



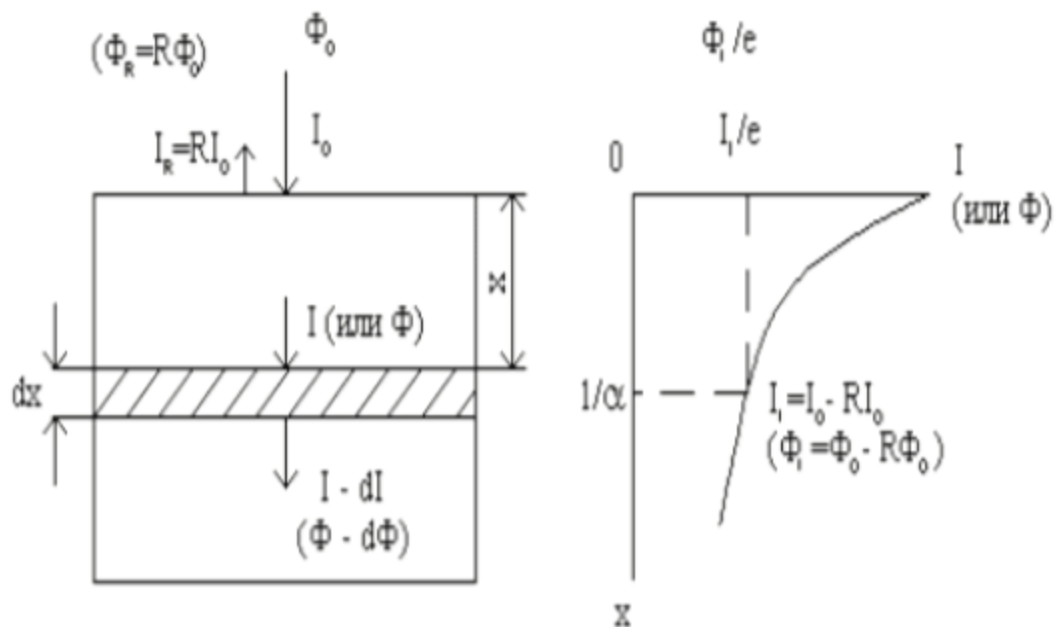
ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Если обозначить через I_0 (или Φ_0) - световой поток, [лм] интенсивность света, т. е. количество световой энергии, проходящей в единицу времени через нормальное к световому потоку единичное сечение полупроводника. Часть светового потока отражается от границы раздела.

Интенсивность света, проходящего через полупроводник, ослабляется вследствие процесса поглощения.

Доля отражённой энергии характеризуется коэффициентом отражения — — .



Выделим на глубине x от поверхности полупроводника бесконечно тонкий слой dx .

Количество световой энергии dI (или $d\Phi$), поглощенное слоем dx , пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой, и толщине слоя:

$$dI = -\alpha I dx$$

Интегрируя , получим

$$I = I_1 e^{-\alpha x}$$

Знак минус указывает на убыль энергии; коэффициент α называется показателем поглощения, характеризующий относительное изменение интенсивности излучения на единицу длины.

Закон Бугера – Ламберта:

()

Где I - интенсивность света, прошедшего через поверхность образца.

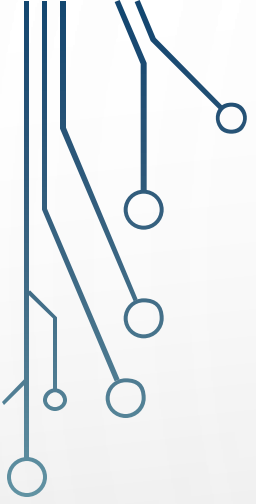
Величина, обратная показателю поглощения ($a^{-1}=1/a$), численно равна толщине слоя, на который интенсивность проходящего света уменьшается в e раз. Таким образом, показатель поглощения a имеет размерность $[m^{-1}=1/m]$.

При нормальном падении световых лучей для слабо поглощающих сред (например, для полупроводников) коэффициент отражения может быть рассчитан по формуле:

где n - показатель преломления света для полупроводника.

Для большинства полупроводников $n = 3 \div 4$. Отсюда $R = 25 \div 36\%$.


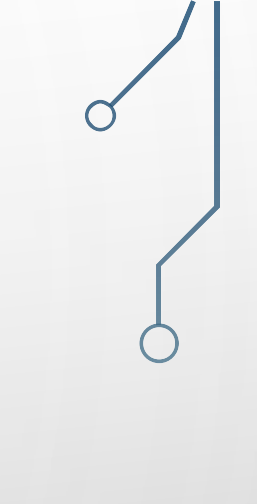
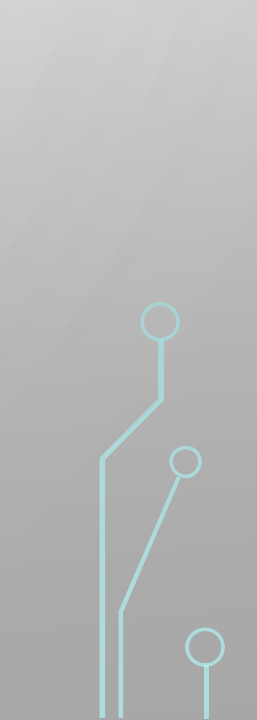
Зависимость поглощения α от длины волны λ [мкм] или энергии фотонов $h\nu = hc/\lambda$ [Дж] называют **спектром поглощения вещества**.



