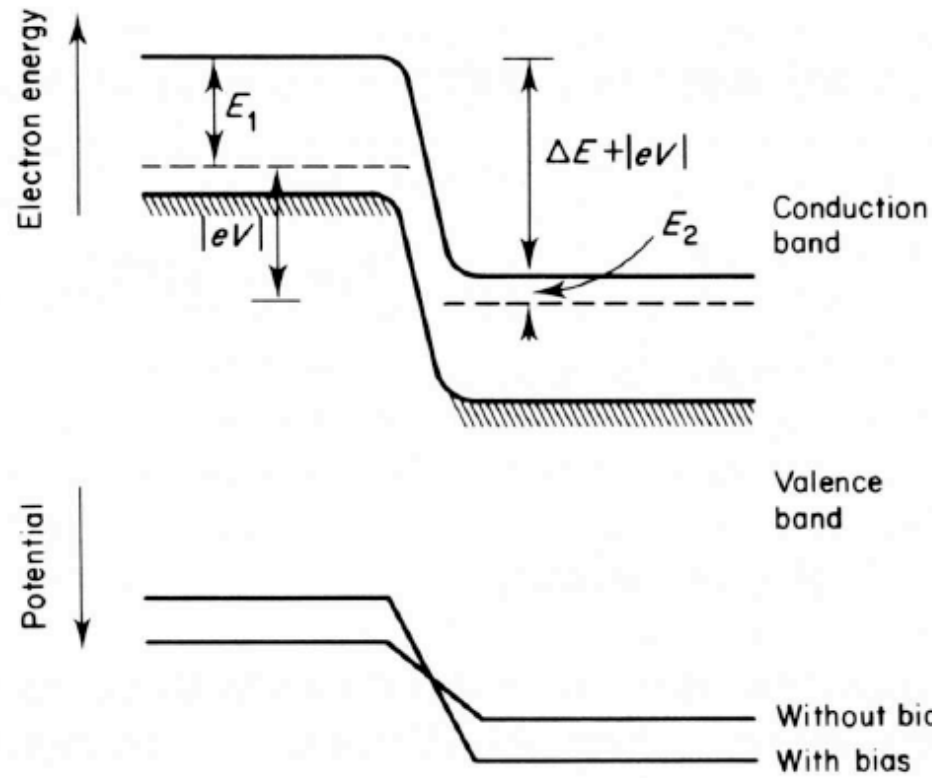
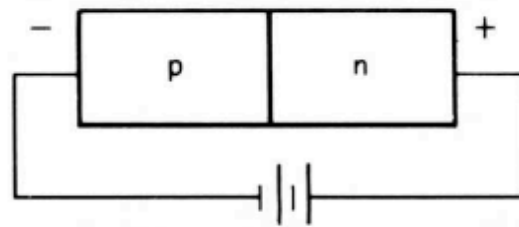
Обратное смещение p - n перехода

- Напряжение смещения V называют обратным напряжением, если оно приложено так, что $\Delta\varphi > \Delta\varphi_0$.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + V \qquad \Delta E = e\Delta\varphi = \Delta E_0 + eV$$

