

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках

СОДЕРЖАНИЕ

1. Поглощение света
2. Собственное поглощение света
3. Экситонное поглощение
4. Поглощение света носителями заряда
5. Фотопроводимость
6. Фоторезисторы
7. Основные характеристики фоторезисторов
8. Основные параметры фоторезисторов
9. Применение фоторезисторов
10. Фотоумножители
11. Фотодиоды

Поглощение света

Свет, проникая в полупроводник, вступает с кристаллической решёткой во взаимодействие, связанное с обменом энергией.

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

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. Доля отражённой энергии характеризуется коэффициентом отражения

Поглощение света

Выделим на глубине x от поверхности полупроводника бесконечно тонкий слой dx (рис. 1).

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

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

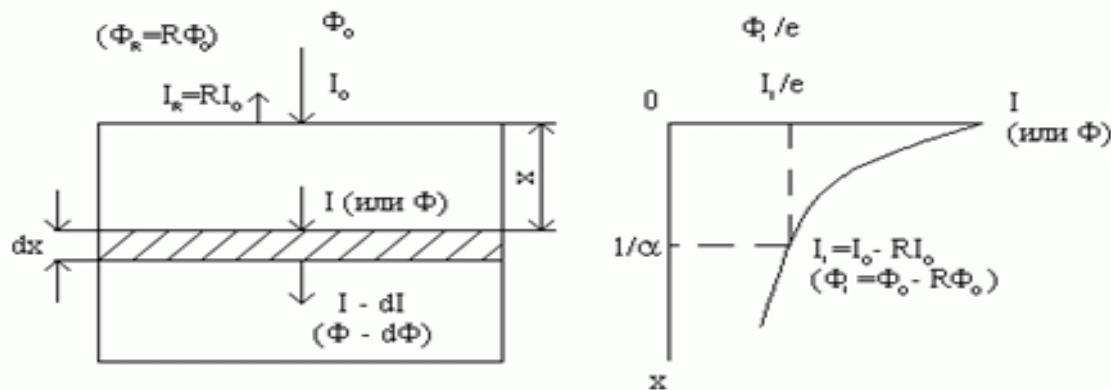


Рисунок 1 – Поглощение света.

Поглощение света

Проинтегрировав, получим закон Бугера-Ламберта:

$$(\quad)$$

где $(\quad)$

Из неё следует, что величина, обратная показателю поглощения, численно равна толщине слоя, на который интенсивность проходящего света уменьшается в e раз.

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

$$\quad$$

где

Поглощение света

Зависимость поглощения от длины волны [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:

1. $\lambda = 0.005 - 0.4$ 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].

Плотность потока излучения измеряют в [Вт/м²].

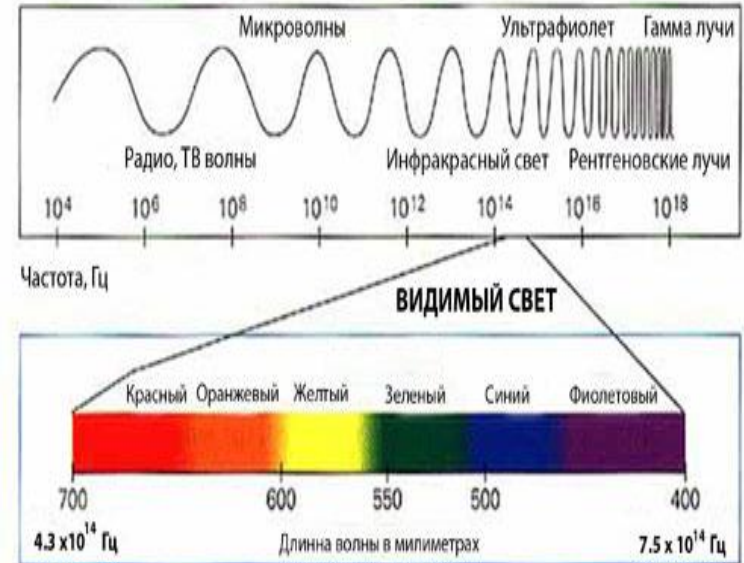


Рисунок 2 – Спектр электро-магнитного излучения.

