

Тема 4

Принципы построения
приемных и передающих
оптических модулей ВОСП

Содержание темы

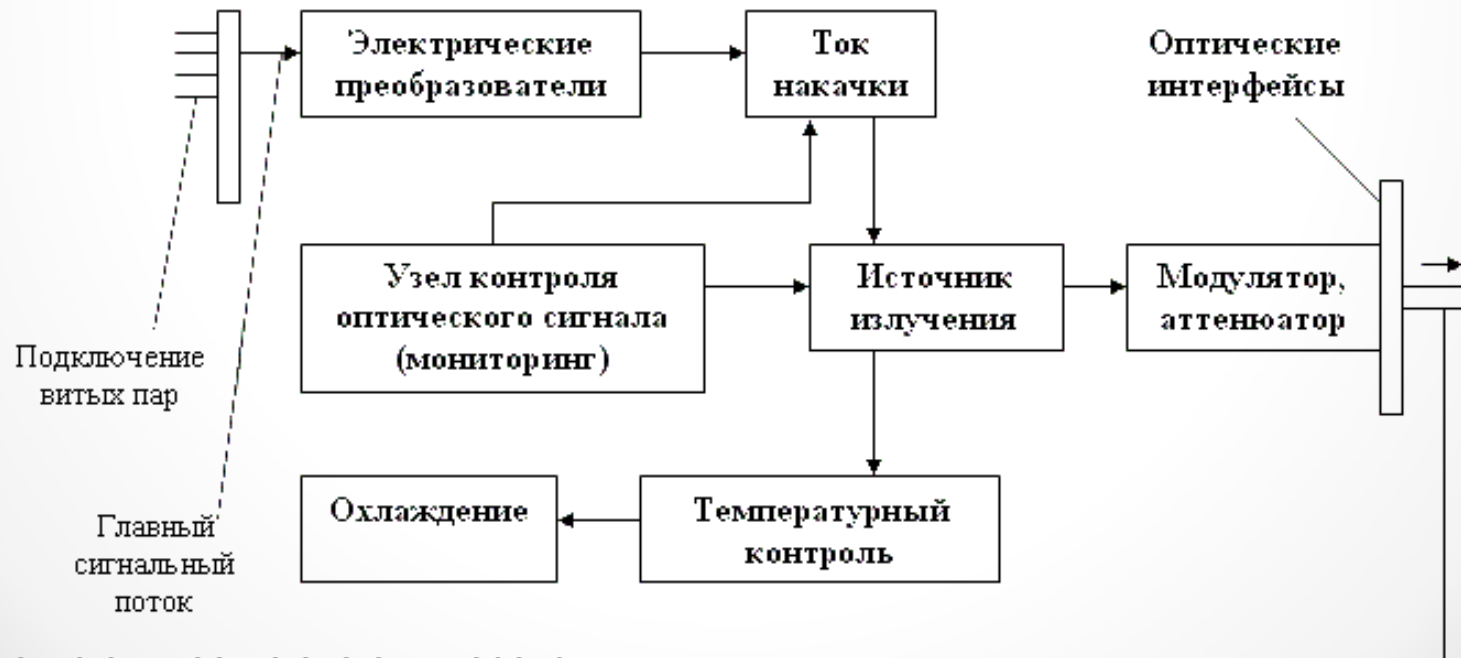
- Структура передающего оптоэлектронного модуля.
- Типы источников оптического излучения.
- Полупроводниковые лазеры.
- Физический механизм работы лазеров.
- Типы полупроводниковых лазеров.
- Светодиоды. Конструкция, принцип работы, основные характеристики.
- Сравнительная характеристика лазеров и светодиодов.

Содержание темы

- Структурная схема приемного оптоэлектронного модуля.
- Р-і-n-фотодиоды. Конструкция, основные характеристики.
- Лавинные фотодиоды. Конструкция, основные характеристики.
- Оптические трансиверы.

Структура передающего оптоэлектронного модуля

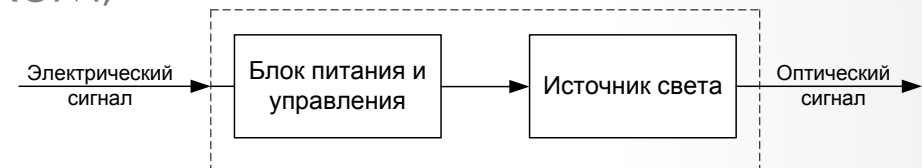
Передающий оптоэлектронный модуль (ПОМ) или оптический передатчик обеспечивает преобразование входного электрического (цифрового или аналогового) сигнала в выходной оптический сигнал.



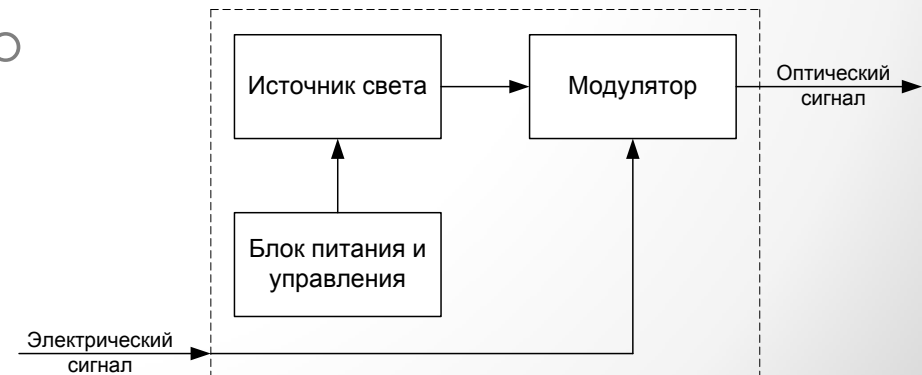
Передающий оптоэлектронный модуль

По характеру модуляции ПОМ делятся на:

- передатчики с **прямой (внутренней) модуляцией** – мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током;



- передатчики с **внешней модуляцией** – непрерывное оптическое излучение модулируется внешним модулятором, что обеспечивает формирование оптического сигнала с минимальной спектральной шириной.



Передающий оптоэлектронный модуль

Требования к источникам излучения:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности оптических волокон;
- источник должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации на требуемой скорости;
- источник должен быть эффективным, т. е. излучаемый им оптический сигнал должна попадать в волокно с минимальными потерями;

Передающий оптоэлектронный модуль

Требования к источникам излучения (продолжение):

- источник должен иметь достаточно большую, но ограниченную мощность, чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния без существенных искажений, вызванных нелинейными эффектами;
- изменения температуры не должно сказываться на функционировании источника излучения;
- стоимость источника излучения должна быть относительно невысокой.

Типы источников оптического излучения

К основным источникам оптического излучения относятся:

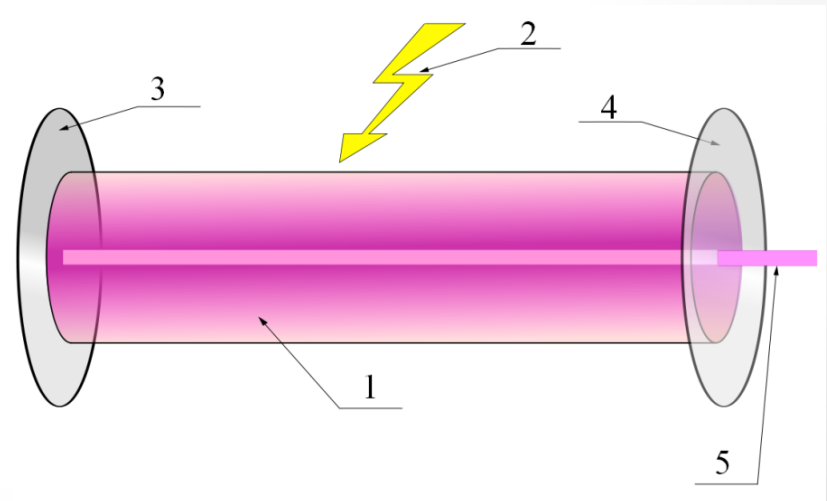
- **Лазеры** (аббревиатура от английского названия **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** – усиление света с помощью вынужденного излучения) или **оптические квантовые генераторы (лазерные диоды)** - это устройства, преобразующие энергию накачки в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.
- **Светодиоды (Light-Emitting Diode, LED)** – это приборы на основе р-n перехода, которые при прямом напряжении смещения могут испускать спонтанное излучение в УФ, видимой (индикаторы) или ИК (источники в ВОСП) областях электромагнитного спектра.

Полупроводниковые лазеры

Любой полупроводниковый лазер содержит 3 компонента:

- рабочее тело;
- систему накачки (источник энергии в полупроводниковых лазерах) – устройство для приведения рабочего тела в активное состояние;
- оптический резонатор – это совокупность отражающих элементов (зеркал), с помощью которых формируется световая волна.

