

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СВЕТОДИОДОВ**

# Введение

Светодиоды (СД, в иностранной литературе — LED), Lighting Emitting Diodes) — наиболее «молодые» источники света, принципиально отличающиеся от тепловых или разрядных излучателей.

Впервые свечение на границе металла и полупроводникового материала — карбида кремния — исследовал русский инженер О.В.Лосев в Нижегородской радиолaborатории в 1923 г. Позднее (в 1939 г.) он дал физическое объяснение этого свечения, получившего в литературе название «эффекта Лосева».

В настоящее время получены следующие значения параметров СД: цветность излучения — практически любая; световая отдача серийных белых СД — до 186 лм/Вт; общий индекс цветопередачи белых СД — более 90.

## Инжекция неосновных носителей тока

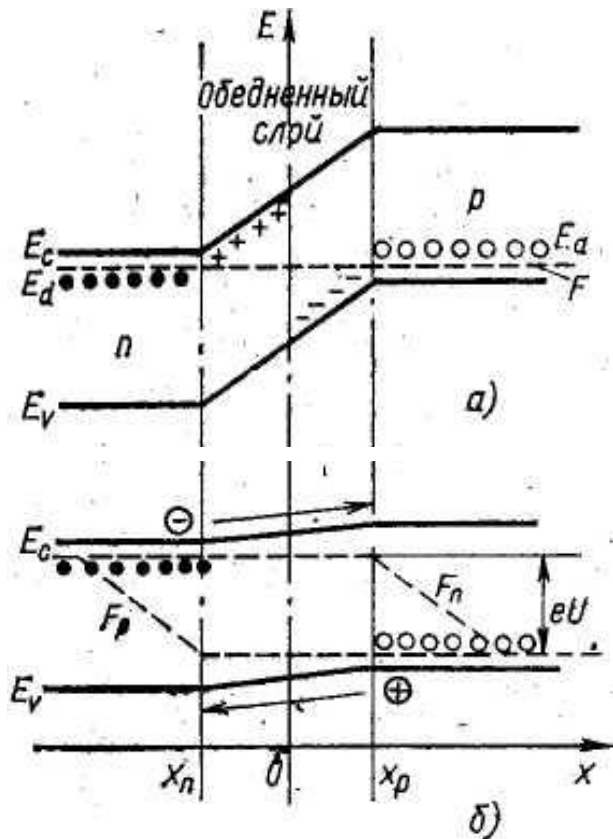
- В основе работы полупроводниковых светодиодов лежит ряд физических явлений, важнейшие из них:
  1. инжекция неосновных носителей в активную область структуры электронно-дырочного гомо- или гетероперехода;
  2. излучательная рекомбинация инжектированных носителей в активной области структуры.

# Инжекция неосновных носителей тока



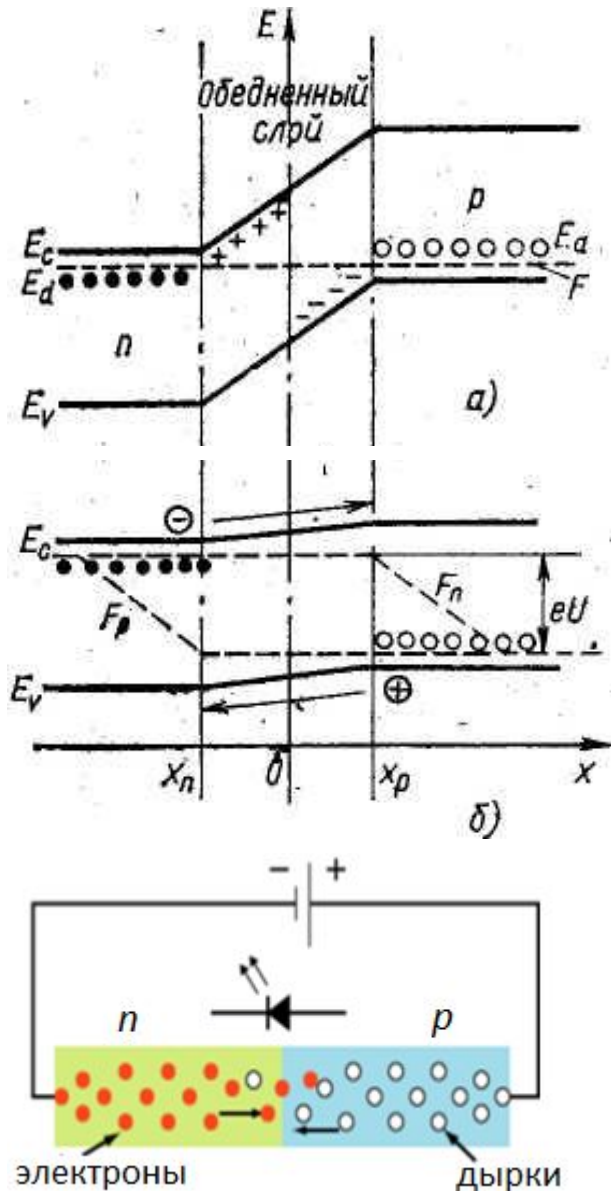
- Схематическое изображение зонной диаграммы  $p-n$ -перехода при термодинамическом равновесии (а)
- $E_c$  — энергия дна зоны проводимости;
- $E_v$  — энергия потолка валентной зоны;
- $E_d$  и  $E_a$  — энергетическое положение доноров и акцепторов;
- $F_n$  и  $F_p$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок;
- $x$  — расстояние от  $p-n$ -перехода;
- $eU$  — потенциал смещения

