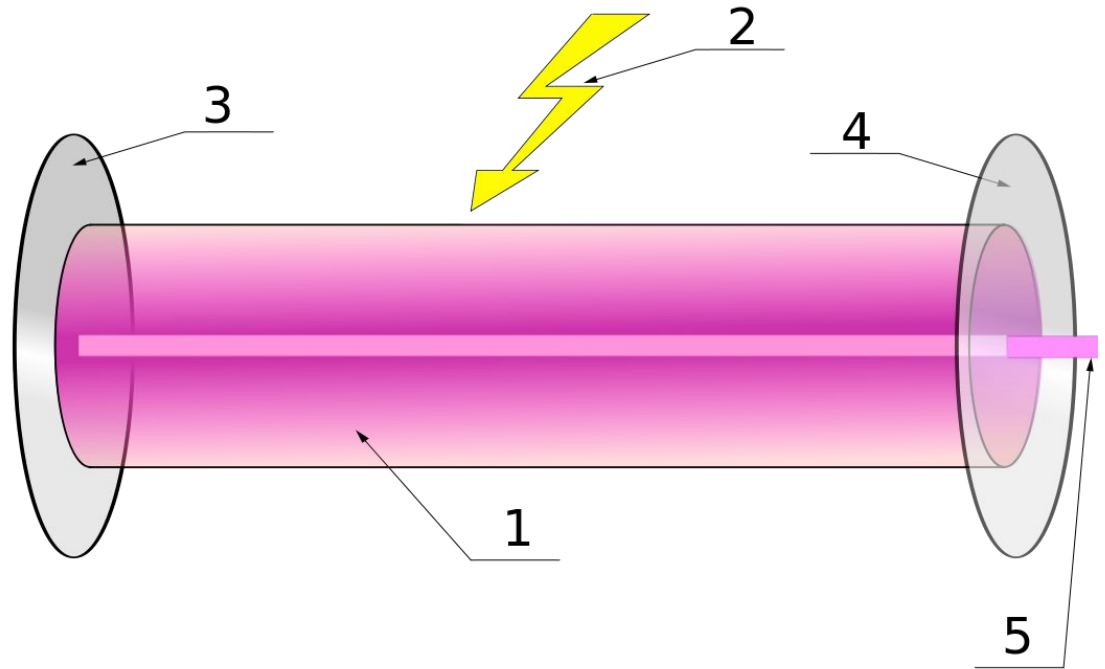
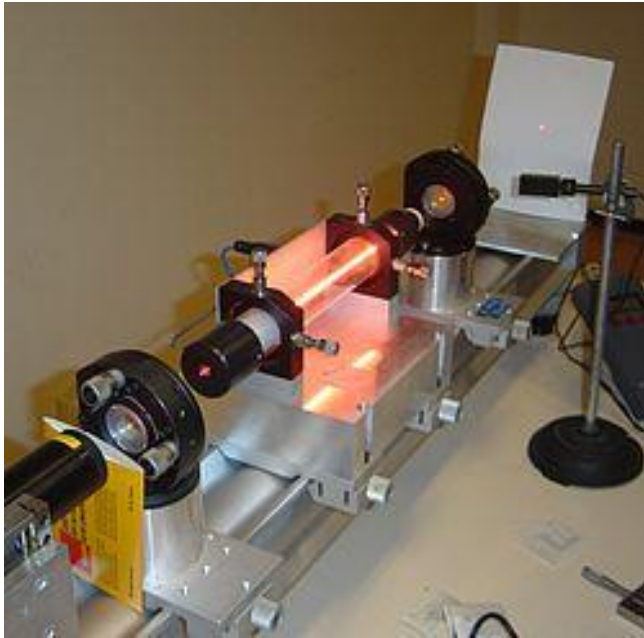


Оптические устройства в системах передачи информации

Лекция 3. Лазеры, модуляторы и приемники оптических сигналов

Устройство лазера



Гелий-неоновый лазер

Светящийся луч в центре — это не собственно лазерный луч, а электрический разряд, порождающий свечение, подобно тому, как это происходит в неоновых лампах. Луч проецируется на экран справа в виде светящейся красной точки.

На схеме обозначены:
1 - активная среда;
2 - энергия накачки лазера;
3 - непрозрачное зеркало;
4 - полупрозрачное зеркало;
5 - лазерный луч.

Условие возбуждение мод

Условие: Электромагнитная волна после прохождения резонатора «туда» и «обратно» должна складываться в фазе сама с собой, т.е. фазовый набег должен быть кратен 2π .

Баланс

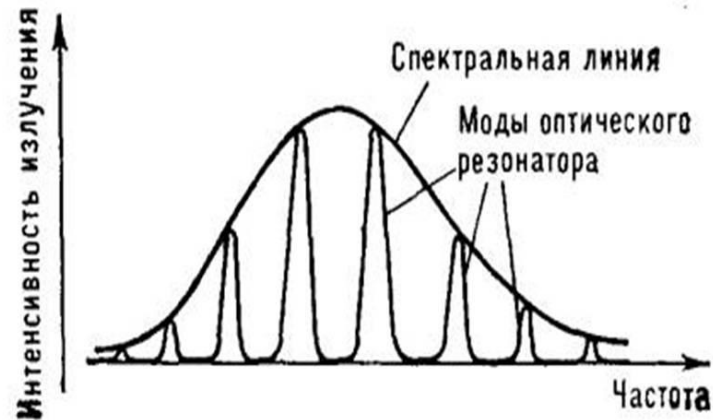
фазы
$$L = m \cdot \lambda / 2$$

λ - длина волны,
 m – целое число,
 L – оптическая длина резонатора

Длины волн мод резонатора:

$$\lambda_m = \frac{2L}{m}$$

Спектр, линия активной среды и моды оптического резонатора



Интервал между соседними модами резонатора:

$$\Delta\lambda = \frac{2L}{m(m+1)} = \frac{\lambda_m^2}{m}$$

Условие возбуждение мод

Условие: Интенсивность электромагнитной волны после прохождения резонатора «туда» и «обратно» не должна уменьшаться.

Баланс

$$I_0 = I_0 \exp(\beta L - \alpha L) R_1 \exp(\beta L - \alpha L) R_2$$

I_0 – интенсивность,

β – коэффициент усиления,

α – коэффициент усредненных потерь

R_1 и R_2 – коэффициенты отражения от зеркал

$$\beta = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \text{– коэффициенты усиления при котором}$$

начинается

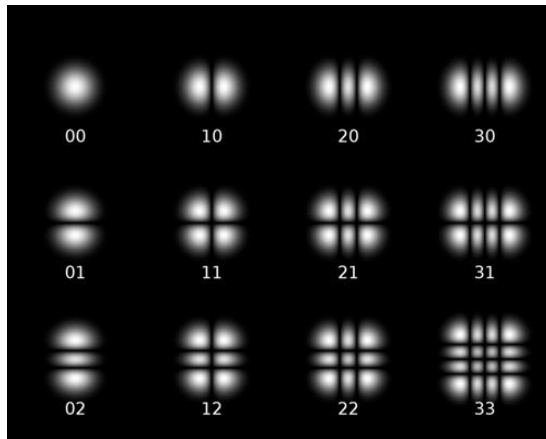
$$I_{\text{ВЫХ}} = I_0 (1 - R_1)$$

лазерная генерация

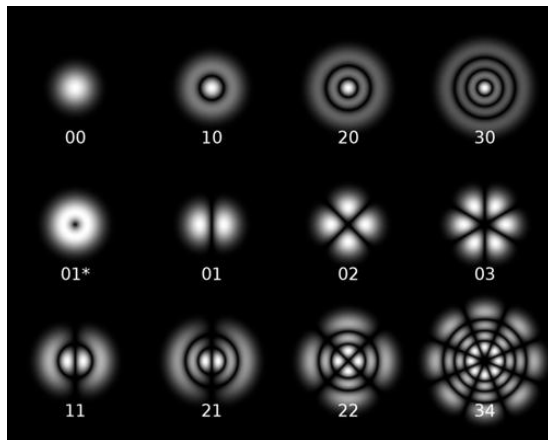
R_1 – коэффициенты отражения от полупрозрачного зеркала