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:

$$h\nu > E_g = \Delta E,$$

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

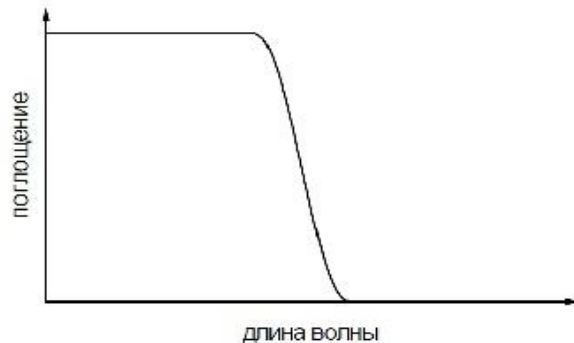


Рисунок 3 – Спектр собственного Поглощения полупроводников.

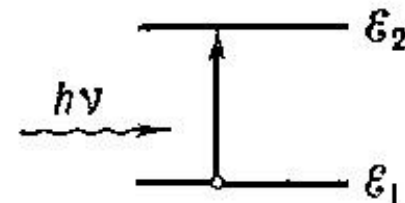


Рисунок 4 – Схема квантового перехода при поглощении волны.

Собственное поглощение света

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

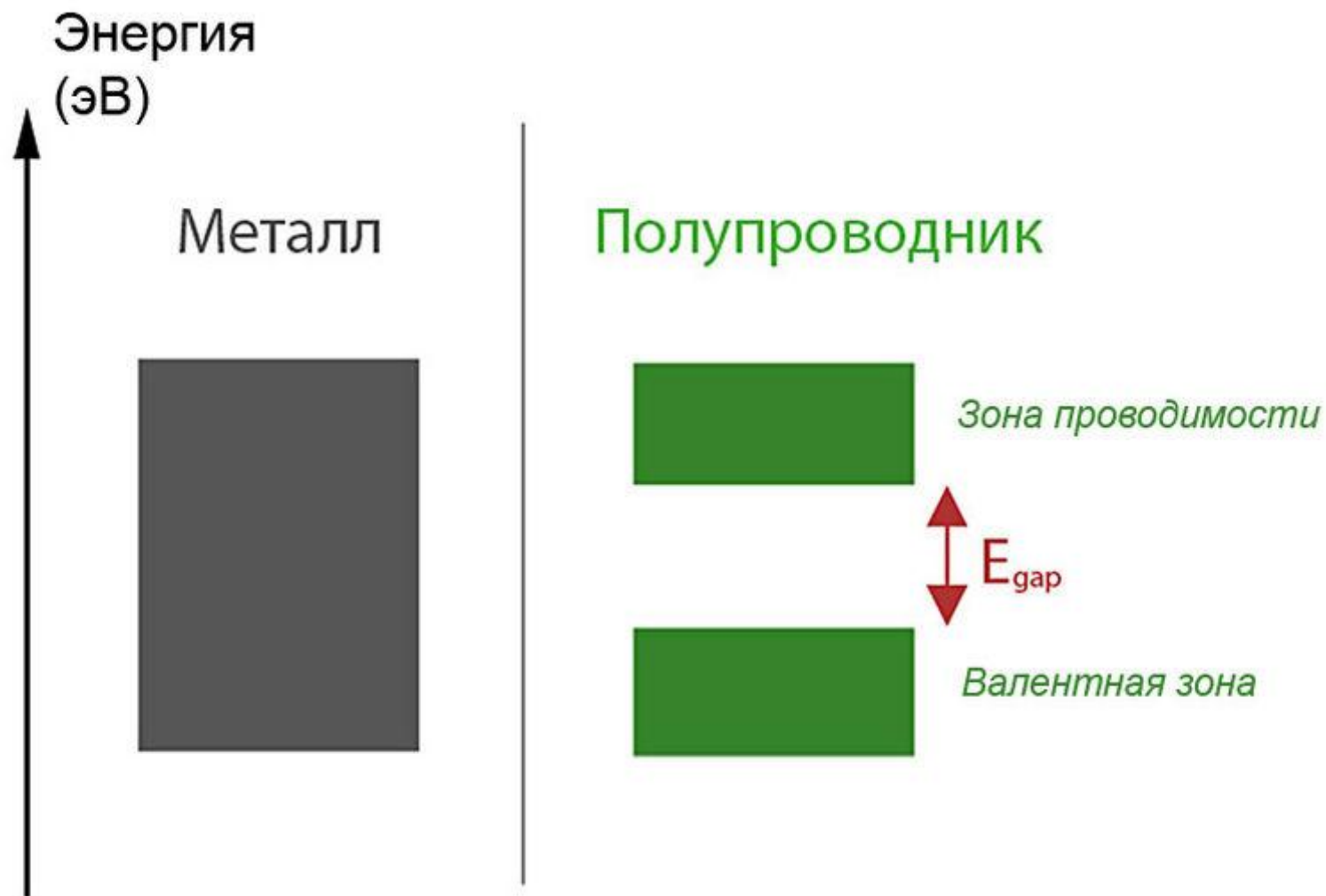
$$[\quad] \text{ ————— }$$

Длинноволновая граница фотопроводимости для собственных фоторезисторов:

- излучение с $\lambda < \lambda_c$ поглощается;
- излучение с $\lambda > \lambda_{gr}$ не может обеспечить межзонного перехода электронов и не даёт вклада в собственное поглощение.