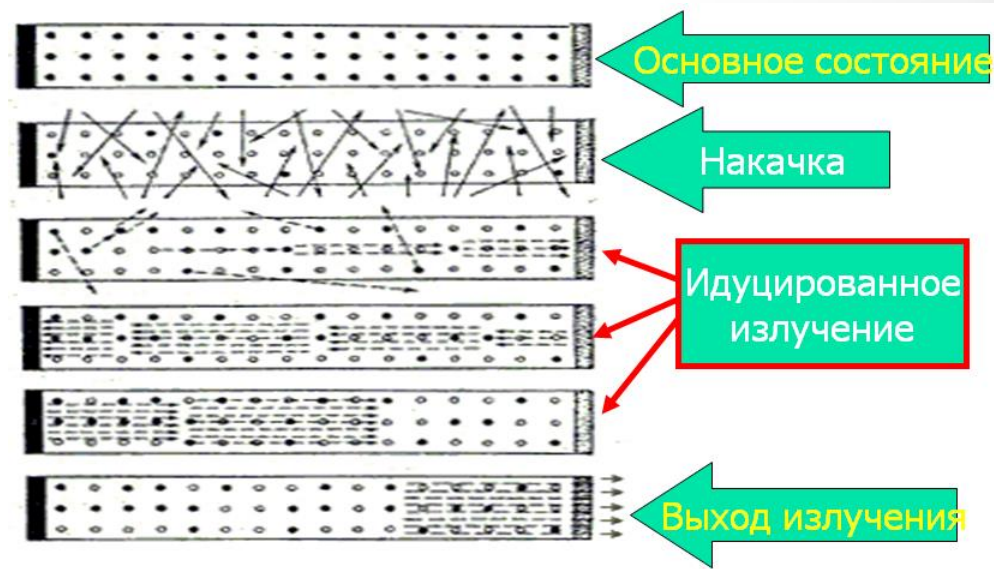
- 1 – активная среда;
- 2 – энергия накачки лазера;
- 3 – непрозрачное зеркало;
- 4 – полупрозрачное зеркало;
- 5 – лазерный луч.



Физический механизм работы лазеров

Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом (или другая квантовая система) способен излучить фотон-копию под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения.

Первоисточником генерации является процесс спонтанного излучения. Оптический резонатор обеспечивает положительную обратную связь, за счёт которой излучённые фотоны вызывают последующие акты индуцированного излучения.



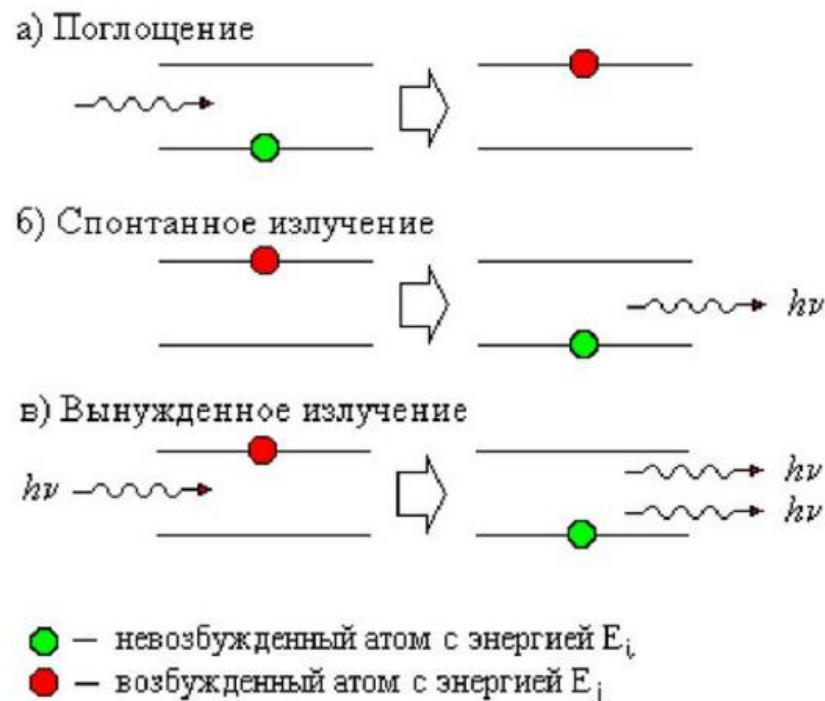
Физический механизм работы лазеров

Квантовые переходы между энергетическими уровнями:

- с нижнего уровня на верхний (**возбуждение**).
- с верхнего уровня на нижний (**релаксация**).

Спонтанное излучение – самопроизвольный переход атомов из возбужденного состояния на нижний энергетический уровень.

Индукированное излучение (вынужденное излучение) – вынужденный переход возбужденного атома на нижний уровень.



Полупроводниковые лазеры

Наибольшее распространение в качестве источников излучения полупроводниковые лазеры:

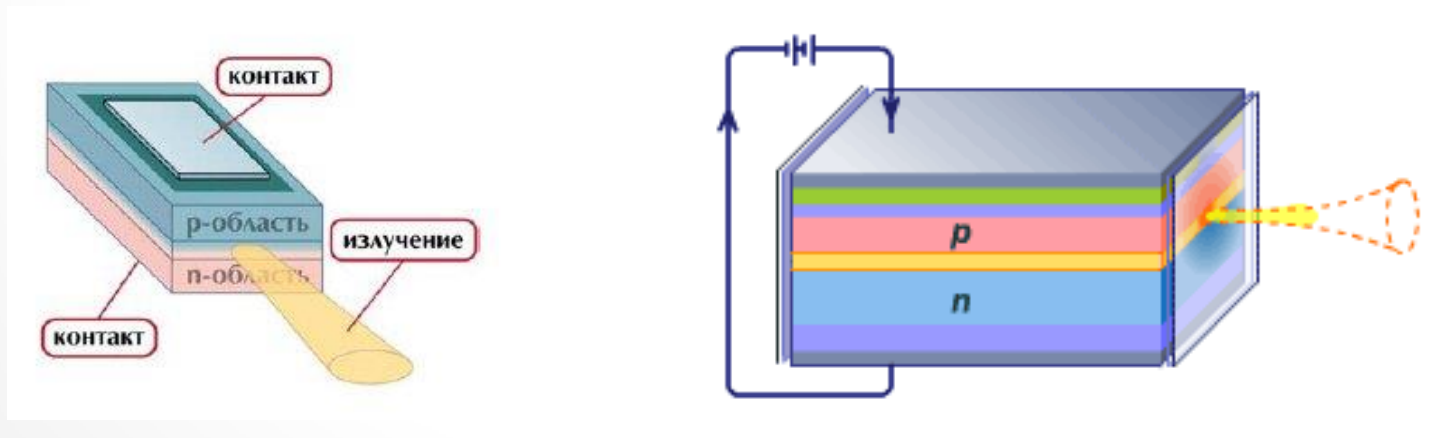
- с резонатором Фабри-Перо (FPR);
- с распределенной обратной связью (DFB);
- с распределенным брэгговским отражением (DBR);
- с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL);
- с внешним резонатором;
- перестраиваемые.



Полупроводниковые лазеры

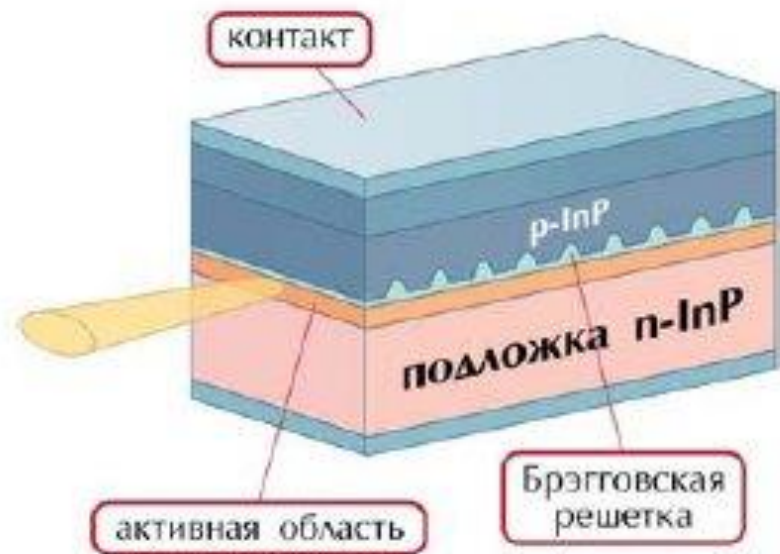
Резонатор Фабри-Перо образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетеропереход.

Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения около 100 %, другая является полупрозрачной, обеспечивая выход излучения наружу.