$\alpha = \alpha(I)$ – коэффициенты усиления нелинейен и ограничивает выходую мощность лазера

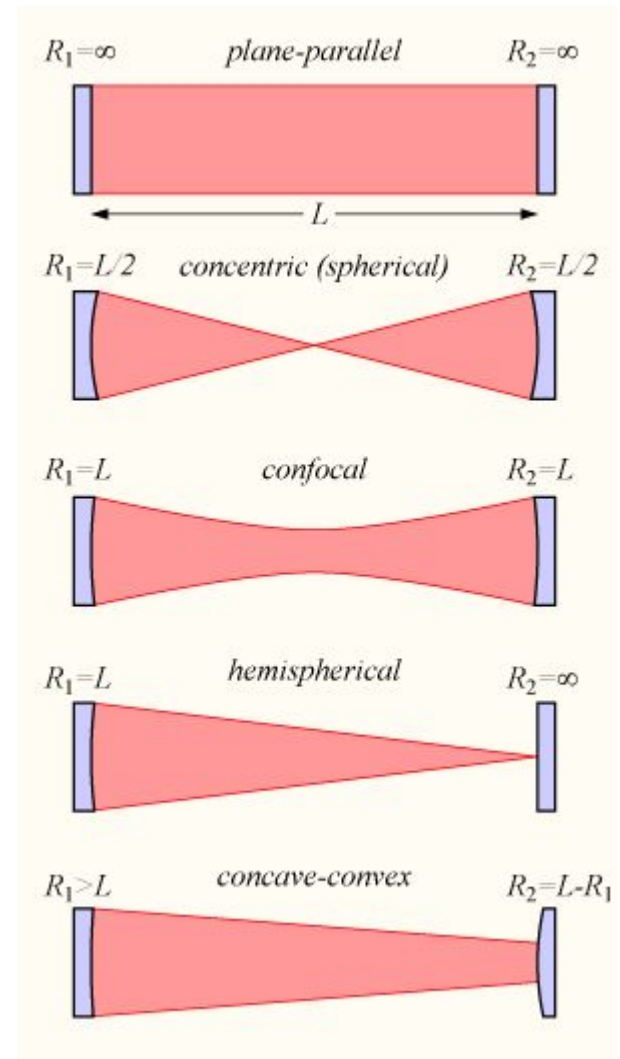
Резонатор лазера



Поперечные моды оптического резонатора с плоскими зеркалами



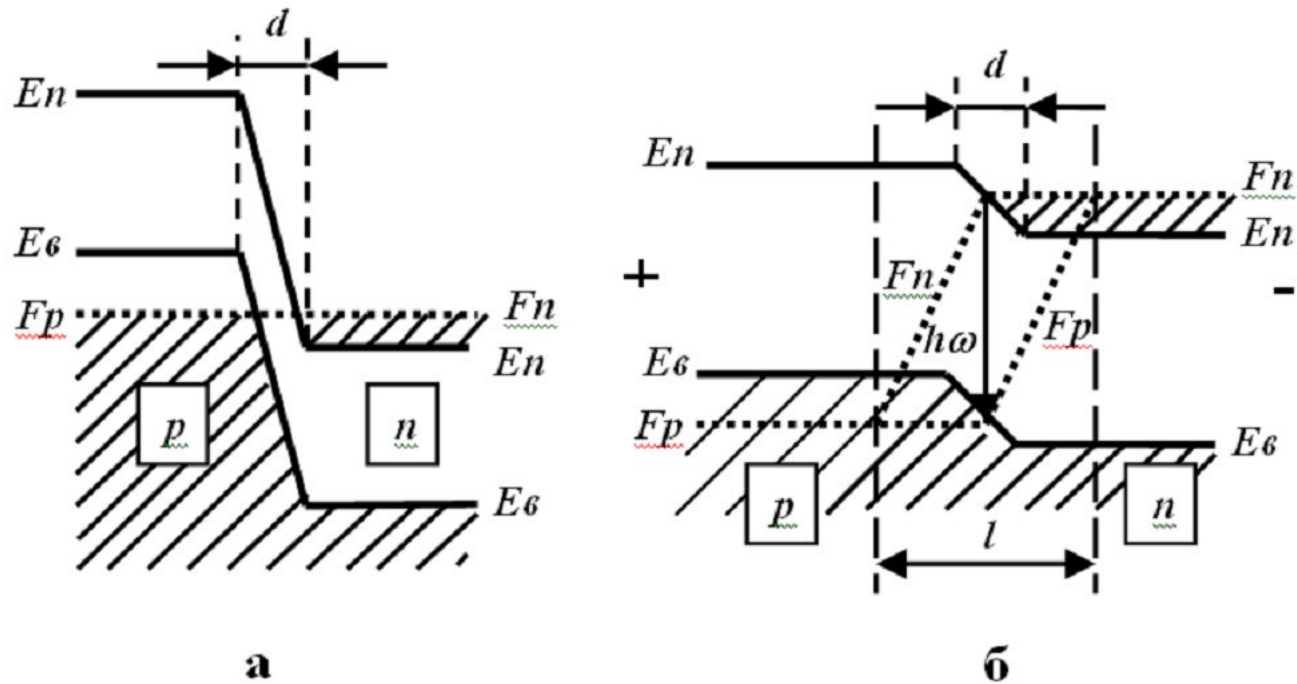
Поперечные моды оптического резонатора со сферическими зеркалами



Типы двухзеркальных резонаторов

Полупроводниковый лазер

Полупроводниковый лазер



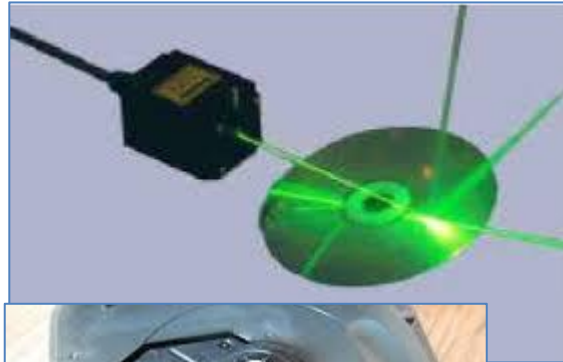
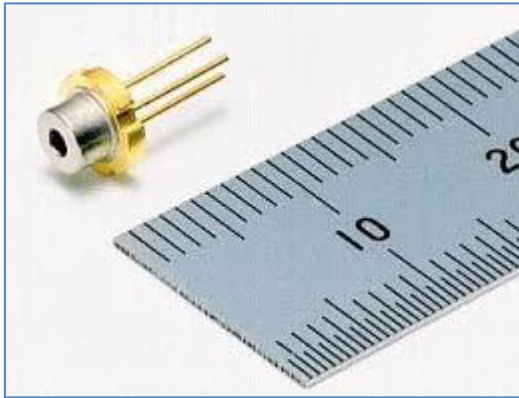
а

б

Энергетическая диаграмма инжекционного полупроводникового лазера:
p-n переход без приложенного внешнего напряжения (а);
p-n переход при приложении внешнего напряжения в прямом направлении (б).

d - ширина p-n перехода, l - реальная ширина области, обеспечивающей работу лазера.

