

# Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

Лекция:

## Светодиоды

**В.М. Шандаров**

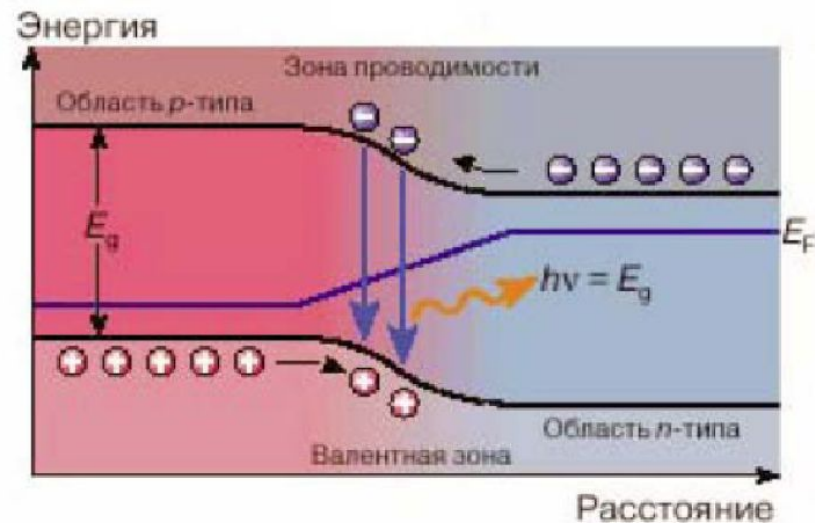
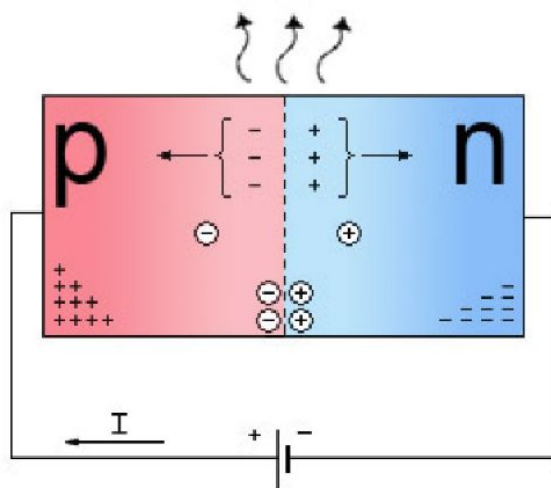
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

# История создания

В 1907 году английский инженер Х.Д. Раунд, трудившийся во всемирно известной лаборатории Маркони, случайно заметил, что у работающего детектора вокруг точечного контакта возникает свечение. Всерьез же заинтересовался этим физическим явлением и попытался найти ему практическое применение Олег Владимирович Лосев.

Обнаружив в 1922 году во время своих ночных радиовахт свечение кристаллического детектора, этот тогда ещё 18-летний радиолюбитель не ограничился констатацией факта, а незамедлительно перешёл к оригинальным экспериментам. Стремясь получить устойчивую генерацию кристалла, он пропускал через точечный контакт диодного детектора ток от батарейки. Лосев писал: «У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0,4 мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынертный источник света».

# К чему приводит прямое смещение



Когда ток протекает в прямом направлении, электроны проходят через переход со стороны n-области, а дырки – со стороны p-области, в результате чего в области p-n перехода происходит излучательная рекомбинация

# Светодиод

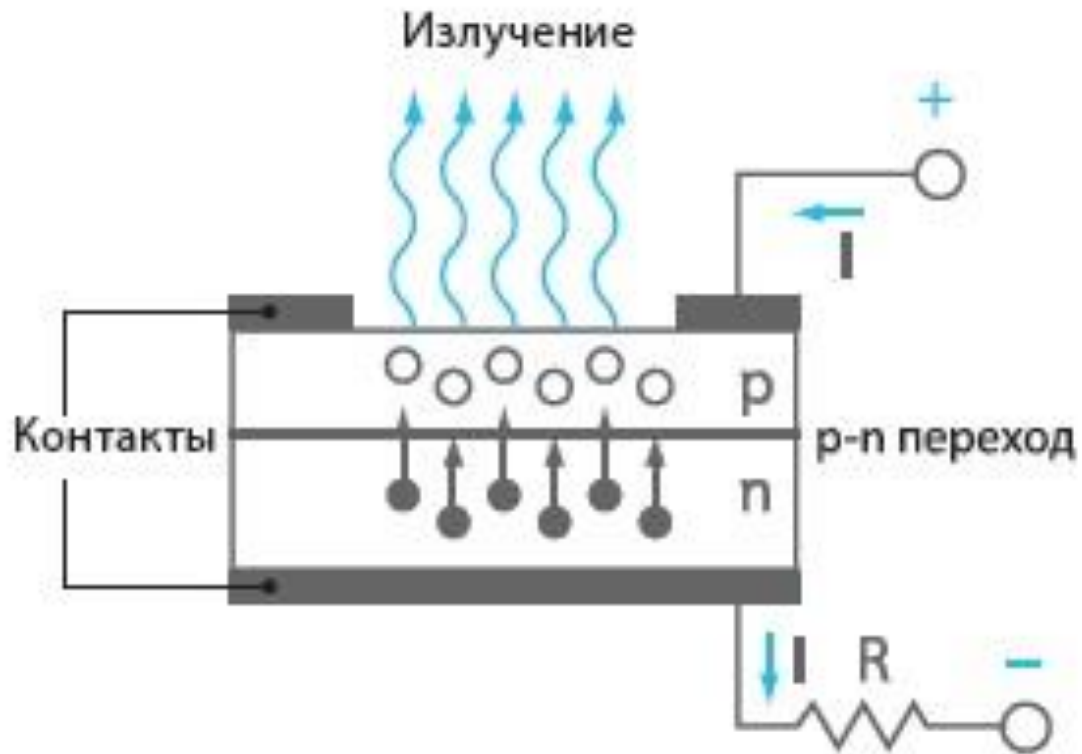
Если п/п структуру с электрической инжекцией не помещать в оптический резонатор, исключая возможность индуцированного излучения, то она будет работать в режиме рекомбинационной люминесценции избыточных носителей заряда. Эта электролюминесценция дает некогерентное излучение, а такие приборы называют светоизлучающими диодами или светодиодами.

# Светодиоды

Материал	Запрещенная энергетическая зона, эВ	Длина волны, мкм
Бинарные соединения		
GaP	2.24	0.55
AlAs	2.09	0.59
GaAs	1.42	0.87
InP	1.33	0.93
InAs	0.34	3.6
Тройные и более соединения		
AlGaAs	1.42-1.61	0.77-0.87
InGaAsP	0.74-1.13	1.1-1.67

$$\lambda \text{ (мкм)} = 1,2398 / E_g \text{ (эВ)}$$

# Светодиод



# Квантовый выход

Основной параметр СД – внешний квантовый выход:

$$\eta = N_f / N_e = (\eta_b / N_e) \cdot K = \eta_b \cdot K$$

где  $N_f$  – число излученных квантов;

$N_e$  – число проходящих через СД носителей заряда;

$K$  – коэффициент потерь при выводе излучения;

$\eta_b$  – внутренний квантовый выход.

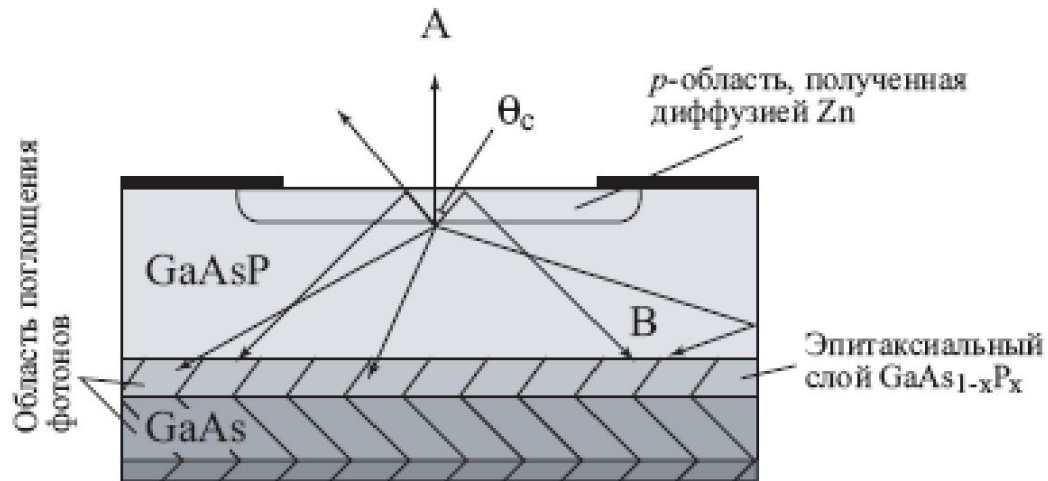
# Потери

## Причины потерь при выводе излучения:

1. Полное внутренне отражение света – для GaAs, например,  $n_{\text{GaAs}} \approx 3,3 - 3,8$  и критический угол составляет около  $17^\circ$ .
2. Просто отражение света от поверхности.
3. Самопоглощение света в кристалле.
4. Излучение света в обратную сторону.



# Светодиоды



*a*

Схема конструкции

# Светодиоды

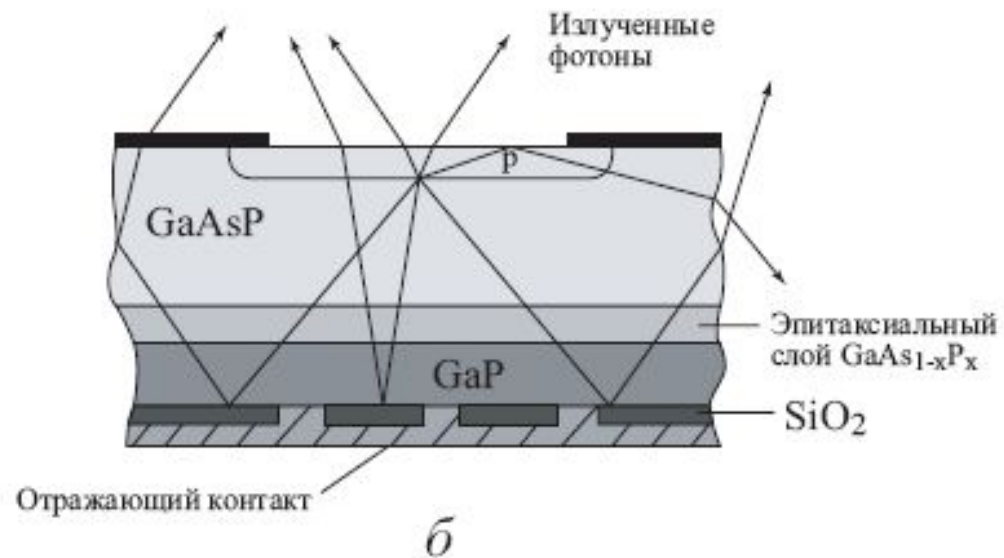
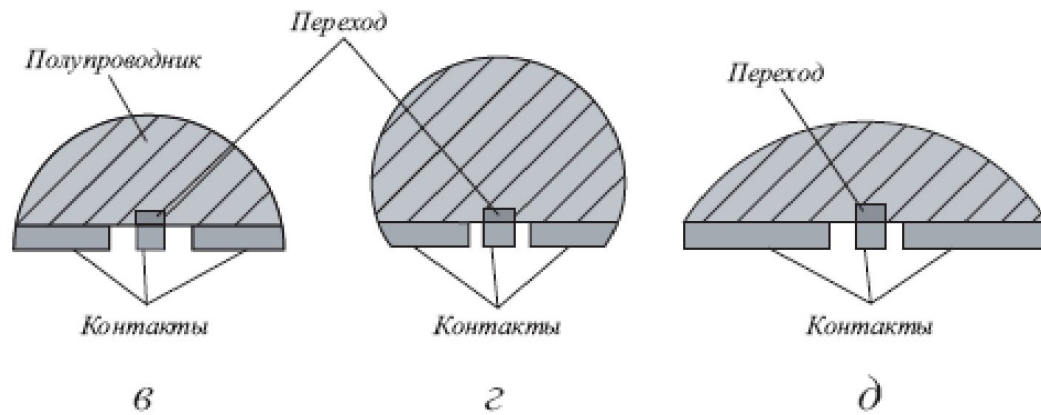


Схема конструкции

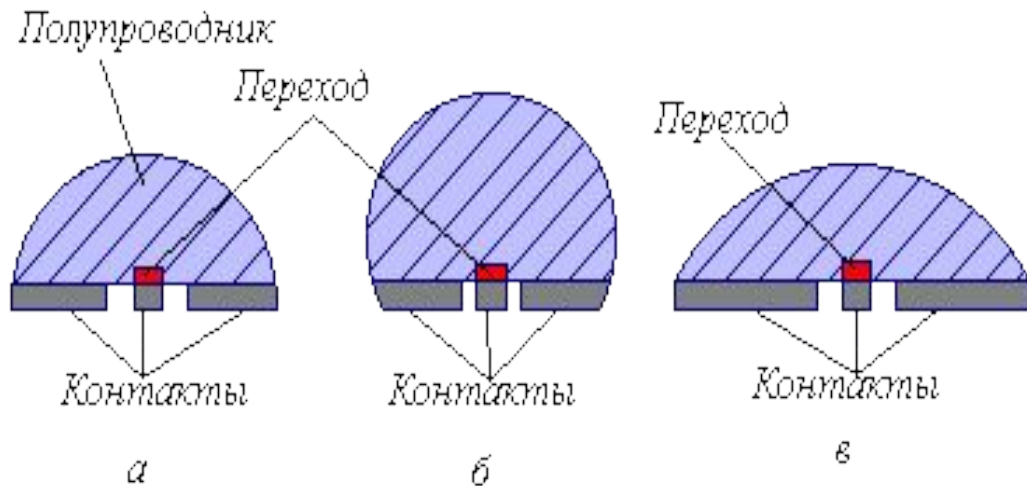
# Светодиоды



## Типы линз

На **рис.** показаны поперечные разрезы других светодиодов, которые имеют параболическую, полусферическую и усечённо сферическую геометрию.

Разрез трёх светодиодов



а-полусфера; б-усечённая сфера; в-параболоид

Основное отличие этих трёх структур от структуры с плоской геометрией состоит в том, что телесный угол для них равен 1. Таким образом, отношение эффективностей равно

$$\frac{\eta}{\eta_F} \approx \frac{1}{1 - \cos\theta_c} = \frac{1}{1 - \sqrt{1 - 1/n_2^2}}$$

$$\eta / \eta_F = 2n_2^2 \text{ при } n_2 \gg 1$$

Это означает, что для структур на GaP с  $n=3.45$  при данной геометрии можно ожидать увеличения эффективности на порядок.