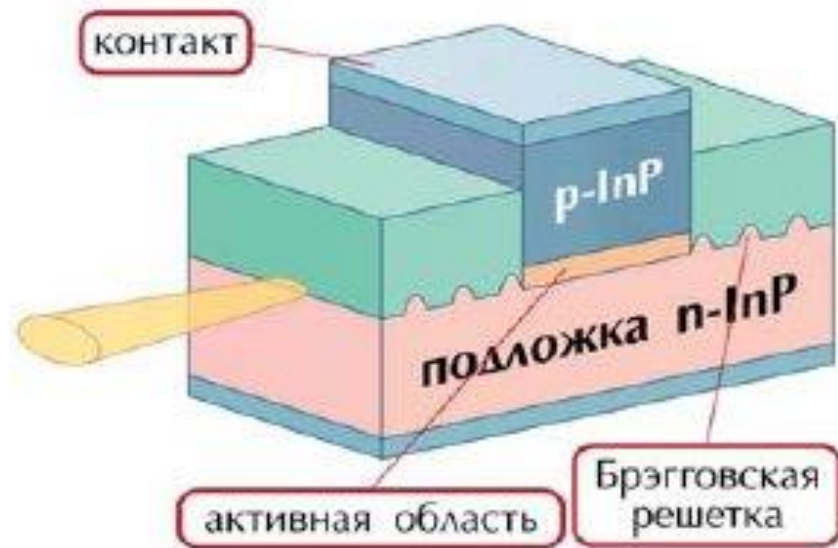
Полупроводниковые лазеры

В структуре лазеров с распределенной обратной связью используется брэгговская дифракционная решетка (формируется в активной зоне между двумя слоями лазерной структуры) для дополнительного уменьшения ширины линии генерации, которая служит механизмом обратной связи, благодаря чему DFB-лазер имеет встроенные возможности выбора длины волны.



Полупроводниковые лазеры

Лазер с распределенным брэгговским отражением содержит брэгговскую решетку, расположенную в неактивной зоне, за счет чего обеспечивается более узкая, по сравнению с предыдущими типами, ширина спектра.

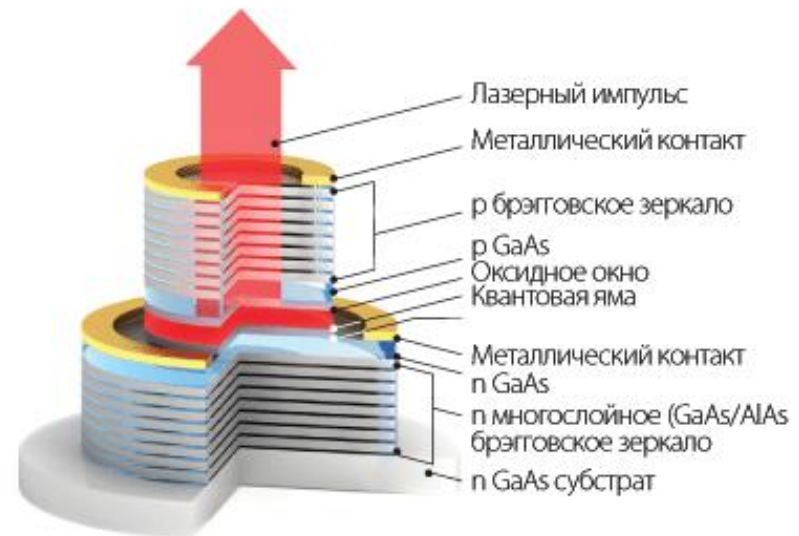


Полупроводниковые лазеры

В лазере с вертикальным резонатором и поверхностным излучением вертикальная структура состоит из ряда слоев р-типа, активной области, и ряда слоев n-типа.

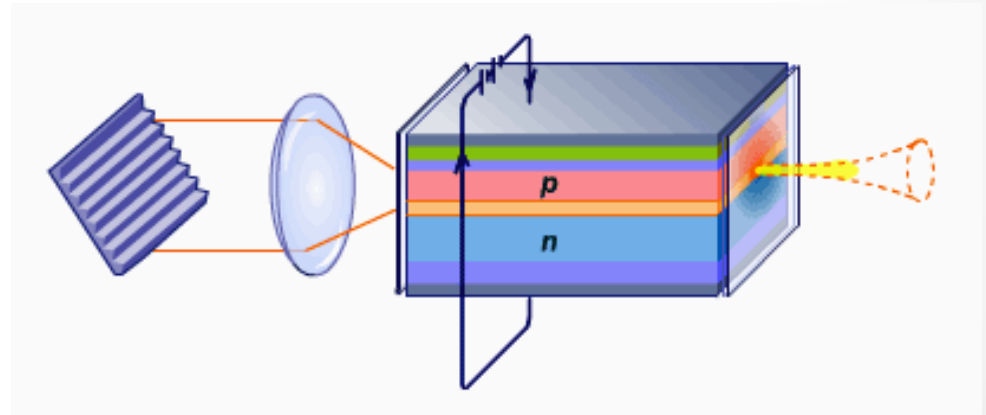
Сверху и снизу от активной среды расположены слои полупроводников с периодически изменяющейся величиной показателя преломления.

Слои выполняют функции лазерных зеркал, и излучение лазера направлено вертикально вверх, то есть перпендикулярно плоскости слоев.



Полупроводниковые лазеры

Изменяя расстояние до зеркала и одновременно разворачивая зеркало-решетку (это эквивалентно изменению шага решетки) в **лазерах с внешним резонатором**, можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 нм.



Полупроводниковые лазеры

Особенности **перестраиваемых лазеров**:

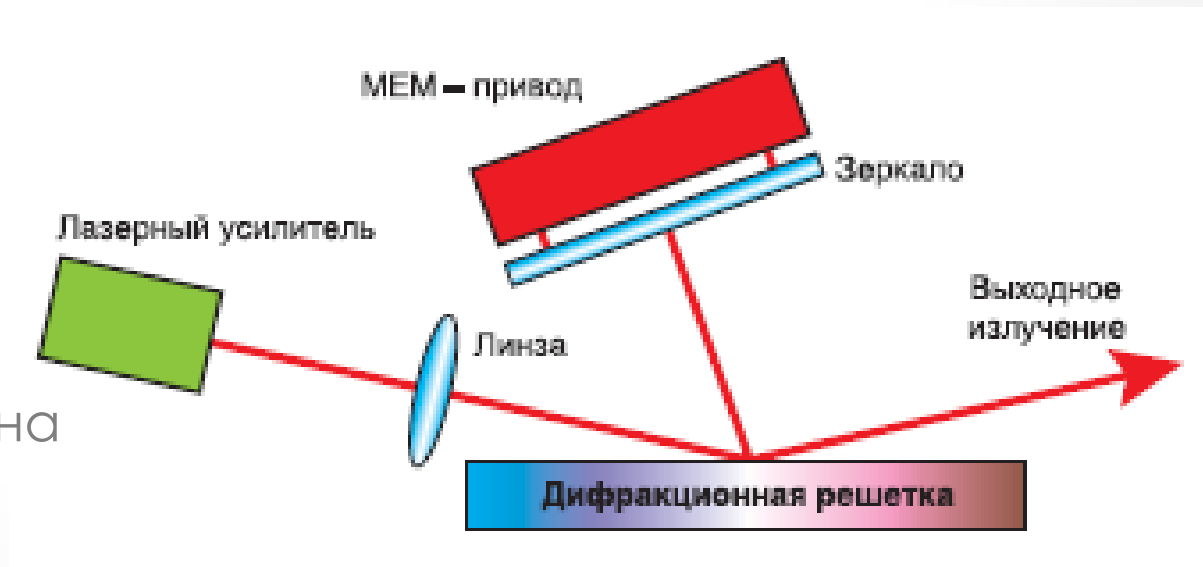
- спектр усиления их активного вещества должен быть достаточно широким для того, чтобы обеспечить генерацию во всем требуемом диапазоне перестройки;
- резонатор лазера должен обладать высокой селективностью для выделения одной длины волны и его конструкция должна обеспечивать возможность перестройки в заданном диапазоне.

Полупроводниковые лазеры

Резонатор **перестраиваемого лазера с селектором на основе дифракционной решетки** образован одним из торцов лазерного диода, дифракционной решеткой и перестраиваемым зеркалом.

Различные спектральные компоненты отражаются от решетки под разными углами.

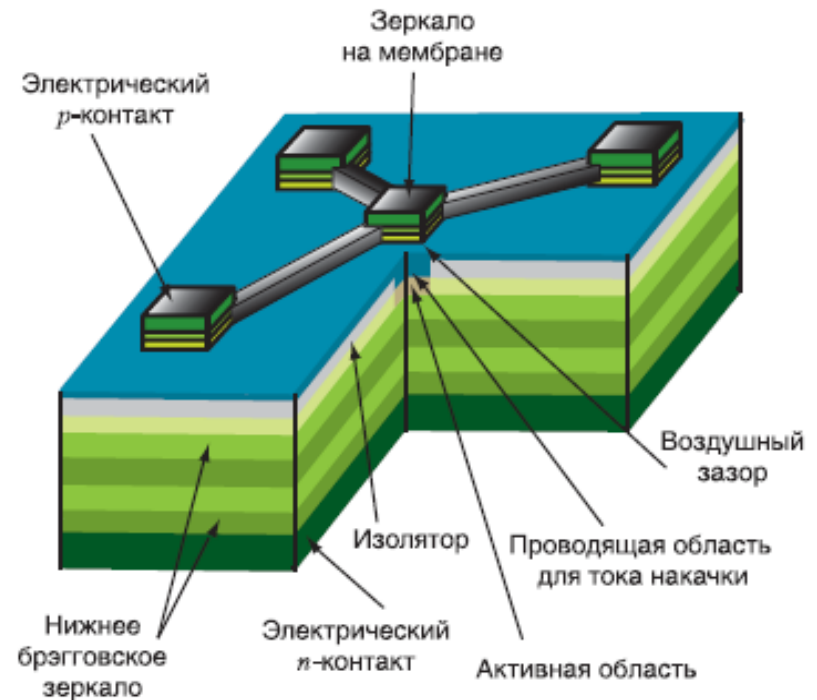
Перестройка частоты достигается изменением наклона зеркала.