# Инжекция неосновных носителей тока



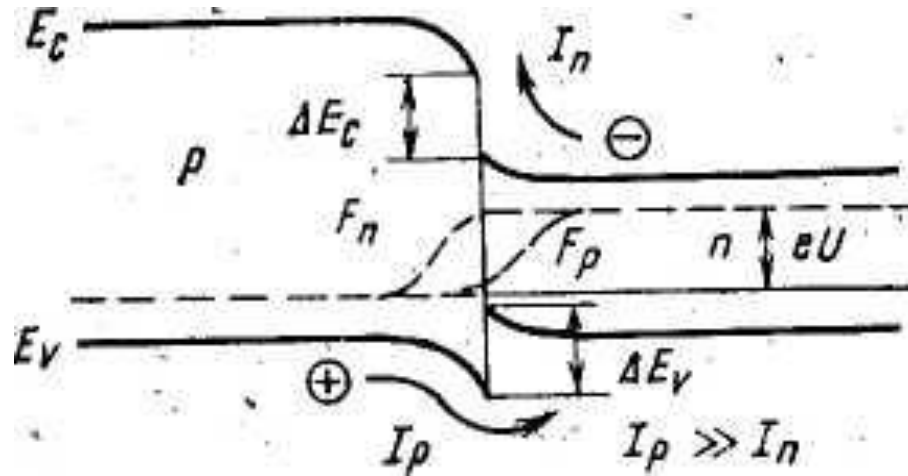
- Схематическое изображение зонной диаграммы  $p-n$ -перехода при термодинамическом равновесии (а) и при прямом смещении (б):
- $E_c$  — энергия дна зоны проводимости;
- $E_v$  — энергия потолка валентной зоны;
- $E_d$  и  $E_a$  — энергетическое положение доноров и акцепторов;
- $F_n$  и  $F_p$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок;
- $x$  — расстояние от  $p-n$ -перехода;
- $eU$  — потенциал смещения

# Инжекция неосновных носителей тока



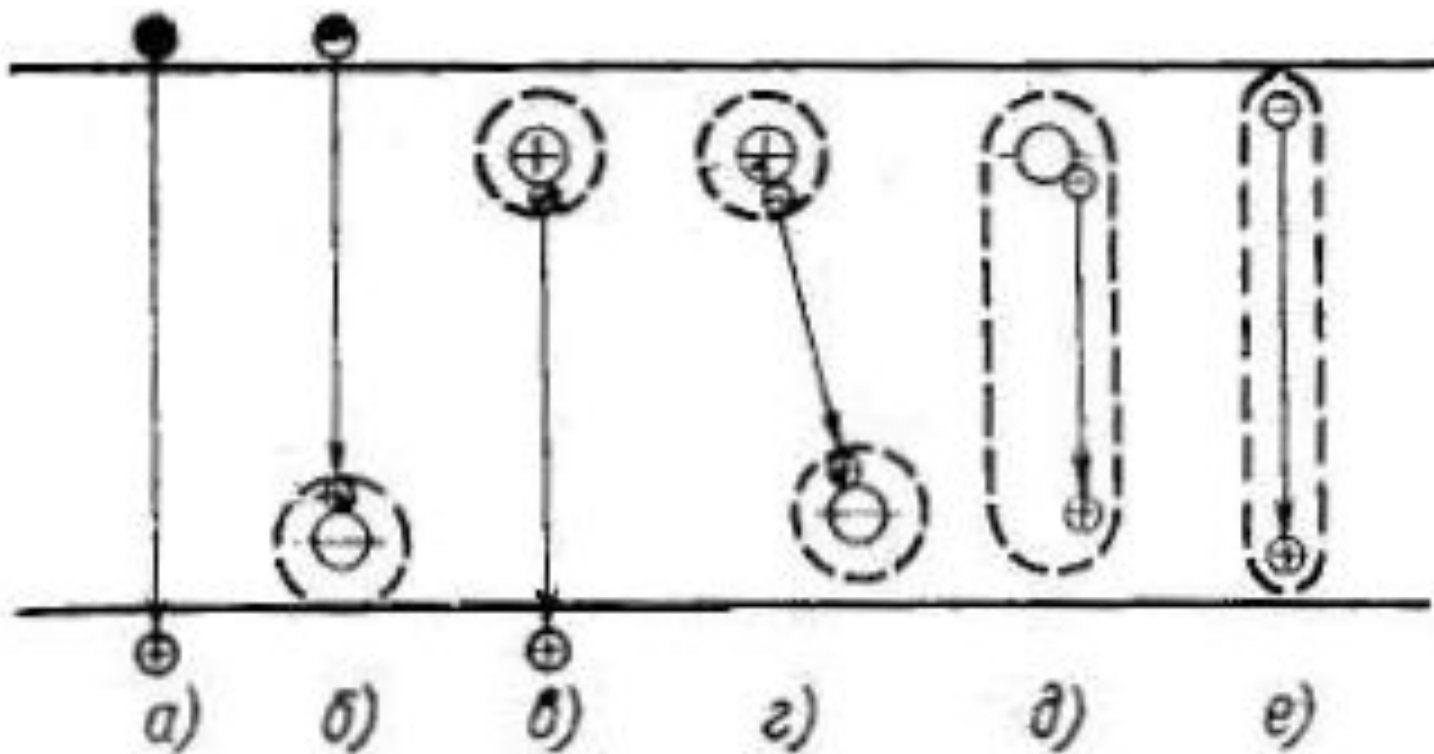
- Схематическое изображение зонной диаграммы  $p-n$ -перехода при термодинамическом равновесии (а) и при прямом смещении (б):
- $E_c$  — энергия дна зоны проводимости;
- $E_v$  — энергия потолка валентной зоны;
- $E_d$  и  $E_a$  — энергетическое положение доноров и акцепторов;
- $F_n$  и  $F_p$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок;
- $x$  — расстояние от  $p-n$ -перехода;
- $eU$  — потенциал смещения

# Инжекция неосновных носителей тока



- Зонная модель  $p$ — $n$ - гетероперехода при прямом смещении:
- $E_c$  — энергия дна зоны проводимости;
- $E_v$  — энергия потолка валентной зоны;
- $\Delta E_v$  - разрыв в валентной зоне;
- $\Delta E_c$  - разрыв в зоне проводимости;
- $F_n$  и  $F_p$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок;
- $eU$  – потенциал смещения