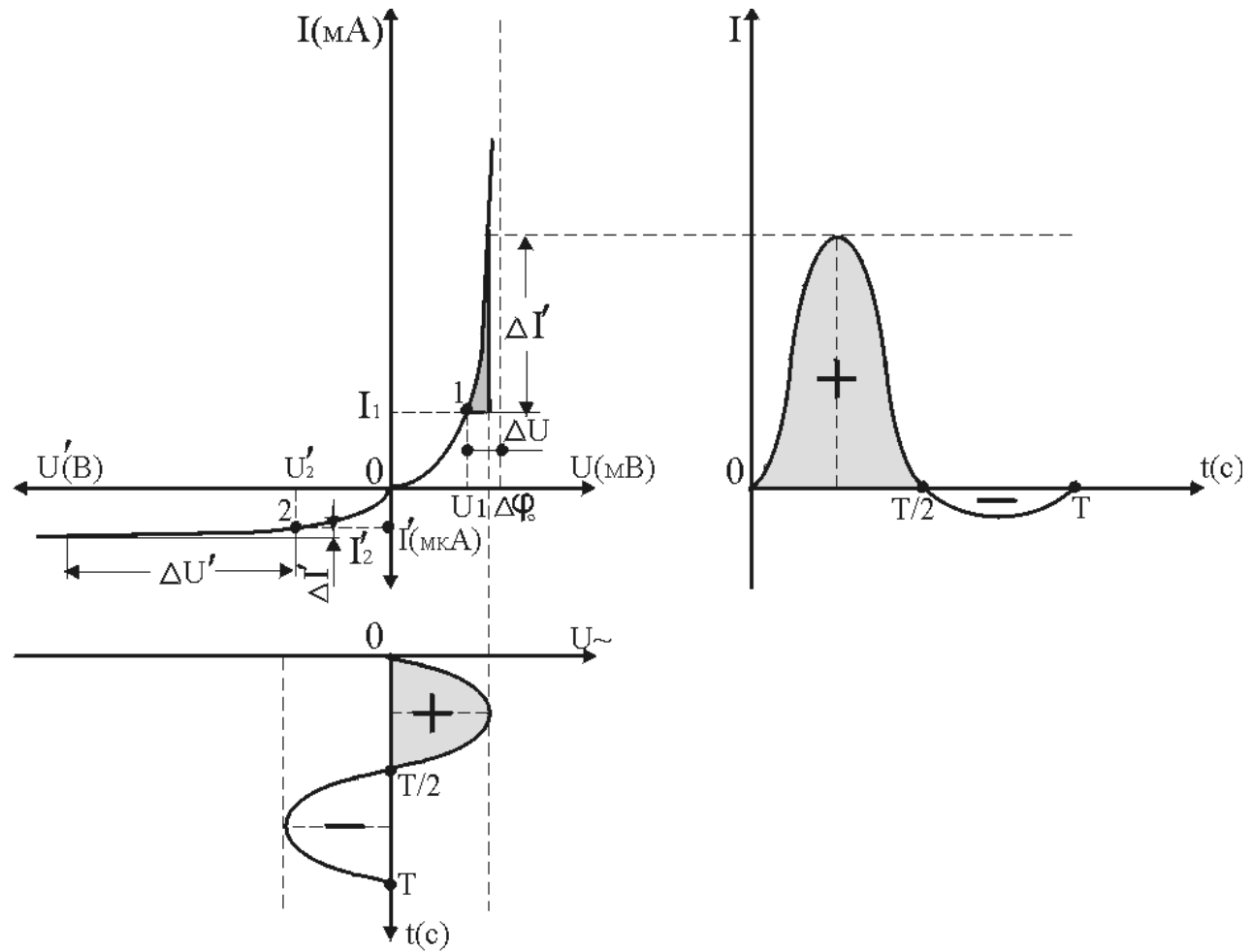
8. При обратном смещении и при $T = \text{const}$ дрейфовый поток ΔP_n дырок из n -слоя остается таким же, как и в состоянии равновесия.