Оптическое излучение характеризуется длинами электромагнитных волн в диапазоне: $\lambda = 0.005 - 1000$ мкм. Оптический диапазон делят на три участка:

- $\lambda = 0.005 - 0.4$ мкм - ультрафиолетовый (УФ);
- $\lambda = 0.4 - 0.76$ мкм - видимый;
- $\lambda = 0.76 - 1000$ мкм - инфракрасный (ИК).

ИК излучение условно разделено на:

- близкое (ближняя область спектра) - до 1.5 мкм;
 - среднее (средняя область спектра) - до 5.6 мкм;
 - далёкое (дальняя область спектра) - до 1000 мкм.
- 
- 
- 

В ИК области спектра поток излучения измеряют в [Вт], т. е. оценивают мощность потока излучения, а в видимой области пользуются понятием светового потока, измеряемого в [лм]. Связь между световым потоком (или Φ) [лм] и мощностью потока монохроматического излучения P [Вт] в видимой области определяется зависимостью —, где K - [лм/Вт] - коэффициент, зависящий от длины волны, называется *фотометрическим эквивалентом излучения* или *функцией спектральной чувствительности*.

Плотность потока излучения измеряют в [Вт/м²]. В видимой области ей соответствует освещенность —

Связь между мощностью монохроматического излучения, падающего на единицу поверхности, и числом фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, выражается соотношением

$$\left[\frac{P}{A} \right] = \frac{N \cdot h \nu}{A \cdot t}$$

где $h \nu$ - энергия фотона [Дж];
 P - мощность излучения [Вт];
 A - площадь [см²].

Суммарная мощность потока излучения абсолютно чёрного тела, имеющего температуру T , определяется законом Стефана – Больцмана

,

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²К⁴ - постоянная Стефана - Больцмана. Температуру T [°К], соответствующую данной мощности излучения, называют *цветовой*.

Поглощение излучения в полупроводниках может быть связано с изменением состояния как свободных, так и связанных электронов, а также с изменением колебательной энергии атомов решётки. В связи с этим различают несколько механизмов оптического поглощения в полупроводниках.

СОБСТВЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Собственное поглощение света обусловлено переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием квантов света, т. е. энергия квантов света идёт на ионизацию атомов полупроводника с образованием пары носителей заряда. Собственное поглощение наблюдается, если

В зависимости от собственное поглощение наблюдается в видимой или ближней ИК области спектра.

Ширина запрещённой зоны определяет положение границы собственного поглощения, т. е. максимальную длину волны кванта, который может поглотиться

$$\left[\frac{1}{\lambda} \right] = \frac{1}{\lambda_0}$$

□ Излучение с $\lambda < \lambda_0$ поглощается

□ Излучение с $\lambda > \lambda_0$ не может обеспечить межзонного перехода электронов и не даёт вклада в собственное поглощение.

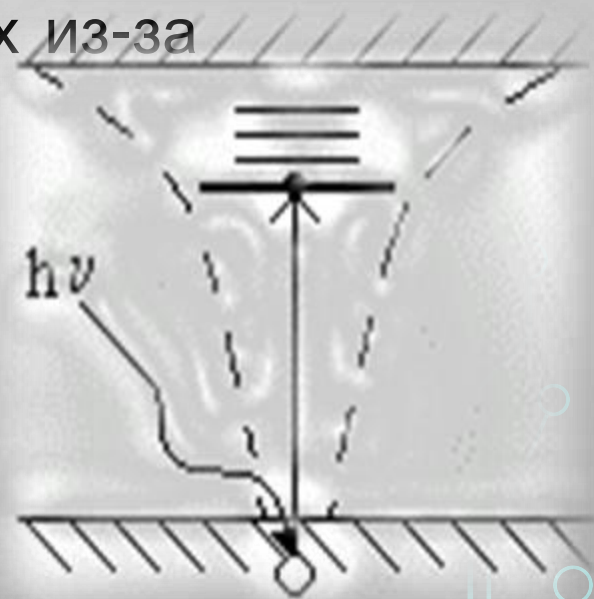
□ Для фотонов с энергией $\mathcal{E} < \mathcal{E}_g$ в собственном полупроводнике $\alpha = 0$.

□ Для фотонов с энергией $\mathcal{E} > \mathcal{E}_g$ коэффициент поглощения α редко возрастает

ЭКСИТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

В некоторых полупроводниках при поглощении фотонов образуются особые возбуждённые состояния электронов валентной зоны, называемые **экситонами**.

Экситон - это система из взаимосвязанных собственными электростатическими полями электрона и оставленной им дырки. Энергия образования экситона меньше ширины запрещённой зоны, поскольку представляет собой минимальную энергию, требуемую для создания разделённой электронно-дырочной пары. В полупроводниках из-за относительно большой диэлектрической проницаемости кулоновское притяжение мало, поэтому энергия связи в экситоне составляет всего лишь около 4 мэВ, а экситонные орбиты охватывают несколько электронных ячеек кристалла (радиус орбиты порядка 15 нм).



ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА

Механизм поглощения обусловлен переходами свободных электронов и дырок с одного энергетического уровня на другой под воздействием квантов света внутри энергетических зон. Под действием электрического поля световой волны носители заряда совершают колебательные движения совместно с полем. Ускоряясь полем на длине свободного пробега, электроны при столкновении с узлами решётки отдают накопленную кинетическую энергию. В результате энергия световой волны превращается в тепловую энергию решётки. Такой вид поглощения существенен тогда, *когда время свободного пробега намного меньше периода электромагнитных колебаний*. В противном случае электрон возвращает волне накопленную энергию. Поэтому интенсивность поглощения растёт с увеличением длины волны падающего света.

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

Явлением **фотопроводимости** называется увеличение электропроводности полупроводника под воздействием электромагнитного излучения.

Основным следствием поглощения энергии света в полупроводнике является перевод электронов из валентной зоны в зону проводимости, т.е. межзонный переход, то энергия кванта света фотона должна удовлетворять условию $h\nu_{кр} \geq \Delta W$, где h – постоянная Планка; ΔW – ширина запрещенной зоны полупроводника; $\nu_{кр}$ – критическая частота электромагнитного излучения (красная граница фотопроводимости).

- ❑ Излучение с частотой $\nu < \nu_{кр}$ не может вызвать фотопроводимость, так как энергия кванта такого излучения $h\nu < \Delta W$ недостаточна для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости.
- ❑ Если же $h\nu > \Delta W$, то избыточная относительно ширины запрещенной зоны часть энергии квантов передается электронам в виде кинетической энергии.

Критической частоте $\nu_{кр}$ соответствует граничная длина волны

$$\lambda_{гр} = c / \nu_{кр} ,$$

где c - скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

- ❑ При длинах волн, больших граничной, фотопроводимость резко падает.

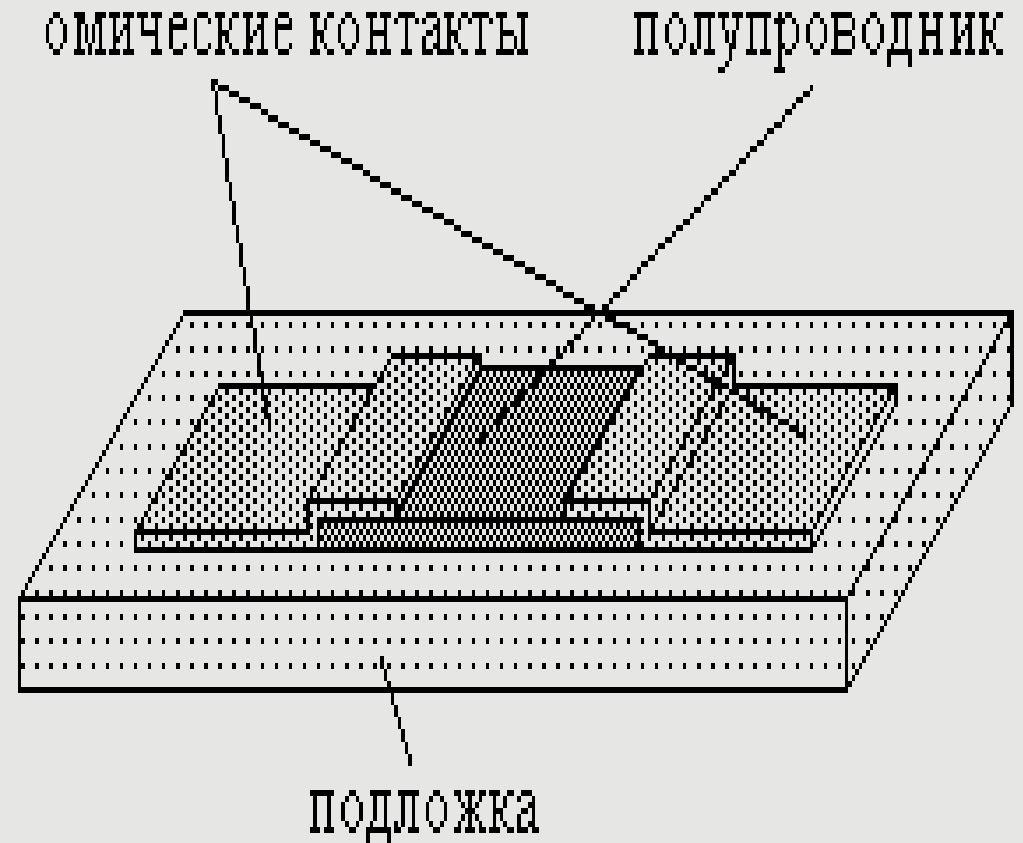
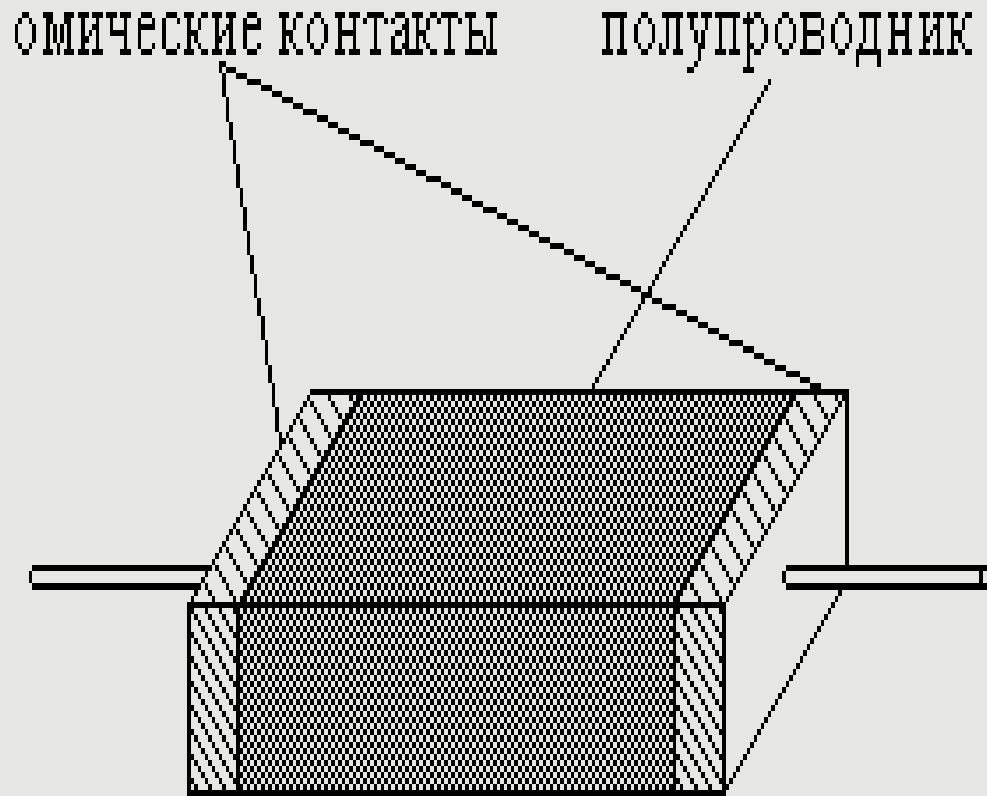
ФОТОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