На следующем слайде будет показана диаграмма энергетических уровней металлов и полупроводников.

Диаграмма энергетических уровней металла и полупроводника ($E_{\text{зап}}$ – ширина запрещенной зоны полупроводника)



Собственное поглощение света

Прямой переход, называют переход, при котором электрон и оставляемая им дырка в момент образования имеют одинаковые квазиимпульсы. Из квантовой теории следует, что при оптических переходах электронов из одной энергетической зоны в другую существуют определённые правила. Разрешёнными оптическими переходами являются лишь те, при которых волновой вектор (квазиимпульс) электрона остаётся неизменным - это и есть прямой переход.

Возможны переходы и не разрешённые правилами отбора. Однако вероятность их существования меньше. При таких переходах, называемых **непрямыми**, закон сохранения импульса выполняется благодаря тому, что в каждом акте поглощения принимают участие не две, а три "частицы": фотон, электрон и фонон, т. е. квант теплового поля.

Экситонное поглощение

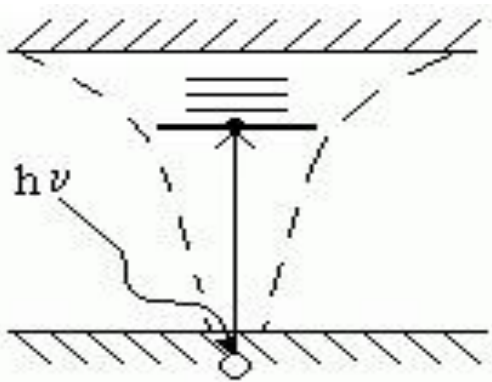


Рисунок 5 – Экситонная проводимость

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. Он напоминает атом водорода, в котором роль ядра играет положительная дырка.

Энергетические уровни возбуждённого электрона, входящего в состав экситона и находящегося в центральном электростатическом поле дырки, лежат несколько ниже края зоны проводимости. Это изображено на рисунке.

Таким образом, энергия образования экситона меньше ширины запрещённой зоны, поскольку ΔE представляет собой минимальную энергию, требуемую для создания разделённой электронно - дырочной пары.

Экситонное поглощение

Экситон может блуждать по кристаллу, передаваясь от одного атома (приходящего в нормальное состояние) к другому. Так как экситон представляет собой в целом нейтральное сочетание электрона с дыркой, то положение слабого внешнего электростатического поля, не способного нарушить связь между ними, не влияет и на хаотическое движение экситонов по кристаллической решётке и не создаёт, следовательно, электрического тока. Экситон при столкновениях с примесными центрами может либо "разорваться" и образовать два носителя заряда, либо рекомбинировать и перевести атом в невозбуждённое состояние. Первое требует сообщение экситону тепловой энергии, необходимой для перевода электрона с экситонного уровня в зону проводимости; второе сопровождается либо излучением кванта энергии, либо чаще всего отдачей энергии экситона решётке полупроводника в виде теплоты.

Поглощение света носителями заряда

Этот механизм поглощения обусловлен переходами свободных электронов и дырок с одного энергетического уровня на другой под воздействием квантов света внутри энергетических зон (соответственно, зоны проводимости для электрона и валентной - для дырки). Под действием электрического поля световой волны носители заряда совершают колебательные движения совместно с полем. Ускоряясь полем на длине свободного пробега, электроны (свободные) при столкновении с узлами решётки отдают накопленную кинетическую энергию. В результате энергия световой волны превращается в тепловую энергию решётки. Такой вид поглощения существует 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 (теоретическое рассмотрение показывает, что $\alpha \sim \lambda^2$). *При фиксированной λ показатель поглощения носителя заряда тем больше, чем выше концентрация носителей заряда в полупроводнике, т. е. чем меньше удельное сопротивление материала.*

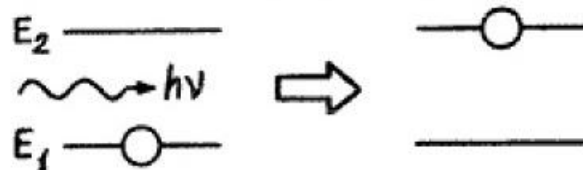


Рисунок 6 – Схема квантового перехода между энергетическими уровнями.