# Излучательная рекомбинация



- Различные механизмы излучательной рекомбинации в полупроводниках



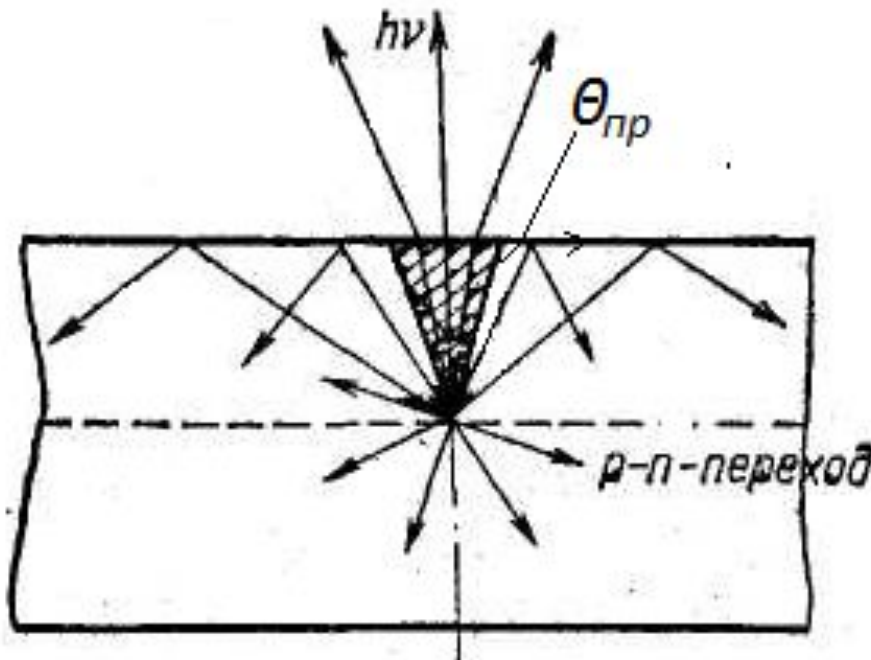
# Вывод света из полупроводника

Из светоизлучающего кристалла может быть выведена только часть генерируемого  $p-n$ -переходом излучения в связи со следующими основными видами потерь:

- 1) потери на внутреннее отражение излучения, падающего на границу раздела полупроводник — воздух под углом, большим критического;
- 2) поверхностные потери на френелевское отражение излучения, падающего на границу раздела под углом, меньшим критического;
- 3) потери, связанные с поглощением излучения в приконтактных областях;
- 4) потери на поглощение излучения в толще полупроводника.

# Вывод света из полупроводника

- Наиболее значительны потери на полное внутреннее отражение излучения.



$$\Theta_{\text{пр}} = \arcsin n_v / n_n'$$

При  $n_n - 3,54$  и  $3,3$

$$\Theta_{\text{пр}} - 16^\circ \text{ и } 17,7^\circ$$

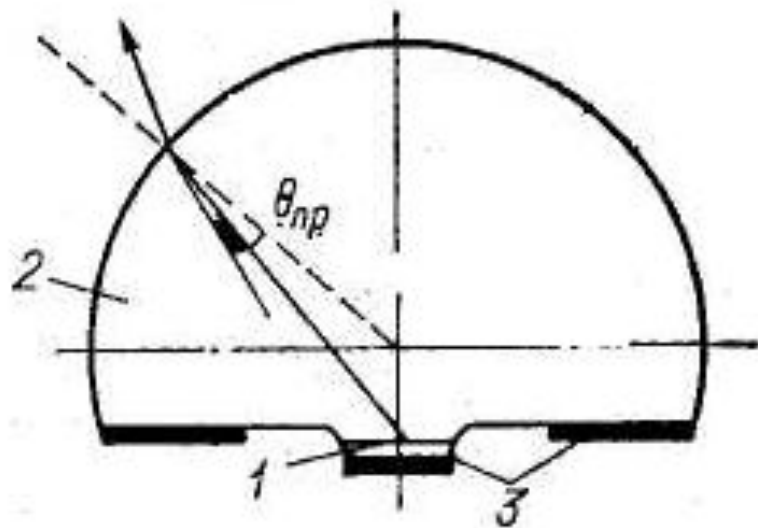
$$\Phi = \sin^2 (\Theta_{\text{пр}} / 2) T_{\text{ср}}$$

$$T = 4 * n(1+n)^{-2}$$

$$\Phi_{\text{GaAs и GaP}} \approx 1,3-1,65 \%$$

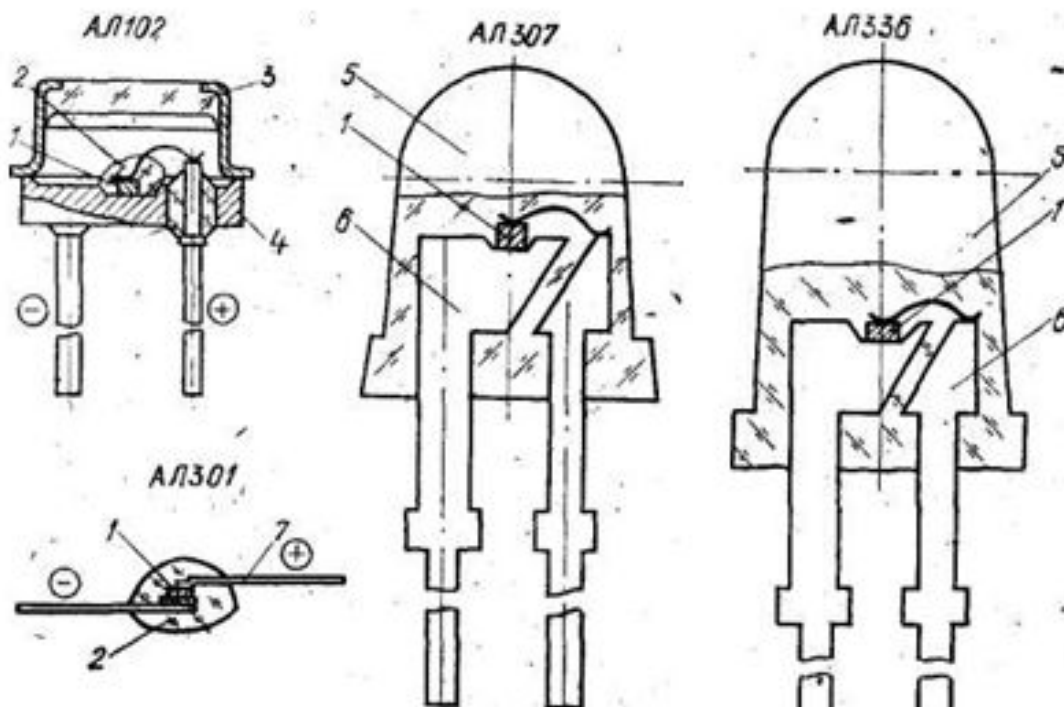
## Вывод света из полупроводника

- Светоизлучающий кристалл, обработанный в виде сферы Вейерштрасса



# Вывод света из полупроводника

Помещение кристалла в среду с показателем преломления  $n_e < n < n_n$  для увеличения критического угла



Устройство некоторых типов светодиодов.