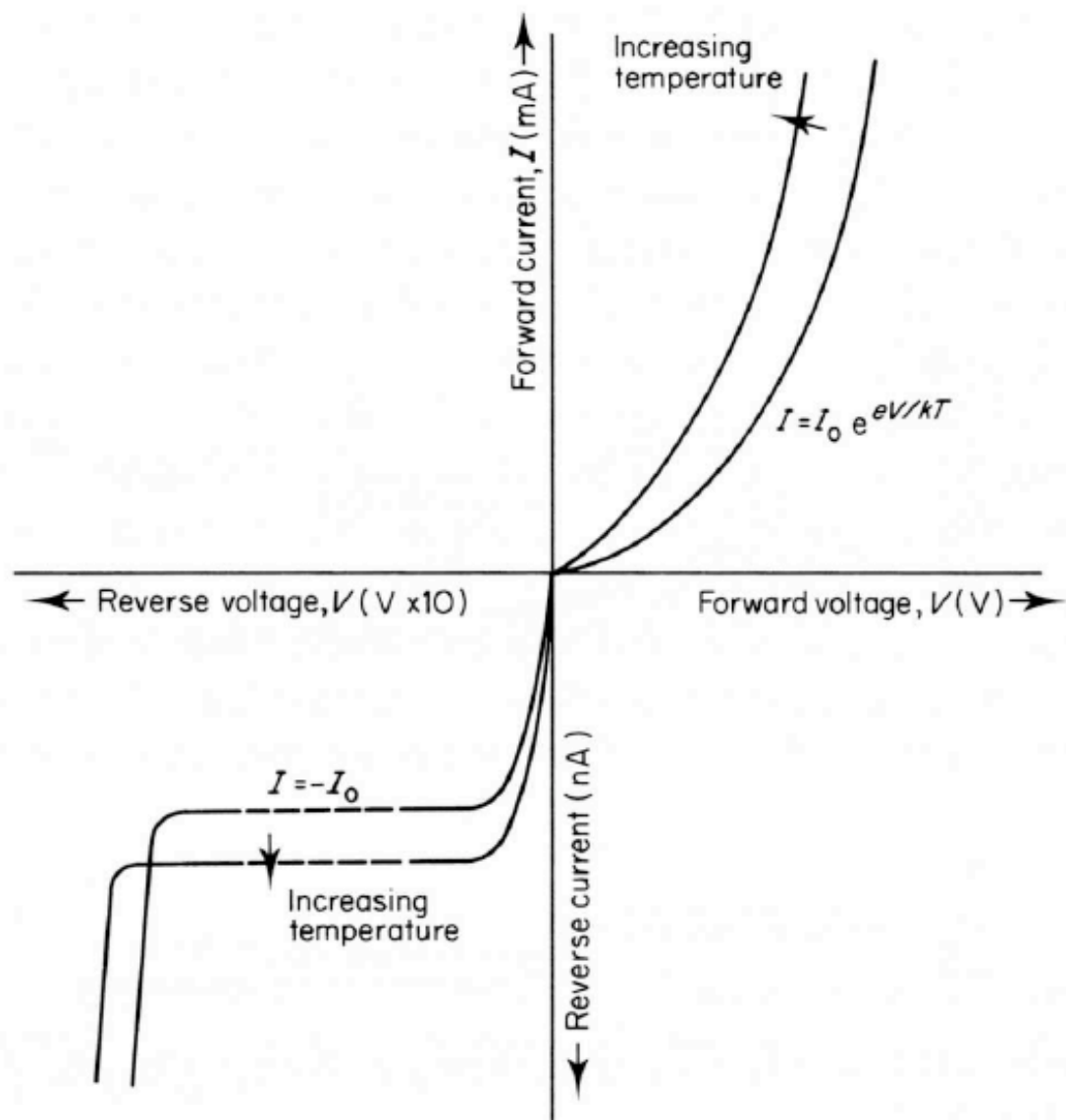
Диффузионный же поток дырок ΔP_p из p -слоя ввиду увеличения высоты ΔE потенциального барьера ($\Delta E > \Delta E_0$) существенно уменьшается по сравнению с равновесным значением: $\Delta P_p \ll \Delta P_{p0}$.



Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

- А





Ток через р-п-переход

- В общем случае концентрация электронов в зоне проводимости определяется соотношением (распределение Максвелла – Больцмана):

$$n = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]$$

Соответственно, в p -области перехода концентрация электронов в зоне проводимости равна

$$n_p = N_c \exp\left[-(E_{cp} - E_{F_p})/kT\right]$$

- В соответствии с рисунком, имеем

$$E_1 = E_{cp} - E_{F_p}$$

- Поэтому

$$n_p = N_c \exp[-E_1/kT]$$

Электронный ток из p -области обусловлен дрейфом электронов и пропорционален их концентрации

- Отсюда имеем

$$i'_e = A' \exp[-E_1/kT]$$

- Аналогично для n -области имеем

$$n_n = N_c \exp[-E_2/kT]$$

- С учетом потенциального барьера ΔE сила тока равна

$$i_e = A \exp[-E_2/kT] \exp[-\Delta E/kT]$$

В условиях равновесия

$$i'_e = i_e$$

$$A' \exp[-E_1/kT] = A \exp[-E_2/kT] \exp[-\Delta E/kT] = A \exp[-(E_2 + \Delta E)/kT]$$