Механизм поглощения света, приводящий к появлению свободных носителей заряда в полупроводнике, при котором изменяется проводимость, а следовательно, внутреннее сопротивление полупроводника, называется фоторезистивным эффектом.

Основное применение он находит в светочувствительных полупроводниковых приборах – *фоторезисторах*, которые широко используются в современной оптоэлектронике и фотоэлектронной автоматике.

ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фоторезисторами называют полупроводниковые приборы, проводимость которых меняется под действием света.

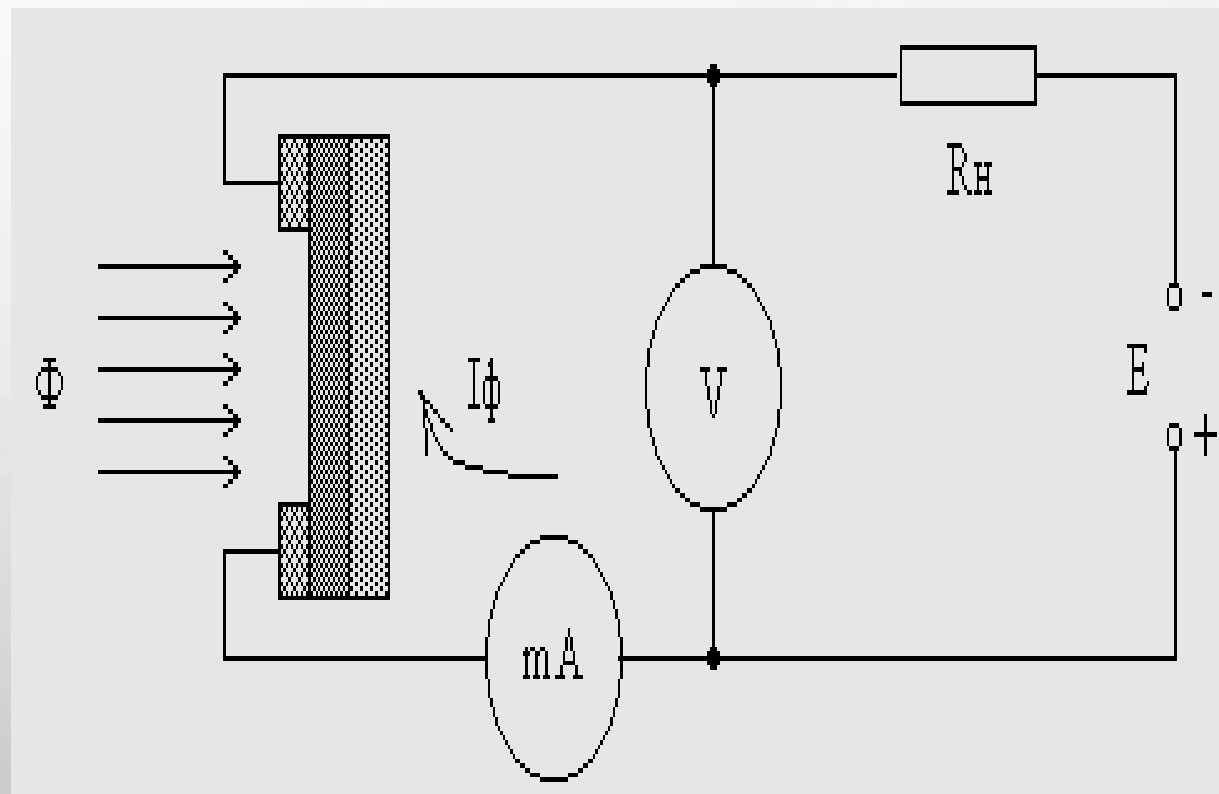


Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения и не освещен, то в его цепи будет протекать *темновой ток*

$I_T = E / (R_T + R_H)$, где E – э. д. с. источника питания; R_T – величина электрического сопротивления фоторезистора в темноте, называемая *темновым сопротивлением*; R_H – сопротивление нагрузки.

При освещении фоторезистора энергия фотонов расходуется на перевод электронов в зону проводимости.

Количество свободных электронно-дырочных пар возрастает, сопротивление фоторезистора падает и через него течет *световой ток* $I_C = E / (R_C + R_H)$.



Разность между световым и темновым током дает значение тока I_{ϕ} , получившего название *первичного фототока проводимости*

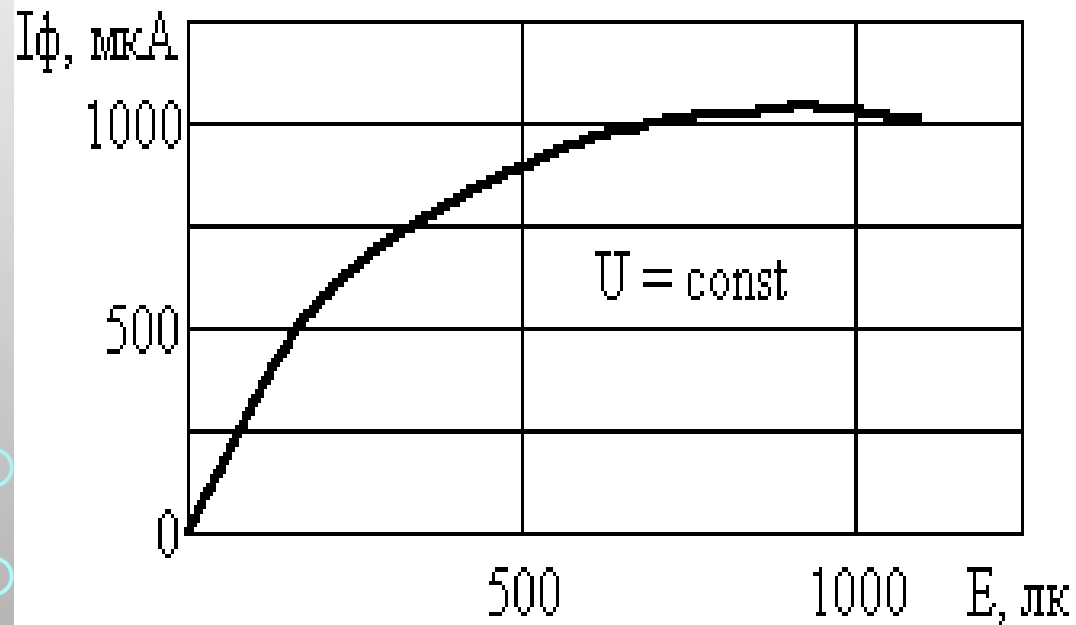
$$I_{\phi} = I_c - I_T$$

Когда лучистый поток мал, первичный фототок проводимости практически безынерционен и изменяется прямо пропорционально величине лучистого потока, падающего на фоторезистор. По мере возрастания величины лучистого потока увеличивается число электронов проводимости. Двигаясь внутри вещества, электроны сталкиваются с атомами, ионизируют их и создают дополнительный поток электрических зарядов, получивший название *вторичного фототока проводимости*.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