# Светодиоды

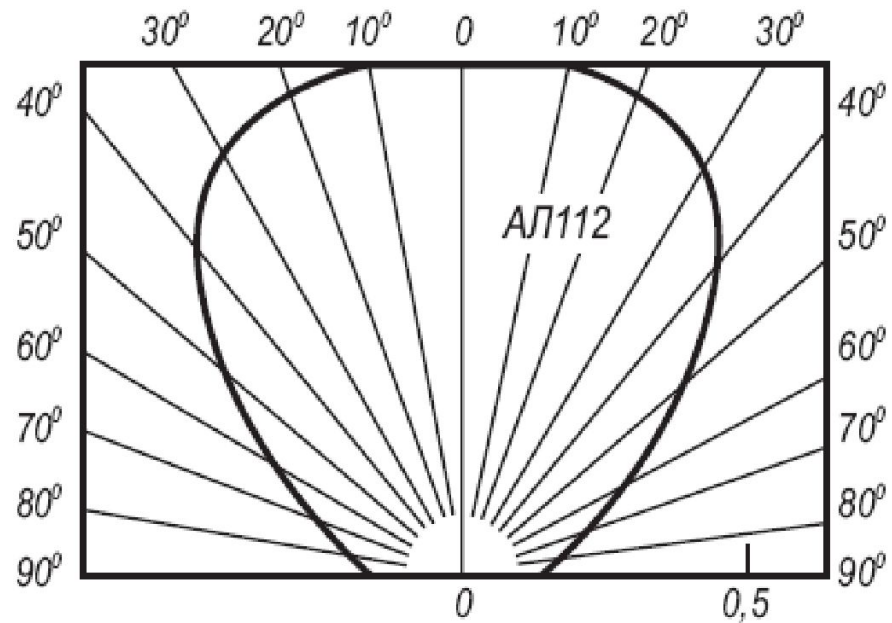
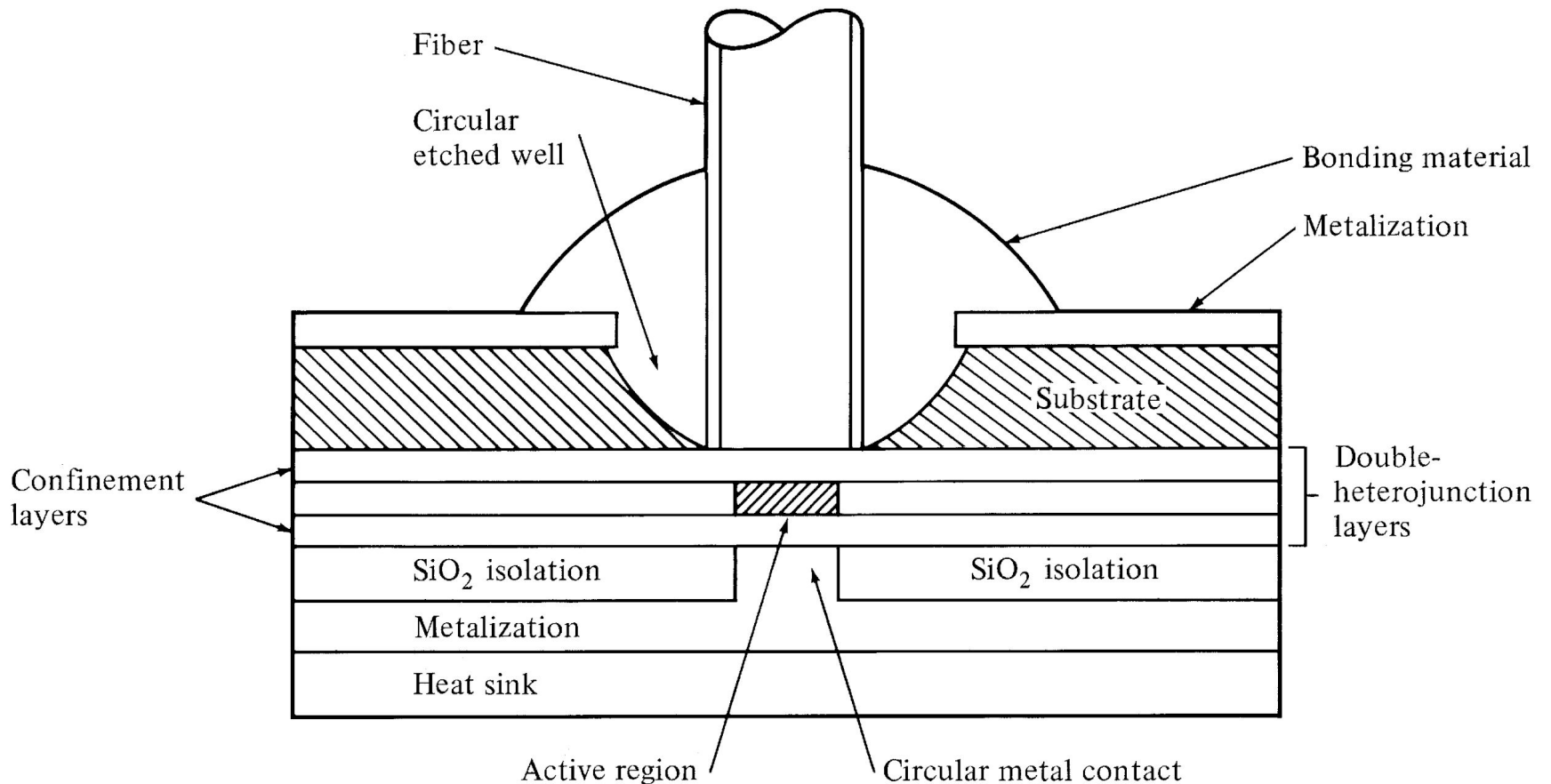
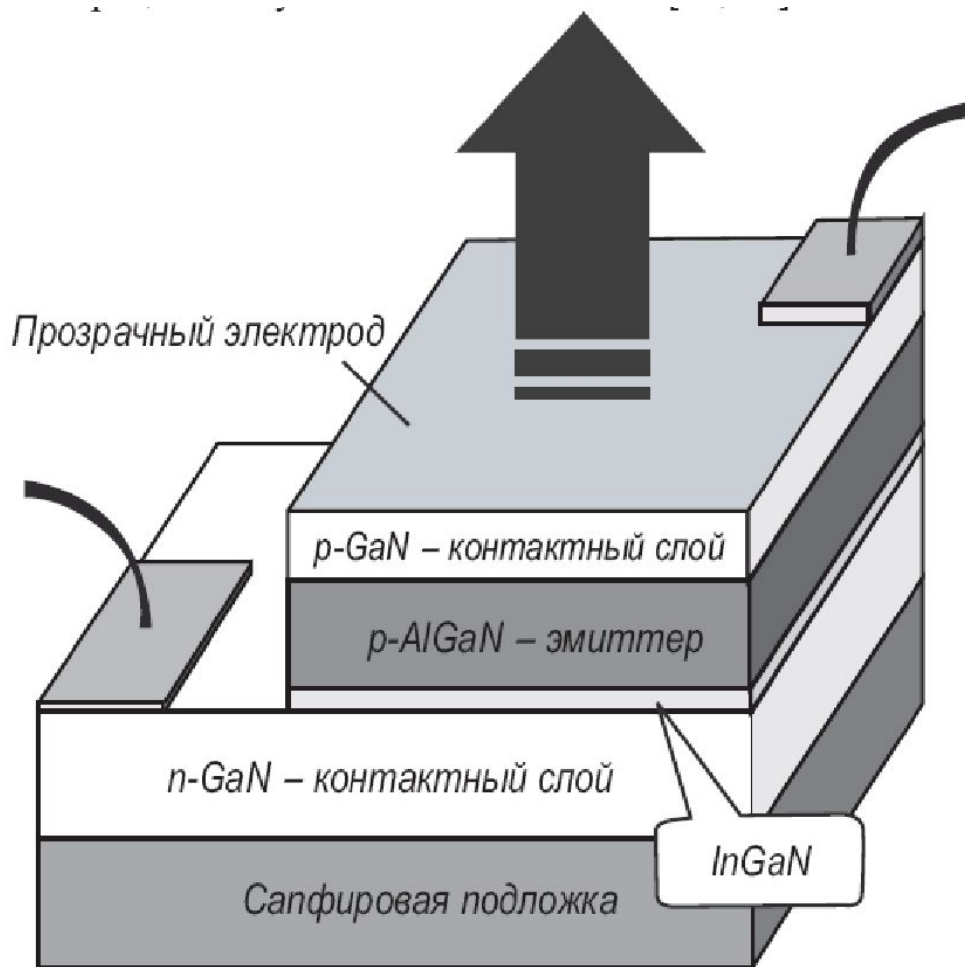


Диаграмма направленности излучения красного светодиода AL112

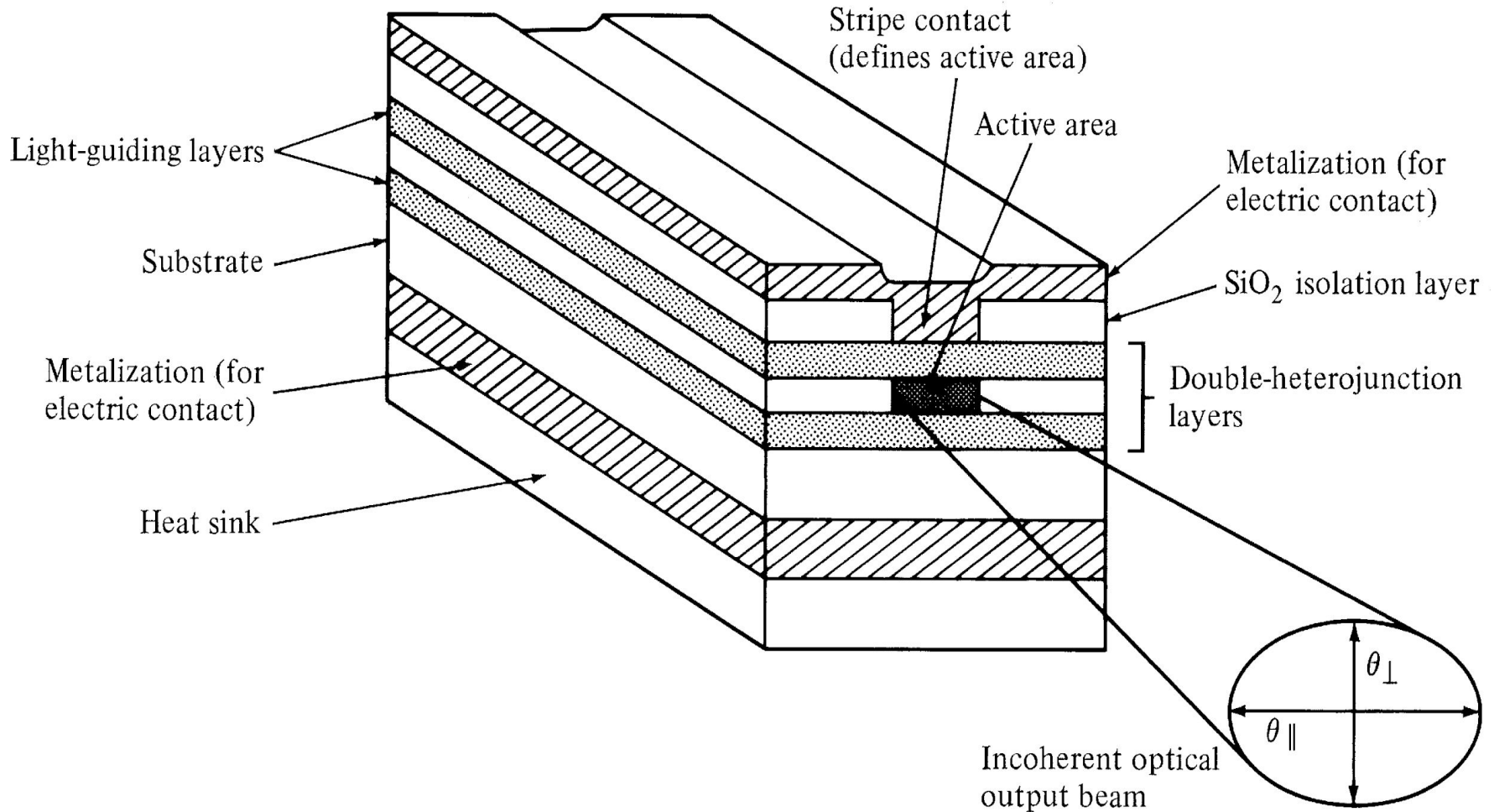
# Структура поверхностно излучающего светодиода