- Из рисунка следует, что $E_1 = E_2 + \Delta E$, поэтому

$$A = A'$$

Теперь для силы тока можно записать, что

$$i_e = i'_e = A \exp[-E_1/kT]$$

$$i_h = i'_h = A \exp[-E_1/kT]$$

- Нижнее уравнение – дырочный ток

При наложении внешней разности потенциалов, получим

- для тока

$$\begin{aligned} i_e &= A \exp[-E_2/kT] \exp[-(\Delta E + eU)/kT] = \\ &= A \exp[-E_1/kT] \exp[-eU/kT] \end{aligned}$$

$$i'_e = A' \exp[-E_1/kT]$$

Результирующий ток равен

$$I_e = i_e - i'_e = i'_e \left\{ \exp \left[-\frac{eU}{kT} \right] - 1 \right\}$$

- Аналогично для дырочного тока:

$$I_h = i_h - i'_h = i'_h \left\{ \exp \left[-\frac{eU}{kT} \right] - 1 \right\}$$

Теперь полный ток через переход можно записать в виде

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[-\frac{eU}{kT} \right] - 1 \right\}$$

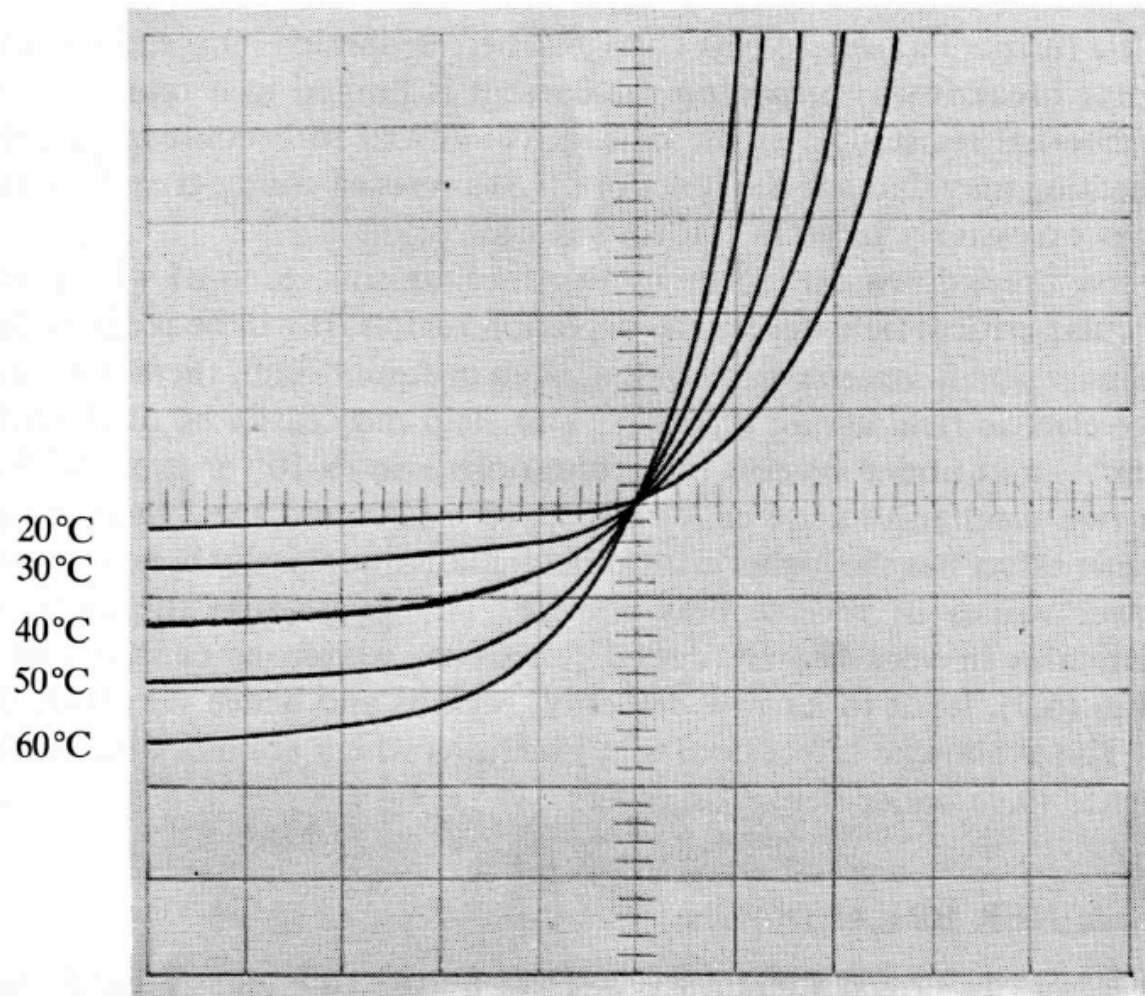
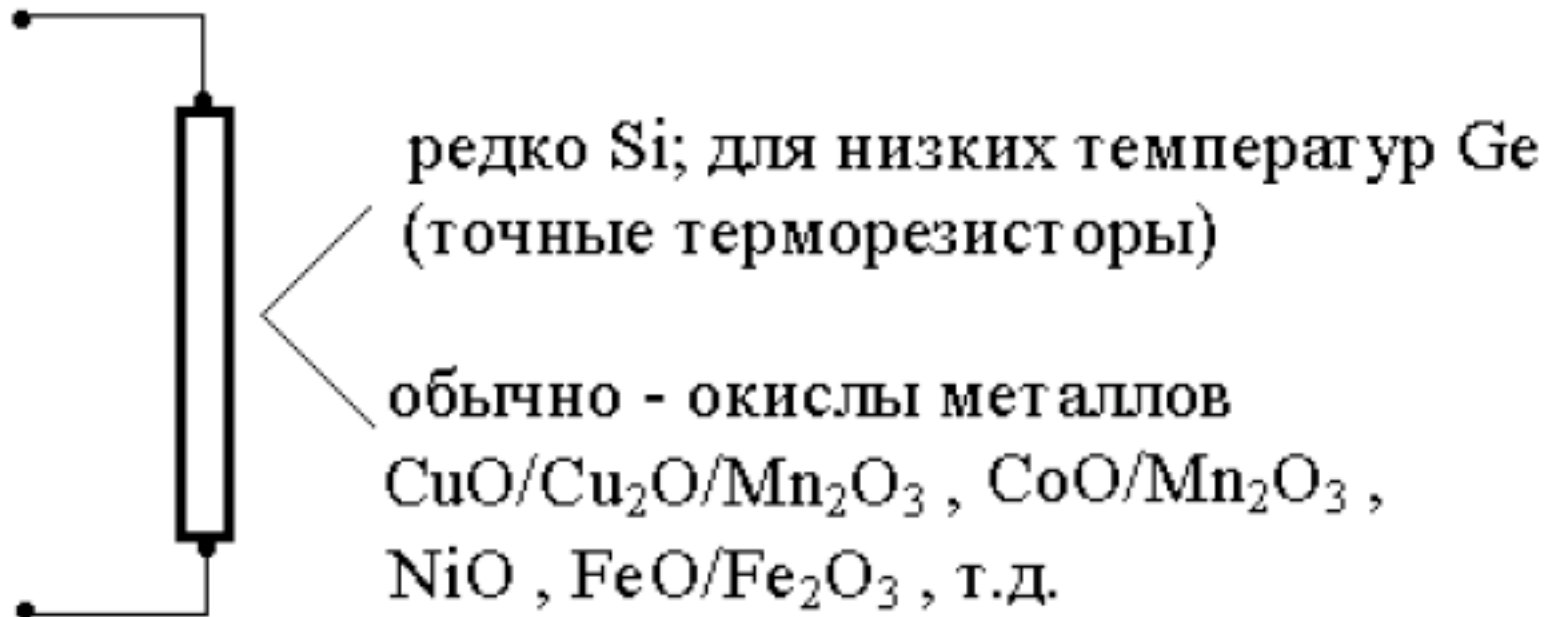


Figure 6.14. Effect of temperature on pn junction characteristics, at temperatures of 20, 40, 50 and 60 °C: horizontal scale 0.05 V per division; vertical scale 0.01 mA per division