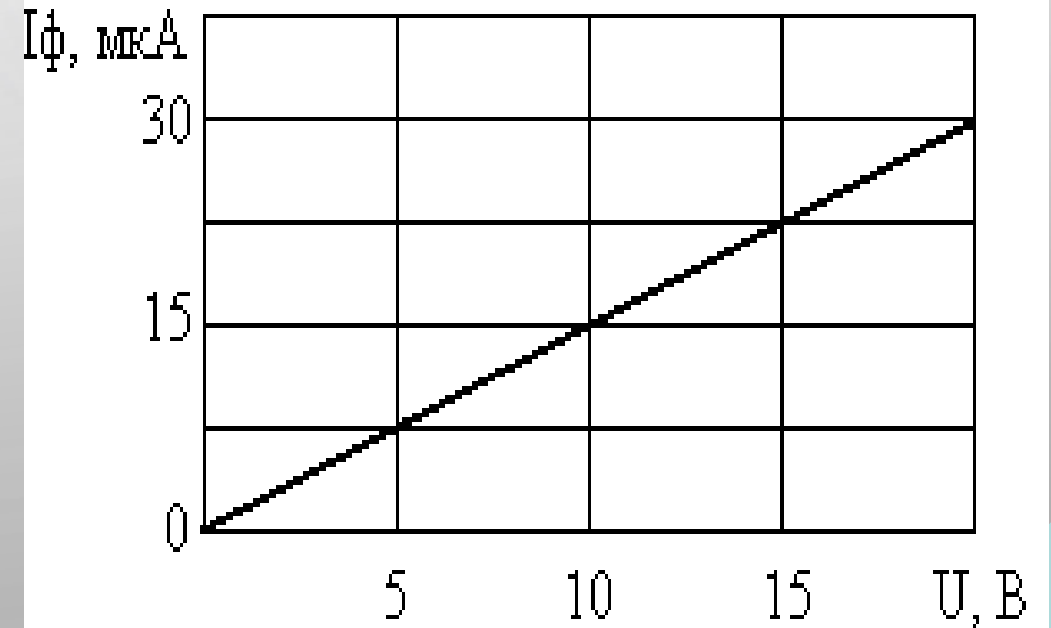
Вольтамперная

- зависимость фототока или темнового тока от приложенного напряжения



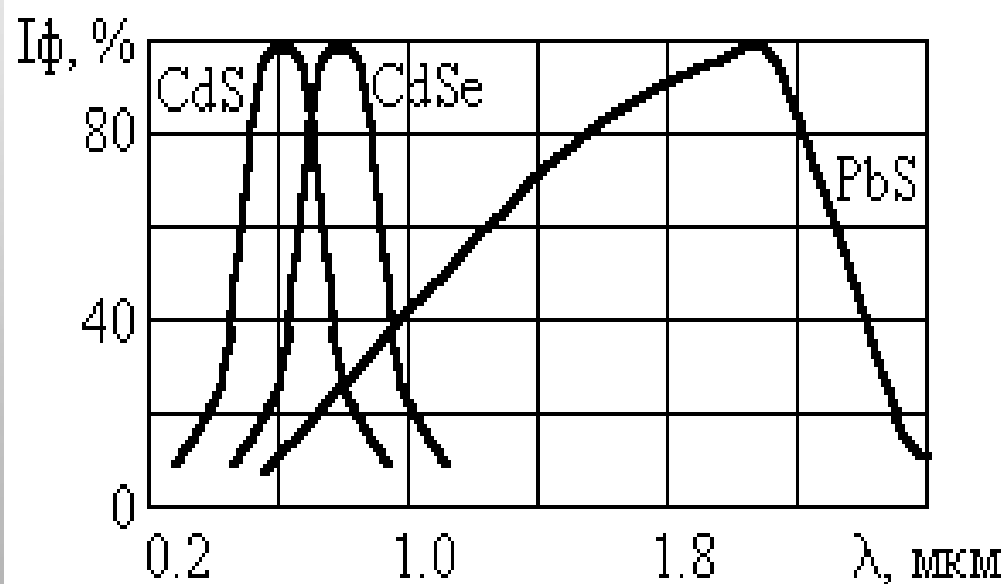
Световая (люксамперная),

- зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава



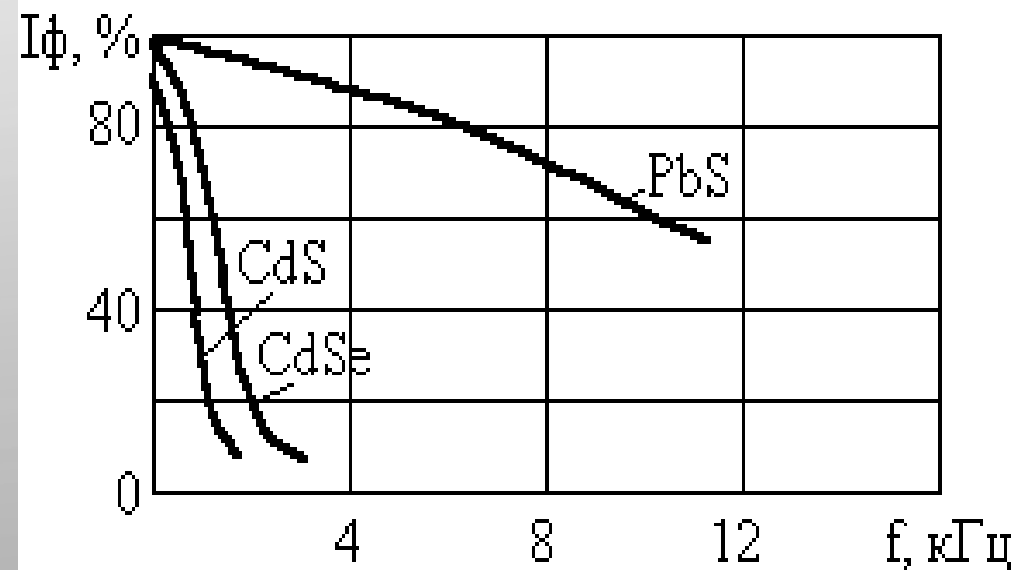
Спектральная

- чувствительность фоторезистора при действии на него потока излучения постоянной мощности определенной длины волны