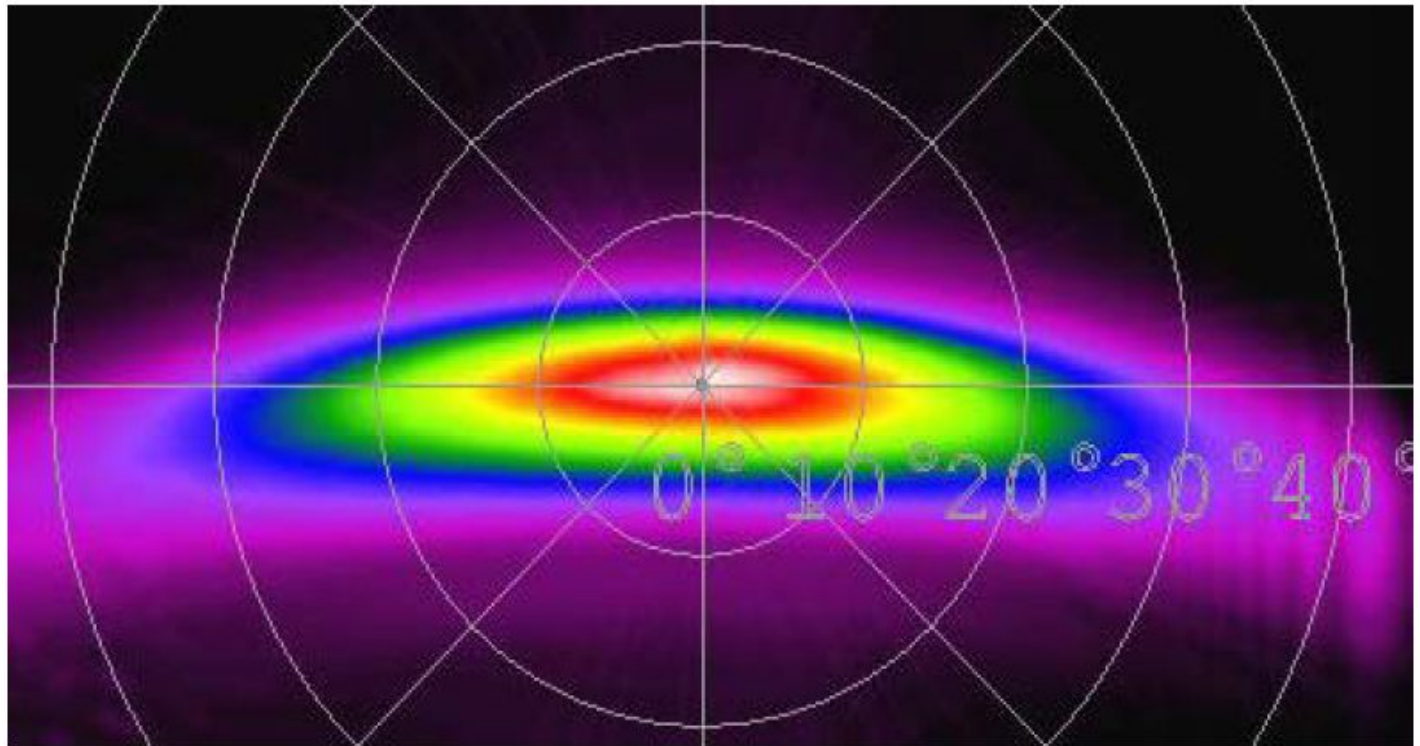
# Светодиоды



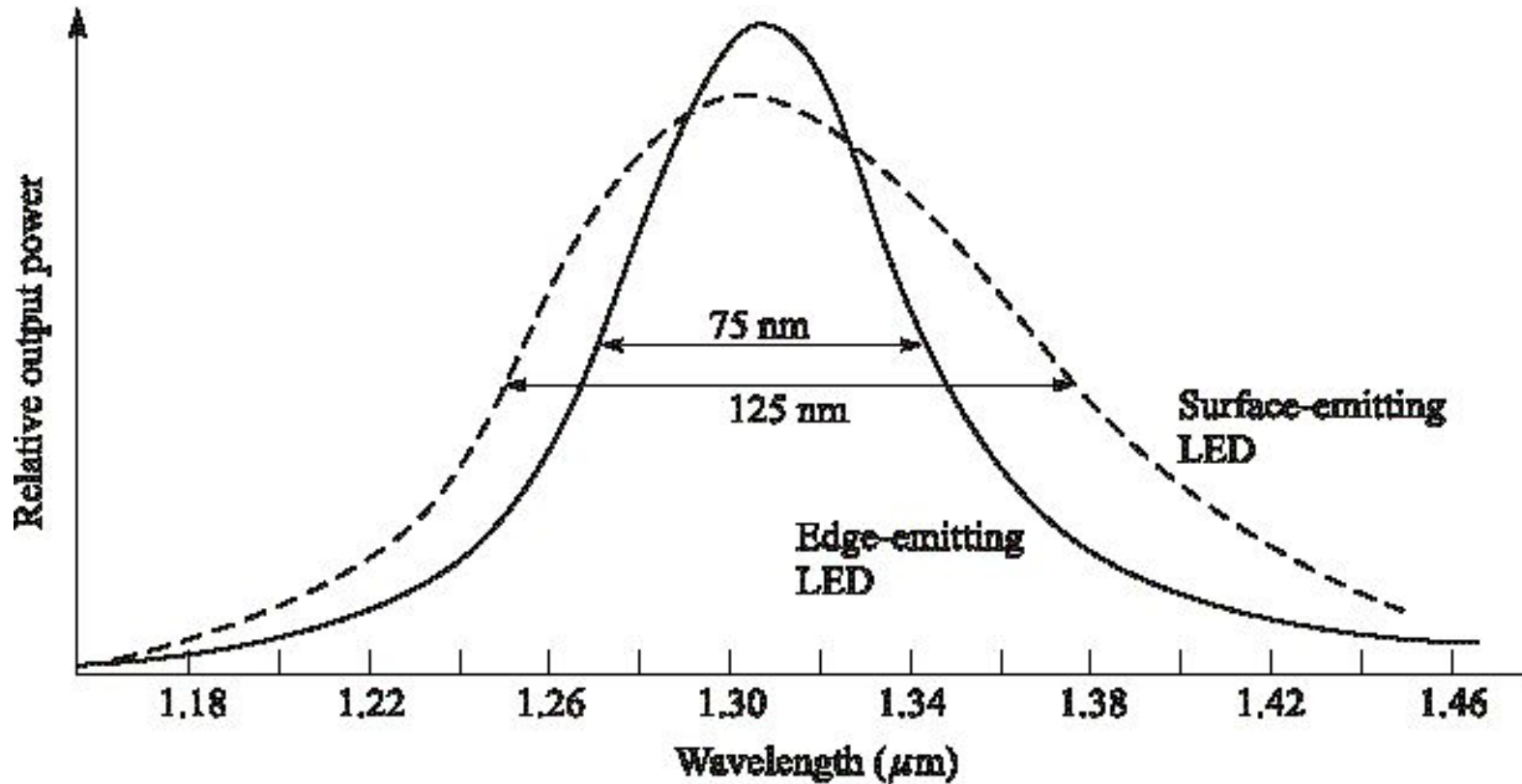
# Edge-emitting LED





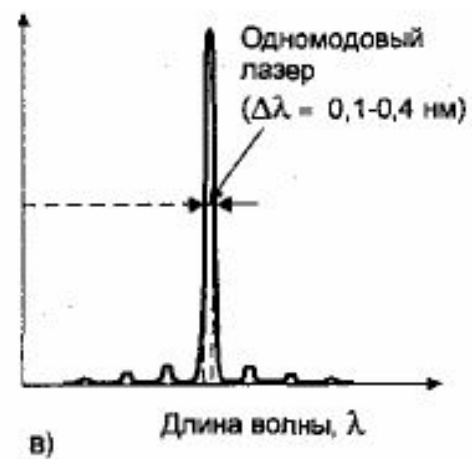
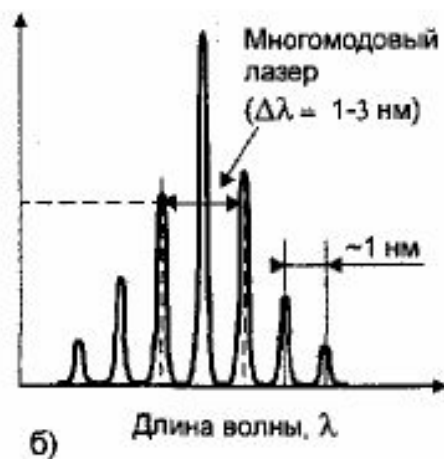


# LED spectral patterns

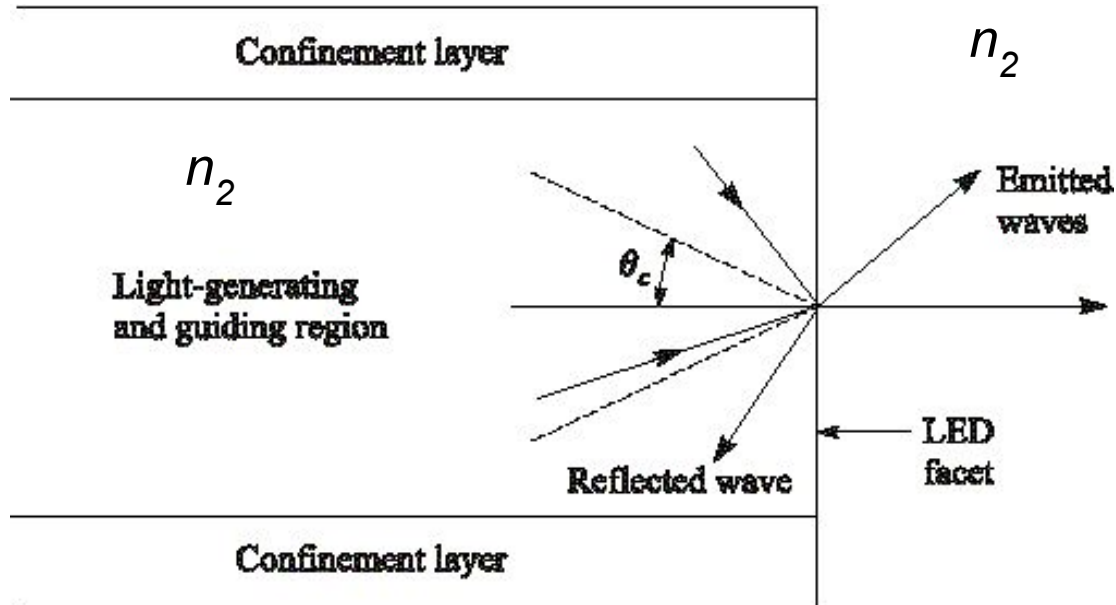


Edge emitting LED's have slightly narrow line width

# Светодиоды



# Light-emission cone



Fresnel Transmission Coefficient

$$T(0) = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

External Efficiency for air  
 $n_2=1, n_1 = n$

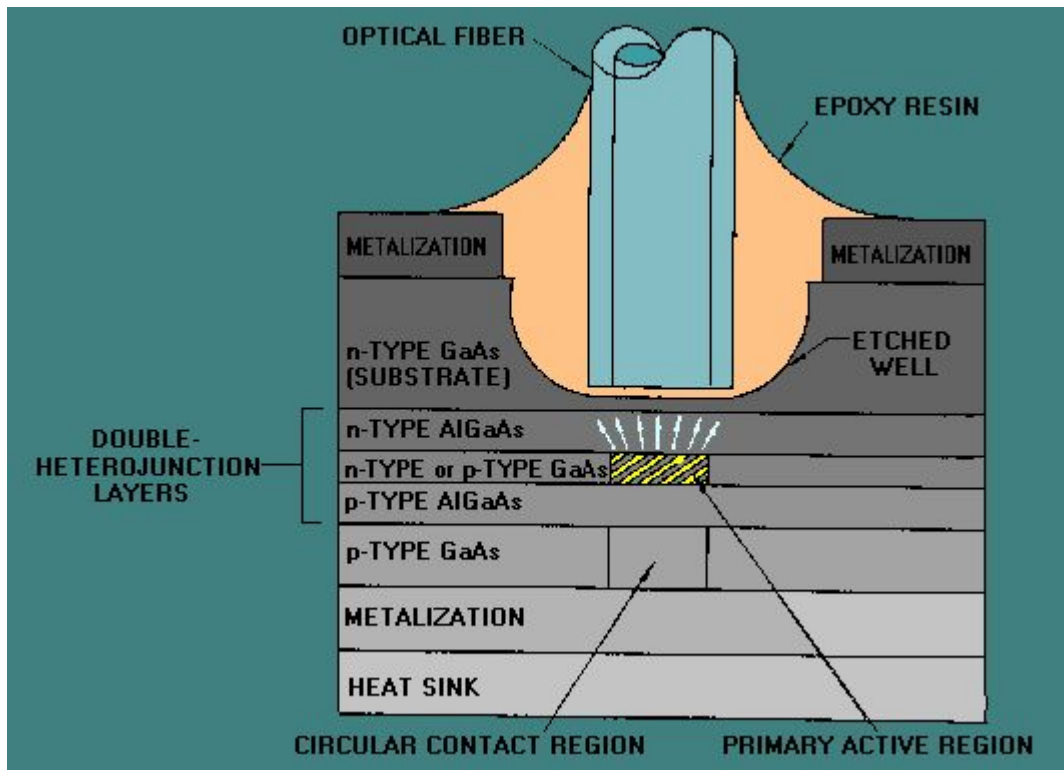
$$\eta_{ext} = \frac{1}{n(n+1)^2}$$

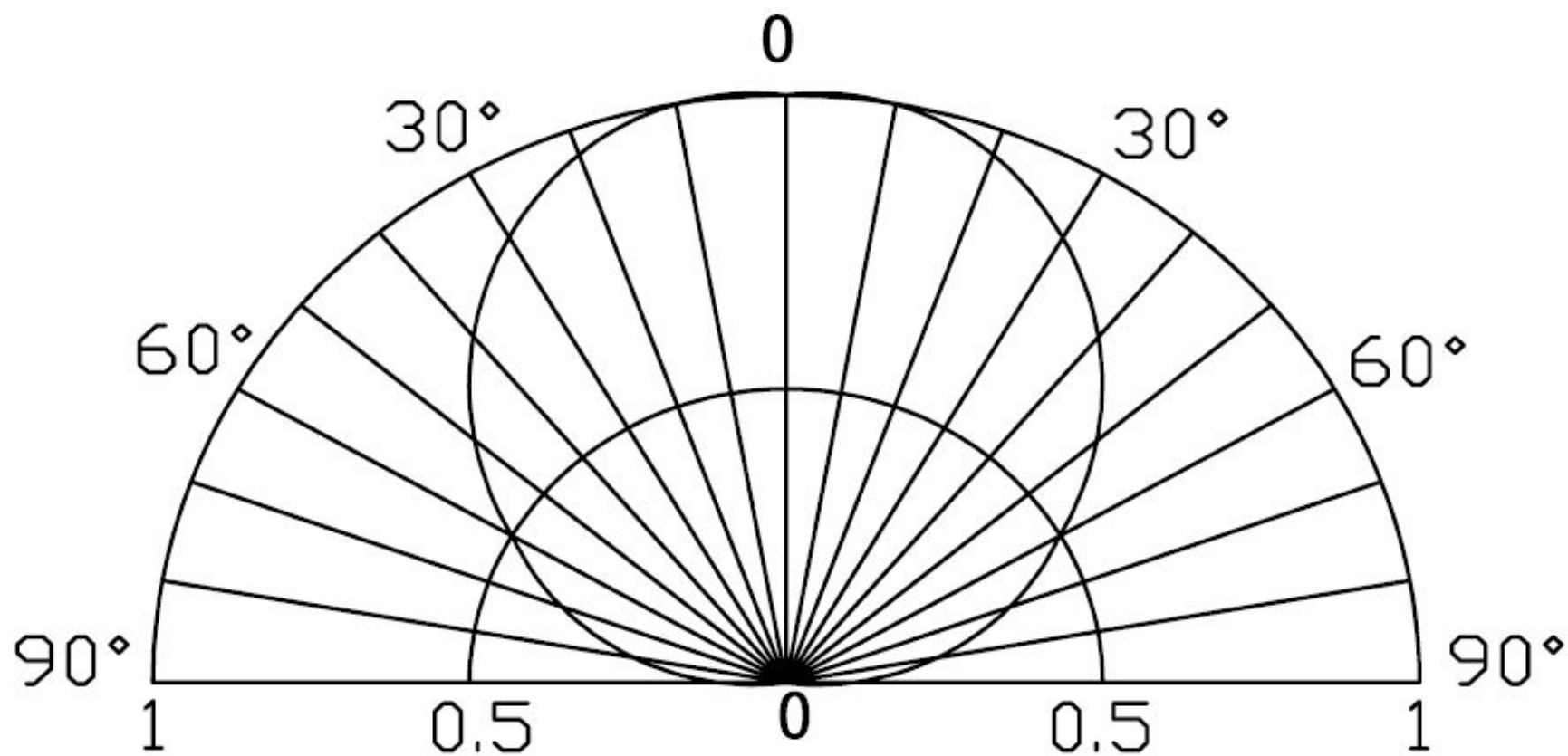
# Drawbacks of LED

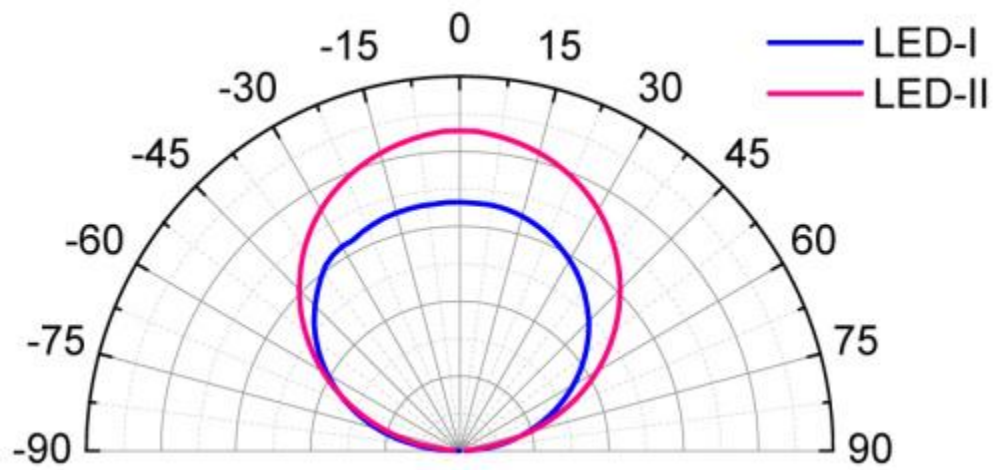
- Large line width (30-40 nm)
- Large beam width (Little optical power coupled in to the fiber)
- Incoherency
- Low E/O conversion efficiency