Жорес Алферов

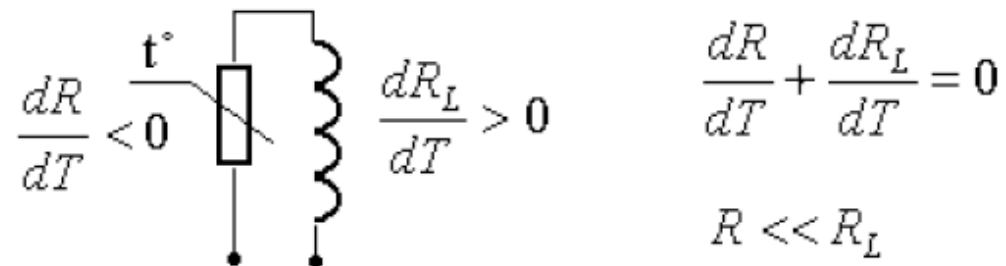


Терморезистор (термистор, термосопротивление) - зависимость сопротивления от температуры

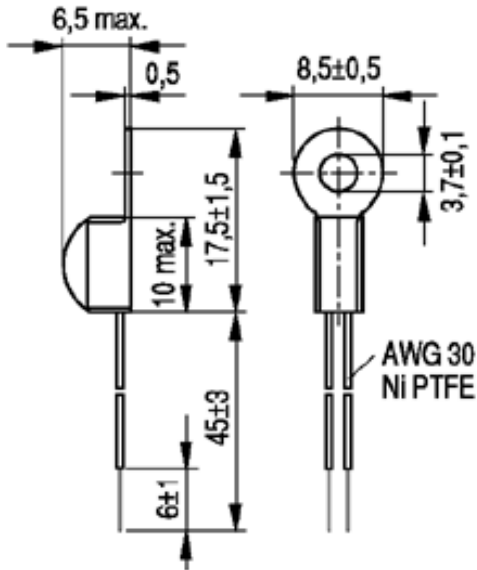


$R \approx R_0 e^{B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)}$ - экспоненциально падает с ростом абсолютной температуры

Пример: компенсация ОС в цветных телевизорах и в дисплеях:

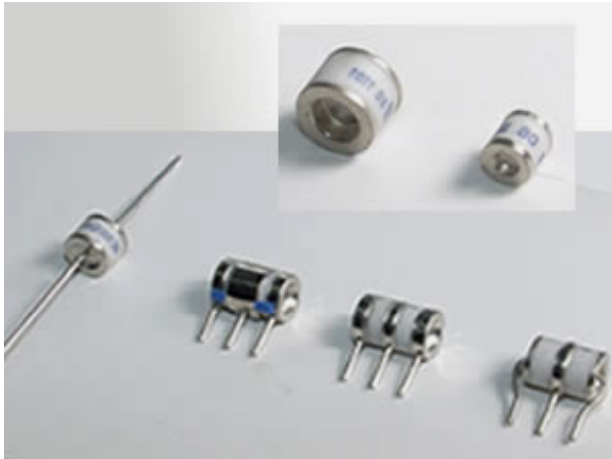


Тепловые сопротивления (термисторы)



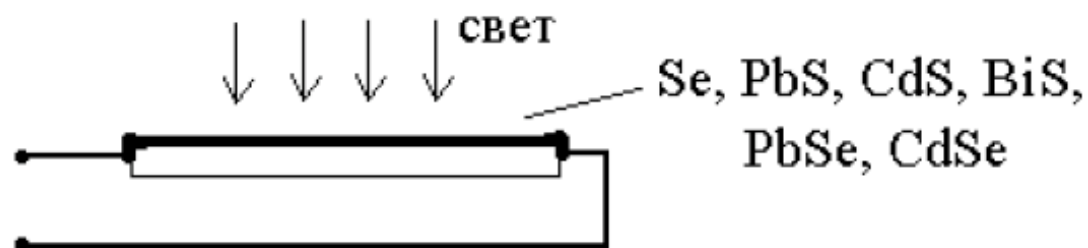
Полупроводники:

- Применение в качестве чувствительных термометров при дистанционных измерениях
- Использование в качестве термометров для замера температур окружающей среды



[Термистор\(видео – опыт\)](#)