Применение полупроводниковых лазеров



CD / DVD / BlueRay / ...



Указки



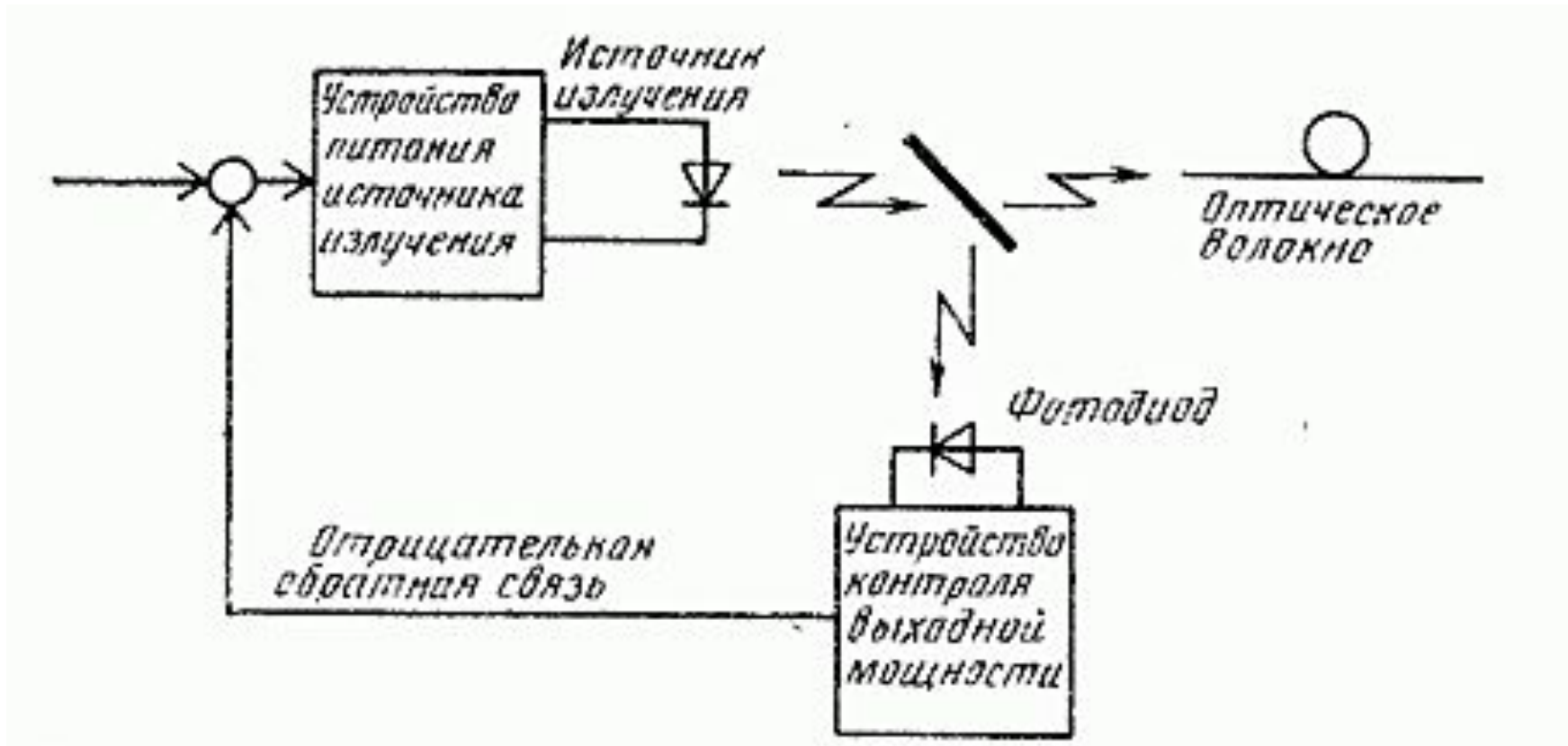
Free Space Optics



Лазерный принтер

Оптические модуляторы

Прямая модуляция интенсивности

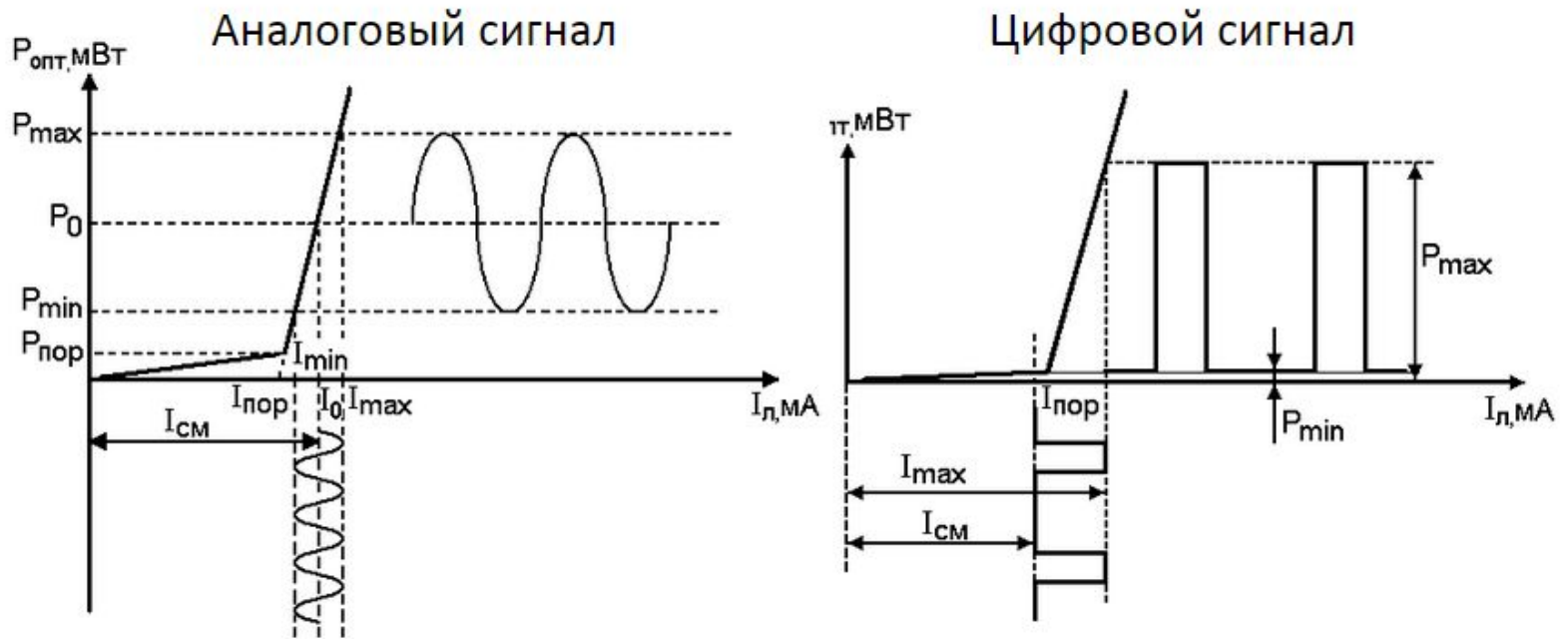


Недостатки:

- нелинейный коэффициент передачи
- изменение параметров источника света (фазы, частоты) при изменении интенсивности излучения

Прямая модуляция интенсивности в лазере

Варианты прямой (непосредственной) модуляции лазера аналоговым и цифровым сигналами.



$$I_0 = I_0 R_2 R_1 \exp(2\beta(i)L - 2\alpha L)$$

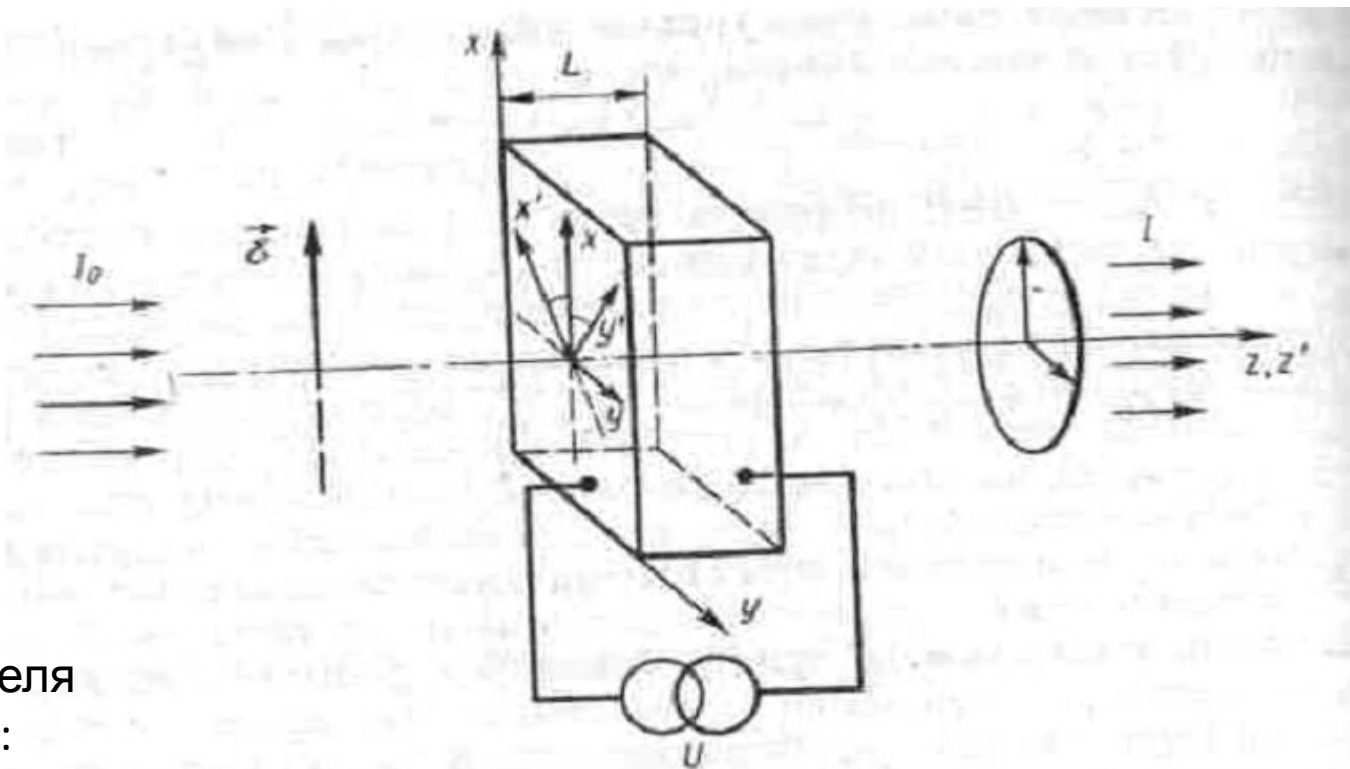
i – величина тока протекающего через активную среду в тв. тел. лазерах

Модуляция с использованием электрооптического эффекта

ПОККЕЛЬСА ЭФФЕКТ - линейный электрооптич. эффект, состоящий в изменении показателей преломления света в кристаллах под действием внеш. электр. поля пропорционально напряжённости электр. поля E . Следствием этого эффекта в кристаллах является **двойное лучепреломление** или изменение величины уже имеющегося двулучепреломления.

Изменение показателя преломления:

$$\Delta n = \Delta n(\vec{E})$$



Изменение показателя фазового набегга:

$$\Delta \phi(\vec{E}) = L \cdot \Delta n(\vec{E})$$

L – длина фазового модулятора

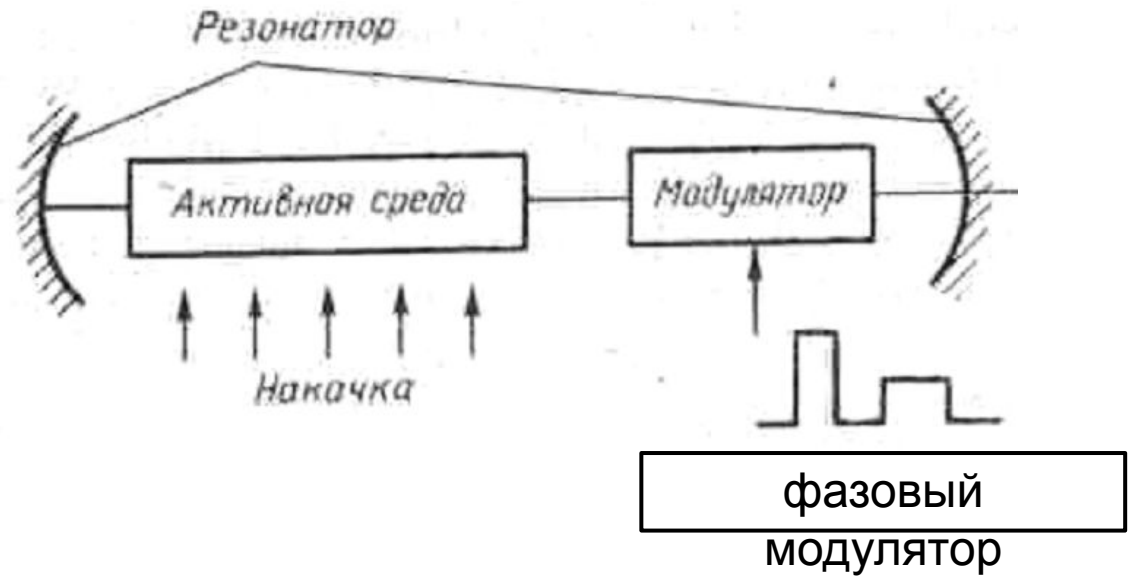
Различные виды модуляции с использованием электрооптического эффекта

1. Изменение показателя преломления (фазового набега) = Фазовая модуляция
2. Изменение показателя преломления + Резонатор лазера = Частотная модуляция
3. Изменение плоскости поляризации + Поляризатор = Внешняя (непрямая) модуляция интенсивности
4. Изменение показателя преломления + Интерферометр = Внешняя (непрямая) модуляция интенсивности