1— кристалл; 2 — полимерная защита; 3 — баллон со стеклянным окном;  
4 — металлостеклянная ножка; 5 — полимерная линза; 6 — держатель;  
7—гибкий золотой вывод

# Вывод света из полупроводника

Нанесение антиотражающих покрытий на поверхность кристалла для снижения потерь на отражение света, падающего на световыводящую поверхность под углом, меньшим критического.

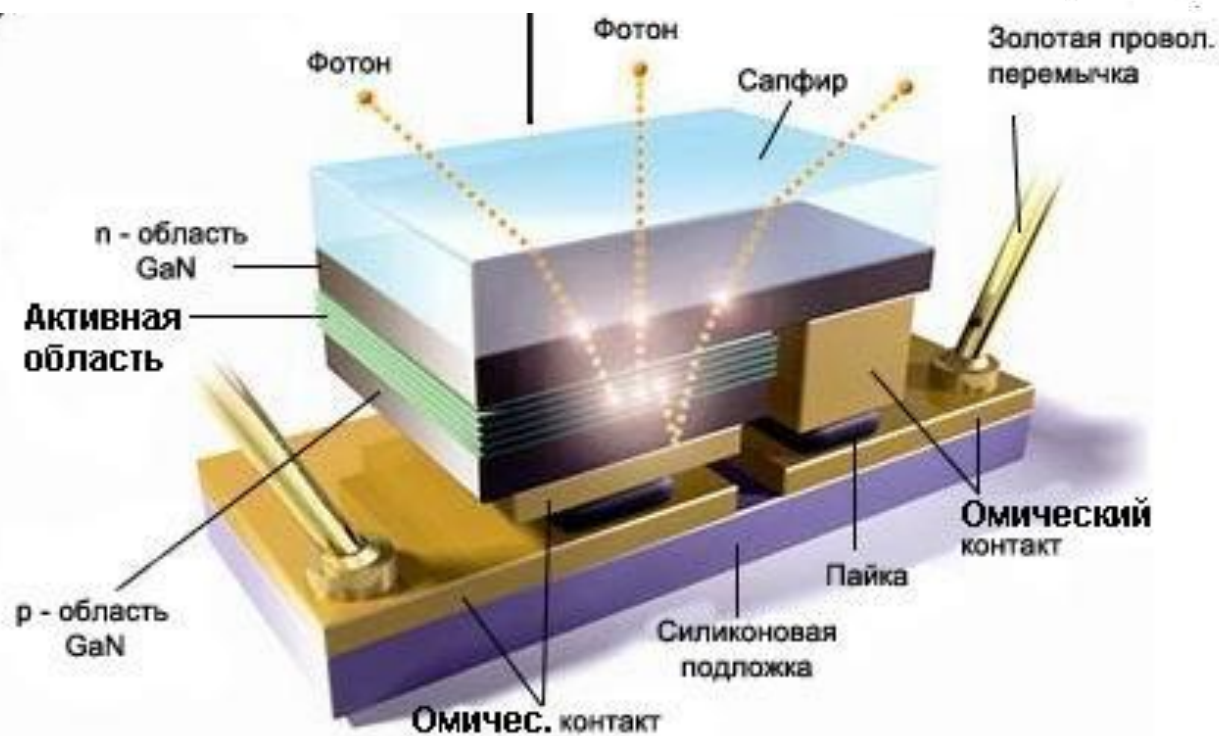
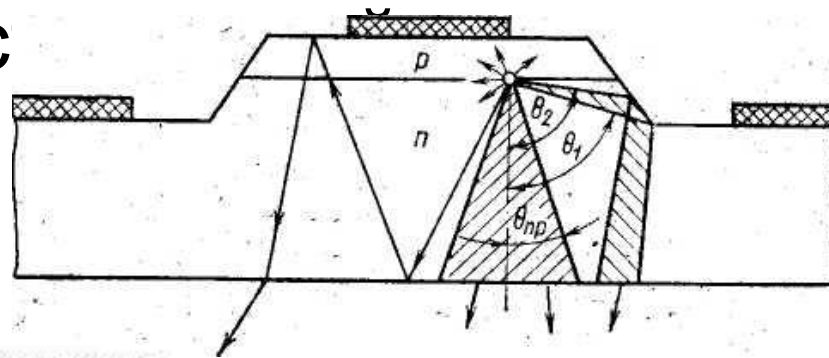
Как показано выше, эти потери для границы полупроводник — воздух составляют примерно 30 %. Однако, если на поверхность полупроводника нанести прозрачную однородную пленку толщиной  $t$  с показателем преломления  $n_1$ , то, при выполнении двух условий:

$$n_n n_v = n_1^2;$$
$$n_1 t = (\rho - \lambda/4) * (2l - 1),$$

где  $t$  — положительное целое число;  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\rho$  — коэффициент отражения света, падающего внутри полупроводника нормально к поверхности раздела с воздухом; будет равен нулю. Практически, применяя антиотражающие покрытия из различных диэлектрических пленок ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и др.), удается увеличить выход излучения на 20—30%.