Фоторезисторы (фотосопротивления) - зависимость сопротивления от освещенности



$$R_{\Phi} = R_0 \frac{I_{\Phi 0}}{I_{\Phi}} - \text{т.е. } i \propto I_{\Phi} \quad \text{в большинстве случаев}$$

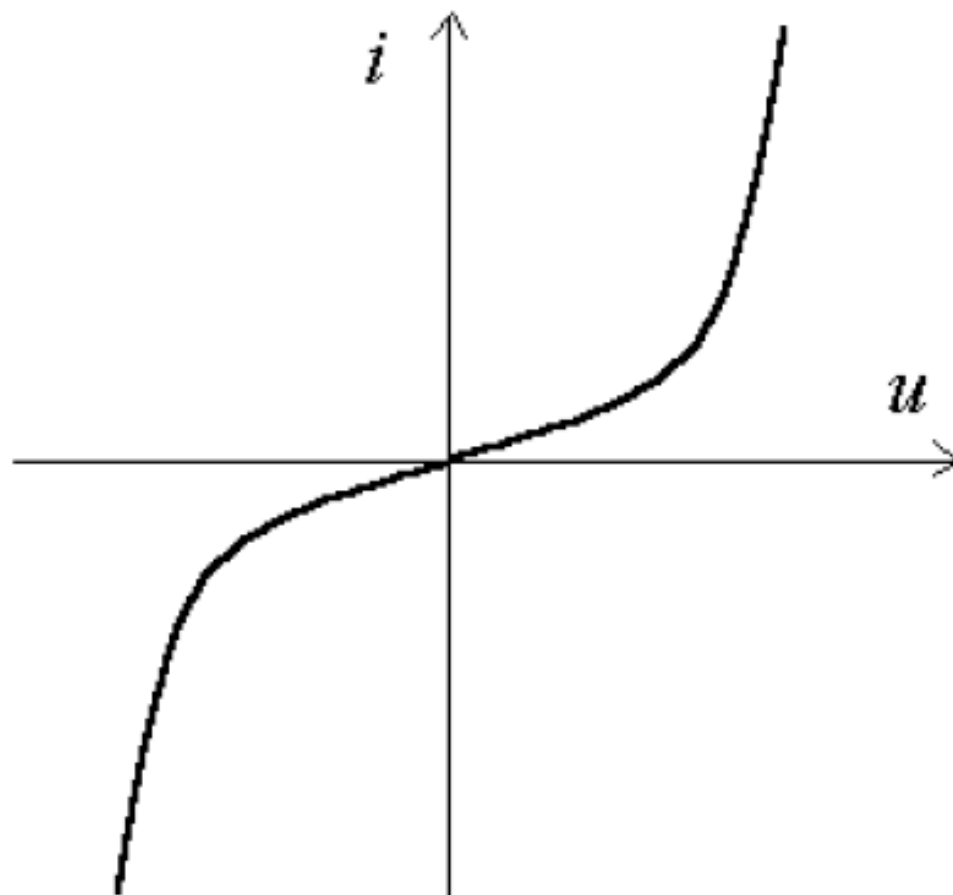
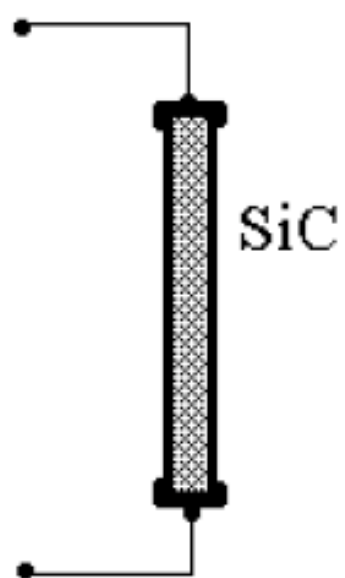
Обычно $R_{\text{ТЕМН}} \sim 100\text{K}\Omega - 1\text{G}\Omega$ $R_{\text{СВЕТ}} \sim 100\Omega - 10\text{K}\Omega$