## Advantages

- Robust
- Linear

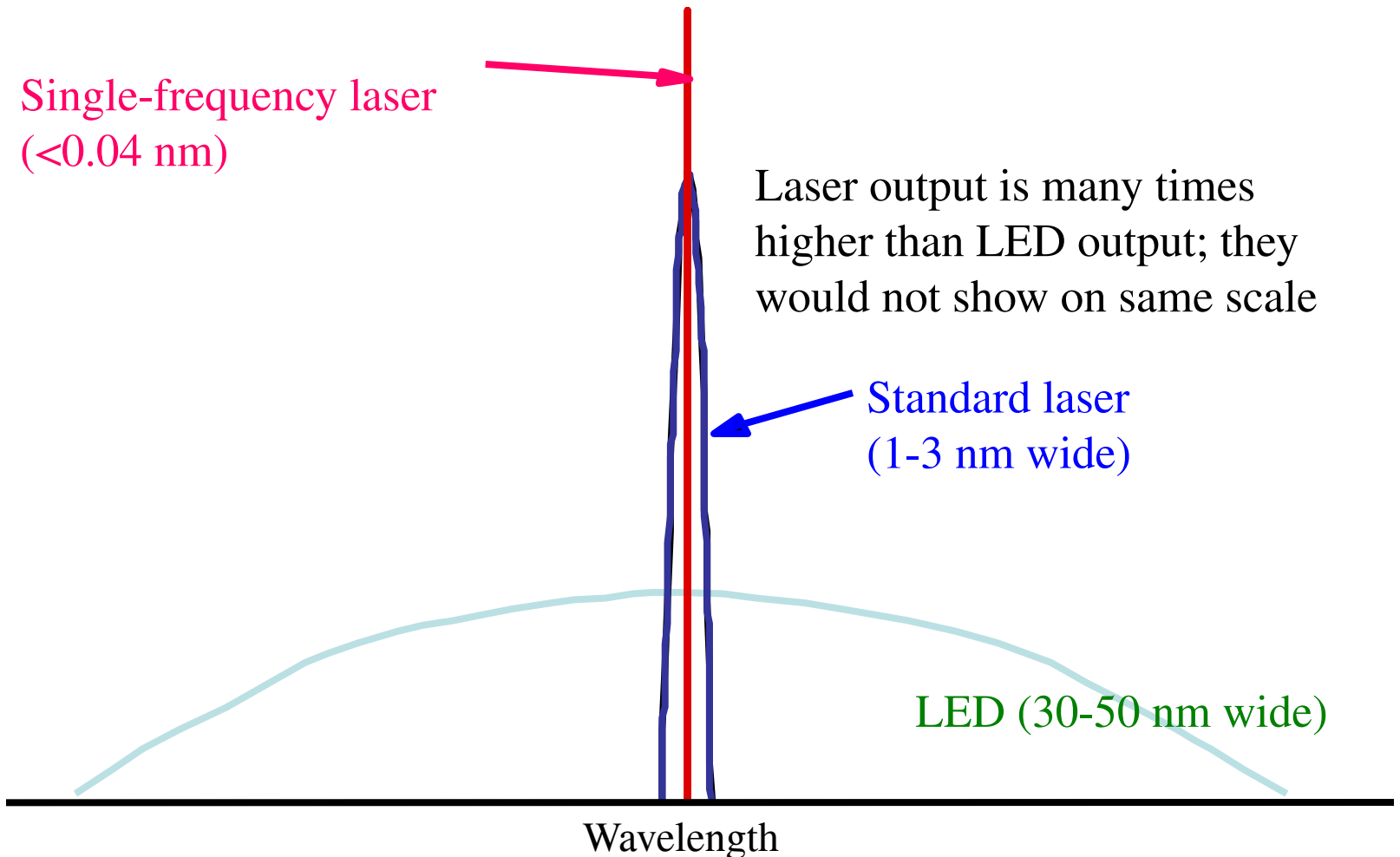


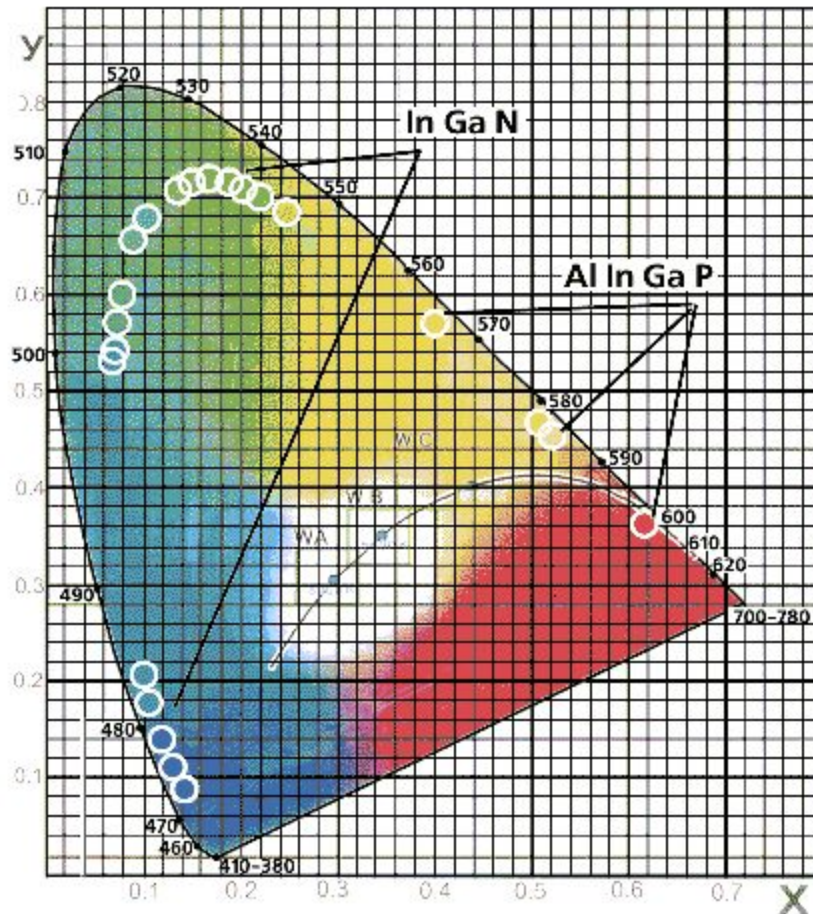




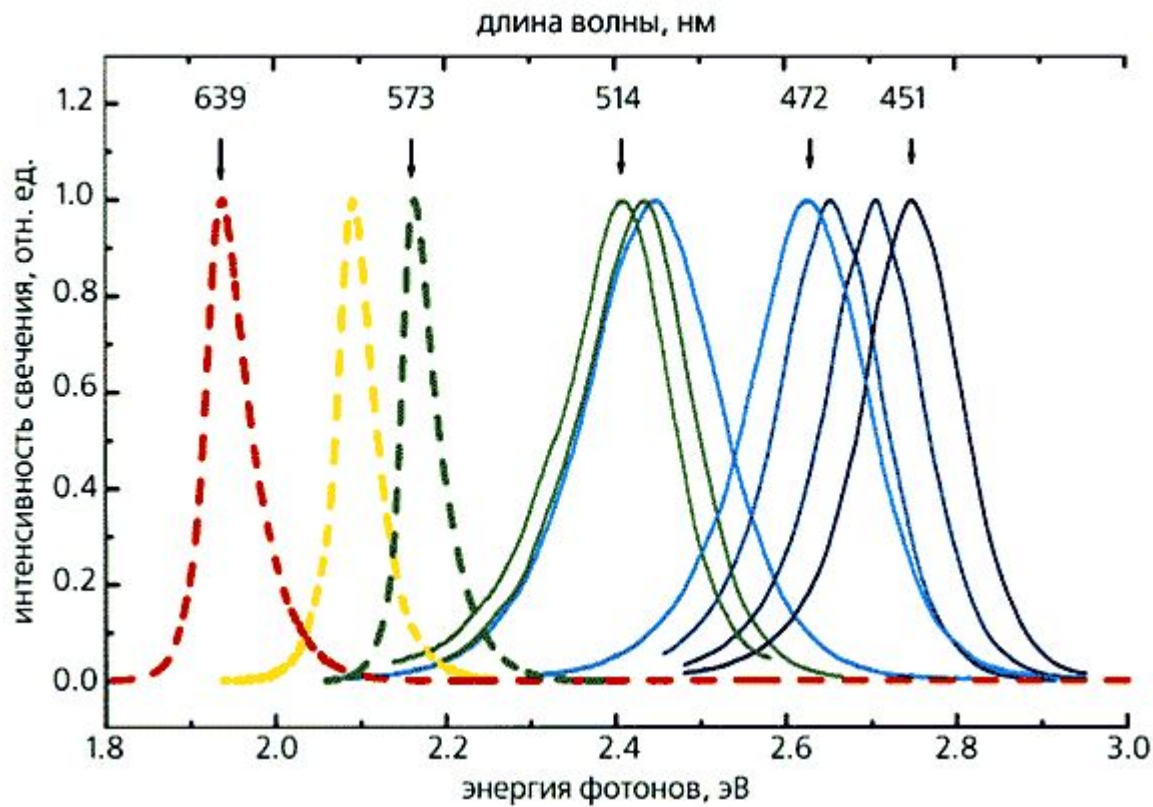


# LED vs. laser spectral width





Цветовой график  
Международной  
комиссии по  
освещению. В центре -  
область белого цвета,  
пересекаемая дугой,  
соответствующей цвету  
черного тела при  
разных температурах.  
Кружками отмечены  
цветовые координаты  
разных светодиодов



**Спектры  
электролюминесценции светодиодов  
на основе  
гетероструктур  
InGaN/AlGaIn/GaN  
(сплошные линии)  
и AlInGaP/GaP  
(штриховые).  
Видно, что они  
перекрывают всю  
область видимого  
спектра**

# Super luminescent LED (SLD)

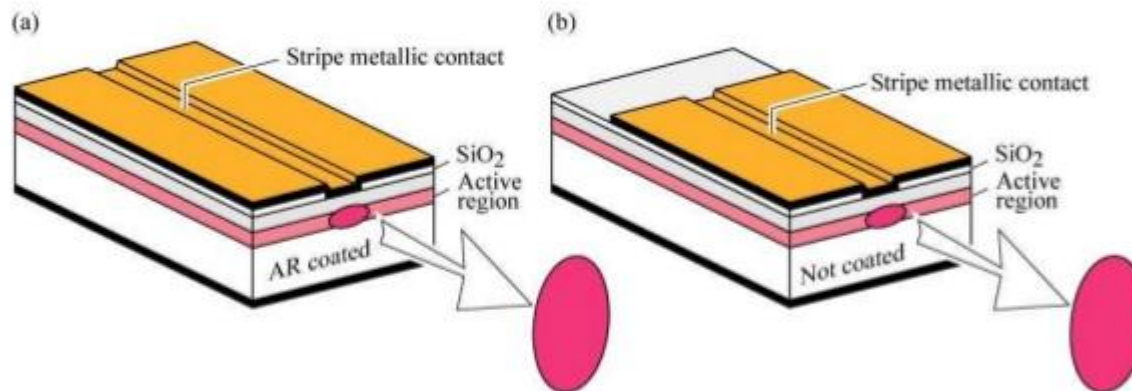
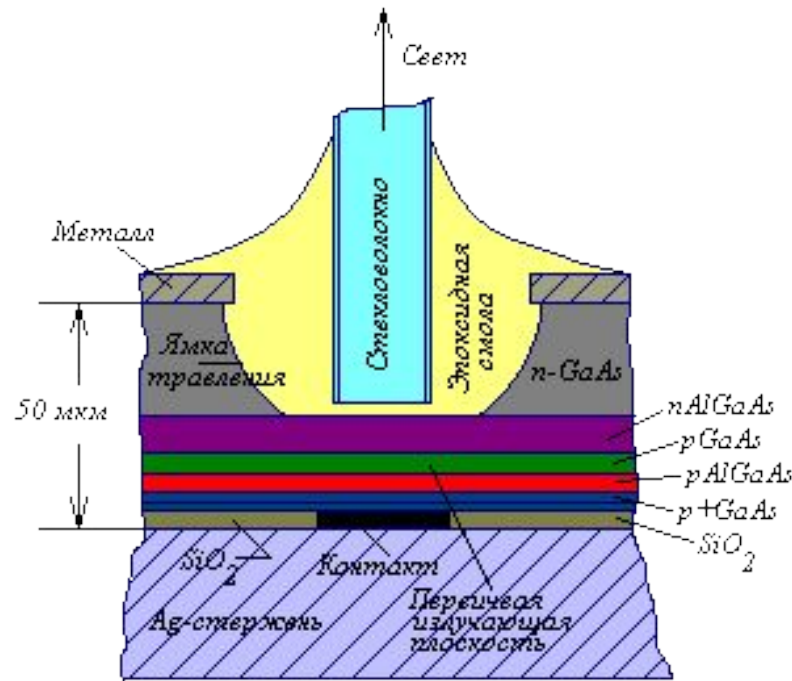
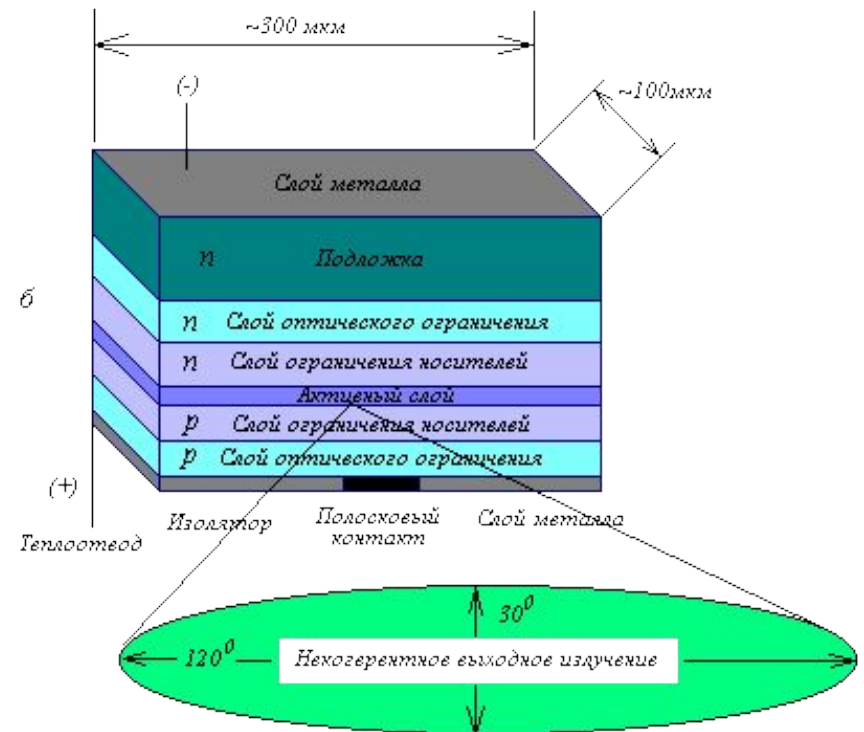


Fig. 23.9. Common structures of superluminescent diodes (SLDs). (a) SLD with cleaved facets coated with anti-reflection (AR) coatings. (b) SLD with cleaved, reflecting facets and stripe contact injecting current over the partial length of the device.