Частотная модуляция

Баланс
фазы

$$2L \cdot \frac{2\pi}{\lambda_m} + 2\Delta\phi = 2\pi$$



Без модулятора

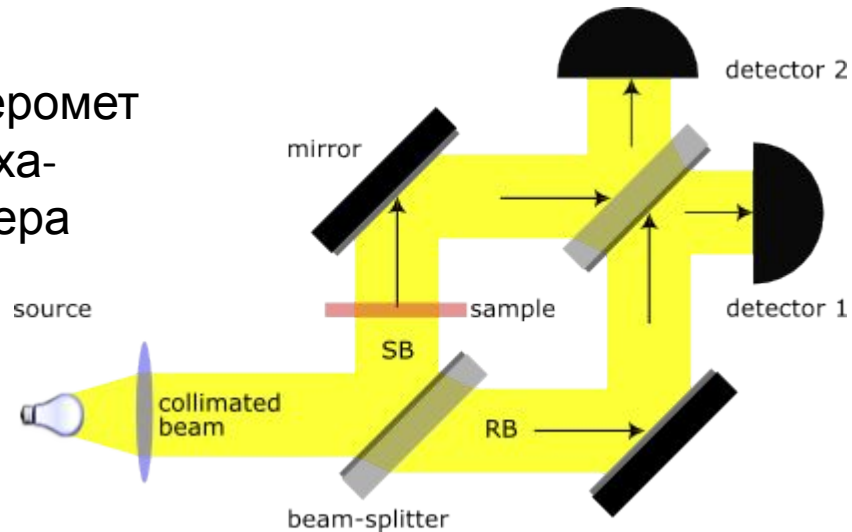
$$\lambda_m = \frac{2L}{m}$$

С модулятором

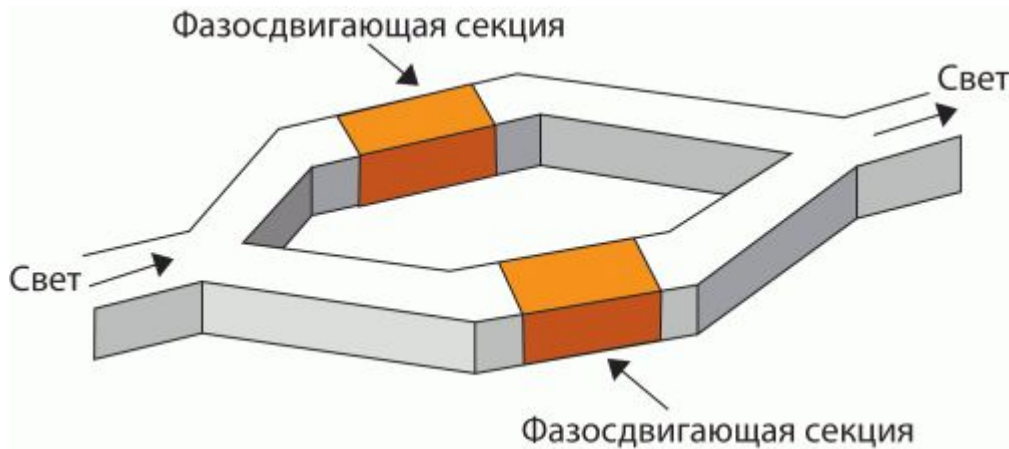
$$\lambda(\Delta\phi) = \frac{2L}{m} + \frac{\Delta\phi}{2\pi m} = \lambda_m + \frac{\Delta\phi}{2\pi m}$$

Амплитудная интерференционная модуляция

Интерферометр
р Маха-
Цандера



Интерферометр Маха-Цандера на
оптических волноводах



Интенсивность на
входе $I_0 = |A_0|^2$

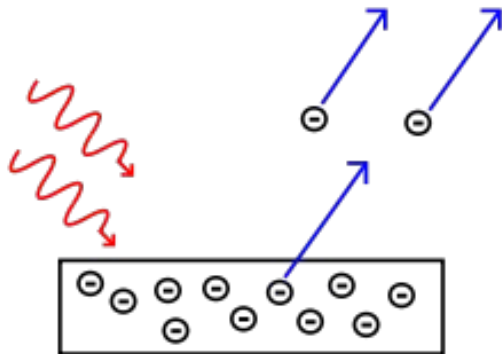
Интенсивность в
плечах $I_1 = \left| \frac{A_0}{2} \right|^2 = I_2 = \left| \frac{A_0}{2} e^{i\phi} \right|^2$

Интенсивность на
выходе $I_0 = \left| \frac{A_0}{2} + \frac{A_0}{2} e^{i\phi} \right|^2 = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \phi)$