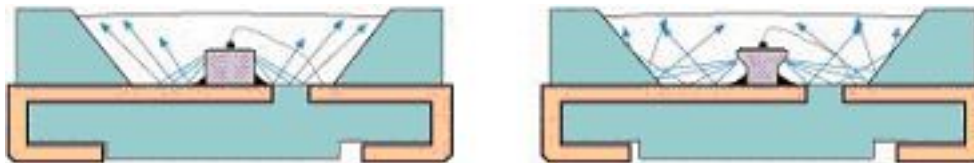
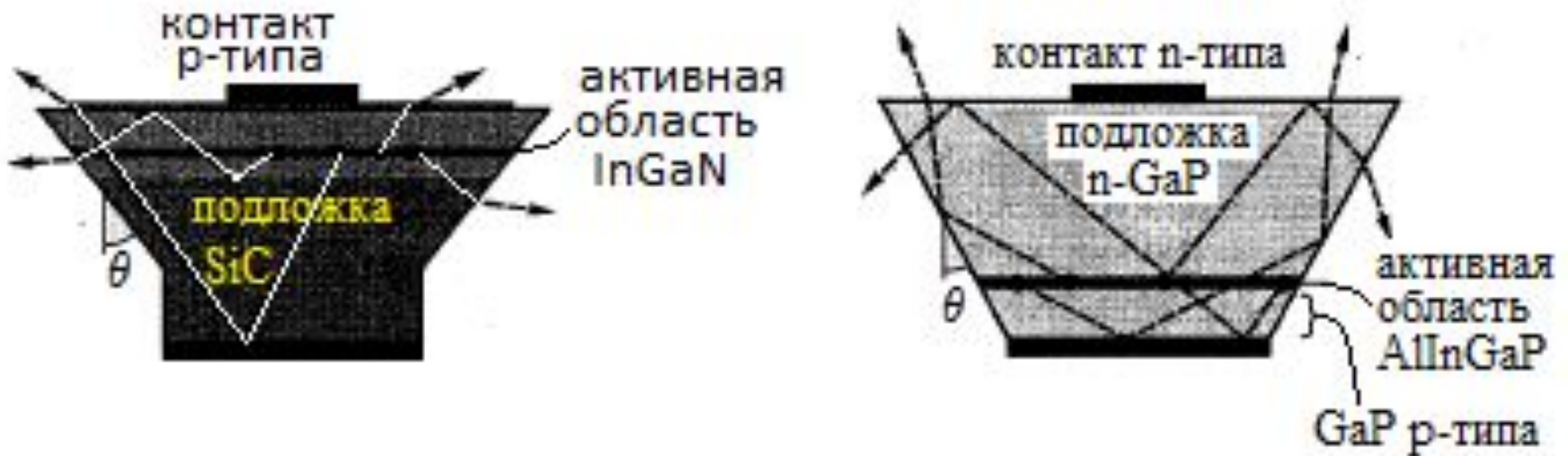
# Вывод света из полупроводника

- Ход лучей в диоде плоской конфигурации с мезас

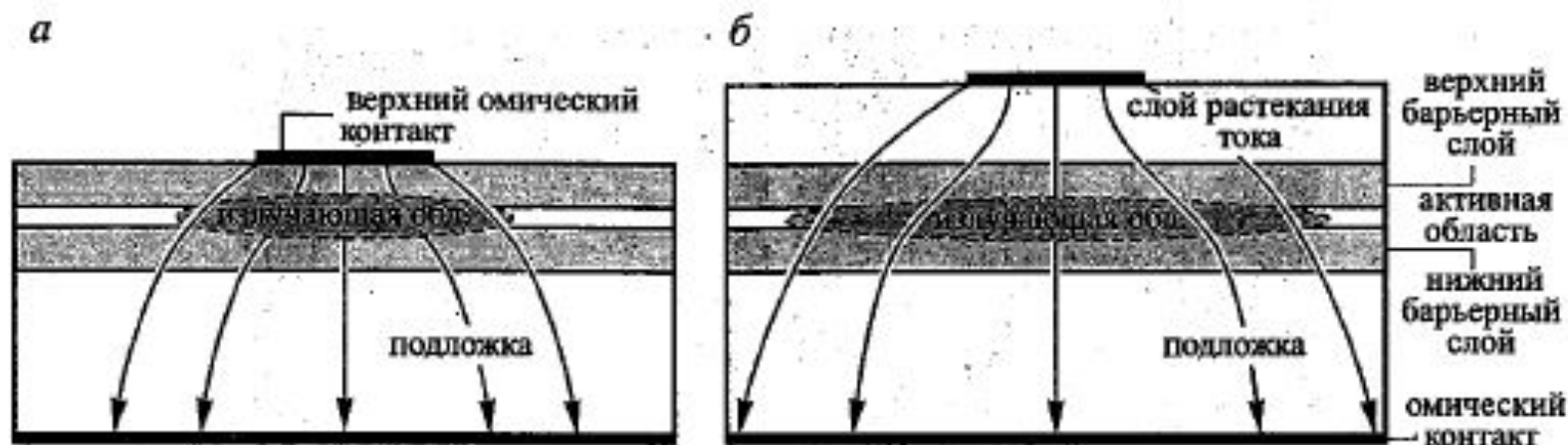
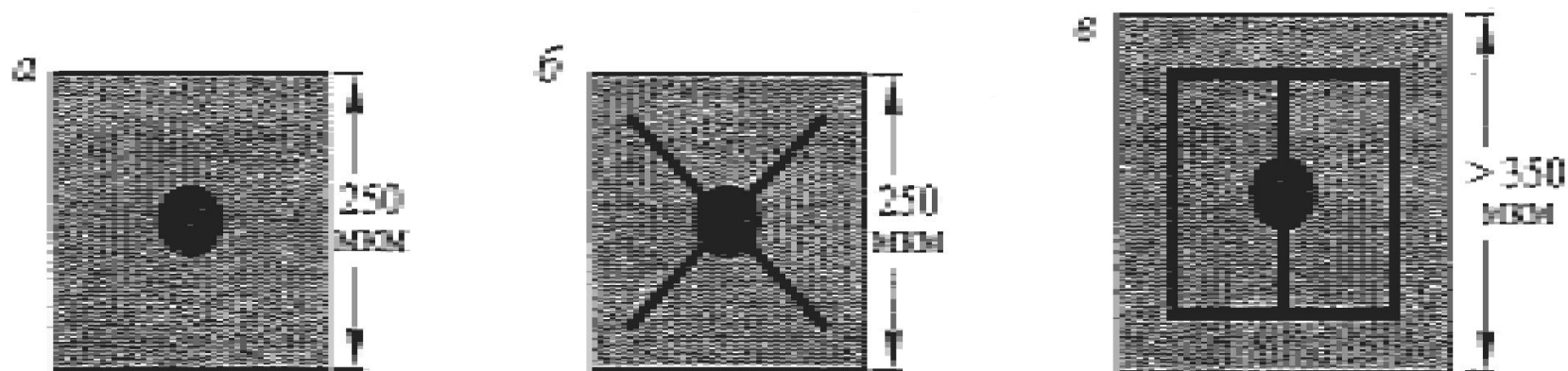