Полупроводниковые лазеры

Перестройка в **перестраиваемых лазерах с вертикальными резонаторами** осуществляется перемещением верхнего подвижного зеркала, отделенного от пассивной n-области небольшим воздушным зазором.

Перемещение зеркала осуществляется электростатическими силами при создании разности потенциалов между перемещающимся зеркалом и верхней частью полупроводниковой гетероструктуры.



Полупроводниковые лазеры

Тип лазера	Преимущества	Недостатки	Применение
С распределенной обратной связью (DFB)	стабильность излучения	относительно низкая выходная мощность; ограниченный диапазон настройки	для узкого диапазона настройки; широко используется в длинных секциях
С распределенным брэгговским отражением (DBR)	высокая скорость переключения	большая ширина линии; нестабильность длины волны	сети доступа; оптические мультиплексоры ввода-вывода
С вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL)	низкое потребление; круговой луч; широкий диапазон настройки	ограничен коротковолновыми диапазонами 850/1310 нм	региональные сети и сети доступа
С внешним резонатором	высокая мощность; малая ширина линии; непрерывность и широкий диапазон настройки	скорость настройки чувствительна к ударам и вибрациям	длинные и ультрадлинные секции; для региональных сетей

Свойства лазеров

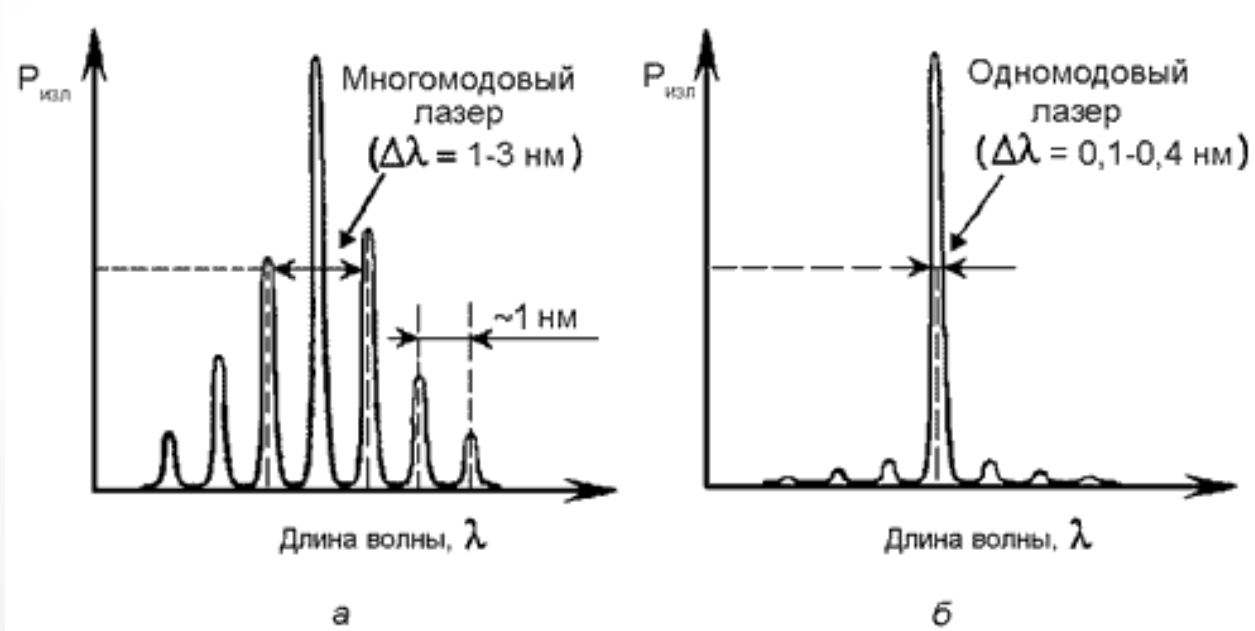
Излучение лазера является:

- узкомонохроматическим;
- когерентным;
- направленным;
- высокоинтенсивным;
- поляризованным.

Монохроматичность

Понятие **монохроматичности** характеризует ширину спектра излучения.

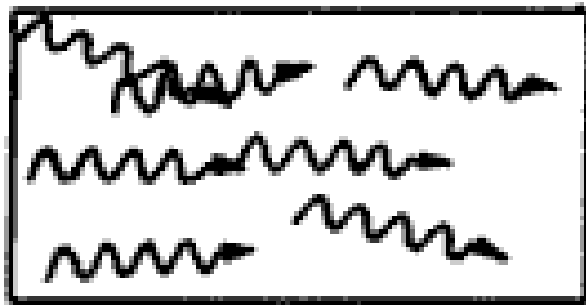
Идеально монохроматическим можно считать излучение, ширина спектра которого близка к нулю.



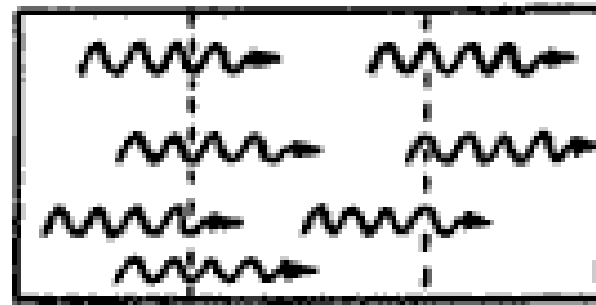
Когерентность

Понятие **когерентности излучения** относится к мере согласования между фазами волн, образующих данное излучение.

Два пучка называются когерентными, если разность фаз между волнами остается постоянной за время наблюдения.



Некогерентный
свет

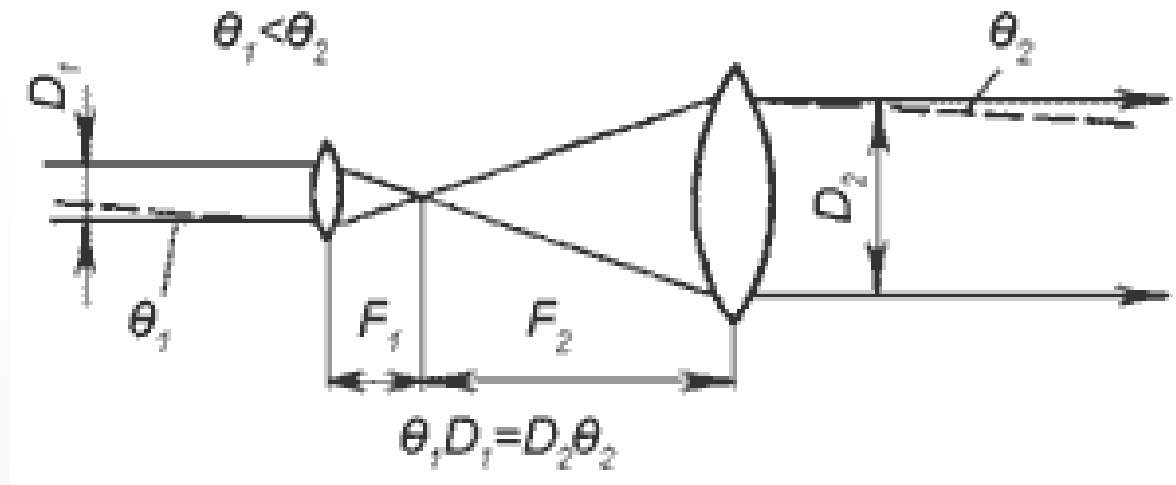


Когерентный
свет

Направленность

Направленным является излучение, распространяющееся в пределах небольшого телесного угла.

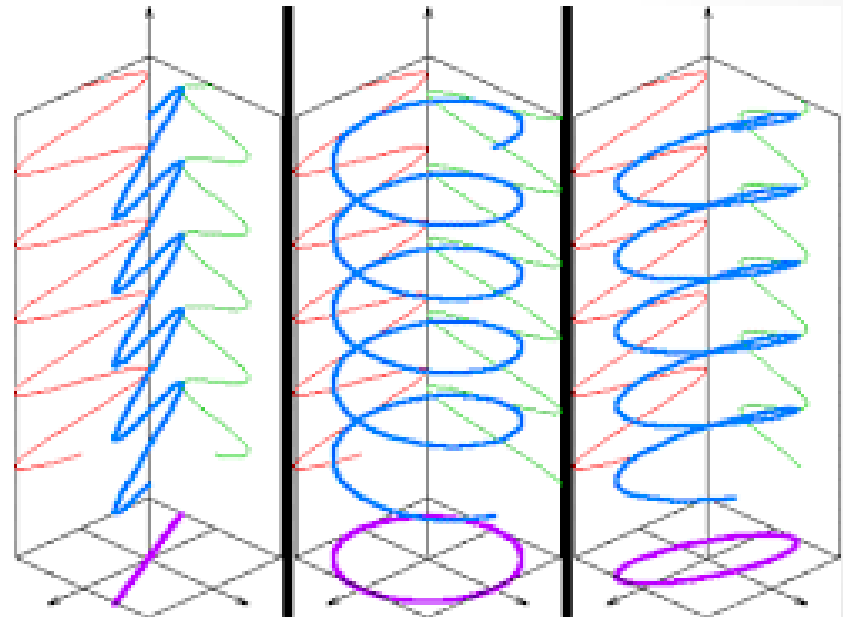
Мерой параллельности излучения является расходимость лазерного пучка.