Различают два основных типа светодиодов, обеспечивающих ввод излучения в оптические волокна малого диаметра: светодиоды с излучающей поверхностью (рис.4) и с излучающей гранью (рис.).



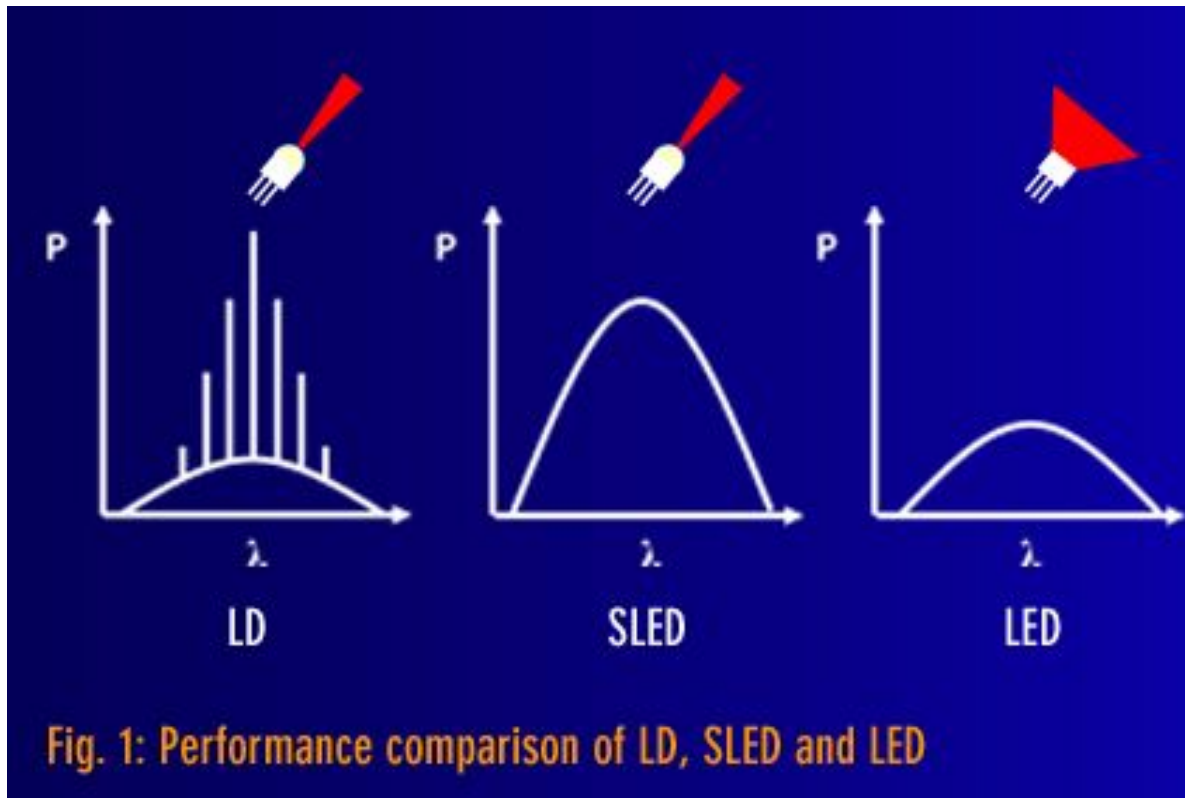
а



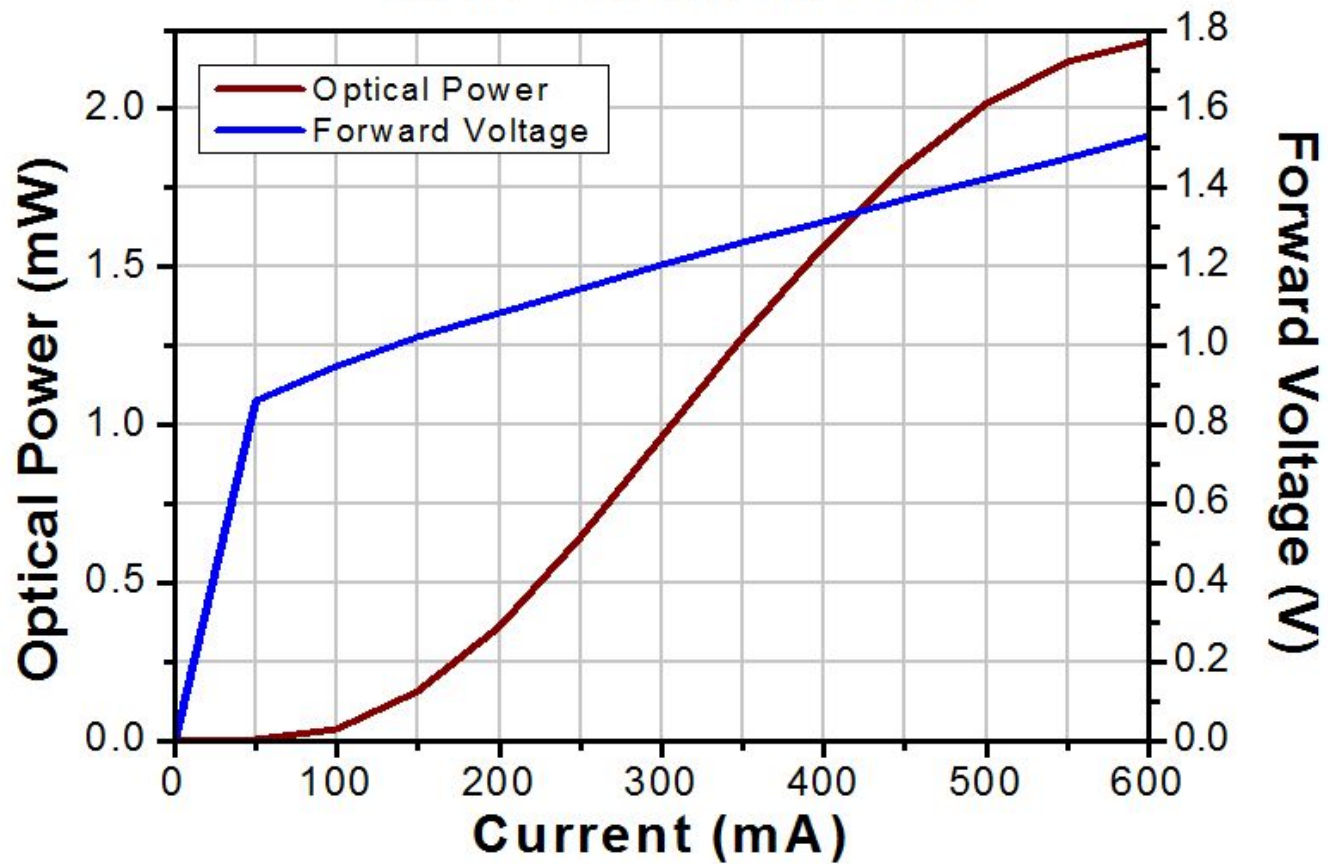
В отличие от полупроводниковых [светодиодов](#) В отличие от полупроводниковых светодиодов, в рабочем режиме суперлюминесцентные диоды излучают в режиме суперлюминесценции, то есть усиления спонтанного излучения за счет вынужденного испускания. В результате в СЛД, как и в [полупроводниковых лазерах](#) В отличие от полупроводниковых светодиодов, в рабочем режиме суперлюминесцентные диоды излучают в режиме суперлюминесценции, то есть усиления спонтанного излучения за счет вынужденного испускания. В результате в СЛД, как и в полупроводниковых лазерах, усиливается спонтанное излучение [p-n перехода](#) В отличие от полупроводниковых светодиодов, в рабочем режиме суперлюминесцентные диоды излучают в режиме суперлюминесценции, то есть усиления спонтанного излучения за счет вынужденного испускания. В результате в СЛД, как и в полупроводниковых лазерах, усиливается спонтанное излучение p-n перехода [светодиода](#).

Такой механизм излучения определяет характерный вид зависимости мощности излучения от подводимого тока: в слаботочном режиме суперлюминесцентный диод работает как обычный светодиод, при достижении инверсии населённости и выходе на суперлюминесцентный режим мощность излучения резко возрастает. Рабочие плотности тока режима суперлюминесценции у СЛД значительно выше, чем у светодиодов (из-за необходимости обеспечения инверсии заселённости) и у полупроводниковых лазеров (меньший оптический путь усиления из-за отсутствия оптического резонатора).

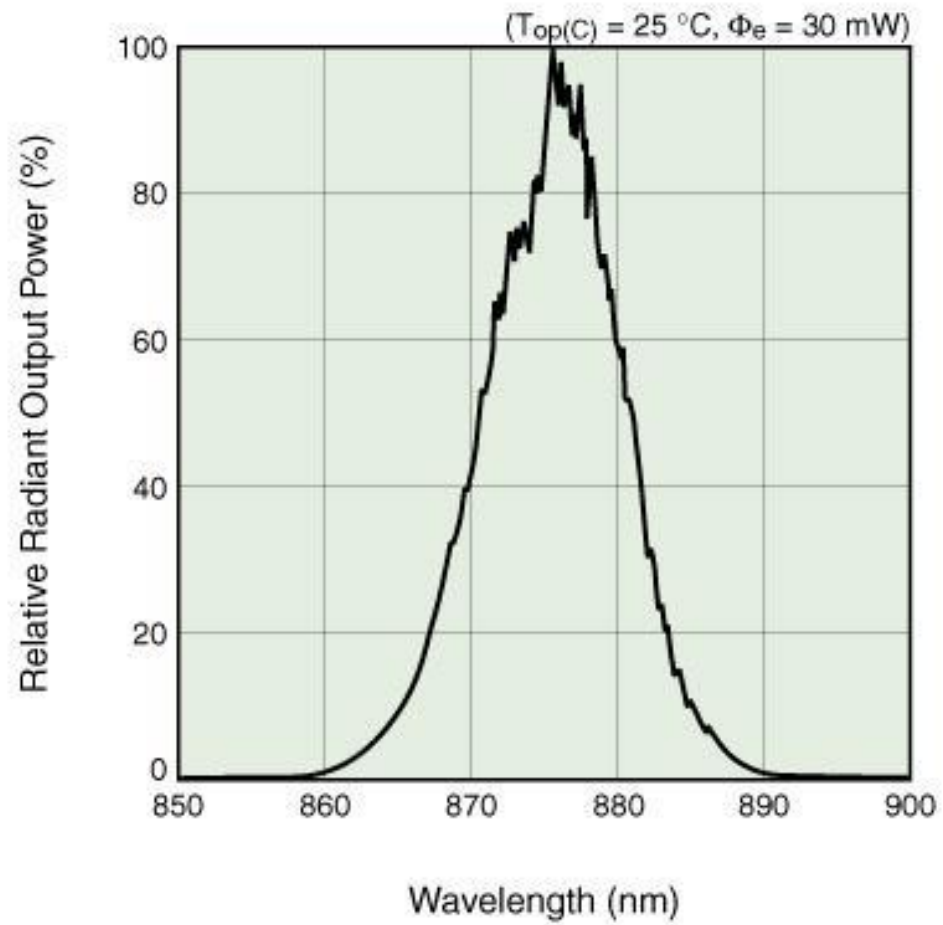
Суперлюминесцентные диоды сходны с полупроводниковыми лазерами тем, что значительная доля излучения обеспечивается механизмом вынужденного излучения, однако в отличие от лазеров в СЛД отсутствуют зеркала резонатора (часто на выходную поверхность СЛД для подавления отражения наносится просветляющее покрытие), поэтому излучение делает (в идеале) только один проход по усиливающей среде, и усиливаются не отдельные [моды](#), а все