# Вывод света из полупроводника

- Кристалл светодиода в форме перевернутой усеченной пирамиды

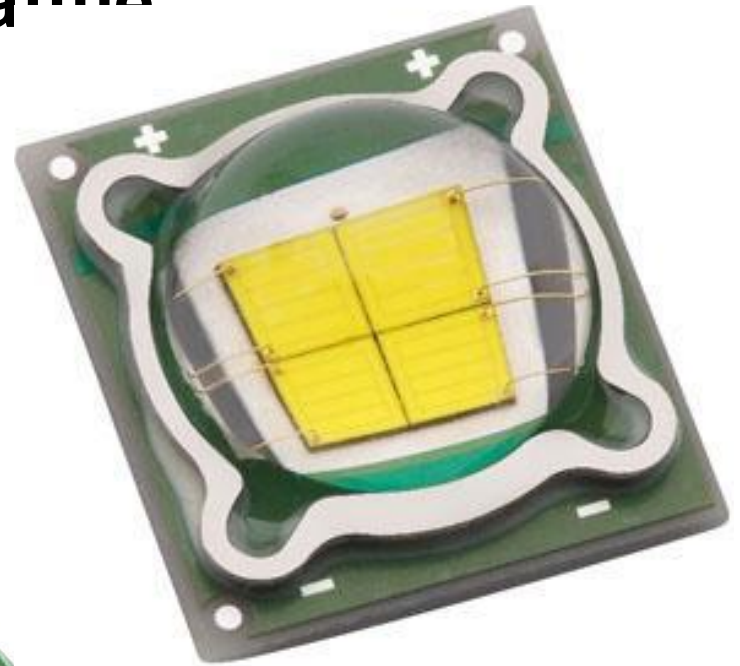
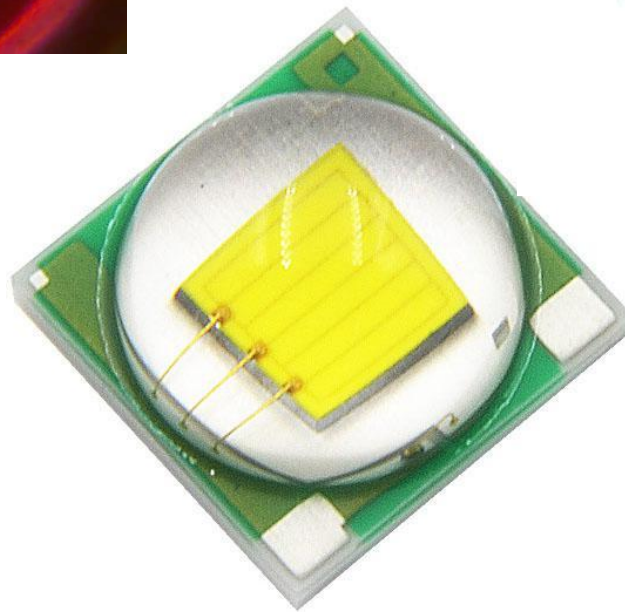
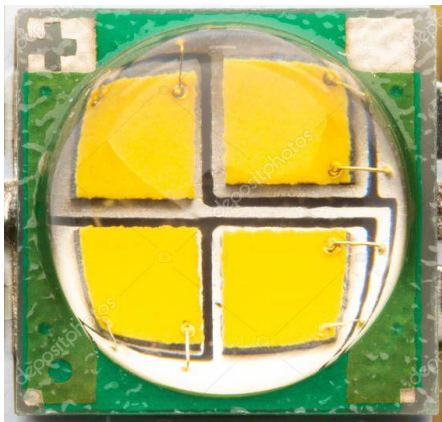
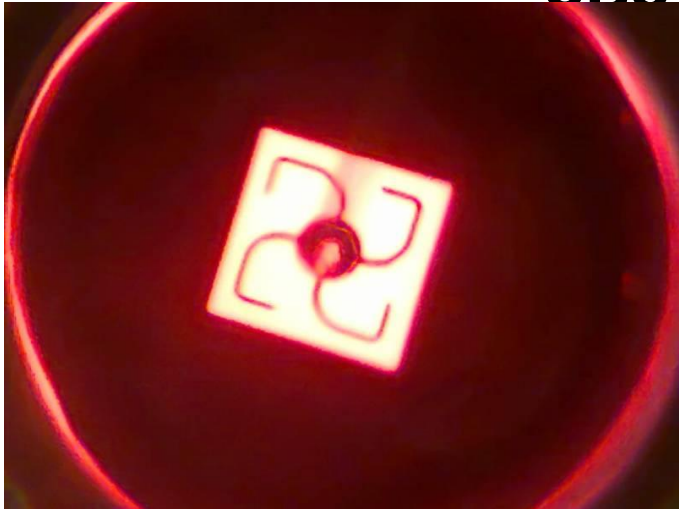


# Создание омических контактов, занимающих незначительную часть площади грани кристалла, с целью уменьшения поглощения света в кристалле





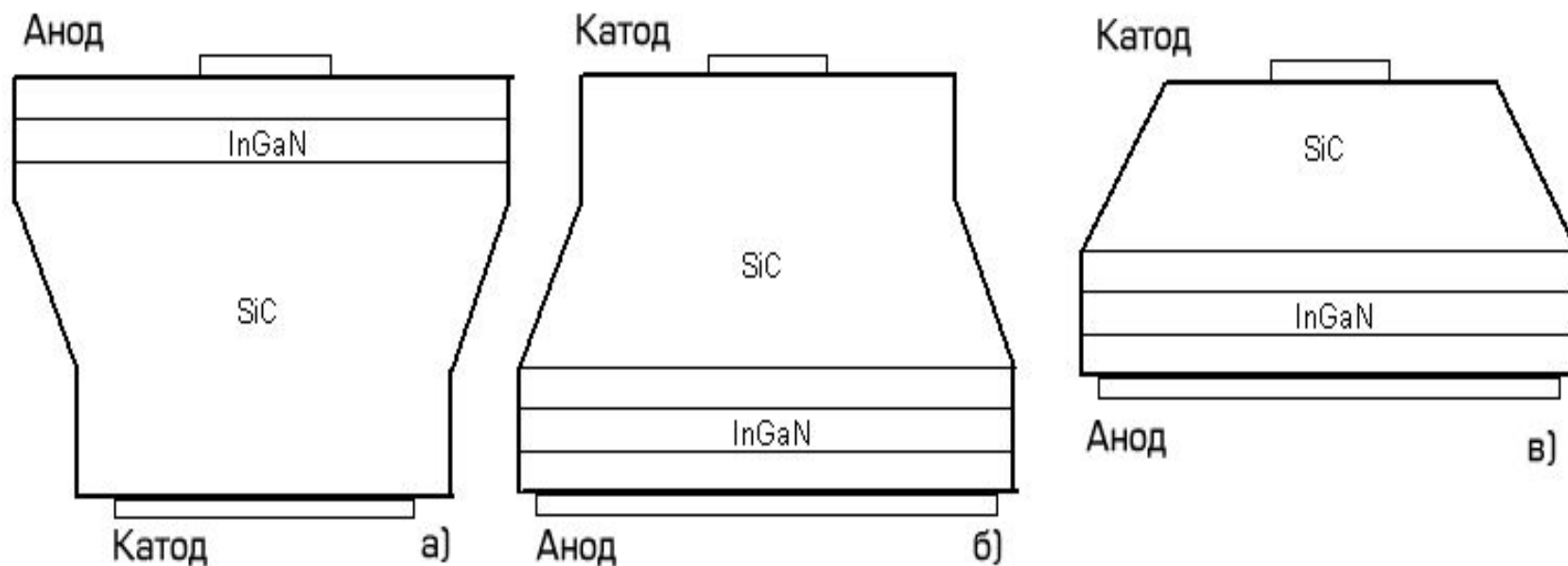
**Создание омических контактов, занимающих  
незначительную часть площади грани  
кристалла, с целью уменьшения поглощения  
света в кристалле**