Интенсивность и поляризация

Понятие **интенсивности** применяется для оценки фотометрических величин, с помощью которых характеризуется излучение лазера: силы излучения, яркости, потока и т. п.

Поляризованным является излучение, имеющее преимущественно направление колебаний вектора электрического (или магнитного) поля, при этом под колебанием понимается как изменение амплитуды, так и вращение вектора.



Эксплуатационные параметры лазеров

- **Коэффициент полезного действия** определяется как отношение энергии генерации к электрической энергии, потребляемой источником накачки.
- **Потребляемая мощность** зависит от типа и мощности излучения лазера.
- **Рабочая температура** активного элемента и элементов системы накачки.
- **Время готовности к работе** представляет собой промежуток времени от момента включения прибора в сеть до получения стабильного режима с заданными характеристиками излучения.

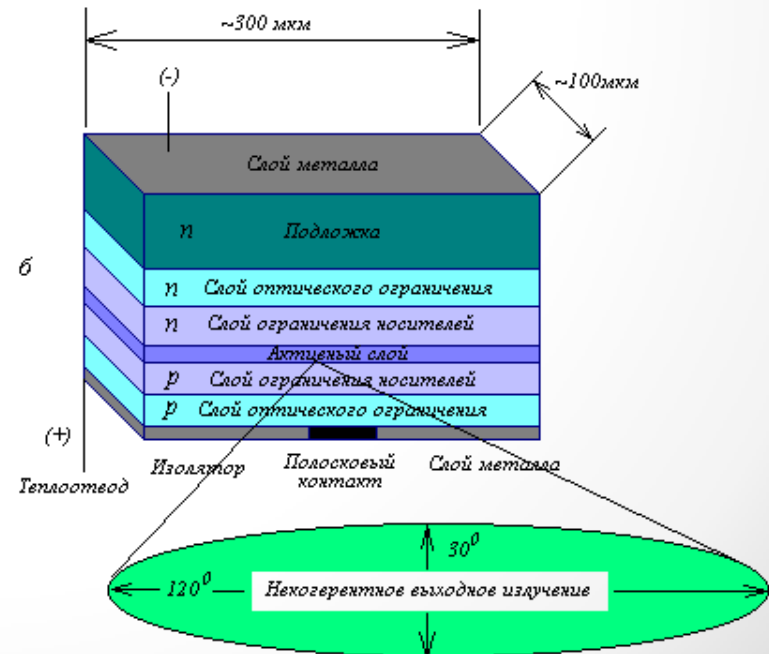
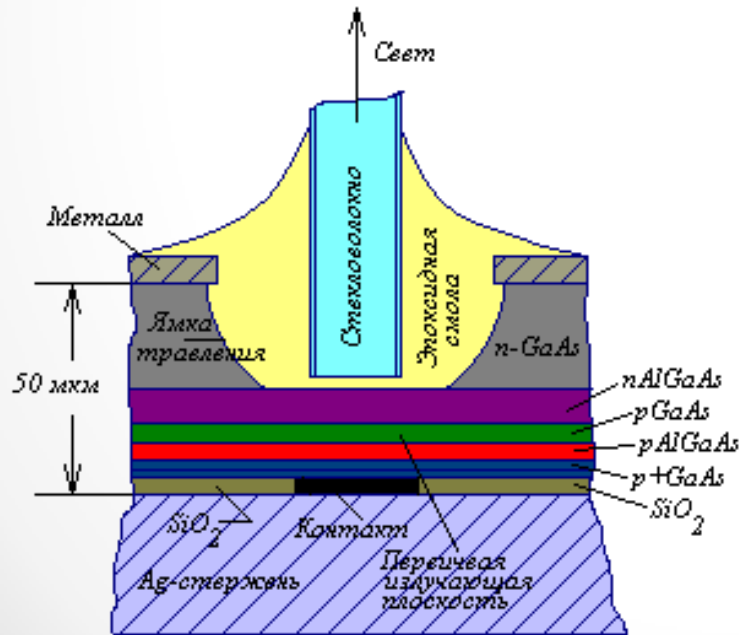
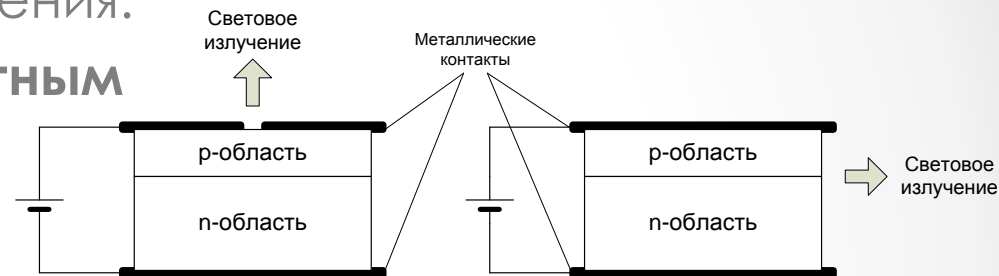
Эксплуатационные параметры лазеров

- **Время непрерывной работы** обычно ограничено, что вызвано нагревом активного элемента или элементов блока питания, после охлаждения которых лазер снова готов к работе.
- **Ресурс работы** представляет собой время работы лазера до выхода из строя одного из основных элементов.
- **Габариты.**
- **Масса.**
- **Надежность.**

Светодиоды

Светодиоды по своей конструкции делятся на два вида в зависимости от выхода излучения:

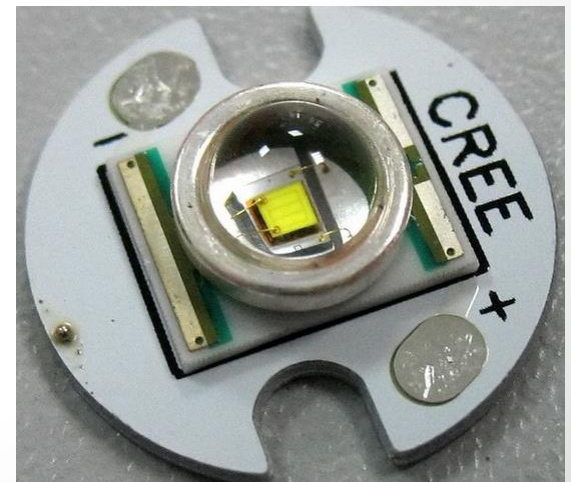
- **светодиоды с поверхностным излучением;**
- **торцевые светодиоды.**



Светодиоды

Принцип работы светодиода основан на **излучательной рекомбинации** носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока.

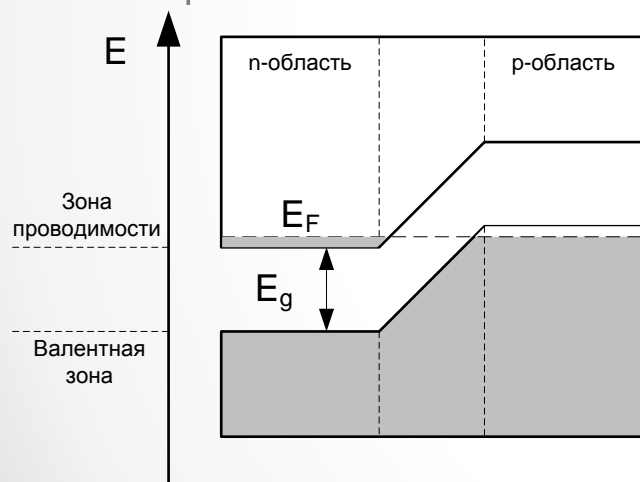
Носители заряда (**электроны** и **дырки**) проникают в активный слой из прилегающих пассивных слоев (р- и n-слоя) вследствие подачи напряжения на р-n структуру, и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света.



Физический механизм работы светодиодов

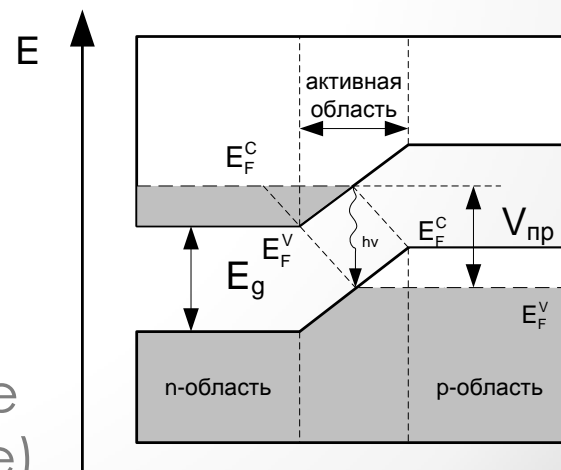
Зонные схемы, поясняющие возникновение активной области в полупроводниковом кристалле с p-n переходом.