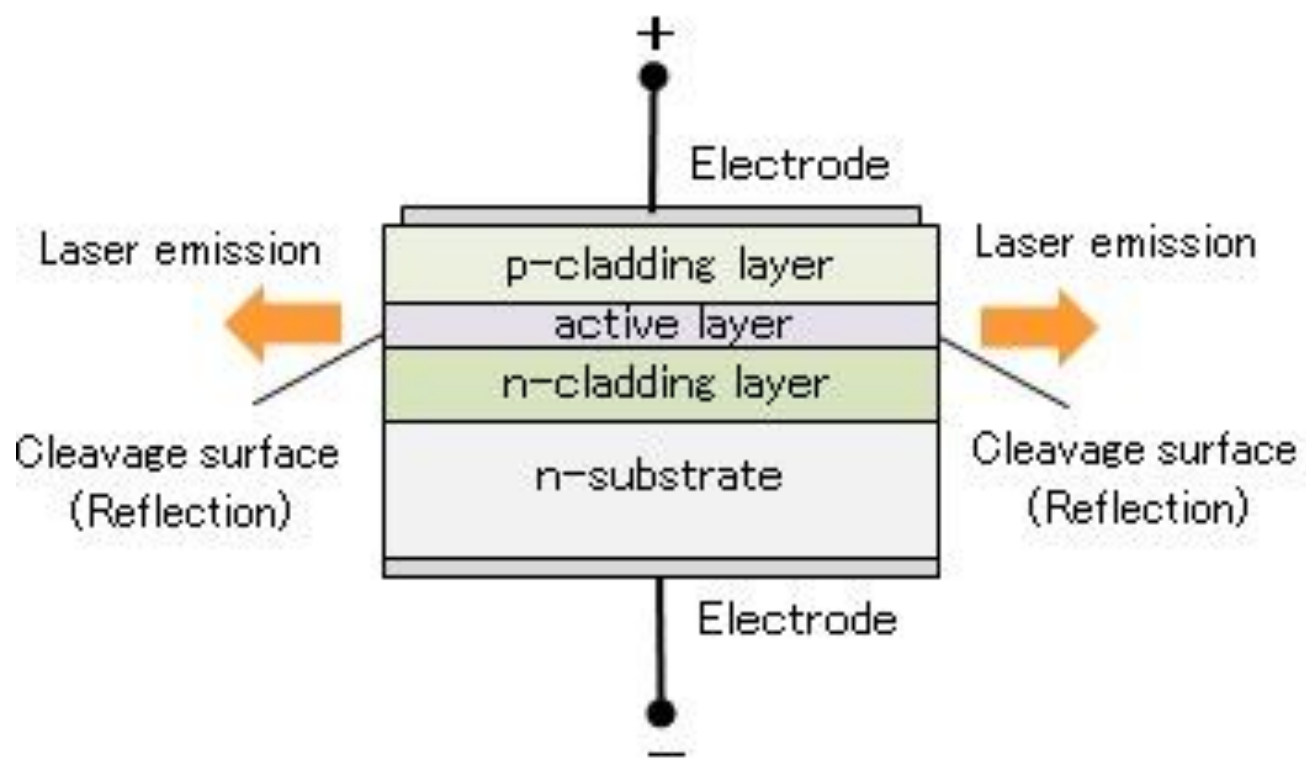


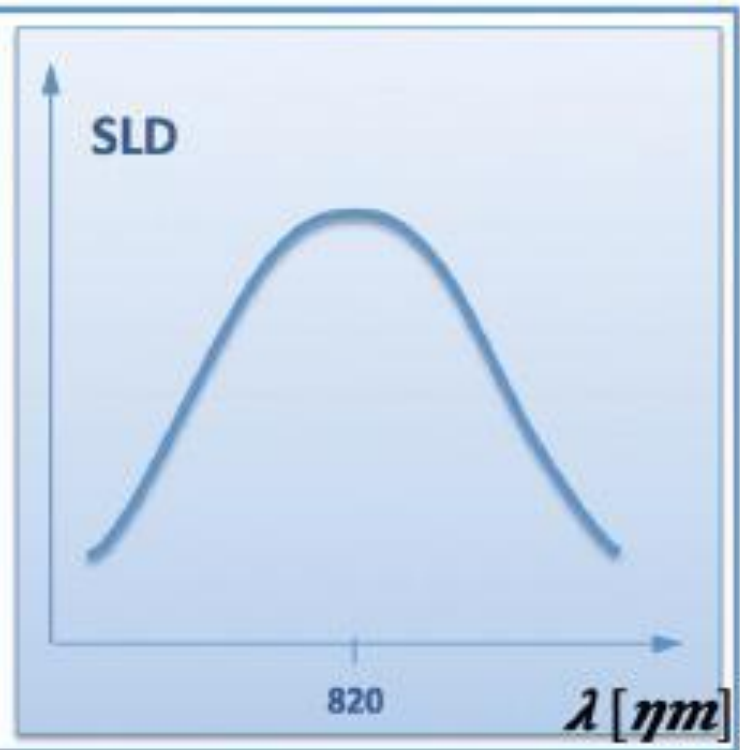
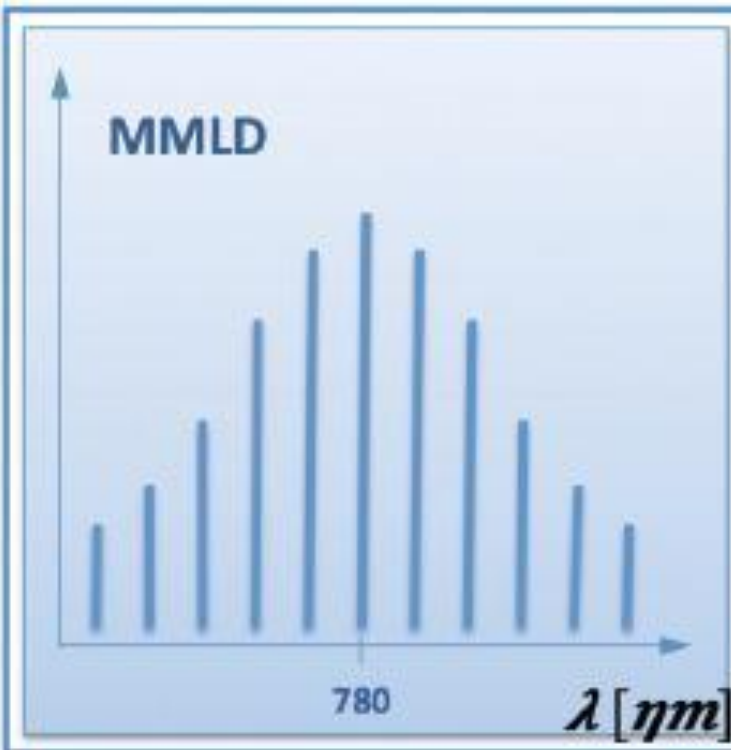
## SLD1550x-A2 LIV

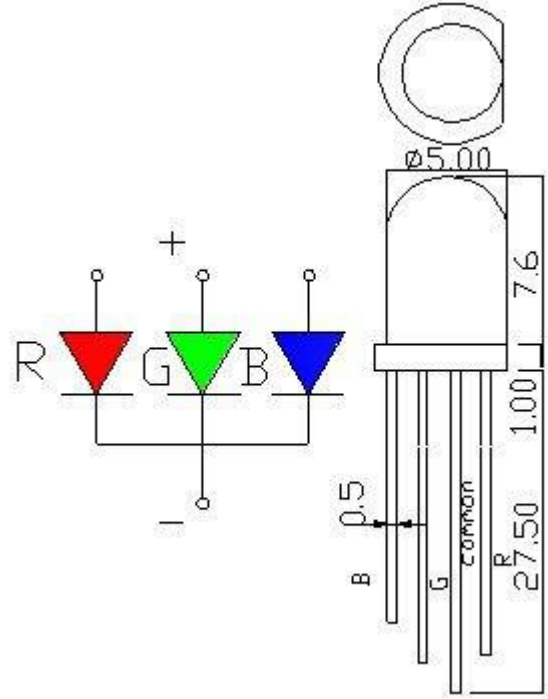


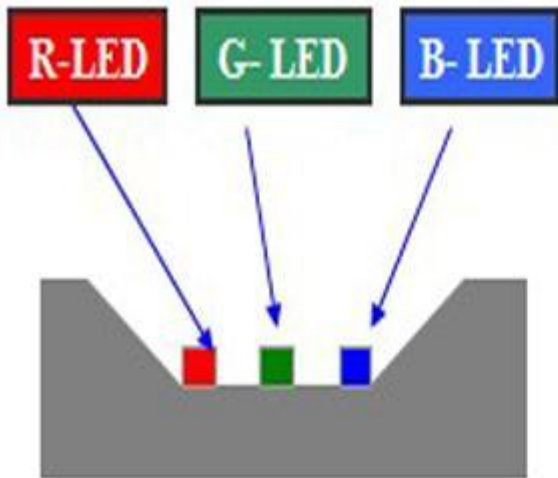




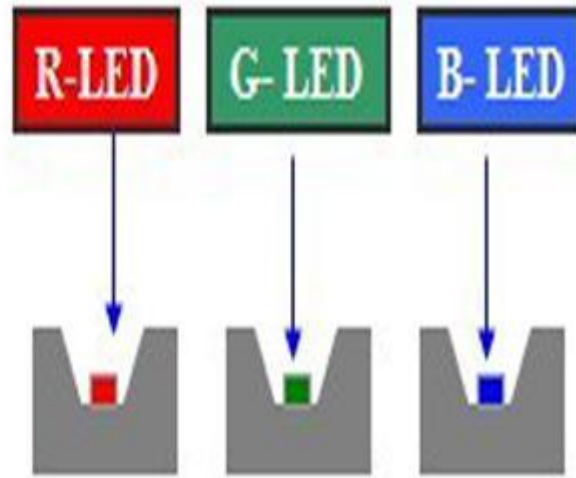




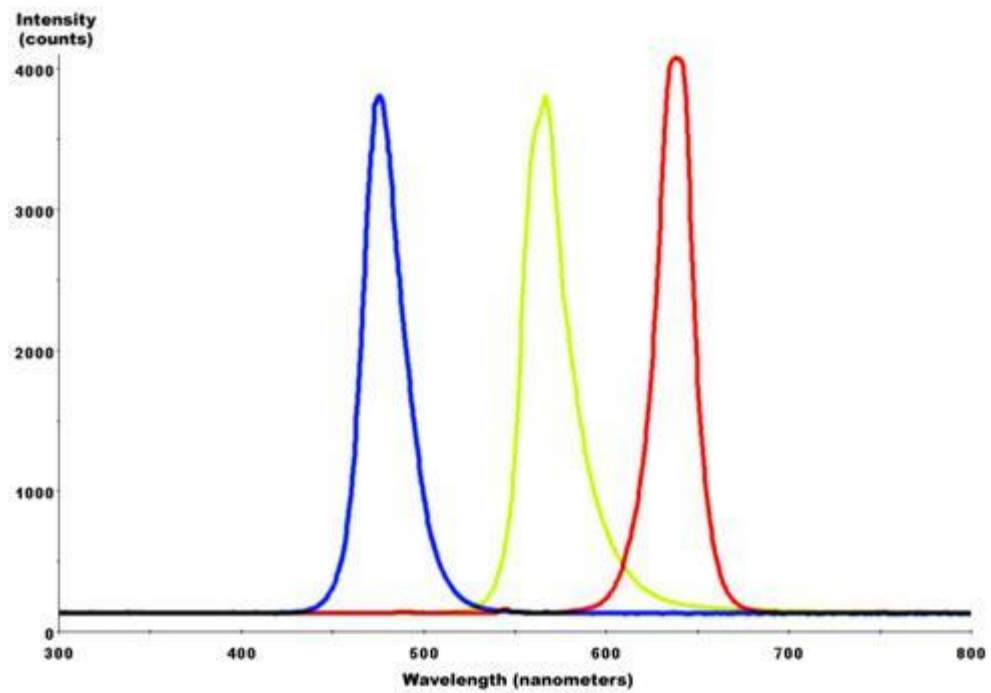


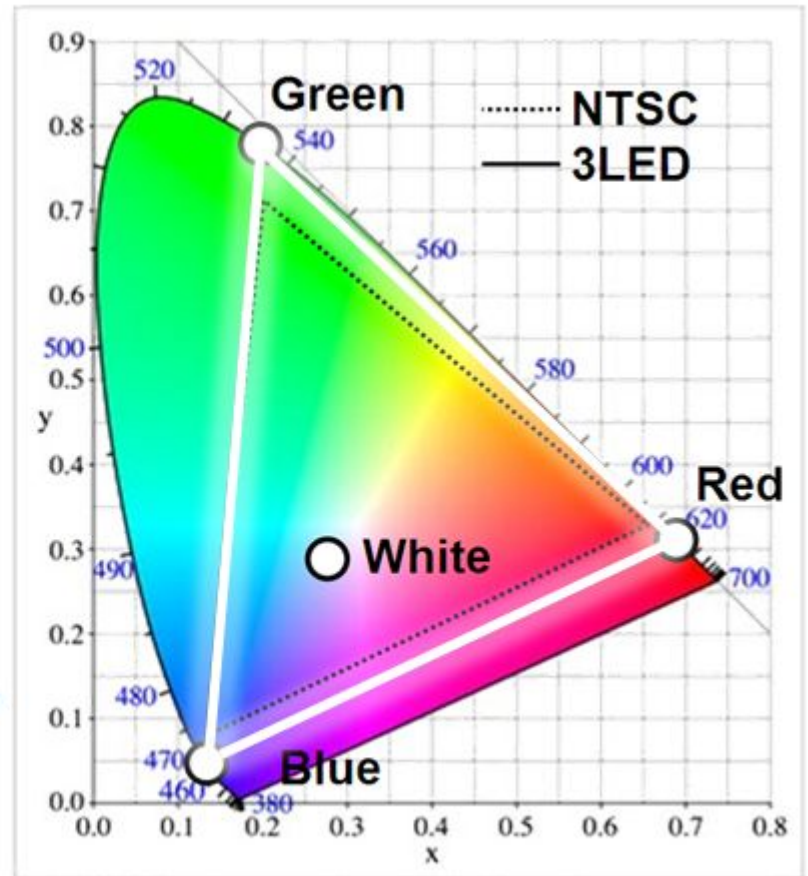
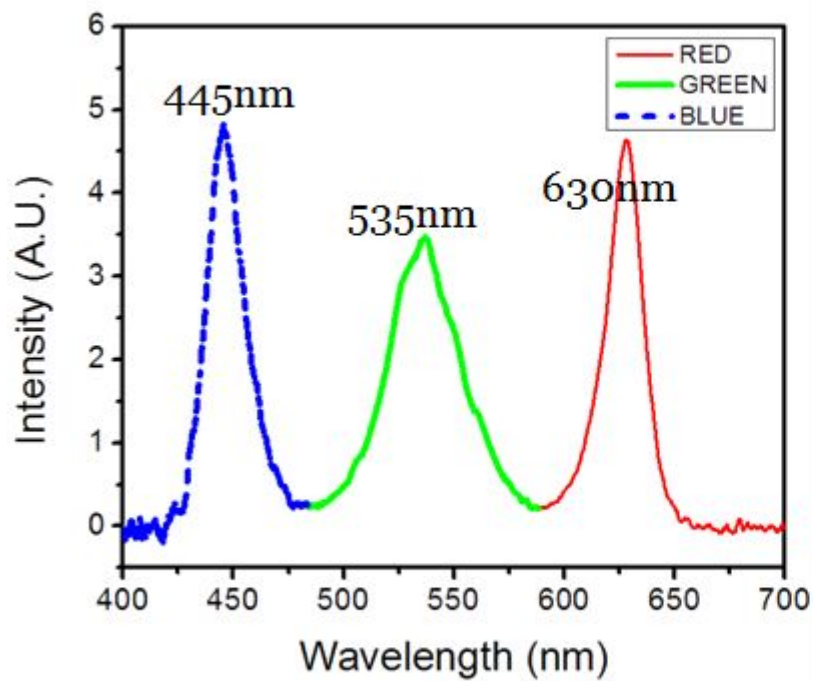


RGB triple LED chips are packaged  
in one white LED lamp



RGB three individual LED lamps emit white  
lights by mixing lights together





# Фотоэлементы

Фотоэлементами называют фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы и другие светочувствительные приборы, используемые в электронной автоматике в качестве датчиков устройств, реагирующих, например, на изменение интенсивности освещения.



# Фоторезисторы

- Это светочувствительные элементы, принцип действия которых основан на изменении проводимости полупроводникового материала под действием света. Он представляет собой пленку из полупроводникового материала (сернистый свинец, селенид кремния, сернистый кадмий), обладающего очень высокой чувствительностью к свету, которую наносят на стекло или керамику. В цепи источника постоянного или переменного напряжения фоторезистор изменяет свое сопротивление и ток в цепи в зависимости от интенсивности света.