# Основные полупроводниковые материалы и излучающие *p-n*-структуры на их основе, используемые в производстве светодиодов

- Полупроводниковые светоизлучающие диоды изготавливают в настоящее время на основе бинарных интерметаллических соединений типа  $A^{III}B^V$  (Арсенид галлия, Фосфид галлия, Нитрид галлия, Нитрид алюминия, Нитрид индия, Карбид кремния) и многокомпонентных твердых растворов этих соединений.
- Для СД с излучением в красной и желтой областях спектра используются полупроводниковые МДГС на основе GaAlAs и AlGaInP, в зеленой и синей областях — на основе нитридов индия и галлия и их твердых растворов (InN, GaN, InGaN, AlInGaN), ультрафиолетового излучения (210 нм) - AlN

# Основные полупроводниковые материалы и излучающие $p-n$ -структуры на их основе, используемые в производстве светодиодов

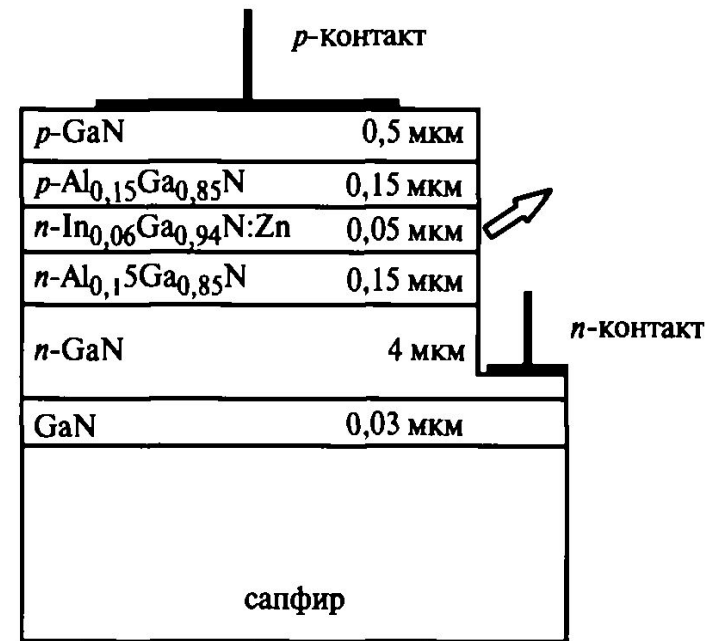
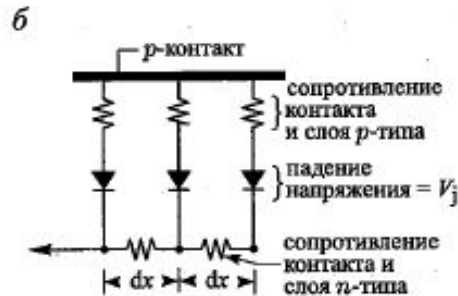
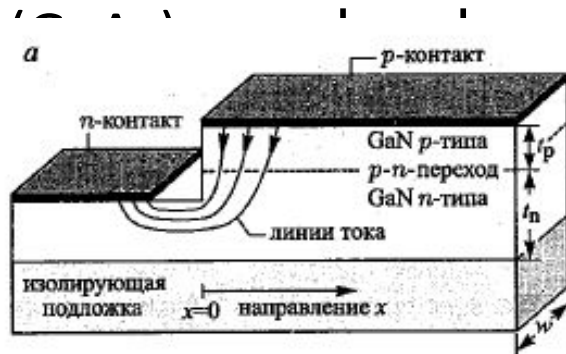


Кристаллы фирмы "Cree" а) MBright™, б) XBright™ – высота 250 мкм,

в) XThin™ – высота 115 мкм

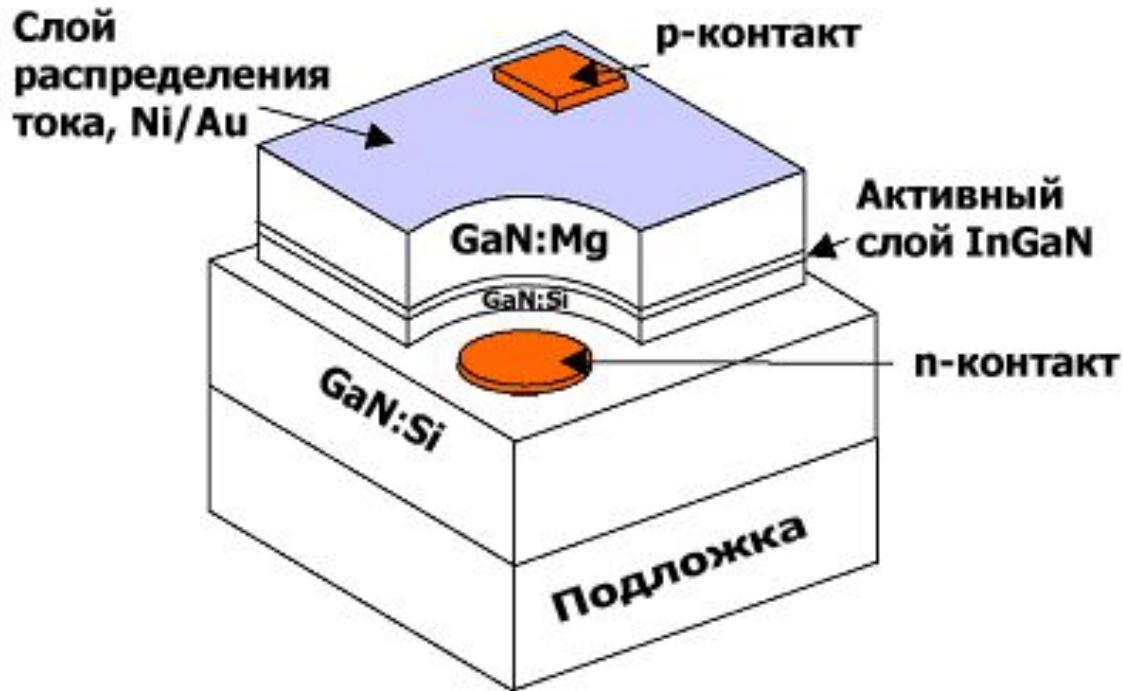
# Основные полупроводниковые материалы и излучающие $p-n$ -структуры на их основе, используемые в производстве светодиодов