Фотопроводимость

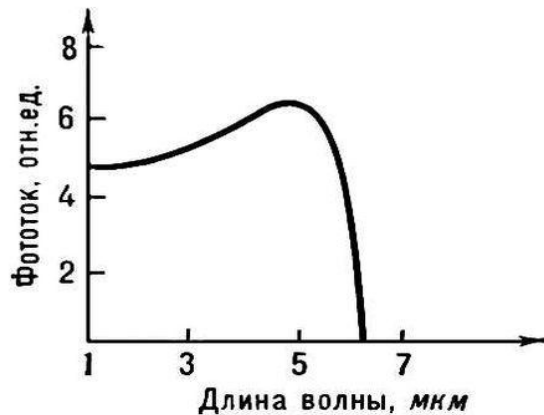


Рисунок 7 – Зависимость фототока от длины волны падающего излучения.

Явлением фотопроводимости называется увеличение электропроводности полупроводника под воздействием электромагнитного излучения.

При освещении полупроводника в нем происходит генерация электронно-дырочных пар за счет переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие этого проводимость полупроводника возрастает на величину:

$$\Delta\sigma = e (\mu_n \Delta n_i + \mu_p \Delta p_i),$$

где e – заряд электрона; μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок; Δn_i – концентрация генерируемых электронов; Δp_i – концентрация генерируемых дырок.

Поскольку 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).

Основные типы оптических детекторов

Наиболее важными типами оптических детекторов являются следующие устройства:

- полупроводниковый фоторезистор;
- фотоумножитель;
- фотодиод.

Схема полупроводникового фотодетектора приведена на рисунке.

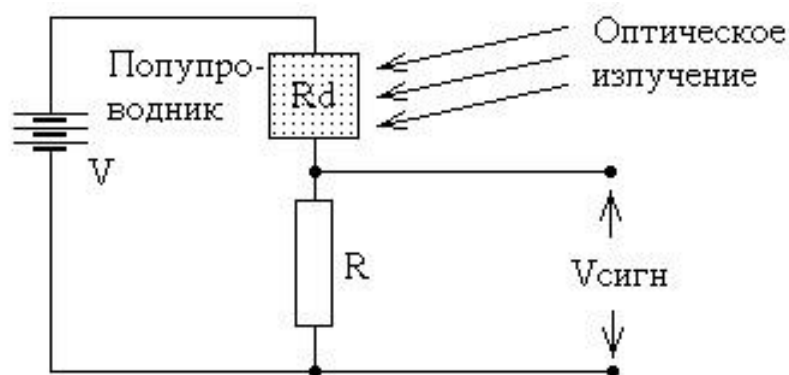


Рисунок 8 – Типовая схема включения детектора с фотосопротивлением

Фоторезисторы

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

Конструкция монокристаллического и пленочного фоторезисторов показана рисунках.

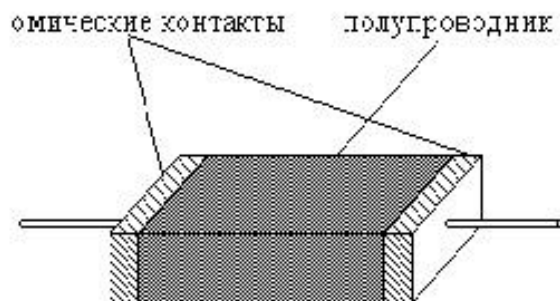


Рисунок 9 – Монокристалльный фоторезистор

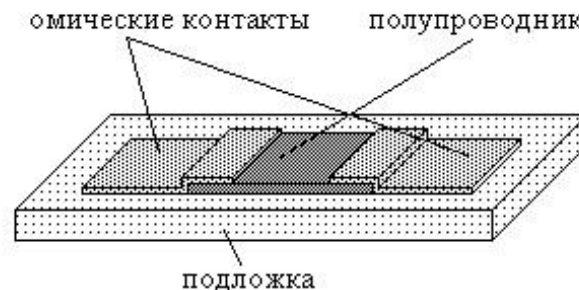


Рисунок 10 – Пленочный фоторезистор

Основным элементом фоторезистора является в первом случае монокристалл, а во втором – тонкая пленка полупроводникового материала.