Частотная

- чувствительность фоторезистора при действии на него светового потока, изменяющегося с определенной частотой



ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОРЕЗИСТОРОВ:

- **Рабочее напряжение U_p** – постоянное напряжение, приложенное к фоторезистору, при котором обеспечиваются номинальные параметры при длительной его работе в заданных эксплуатационных условиях.
- **Максимально допустимое напряжение фоторезистора U_{max}** – максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к фоторезистору, при котором отклонение его параметров от номинальных значений не превышает указанных пределов при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях.
- **Темновое сопротивление R_T** – сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него излучения в диапазоне его спектральной чувствительности.
- **Световое сопротивление R_c** – сопротивление фоторезистора, измеренное через определенный интервал времени после начала воздействия излучения, создающего на нем освещенность заданного значения.

- **Кратность изменения сопротивления K_R** – отношение темнового сопротивления фоторезистора к сопротивлению при определенном уровне освещенности (световому сопротивлению).
- **Допустимая мощность рассеяния** – мощность, при которой не наступает необратимых изменений параметров фоторезистора в процессе его эксплуатации.
- **Общий ток фоторезистора** – ток, состоящий из темнового тока и фототока.
- **Фототок** – ток, протекающий через фоторезистор при указанном напряжении на нем, обусловленный только воздействием потока излучения с заданным спектральным распределением.
- **Удельная чувствительность** – отношение фототока к произведению величины падающего на фоторезистор светового потока на приложенное к нему напряжение, мкА/(лм·В)

$$K_0 = I_{\phi} / (\Phi U),$$

где I_{ϕ} – фототок, равный разности токов, протекающих по фоторезистору в темноте и при определенной (200 лк) освещенности, мкА; Φ – падающий световой поток, лм; U – напряжение, приложенное к фоторезистору, В.

- **Интегральная чувствительность** – произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение $S_{\text{инт}} = K_0 U_{\text{max}}$.
- **Постоянная времени** $\tau_{\text{ф}}$ – время, в течение которого фототок изменяется на 63%, т. е. в e раз. Постоянная времени характеризует инерционность прибора и влияет на вид его частотной характеристики.