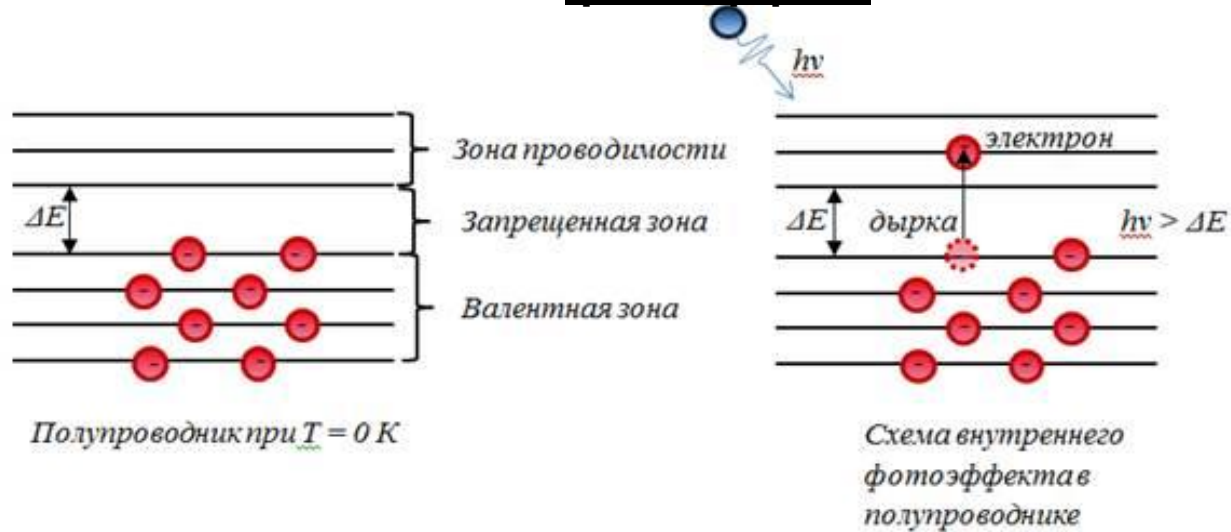
Оптические приемники

Фотоэффект

Внешний фотоэффект



Внутренний фотоэффект



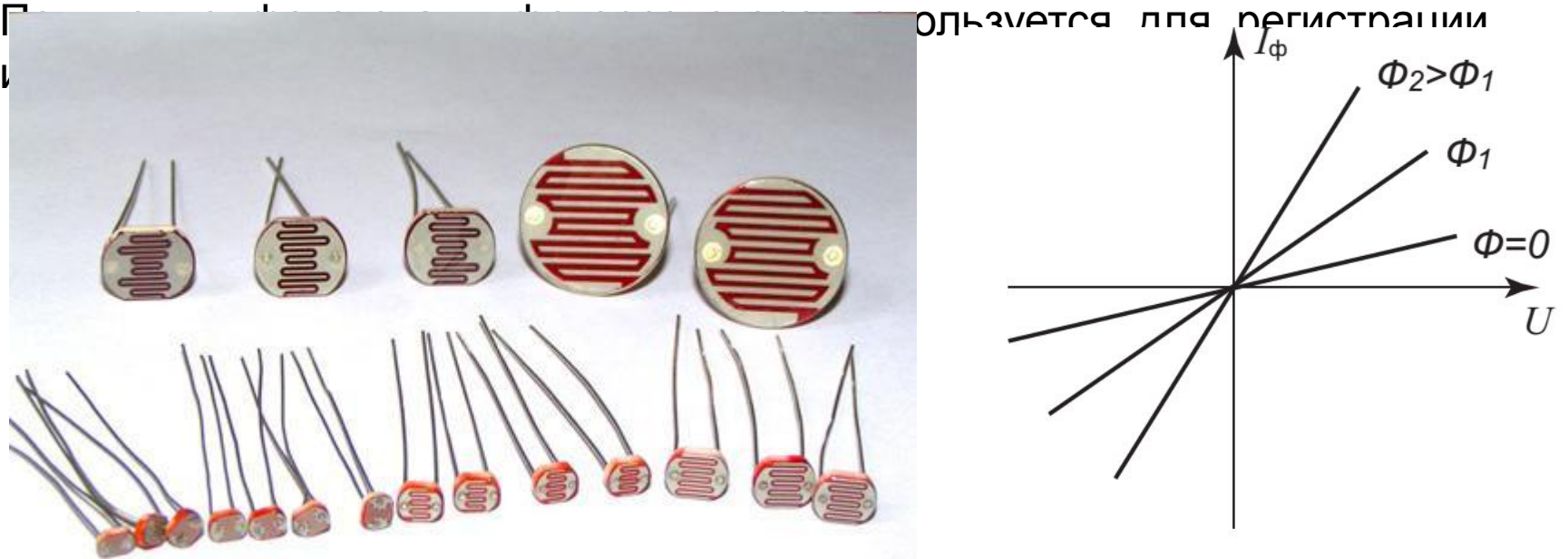
Особенности фотоэффекта: красная граница, зависимость тока от числа фотонов

Фоторезисторы

Фоторезистор - полупроводниковый прибор, обладающий свойством изменять свое электрическое сопротивление под воздействием оптического излучения.

Через фоторезистор, включенный в электрическую цепь, содержащую источник постоянного тока, протекает электрический ток.

При облучении фоторезистора ток увеличивается в результате появления фототока, который пропорционален уровню воздействующего сигнала и совсем не зависит от полярности приложенного к фоторезистору напряжения.



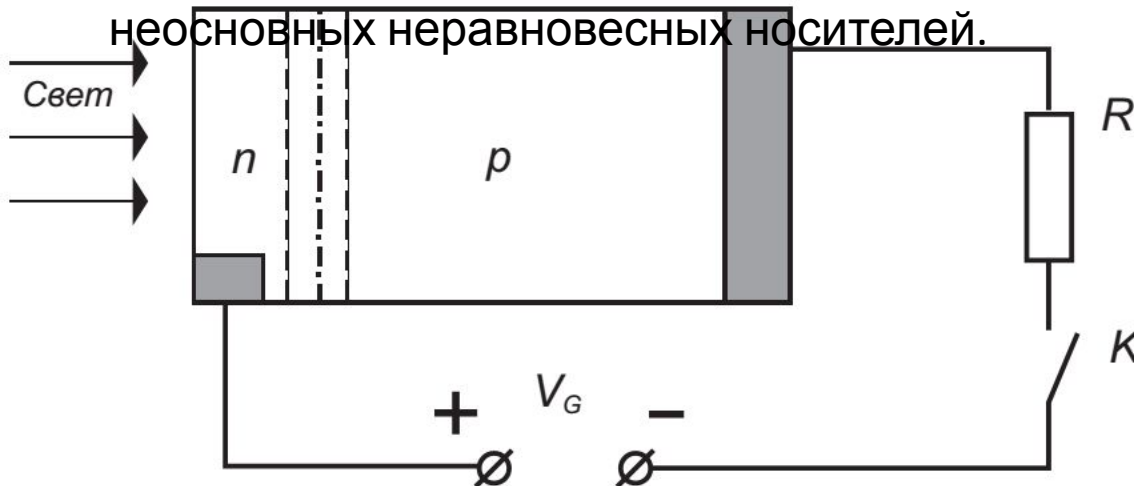
Быстродействие фоторезисторов невелико, поэтому работать они могут лишь **на очень низких частотах**

Полупроводниковые фотодиоды

При попадании кванта света с энергией $h\nu$ в полосе собственного поглощения в полупроводнике возникает пара неравновесных носителей – электрон и дырка. При регистрации электрического сигнала необходимо зарегистрировать изменение концентрации носителей.

В фотодиодах на основе р-п переходов используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода созданных оптическим излучением

неосновных неравновесных носителей.



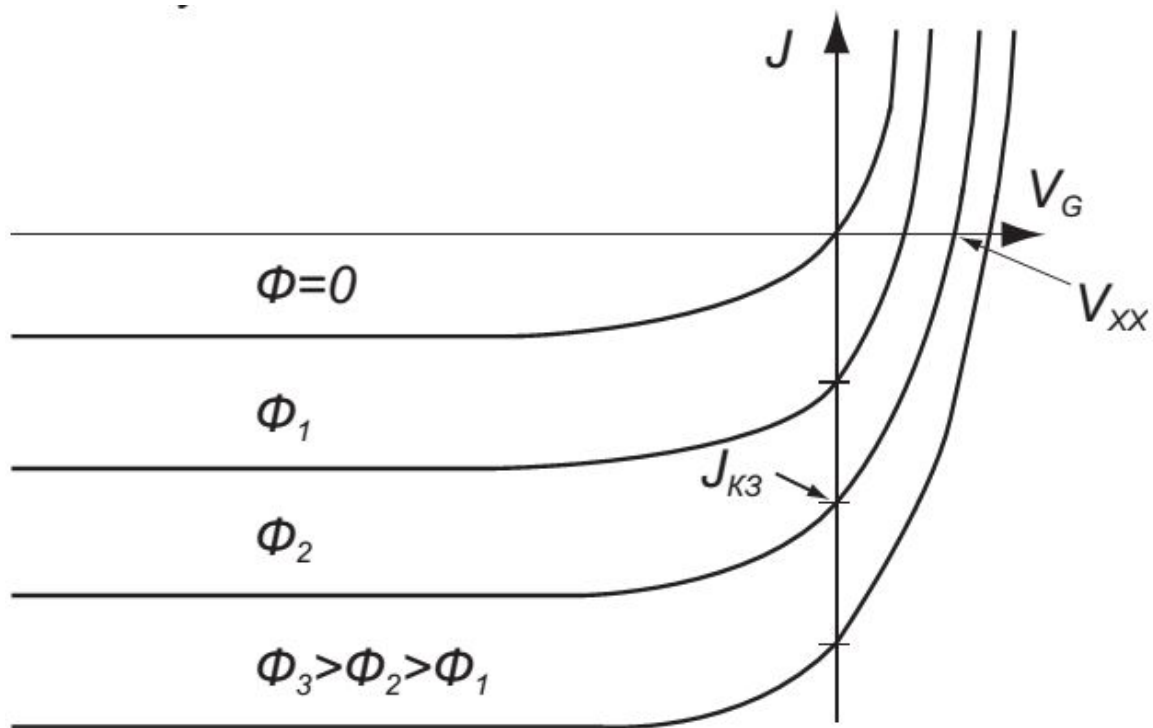
Схематическое изображение фотодиода и схема его включения.