Фоторезисторы

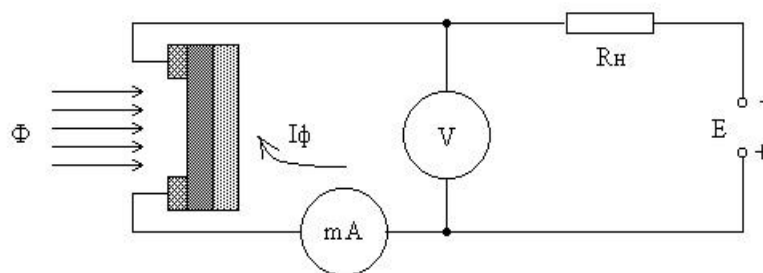


Рисунок 11 – Схема включения для изменения параметров и характеристик фоторезистора

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (схема включения показана на рисунке) 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.

Фоторезисторы

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:

$$I_c = E / (R_c + R_n).$$

Разность между световым и темновым током дает значение тока I_ϕ , получившего название первичного фототока проводимости:

$$I_\phi = I_c - I_T.$$

Основные характеристики фоторезисторов

Вольтамперная. Характеризует зависимость фототока (при постоянном световом потоке Φ) или темнового тока от приложенного напряжения. Для фоторезисторов эта зависимость практически линейна. Закон Ома нарушается в большинстве случаев только при высоких напряжениях на фоторезисторе.

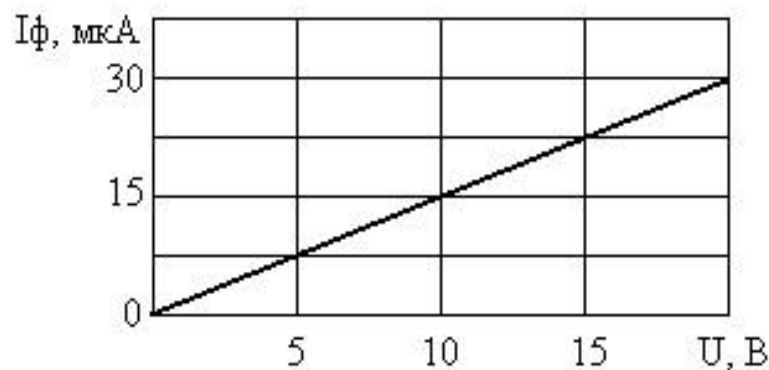


Рисунок 12 – Вольтамперная характеристики фоторезистора

Основные характеристики фоторезисторов

Световая (люксамперная). Характеризует зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава. Полупроводниковые фотрезисторы имеют нелинейную люксамперную характеристику. Наибольшая чувствительность получается при малых освещенностях. Это позволяет использовать фоторезисторы для измерения очень малых интенсивностей излучения. При увеличении освещенности световой ток растет примерно пропорционально корню квадратному из освещенности. Наклон люксамперной характеристики зависит от приложенного к фоторезистору напряжения.

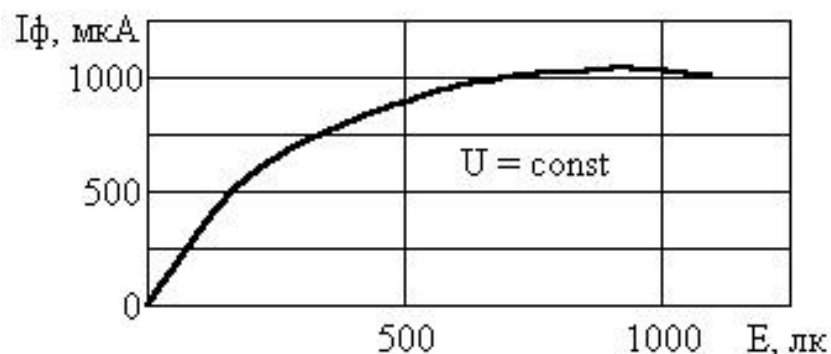
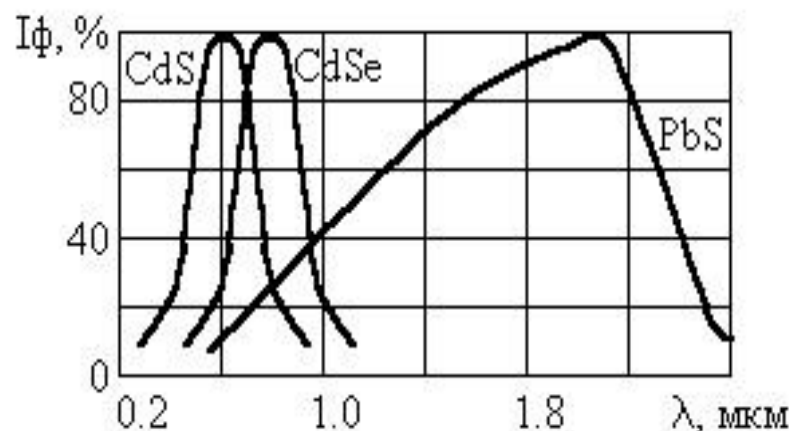