Наибольшее распространение получил метод выращивания МДГС путем металлоорганического вакуумного нанесения материалов на подложку из сапфира ( $Al_2O_3$ ), карбида кремния (SiC), арсенида галлия

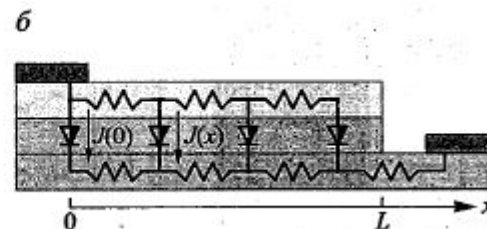
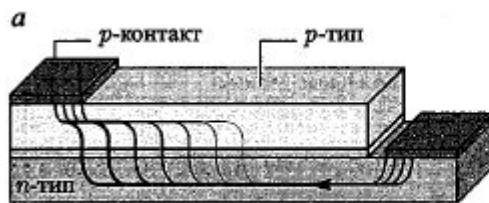


Структура кристалла синего СД

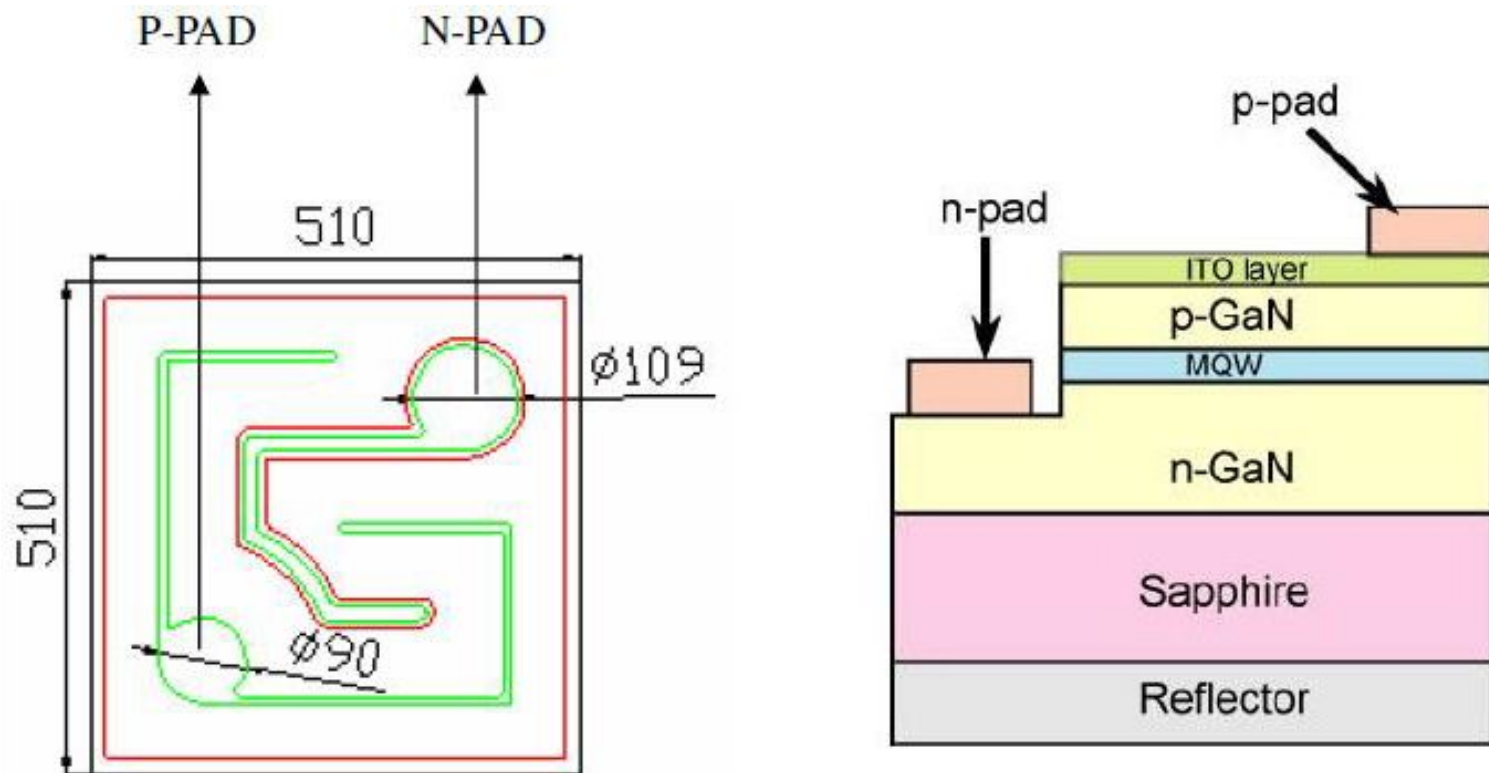
# Основные полупроводниковые материалы и излучающие $p-n$ -структуры на их основе, используемые в производстве светодиодов



Вид излучающего кристалла с гетероструктурой типа InGaN/AlGaN/GaN на подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Показана активная область (область  $p-n$  – перехода) и расположение омических контактов.



# Основные полупроводниковые материалы и излучающие $p-n$ -структуры на их основе, используемые в производстве светодиодов



Структура чипа малой мощности



# Полупроводниковые материалы и излучающие $p-n$ -структуры нанесенные на сапфировые подложки