Применение - измерение и регулировка освещенности, фотодатчики

Недостаток - инерционность

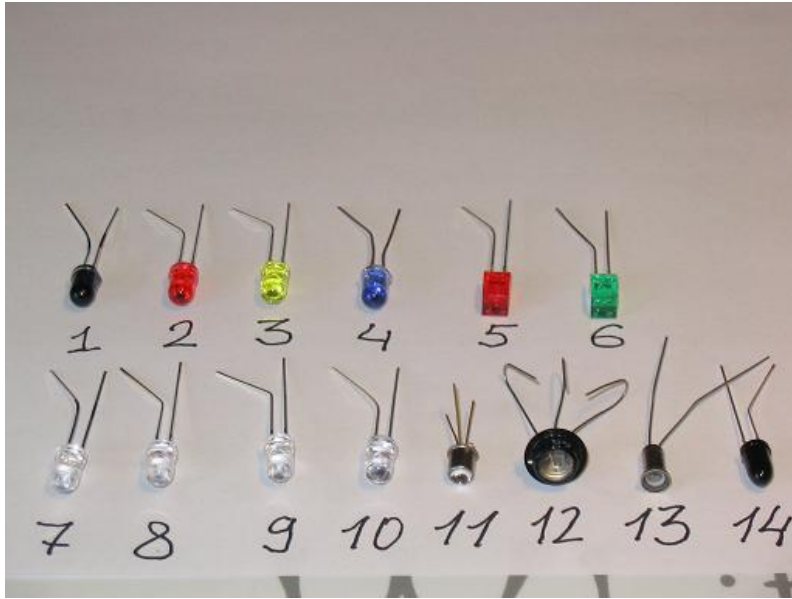
Достоинство - обычно линейная зависимость $i(u) = \frac{u}{R(I_\Phi)}$ (закон Ома)

Варистор (нелинейное сопротивление)

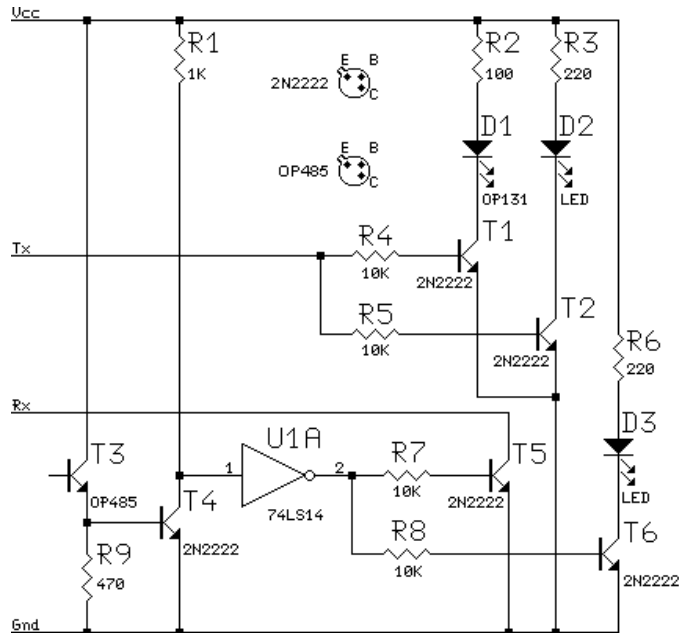


Применение : стабилизация высоких напряжений (телевизоры, дисплеи), защита от перенапряжения

Фоторезистор



Когда на транзистор падает свет достаточно большой энергии, т.е. с достаточно малой длиной волны, в нем освобождаются электронно-дырочные пары. Если пары возникают вблизи p - n -перехода с напряжением обратного смещения, они могут диффундировать в область перехода. Один из носителей может быть ускорен напряжением, имеющимся на переходе, и тогда он приобретает способность освобождать дополнительные заряды в процессах столкновения. В материале n -типа ускоряется дырка, в материале p -типа – электрон. Поскольку заряды несут ток через переход, он возникает и во внешней цепи, т.е. свет преобразуется в электрический ток.



Фоторезистор

Использование:

1. Регистрация и изменения слабых световых потоков.
2. Обнаружение инфракрасных лучей.
3. В автоматических устройствах, служащих для подсчета изделий движущихся на конвейере, контроля их размеров

Например, турникет в метро работает именно по такому принципу.