Рисунок 13 – Люксамперная характеристика фоторезистора

Основные характеристики фоторезисторов

Спектральная. Характеризует чувствительность фоторезистора при действии на него потока излучения постоянной мощности определенной длины волны. Спектральная характеристика определяется материалом, используемым для изготовления светочувствительного элемента. Сернисто-кадмиевые фоторезисторы имеют высокую чувствительность в видимой области спектра, селенисто-кадмиевые – в красной, а сернисто-свинцовые – в инфракрасной.

Рисунок 14 – Спектральные характеристики фоторезистора



Основные характеристики фоторезисторов

Частотная. Характеризует чувствительность фоторезистора при действии на него светового потока, изменяющегося с определенной частотой. Наличие инерционности у фоторезисторов приводит к тому, что величина их фототока зависит от частоты модуляции падающего на них светового потока – с увеличением частоты светового потока фототок уменьшается. Инерционность ограничивает возможности применения фоторезисторов при работе с переменными световыми потоками высокой частоты.

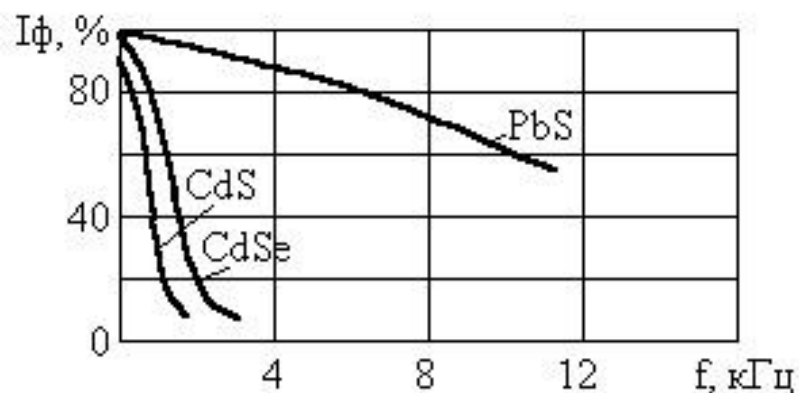


Рисунок 15 – Частотные характеристики фоторезистора

Характеристики фоторезисторов

При включении и выключении света фототок возрастает до максимума и спадает до минимума не мгновенно. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света.

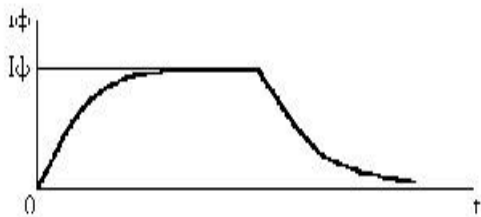


Рисунок 16 – Кривая релаксации фототока

При малом уровне инжекции нарастание и спад фототока во времени можно представить экспонентами с постоянной времени τ , равной времени жизни носителей в полупроводнике. В этом случае при включении света фототок i_ϕ будет нарастать и спадать во времени по закону:

$$i_\phi = I_\phi (1 - e^{-t/\tau}); \quad i_\phi = I_\phi e^{-t/\tau},$$

где I_ϕ – стационарное значение фототока при освещении.

Основные параметры фоторезистора

- **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).

Основные параметры фоторезисторов

- **Допустимая мощность рассеяния** – мощность, при которой не наступают 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):
 - $K_0 = I_\phi / (\Phi U)$.
- **Интегральная чувствительность** – произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение $S_{\text{инт}} = K_0 U_{\text{max}}$.
- **Постоянная времени** τ_ϕ – время, в течение которого фототок изменяется на 63%, т. е. в e раз.