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

сульфиды,
селениды и
теллуриды
различных
элементов

Материал для
фоторезисторов

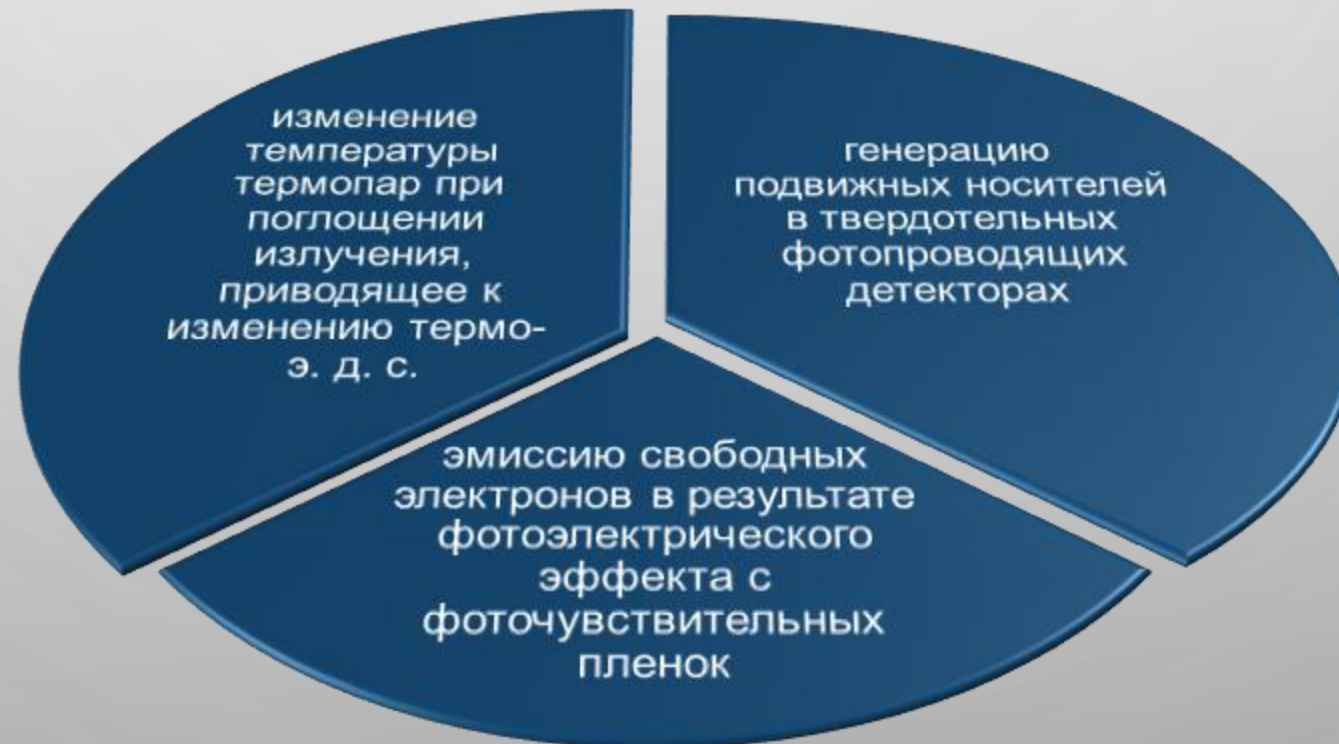
соединения типа
 $A_{III}B_V$

в области видимого
света и ближнего
ультрафиолета –
CdS

в инфракрасной области -
фоторезисторы на основе
PbS, PbSe, PbTe, InSb

Значительный интерес представляет использование фоторезисторов в оптоэлектронике.

Для регистрации оптического излучения его световую энергию обычно преобразуют в электрический сигнал, который затем измеряют обычным способом. При этом преобразовании обычно используют следующие физические явления:



фотодиод