n – эмиттер, p – база фотодиода



Полупроводниковые фотодиоды

Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных уровнях освещения



Полупроводниковые фотодиоды

Конструкции наиболее распространенных фотодиодов

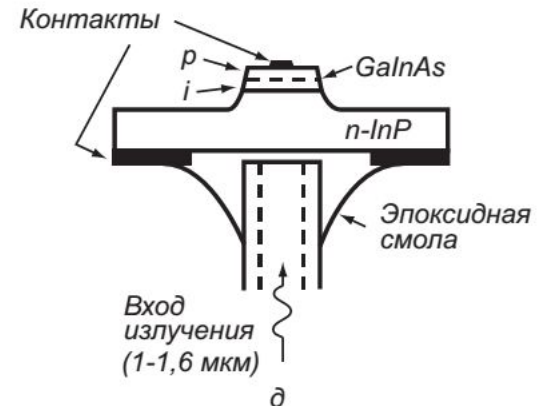
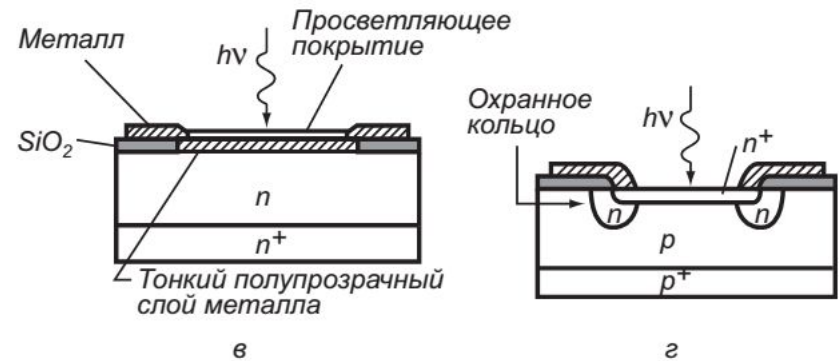
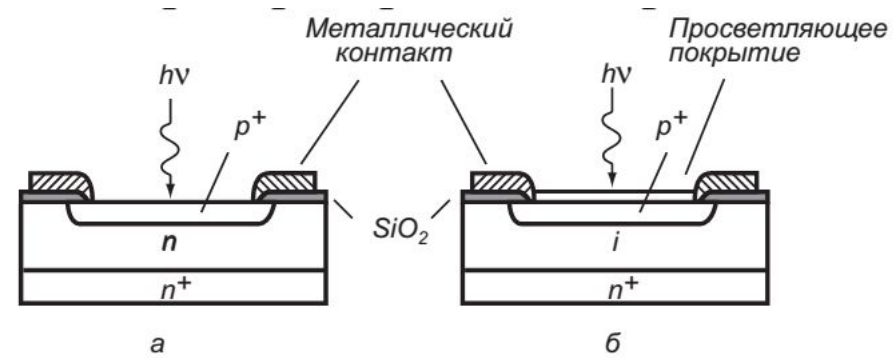
а) фотодиод на основе p-n перехода,

б) p-i-n фотодиод,

в) фотодиод на основе барьера Шоттки,

г) фотодиод основе p-n перехода с лавинным умножением,

д) фотодиод на основе p-i-n гетероструктуры



Полупроводниковые p-i-n фотодиоды

PIN-диод — разновидность диода, в котором между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственный полупроводник (i-область).



При достаточно большом напряжении оно пронизывает i-область, и свободные носители, появившиеся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем p-n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в p-i-n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле.

Достоинства:

- 1) есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i-области.
- 2) высокая чувствительность и быстродействие
- 3) малое рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$

Недостатки: сложность получения высокой чистоты i-области

Полупроводниковые р-і-п фотодиоды

При проектировании ріп-диода приходится искать компромисс: с одной стороны, увеличивая величину i -области (а соответственно, и количество накопленного заряда) можно добиться резистивного поведения диода на более низких частотах, но с другой стороны, при этом для рекомбинации заряда и перехода в закрытое состояние потребуется *большее время*.

ріп-диод может использоваться в сетевых картах и коммутаторах для волоконно-оптических кабелей.

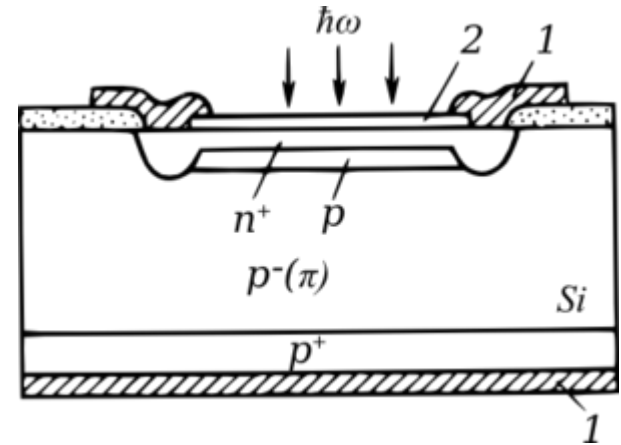
В качестве фотодетектора ріп-диод работает при обратном смещении. При этом он закрыт и не пропускает ток (за исключением незначительного тока утечки). Фотон входит в i -область, порождая образование электронно-дырочных пар. Носители заряда, попадая в электрическое поле ОПЗ, начинают двигаться к высоколегированным областям, создавая электрический ток, который может быть детектирован внешней цепью. Проводимость диода зависит от длины волны, интенсивности и частоты модуляции падающего излучения.

Лавинные фотодиоды

Лавинные фотодиоды — высокочувствительные полупроводниковые приборы, преобразующие свет в электрический сигнал за счёт **фотоэффекта**.

При подаче сильного обратного смещения (близкого к напряжению лавинного пробоя, обычно порядка нескольких сотен вольт для кремниевых приборов), происходит усиление фототока (примерно в 100 раз) за счёт ударной ионизации (лавинного умножения) генерированных светом носителей заряда.

Суть процесса в том, что энергия образовавшегося под действием света электрона увеличивается под действием внешнего приложенного поля и может превысить порог ионизации вещества, так что столкновение такого «горячего» электрона с электроном из валентной зоны может привести к возникновению новой электрон-дырочной пары, носители заряда которой также будут ускоряться полем и могут стать причиной образования всё новых и новых носителей заряда.