Применение фоторезисторов

1. Датчики пересечения ИК-луча, для охранной сигнализации и промышленности с высокой помехоустойчивостью к оптическим помехам.
2. Измерители мощности импульсных ультрафиолетовых лазеров, фотоприемники для измерения распределения энергии по сечению пучка ультрафиолетового лазера.
3. Устройства для фотоприборов, измеряющих концентрацию сахара в жидкостях, и измеряющих влажность по отраженному свету от поверхности объекта.
4. Устройства и фоторезисторы для многоспектрального параллельного оптического анализа в цветной металлургии, геологии, для аэрокосмонавтики, и в других высокотехнологичных областях для научных исследований и контроля промышленных процессов.

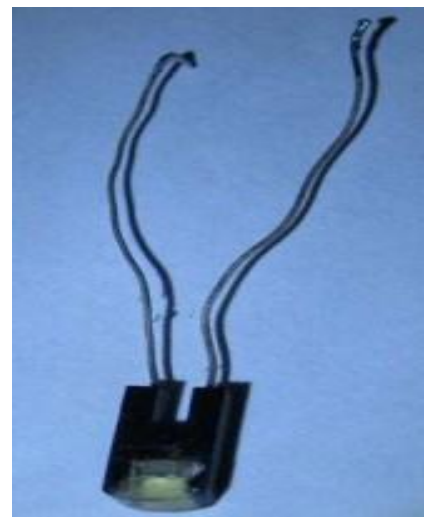


Рисунок 17 –
Фоторезистор СФ3-1.

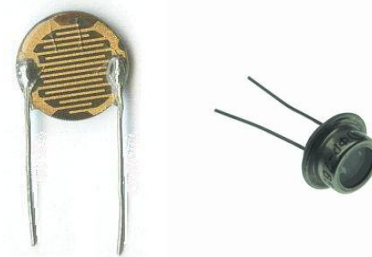


Рисунок 18 – Фоторезисторы.

Фотоумножители

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 10^5 раз и выше).

Фотоэлектронный умножитель состоит из входной (катодной) камеры (образуется поверхностями фотокатода, фокусирующих электродов, первого динода), умножительной динодной системы, анода и дополнительных электродов. Все элементы размещаются в вакуумном корпусе (баллоне).

Наиболее распространены ФЭУ, в которых усиление потока электронов осуществляется при помощи нескольких специальных электродов изогнутой формы — «динодов», обладающих коэффициентом вторичной эмиссии больше 1. Для фокусировки и ускорения электронов на анод и диноды подаётся высокое напряжение (600—3000 В).

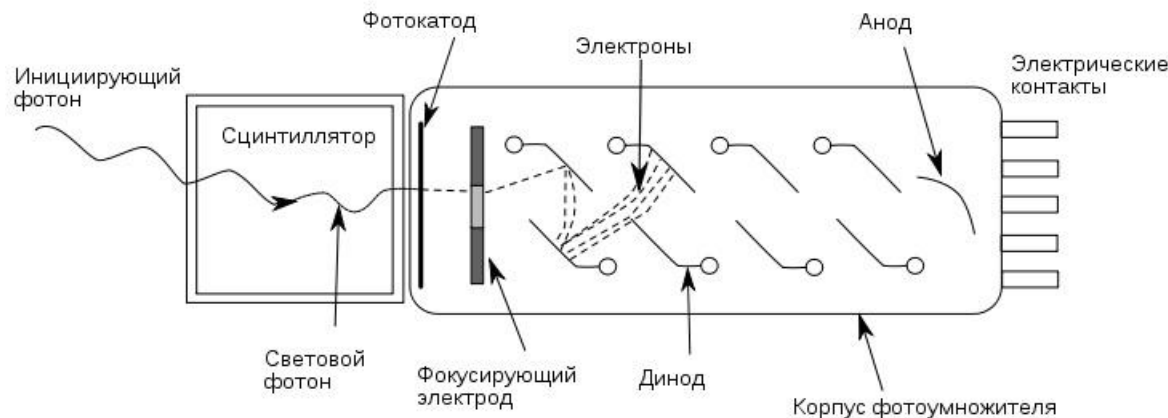


Рисунок 19 – Схема фотоэлектронного умножителя.

Применение фотоумножителей

1. Спектрометрия — сцинтилляционные счётчики.
2. Ядерная физика — в установках для изучения кратковременных процессов (временные ФЭУ).
3. Оптика, телевидение, лазерная техника.
4. Хемилюминесценция.
5. Физика элементарных частиц - для регистрации нейтрино (Проекты "Полтергейст", AMANDA).



Рисунок 20 – Фотоумножитель.

Фотодиоды

Д — приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в р-п-переходе.