Заштрихованы области энергетических зон, заполненные электронами.



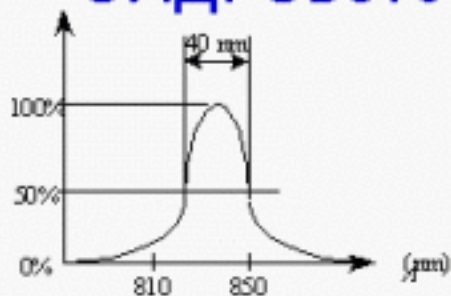
внешнее напряжение к кристаллу не приложено (нулевое смещение);

к кристаллу приложено напряжение (прямое смещение)



Сравнение лазеров и светодиодов

◆ СИД: Светоизлучающий диод

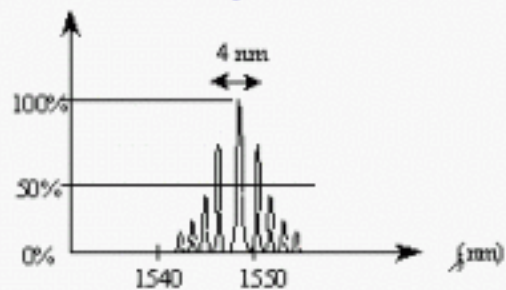


Спектральная характеристика излучения



Дисперсия оптич. излучения

◆ Лазерный диод



Спектральная характеристика излучения



Сравнение лазеров и светодиодов

Параметры	Лазер	Светодиод
Возможная длина волны	0,63-1,5 мм	0,40-1,5 мм
Средний угол расхождения	20-30 градусов	20-50 градусов
Поляризация	поляризован	полностью деполаризован
Монохроматичность излучения	монохроматичное	немонохроматичное
Когерентность излучения	когерентное	некогерентное
Фокусировка в параллельный нерасходящийся пучок	есть	нет
Минимальное пятно, в которое можно сфокусировать излучение	0,1 мм	3 мм
Максимальный КПД серийных приборов	10 %	3 %
Максимальная достигнутая плотность мощности освещения объекта от одиночного излучателя в постоянном режиме	200 Вт/см ²	0,1 Вт/см ²
Предельная мощность в импульсе	100 Вт	100 мВт
Максимальная мощность в импульсе	50 Вт	100 мВт
Доля мощности которую можно ввести в 200 мкм световод	50 %	0,5 %
Цена одного прибора	3-100 у. е.	0,1-1 у. е.

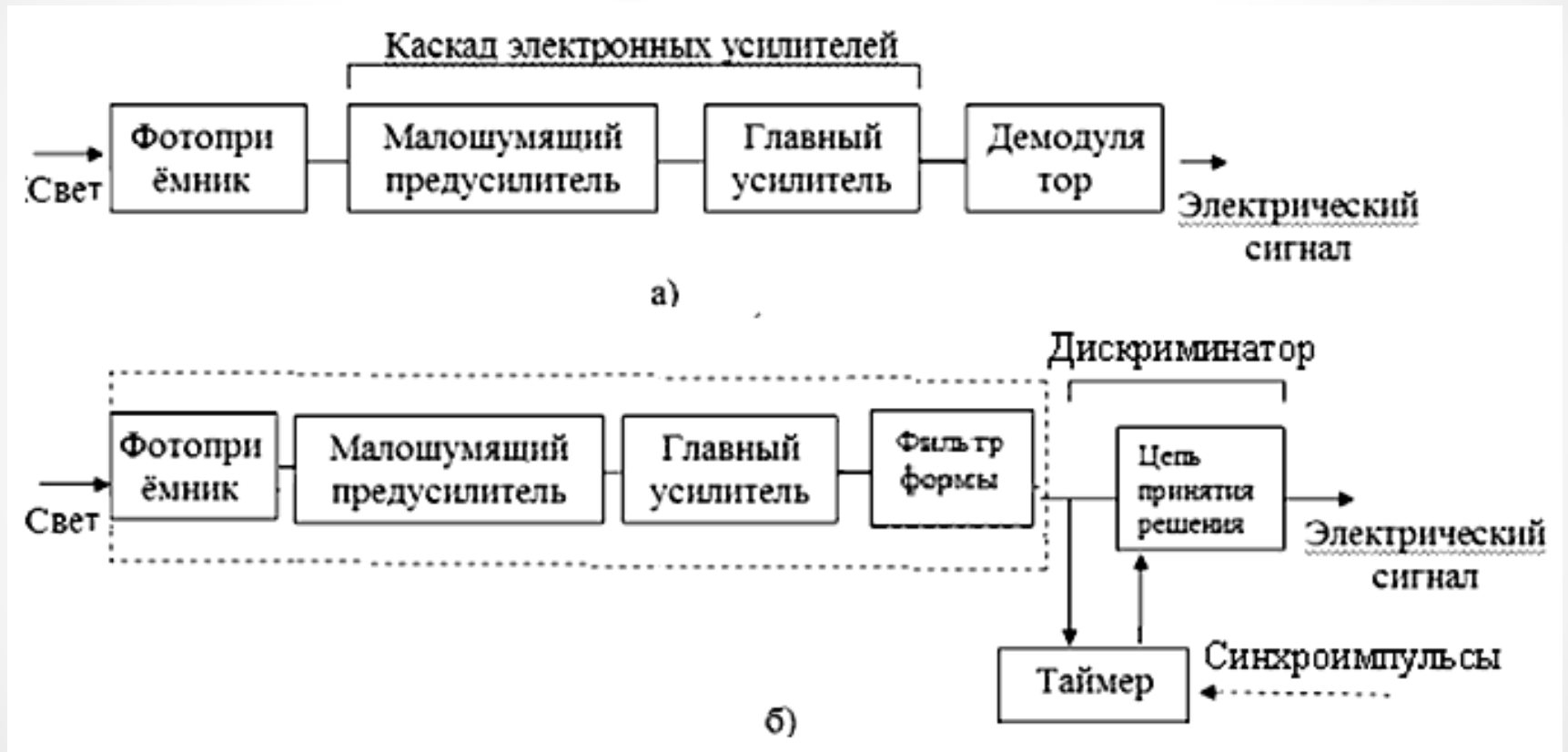
Структура приемного оптоэлектронного модуля

Приемный оптоэлектронный модуль (ПРОМ) или оптический приемник обеспечивает преобразование входного оптического сигнала в выходной электрический (цифровой или аналоговый) сигнал.

Основные функциональные элементы ПРОМ:

- **фотоприемник**, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- **каскад электрических усилителей**, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную к обработке;
- **демодулятор**, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

Приемный оптоэлектронный модуль



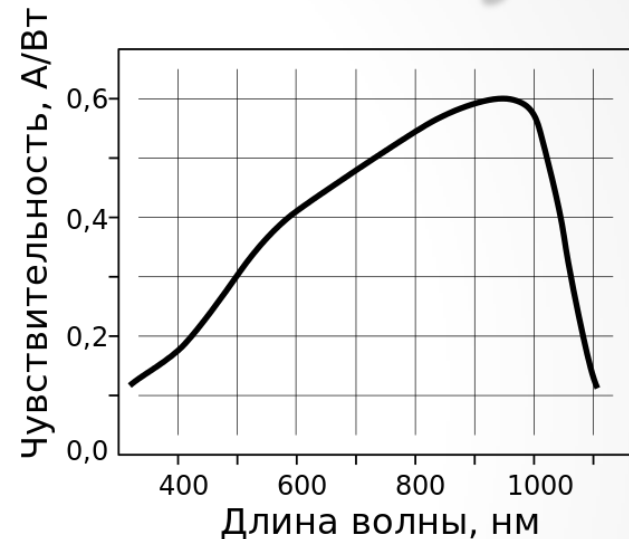
- а) аналоговый модуль;
- б) цифровой модуль.

Приемный оптоэлектронный модуль

Характеристики ПРОМ:

Чувствительность – отношение исходящего тока фотодиода к входной оптической мощности (обычно связана с определенной длиной волны или частотой), А/Вт.

Спектральная чувствительность – диапазон длин волн, к которым чувствителен данный фотодиод.



Приемный оптоэлектронный модуль

Характеристики ПРОМ (продолжение):

Светочувствительность – минимальная оптическая мощность на входе фотоприемника, при которой он все еще может создать на выходе пригодный электрический сигнал (обычно связана с определенной длиной волны или частотой), дБм.

Темновой ток – ток утечки, протекающий в фотодиоде при отсутствии света (обычно обусловлен температурой диода).

Время пролета – время, необходимое носителю, индуцированному светом, для преодоления обеднённой области полупроводника (определяет максимально возможную скорость передачи данного фотодиода).