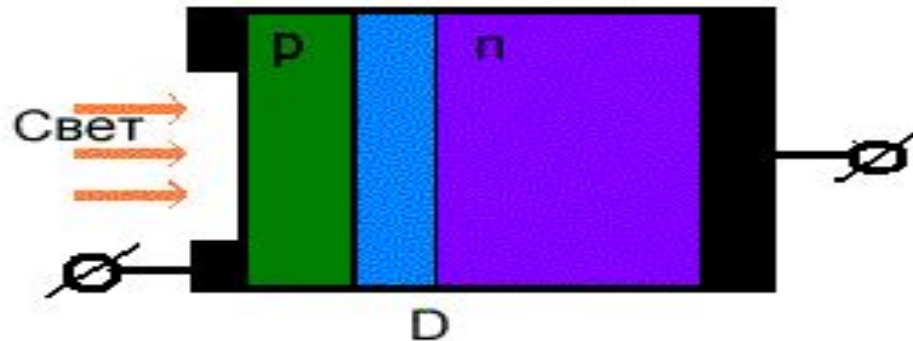


# Фотодиоды

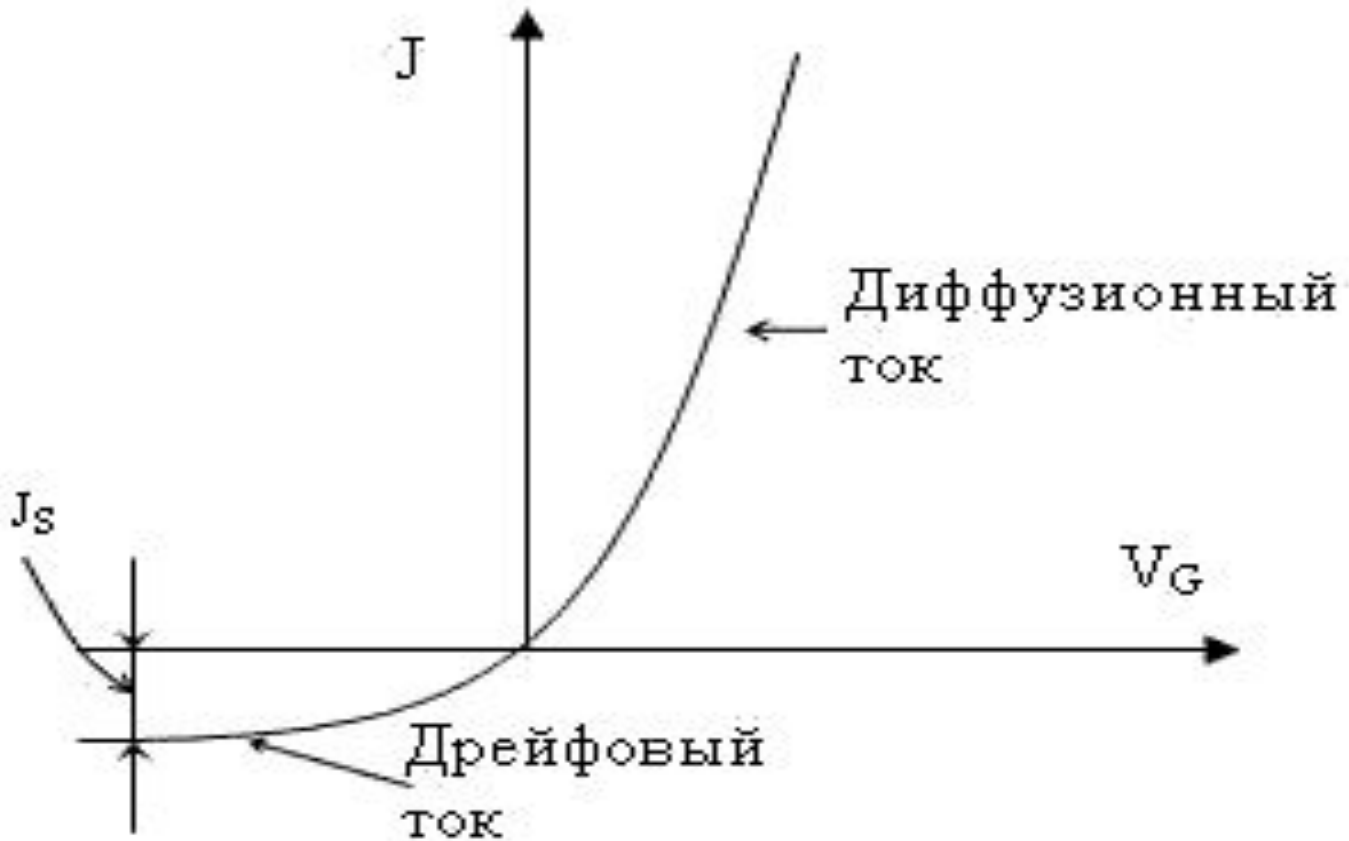
## Принцип действия:

под действием оптического излучения образуется электронно-дырочная пара и в области пространственного заряда р-п перехода резко возрастает обратный ток фотодиода.

## Схема фотодиода:



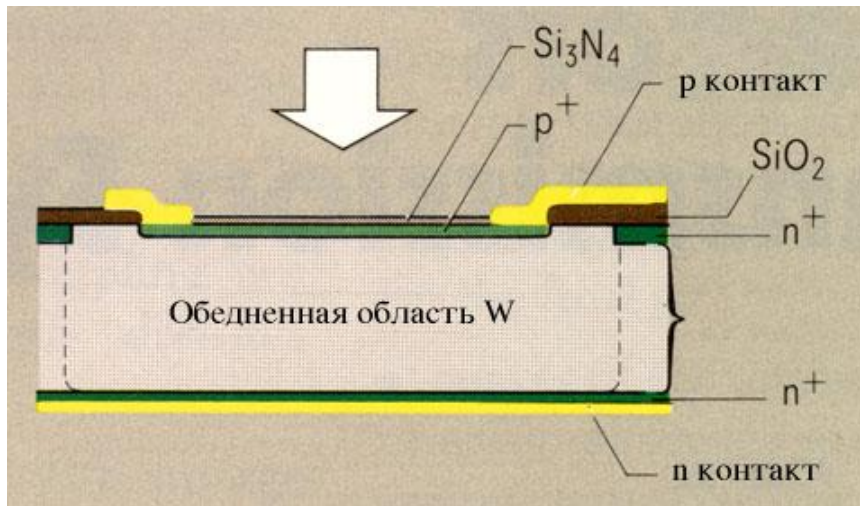
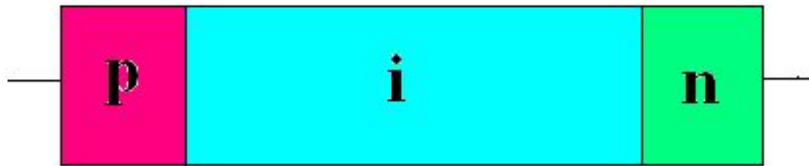
# ВАХ диода на основе р-п – перехода



# р-п-фотодиод в оптической связи

- Две характеристики р-п-фотодиодов ограничивают их применение в волоконно-оптической связи.
- Во-первых, обедненная зона составляет достаточно малую часть всего объема диода, и большая часть поглощенных фотонов не приводит к генерации тока во внешнем контуре. Возникающие при этом электроны и дырки рекомбинируют на пути к области сильного поля. Для генерации тока достаточной силы требуется мощный световой источник.
- Во-вторых, наличие медленного отклика, обусловленного медленной диффузией, замедляет работу диода, делая его непригодным для средне- и высокоскоростных применений. Это позволяет использовать фотодиод на основе р-п – перехода только в килогерцовом диапазоне.

# р-і-п-фотодиод

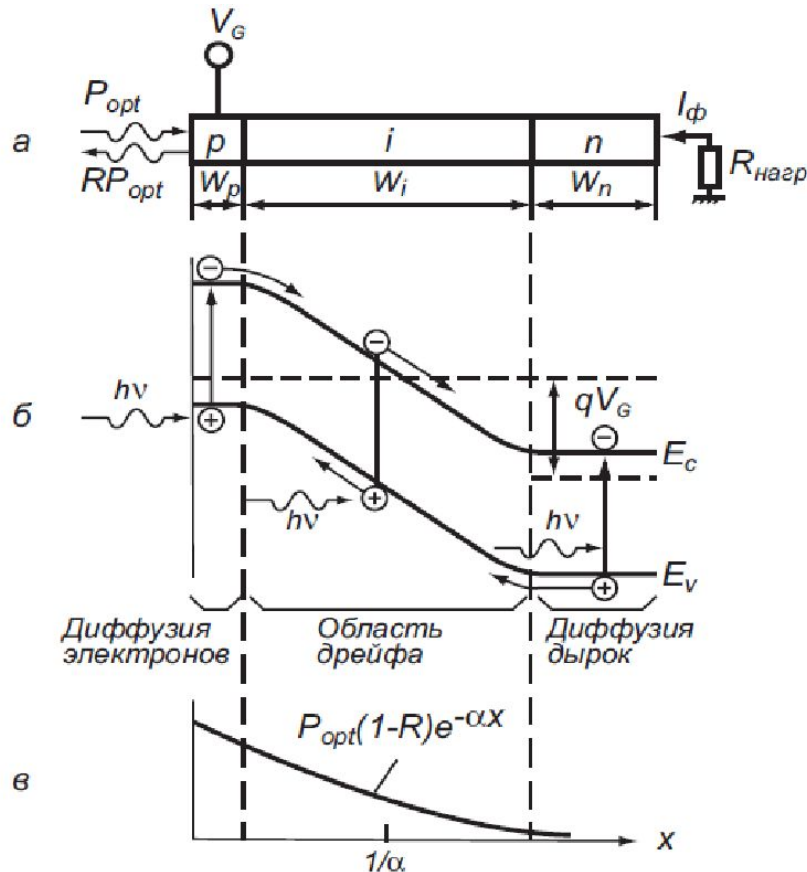


Конструкция ріп-фотодиода

**р-і-п-фотодиод** — разновидность фотодиода, в котором между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственный (нелегированный) полупроводник (*i*-область).

Толщина *i*-слоя выбирается достаточно большой (50 – 70 мкм), легированные слои сделаны очень тонкими → все оптическое излучение поглощалось в *i*-слое и сокращалось время переноса зарядов из *i*-зоны в легированные области

# P-i-n фотодиод

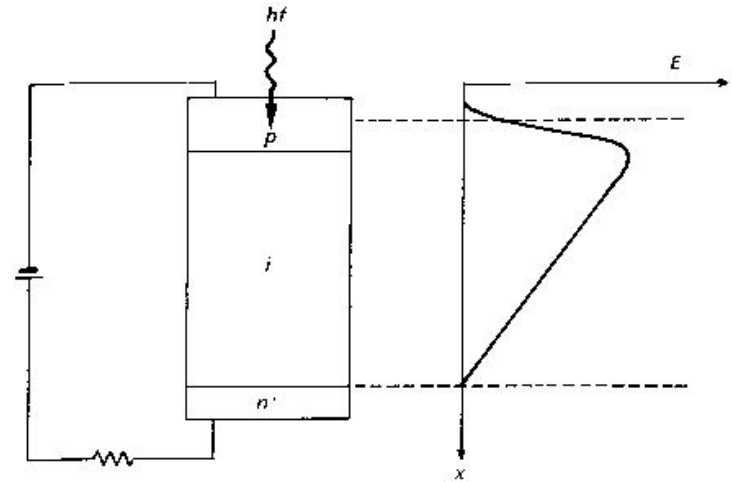
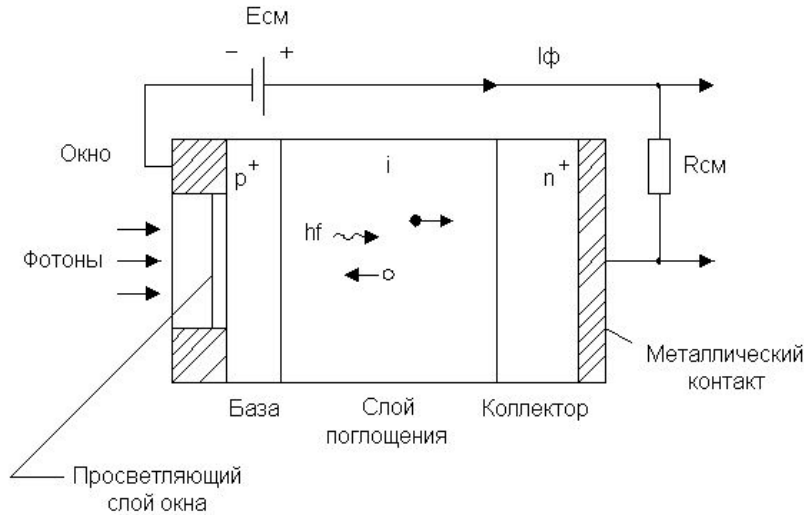


**i-слой называется обеднённым слоем, поскольку в нём нет свободных носителей. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, поэтому всё напряжение падает на i-слое и в нём создаётся максимальное значение электрического поля.**

Рис. 5.11. Принцип работы p-i-n фотодиода:

а – поперечный разрез диода; б – зонная диаграмма в условиях обратного смещения; в – распределение интенсивности излучения

# Принцип работы



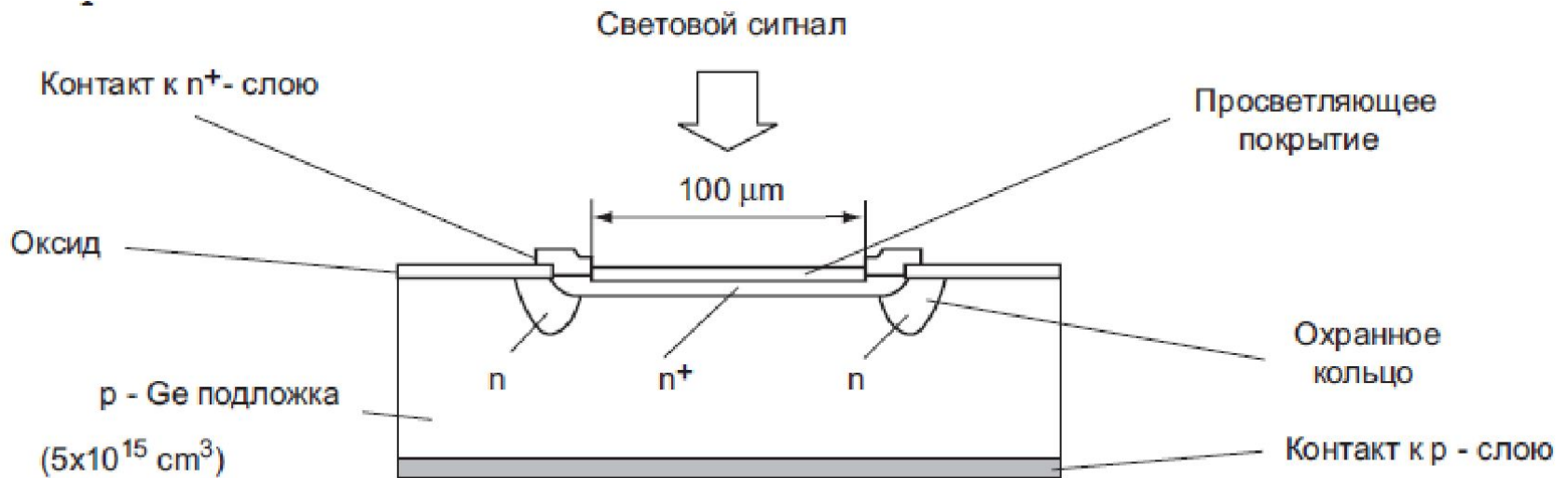
**Фотон в i-области порождает электронно-дырочные пары. Носители, попадая в электрическое поле ОПЗ, двигаются к высоколегированным областям, создавая электрический ток, который может детектироваться внешней цепью. Проводимость диода зависит от длины волны, интенсивности и частоты модуляции света.**

# Основные параметры

- **чувствительность** (в современных р-і-п-фотодиодах чувствительность составляет величину от 10 нВт до 100 пВт, что соответствует -50 дБм - -70 дБм);
- **квантовая эффективность** (в р-і-п-фотодиодах обычно достигает 80%, для фотодиодов, сконструированных для применения в оптоволоконных линиях, емкость перехода равна 0,2 пФ при рабочей поверхности диода 200 мкм);
- **время отклика** (фотогенерированные носители в і-слое будут разделяться в сильном электрическом поле, и фотоотклик таких диодов будет быстрым).