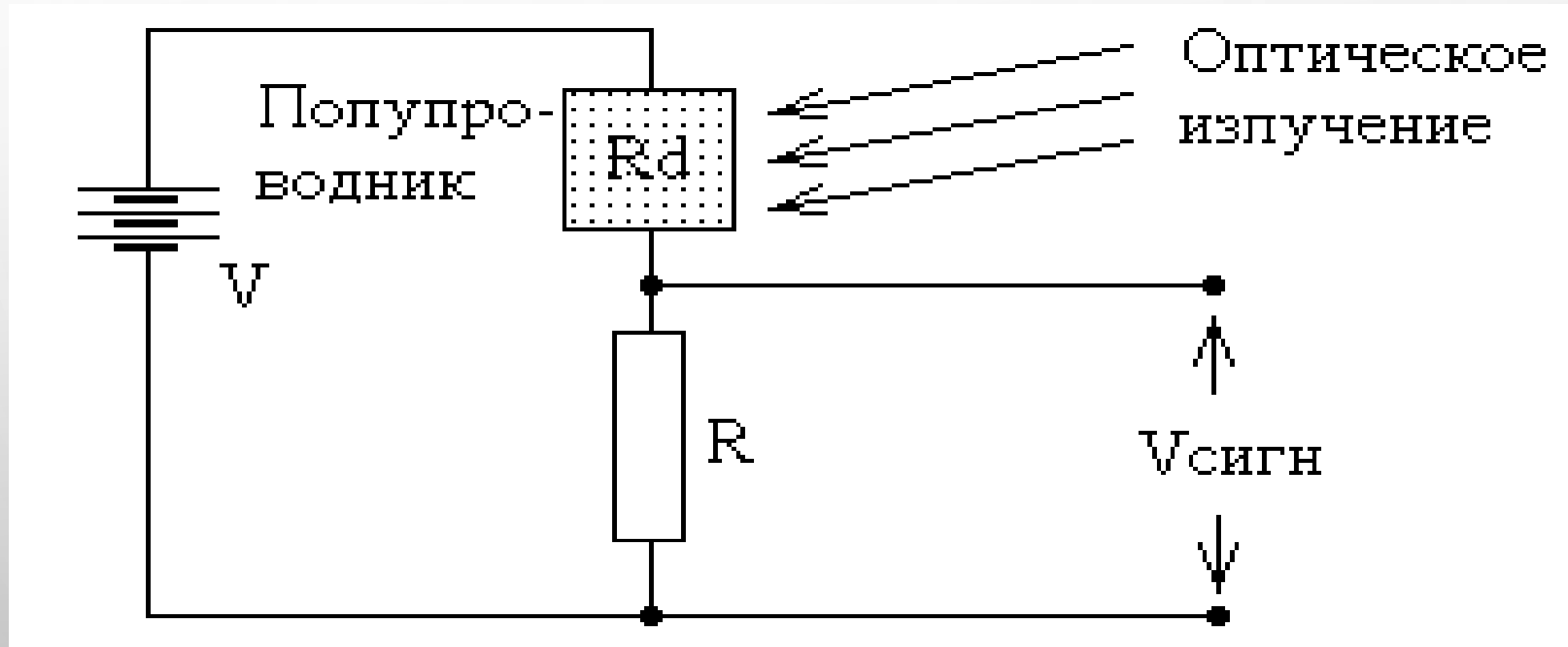
полупроводниковый
фоторезистор

**Наиболее
важные типы
оптических
детекторов:**

лавинный фотодиод

фотоумножитель

СХЕМА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОДЕТЕКТОРА



Типовая схема включения детектора с фотосопротивлением

The image features a light gray background with a subtle pattern of concentric circles. In the four corners, there are decorative elements resembling circuit board traces or neural network connections. These elements consist of thin lines that branch out and terminate in small circles, creating a sense of connectivity and technology.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!