Приемный оптоэлектронный модуль

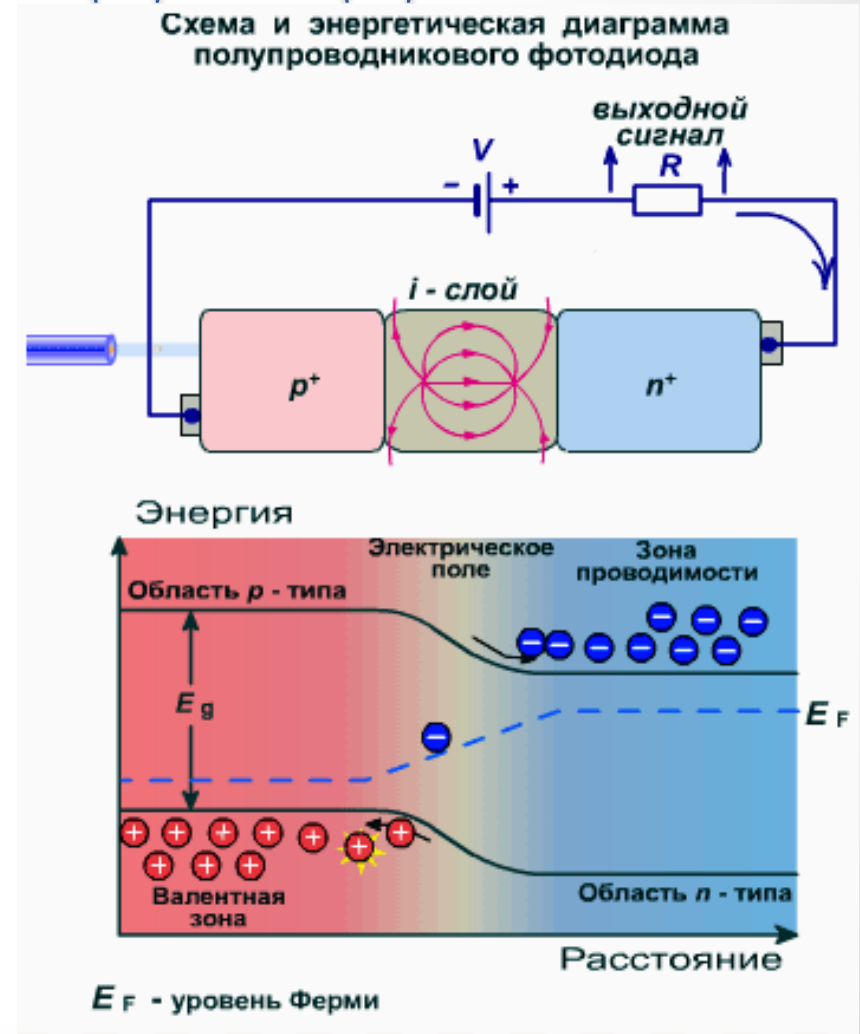
Виды фотодиодов:

- **p-i-n-фотодиоды;**
- **лавинные фотодиоды.**

P-i-n-фотодиоды

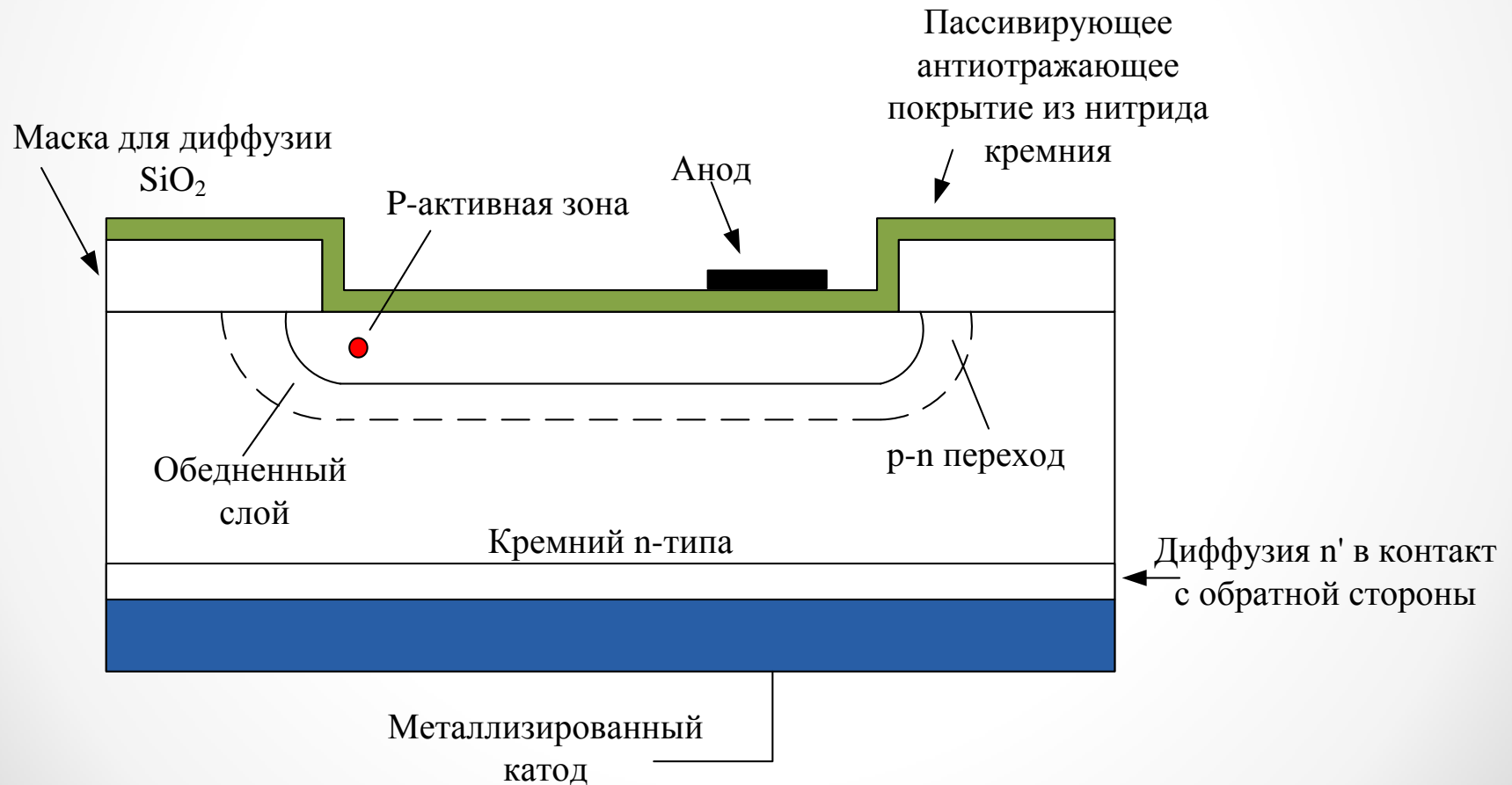
Между сильно легированными слоями p^+ и n^+ типа расположен обедненный свободными носителями i -слой.

При наличии падающего света на i -слой, в нем образуются электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля движутся и образуют электрический ток.



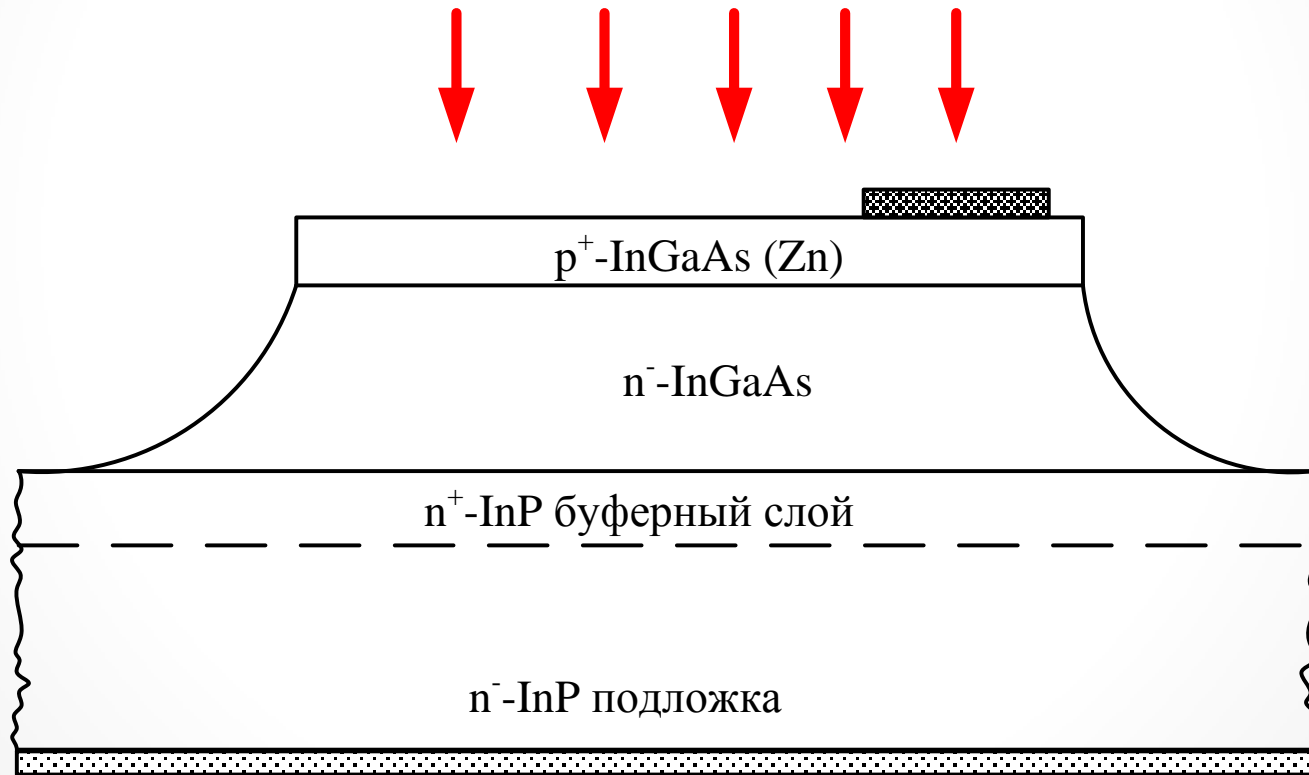
P-i-n-фотодиоды

Кремневый фотодиод



P-i-n-фотодиоды

Обобщенная схема PIN-фотодиода на основе InGaAs



Контакт с обратной стороны

P-i-n-фотодиоды

Достоинства:

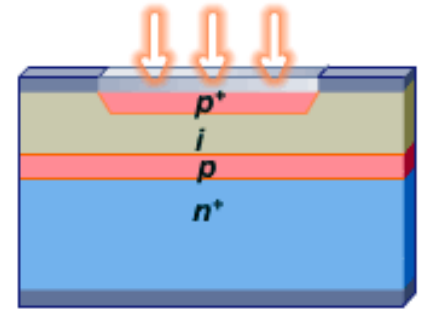
- есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i-области;
- высокая чувствительность и быстродействие;
- малое рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$.

Недостатки:

- сложность получения высокой чистоты i-области.

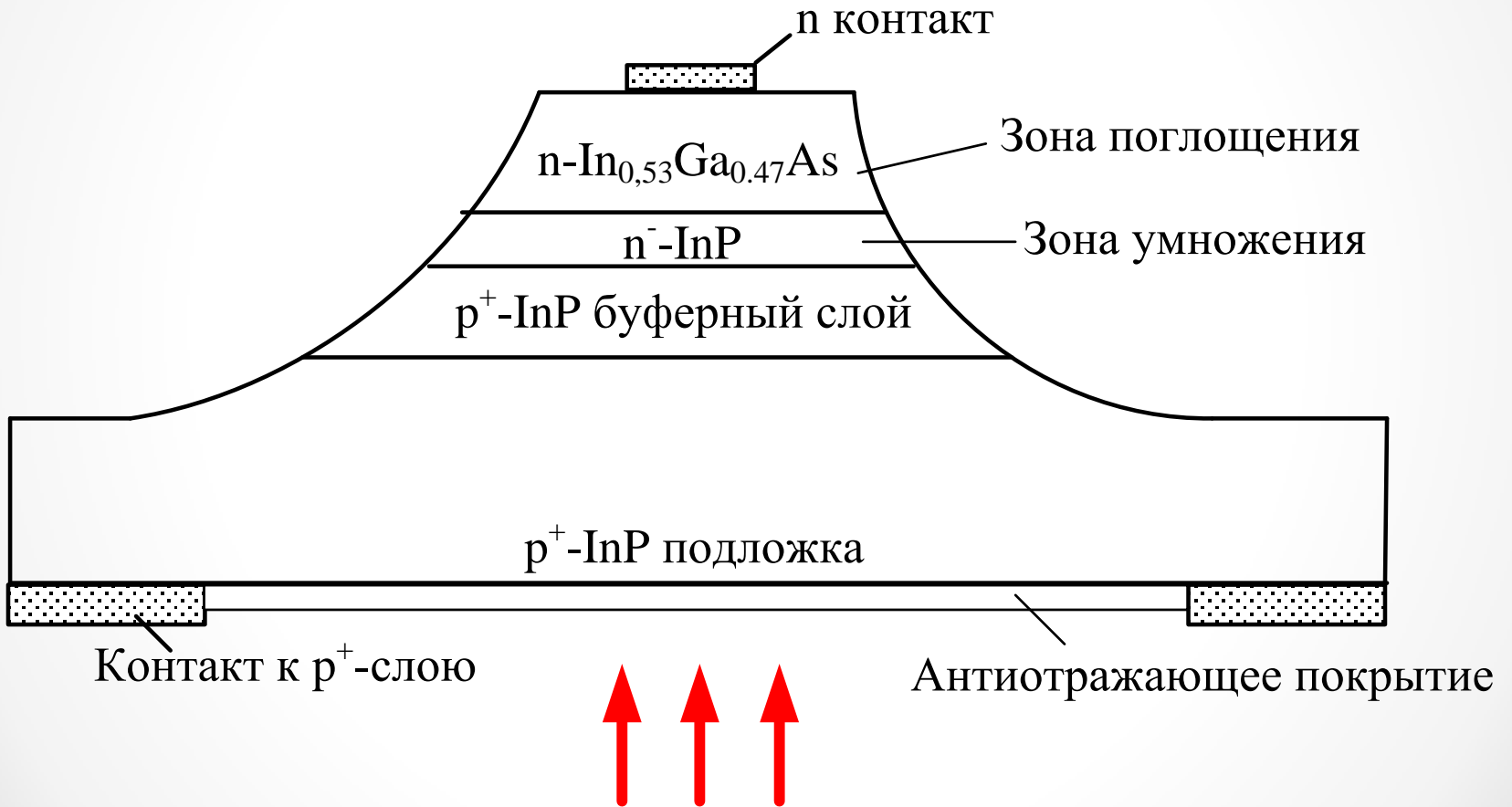
Лавинные фотодиоды

Главное отличие **лавинного фотодиода** – внутреннее усиление сигнала, базированное на лавинном электронном умножении сигнала за счет добавления р-слоя (р⁺-i-р-n⁺ структура).



- 1) При воздействии света на i-слой образуются электронно-дырочные пары.
- 2) Благодаря небольшому полю, происходит направленное движение носителей к полюсам.
- 3) При попадании свободных электронов из i-слоя в р-слой они получают большее ускорение.
- 4) Ускоряясь в зоне проводимости р-слоя, такие электроны накапливают энергию, достаточную, чтобы выбить другие электроны из валентной зоны в зону проводимости.

Лавинные фотодиоды



Фотодиоды 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.

За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещённой зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн.

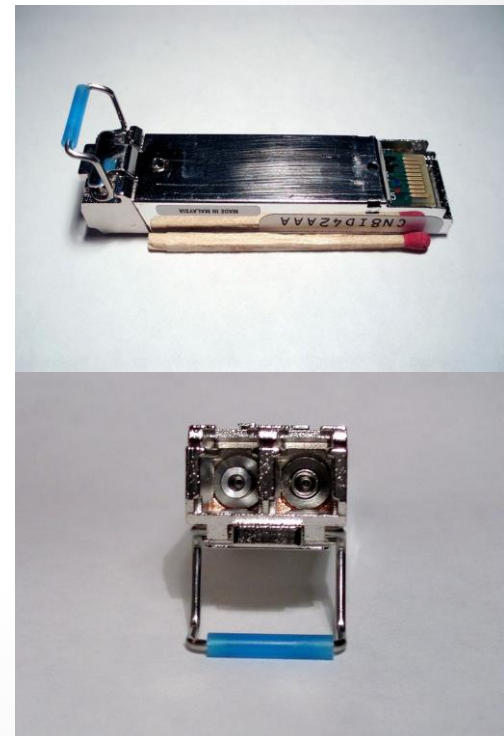
Недостаток – сложность изготовления.

Оптические трансиверы

Оптические трансиверы предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические для последующей передачи по волоконно-оптической линии и обратного преобразования на приеме.

SFP (Small Form-factor Pluggable) – промышленный стандарт модульных компактных трансиверов, используемых для передачи данных в телекоммуникациях.

Модули SFP используются для присоединения платы сетевого устройства (коммутатора, маршрутизатора) к оптическому волокну, выступающему в роли сетевого кабеля.



Оптические трансиверы

Разновидности SFP-модулей и их обозначения:

- **SX** – 850 нм, 550 м, MMF;
- **LX** – 1310 нм, 10 км, SMF;
- **XD** – 1550 нм, 40 км, DWDM;
- **ZX** – 1550 нм, 80 км, DWDM;
- **EX** или **EZX** – 1550 нм, 120 км, DWDM;
- **BX** – 1310/1550 нм, 10 км, SMF.

Оптические трансиверы

Наиболее распространённые области применения SFP-модулей – **передача данных в телекоммуникационных сетях** на скоростях выше 100 Мбит/с с использованием следующих технологий:

- **Ethernet:**
 - Fast Ethernet (100 Мбит/с),
 - Gigabit Ethernet (1 Гбит/с),
 - 10G Ethernet (10 Гбит/с);
- **SDH:**
 - STM-1 (155 Мбит/с),
 - STM-4 (622 Мбит/с),
 - STM-16 (2,5 Гбит/с);
- **Fibre Channel:** 1, 2, 4, 8, 16 Гбит/с.