# Схема конструкции р-і-п ФД



# Кремниевые p-i-n-фотодиоды

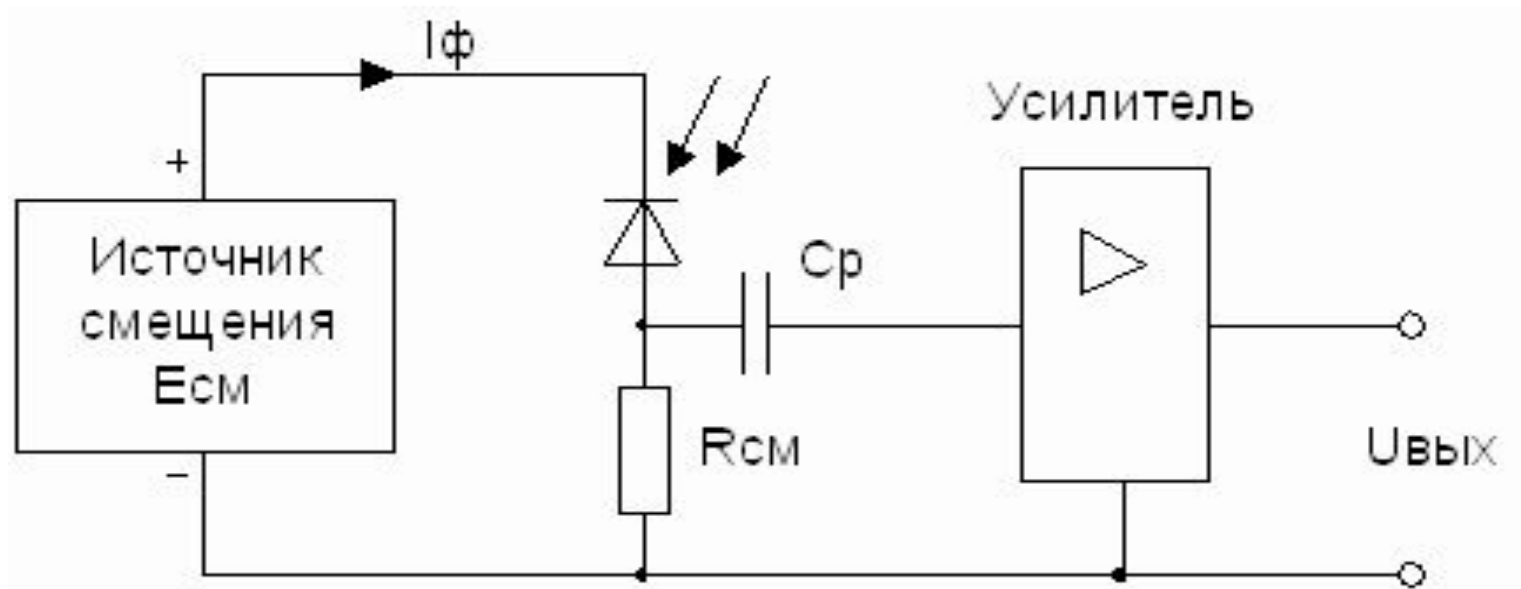


Диоды поставляются в разных корпусах (металлический, керамический, пластмассовый) и с различными размерами активной области. Также доступны p-i-n-фотодиоды с мини-линзами, благодаря которым повышается коэффициент передачи оптической мощности.

Обладают низкой зарядовой емкостью, позволяющей им работать в широком диапазоне частот при низком напряжении смещения.

При подключении кремниевых p-i-n-фотодиодов к высокоскоростному предусилителю их малая общая емкость обеспечивает высокое быстродействие и низкий уровень шума. Эта особенность делает кремниевые p-i-n-фотодиоды идеальными детекторами для применения в высокоскоростной фотометрии и оптических линиях связи.

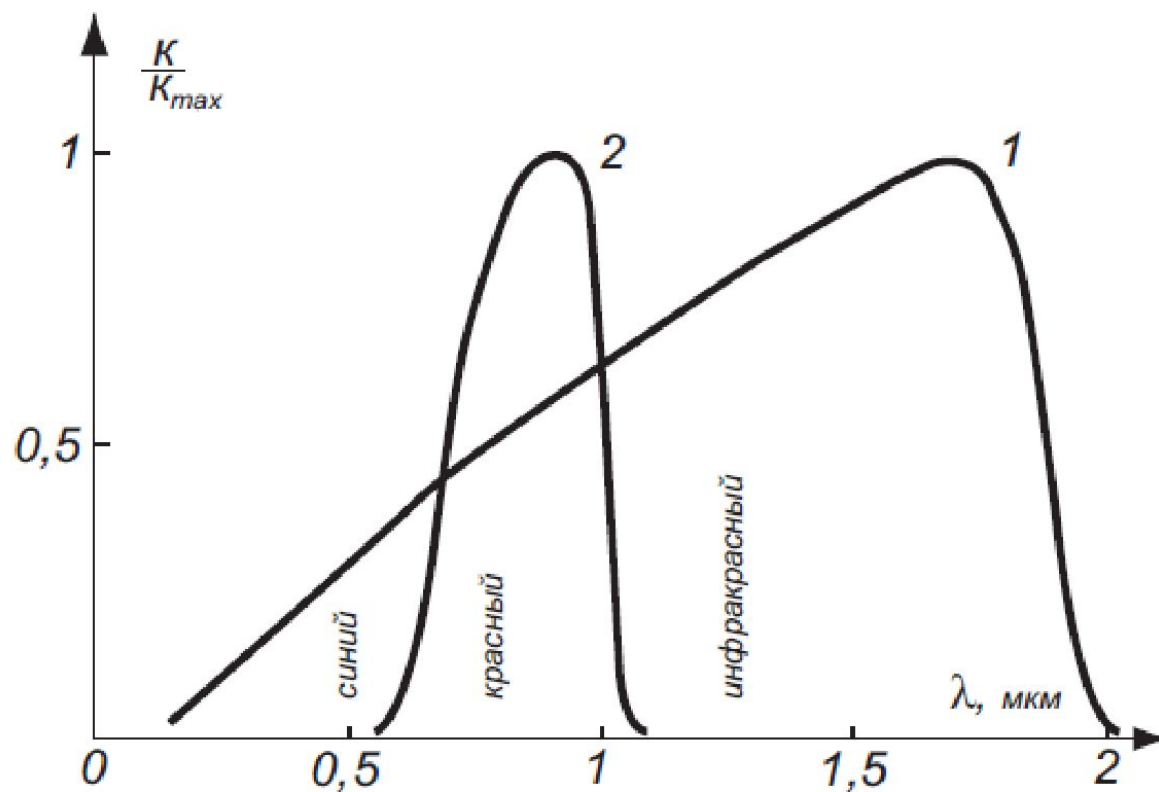
# Схема включения фотодиода



В схеме включения разделительная емкость  $C_p$  позволяет устранить высокое напряжение смещения до 30 В со входа мал шумящего усилителя.

Динамический диапазон входных оптических мощностей для схемы фотодиода с усилителем может достигать 60 дБ.

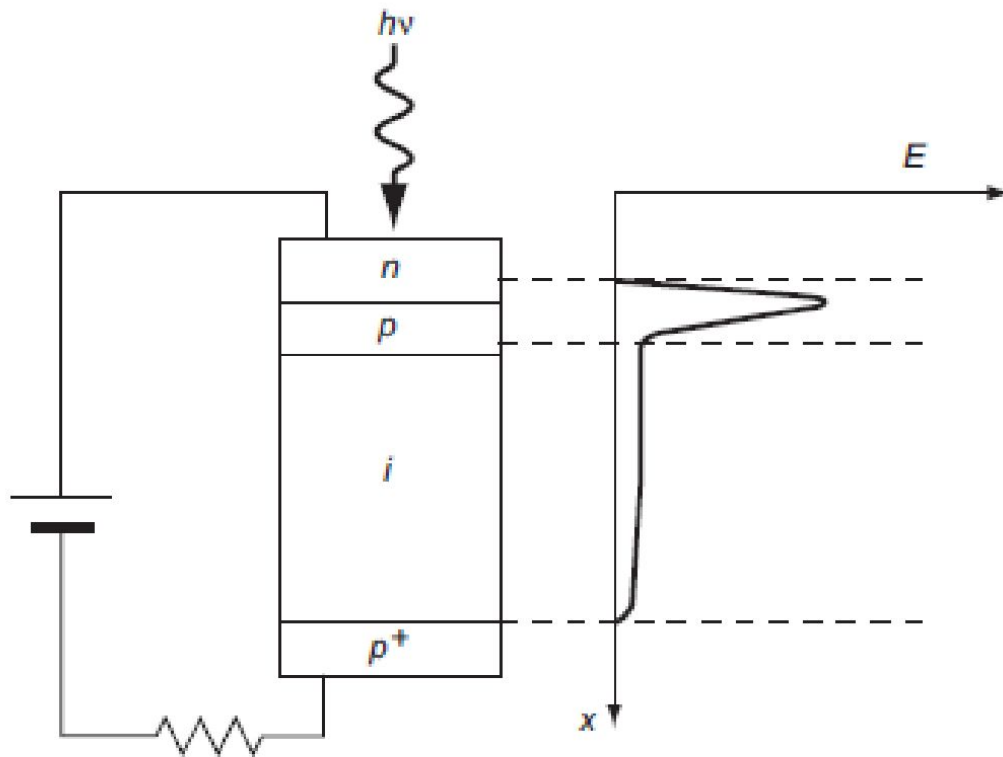
# Спектральная чувствительность Ge (1) и Si (2) приборов



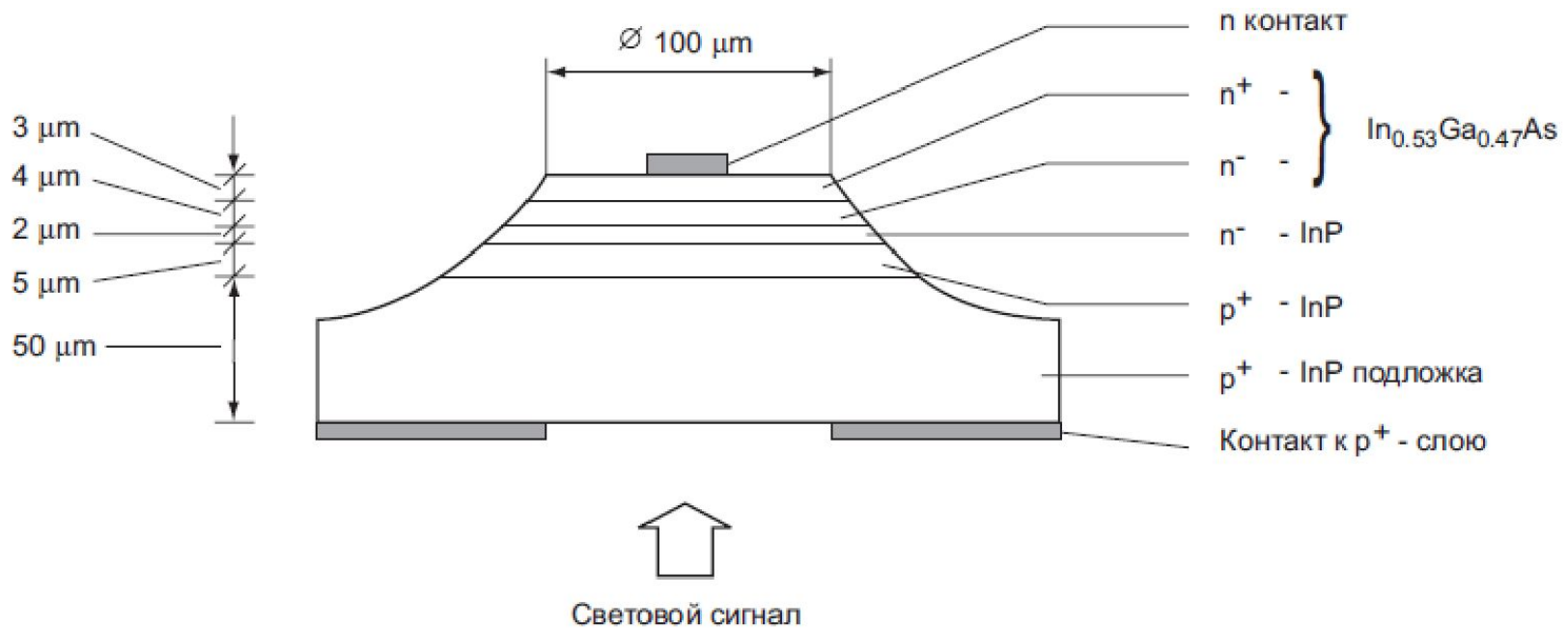
# Лавинный фотодиод

Лавинный фотодиод (APD) отличается наличием очень сильного электрического поля в некоторой части обедненной зоны. *Первоначальные носители* — свободные электроны и дырки, появляющиеся после поглощения света, — под действием этого поля ускоряются, приобретая несколько электрон-вольт кинетической энергии. При столкновении быстрых носителей с нейтральными атомами происходит передача части кинетической энергии электронам валентной зоны и перемещение этих электронов в зону проводимости. В результате появляются свободные электроны и дырки. Возникающие таким образом носители, в отличие от первоначальных, называются *вторичными*.

# Схема лавинного ФД



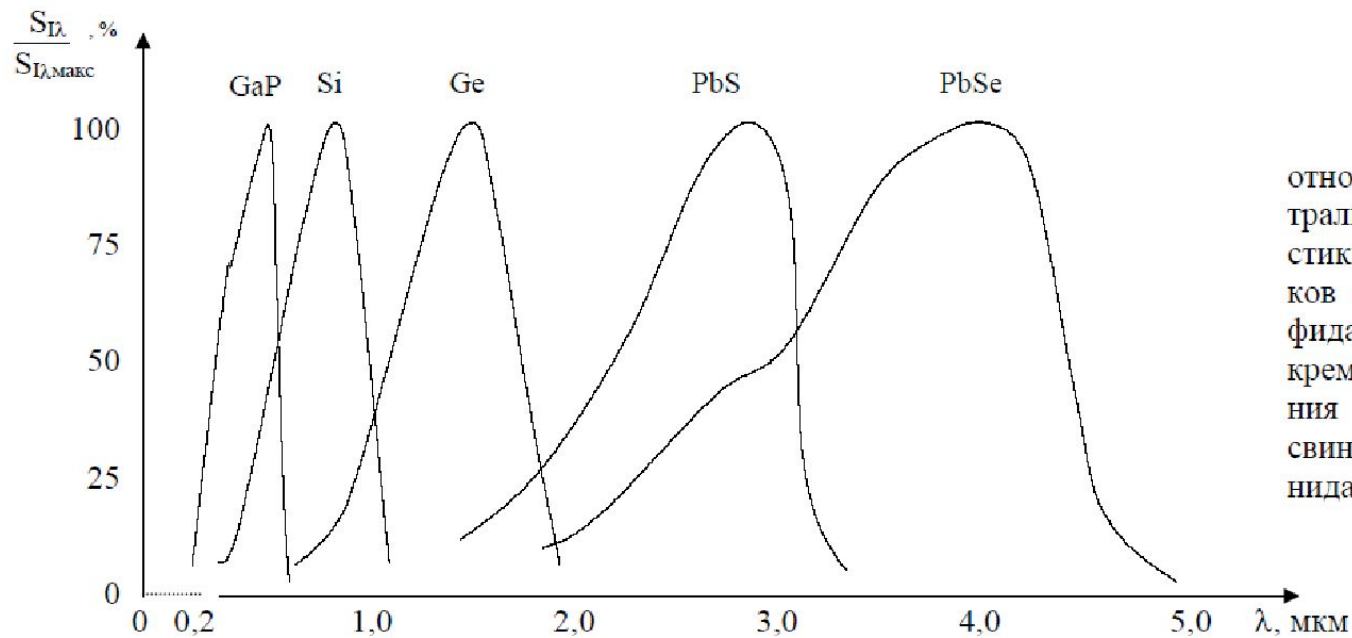
# Схема конструкции лавинного ФД



**Спасибо за  
внимание!**



# Светодиоды



Усредненные относительные спектральные характеристики фотоприемников на основе фосфида галлия (GaP), кремния (Si), германия (Ge), сульфида свинца (PbS) и селенида свинца (PbSe).