(Режимы работы фотодиода) Фотодиод может работать в двух режимах:

- фотогальванический — без внешнего напряжения;
- фотодиодный — с внешним обратным напряжением.

Особенности:

- простота технологии изготовления и структуры;
- сочетание высокой фоточувствительности и быстродействия;
- малое сопротивление базы;
- малая инерционность.

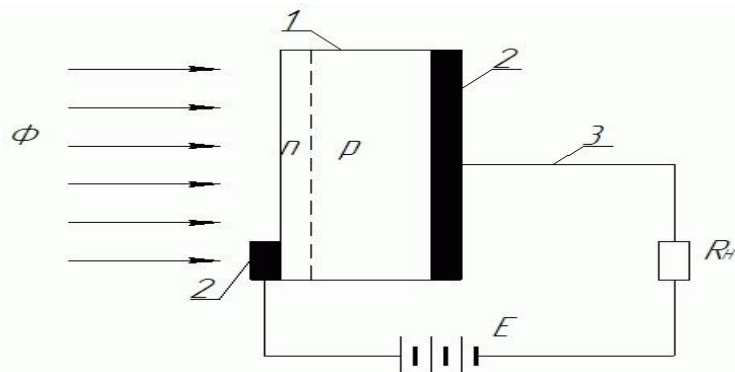


Рисунок 21 - Структурная схема фотодиода:

1 — кристалл полупроводника;

2 — контакты;

3 — выводы;

Φ — поток электромагнитного излучения;

E — источник постоянного тока;

R_H — нагрузка.

Фотодиоды

Принцип работы:

При воздействии квантов излучения в базе происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе р-п-перехода. Ширина базы (п-область) делается такой, чтобы дырки не успевали рекомбинировать до перехода в р-область. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей — дрейфовым током. Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем р-п-перехода и ёмкостью р-п-перехода C_{p-n} .

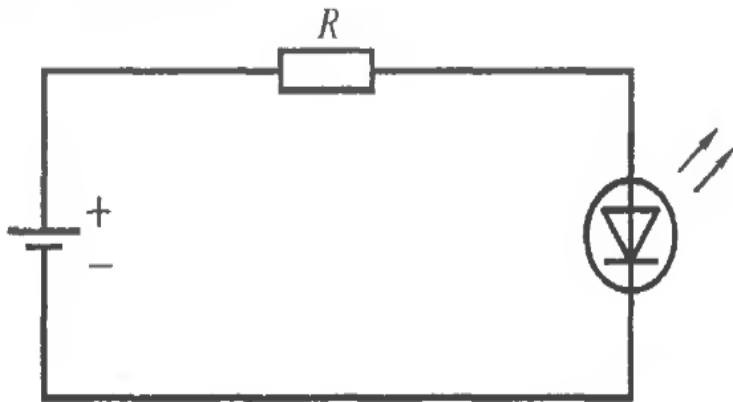


Рисунок 22— Схема включения фотодиода.



Рисунок 23 – Фотодиоды.

Классификация фотодиодов

- **p-i-n фотодиод.**

В p-i-n структуре средняя i-область заключена между двумя областями противоположной проводимости.

- **Фотодиод Шоттки** (фотодиод с барьером Шоттки).

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник p-типа.

- **Лавинный фотодиод.**

В структуре используется лавинный пробой. Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны.

- **Фотодиод с гетероструктурой.**

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Один слой p+ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области.

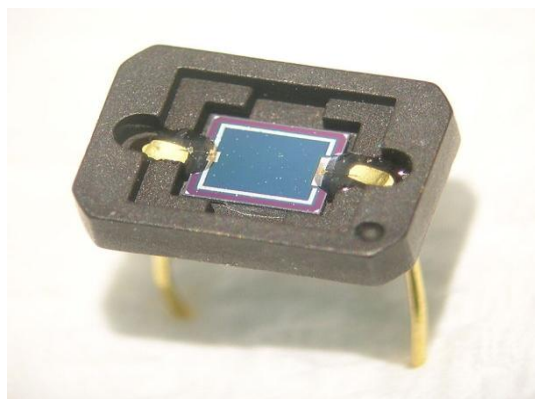


Рисунок 24 – Фотодиод.

Применение фотодиодов

1. Датчики освещения.
2. Датчики положения (сигнал с фотодиода зависит от того, перекрыл исследуемый объект поток света или нет).
3. Устройства гальванической развязки электрических сигналов (оптроны).
4. Волоконно-оптические линии связи.
5. Солнечные батареи.



Рисунок 25— Фотодиоды.

THE END.