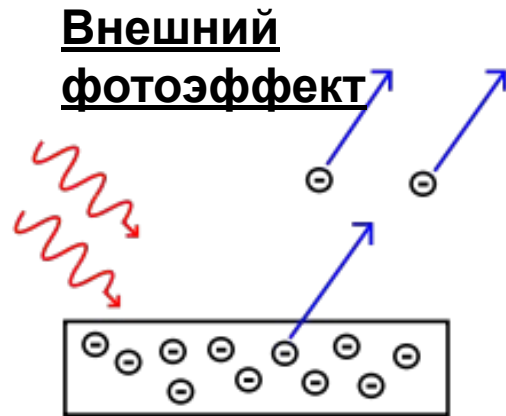


Структура лавинного фотодиода на основе кремния:

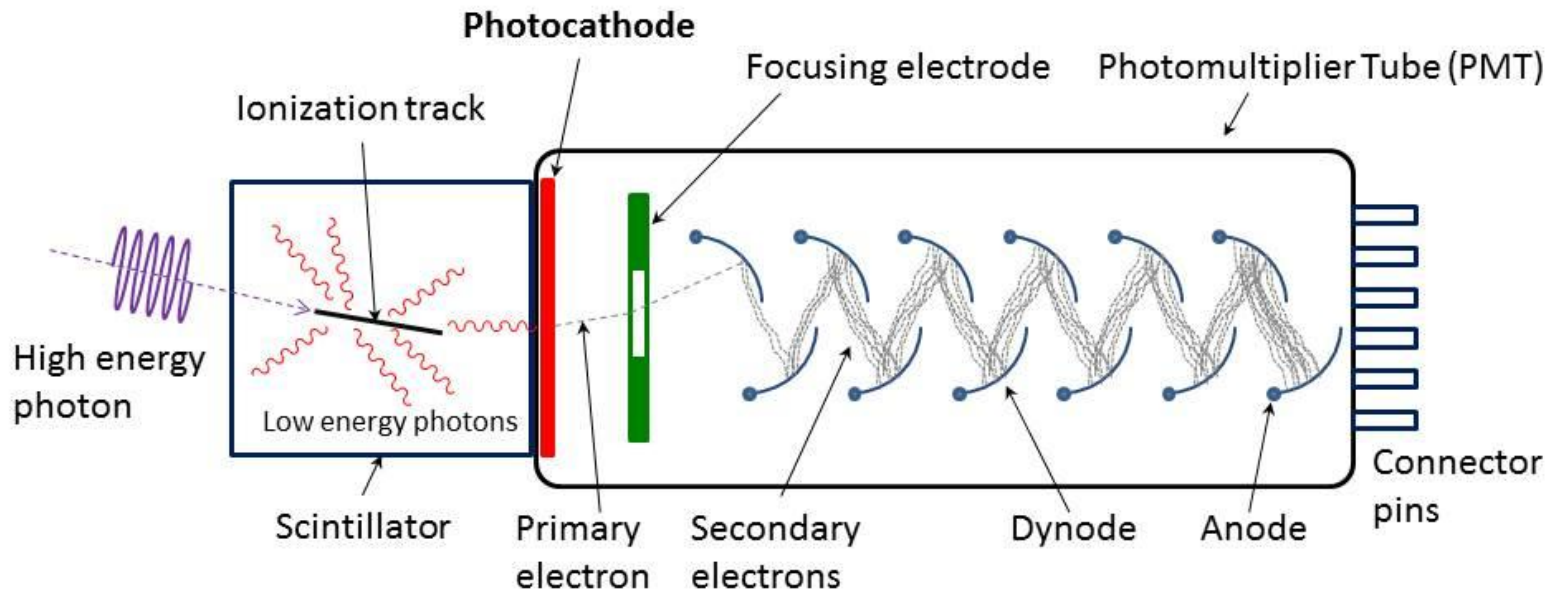
1 — омические контакты,
2 — антиотражающее покр



Фотоэффект

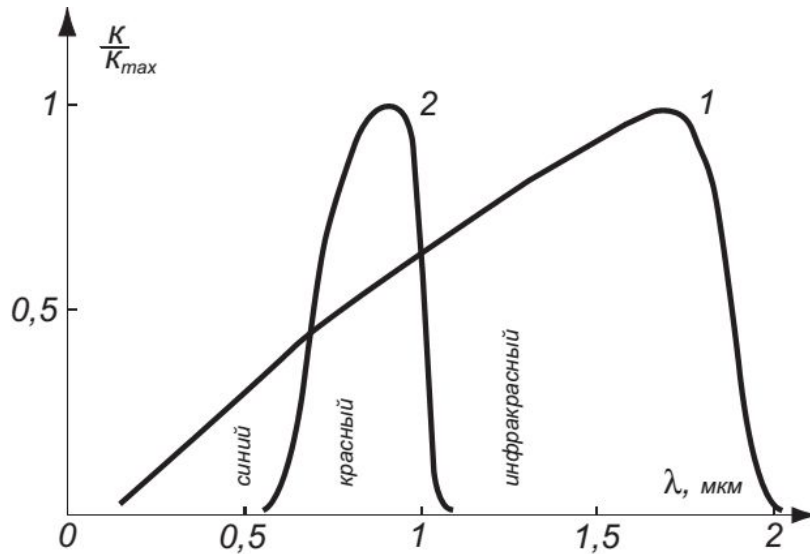


фотоумножитель



Полупроводниковые фотодиоды

Красная граница фотоэффекта и спектральная чувствительность



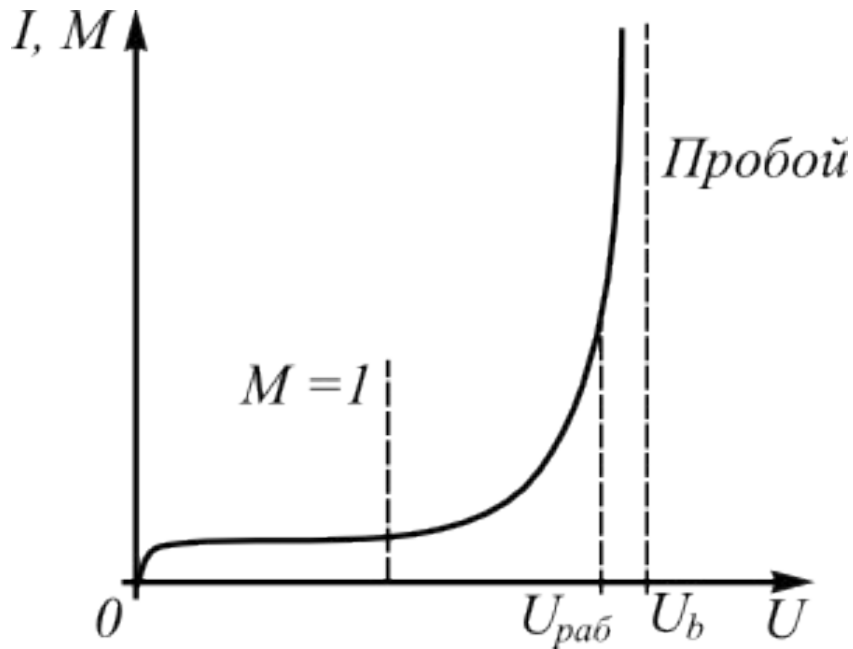
Кривые спектральной чувствительности:

- 1) германиевого,
- 2) кремниевого фотодиодов

Величину светового потока Φ будем поддерживать постоянной при любой длине волны света.

Зависимость фототока $J\Phi(\lambda)$ будет определяться зависимостью квантового выхода $\eta(\lambda)$ и коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ от длины волны

Лавинные фотодиоды



Зависимость тока (I) и коэффициента умножения (M) от обратного напряжения (U) на ЛФД.

Ограничения на скорость работы накладывают ёмкости, времена транзита электронов и дырок и время лавинного умножения. Ёмкость увеличивается с ростом площади переходов и уменьшением толщины. Время транзита электронов и дырок возрастает с увеличением толщины, что заставляет идти на компромисс между емкостью и временем. Задержки, связанные с лавинным умножением определяются структурой диодов применяемыми материалами, существует зависимость от .

Литература

1. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации. СПб. 2007.
2. Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем. МИРЭА 2010