

Светодиоды и полупроводниковые лазеры

Выполнили студенты гр. 21305
Алексеев А.Ю. и Павлов И.А.

Содержание

- Светодиоды
- Полупроводниковые
лазеры

Светодиоды

Светодиодом, или *излучающим диодом*, называют полупроводниковый диод на базе p-n перехода либо гетероперехода, излучающий кванты света при протекании через него прямого тока.

По характеристике излучения излучающие диоды можно разделить на две группы: с излучением в видимой части спектра - *светодиоды* и в инфракрасной части диапазона - *диоды ИК-излучения*.

Промышленные светодиоды существуют красного, оранжевого, зеленого, желтого, голубого, фиолетового цветов свечения, а также с переменным цветом свечения.



Спектральная характеристика излучения светодиода при межзонных переходах представляет собой монохроматическую линию, полушириной kT и центрированную при значении $h\nu = E_g$

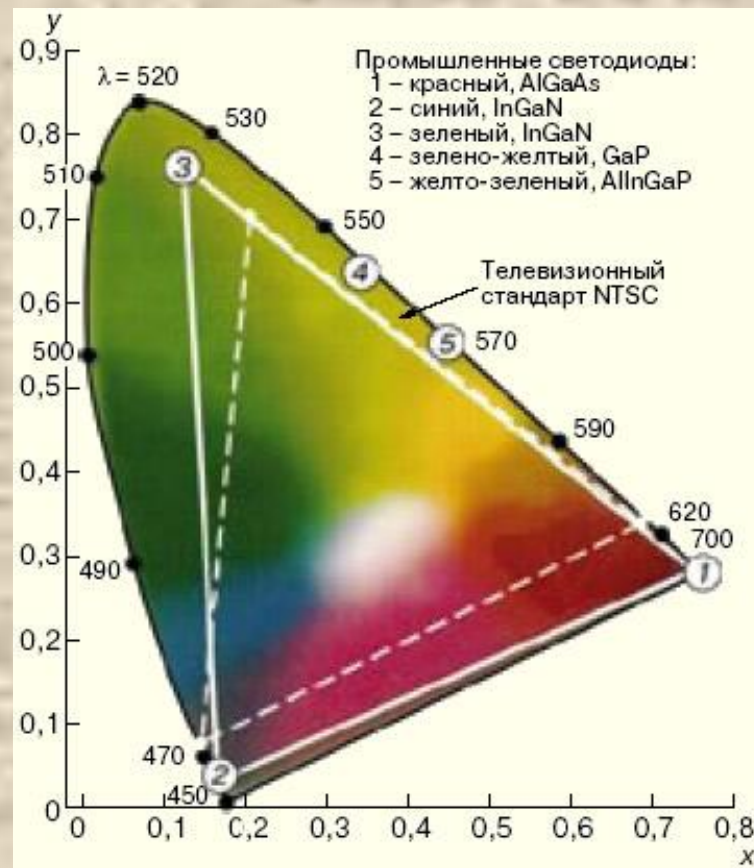
Спектральная чувствительность человеческого глаза находится в диапазоне цветов от фиолетового до красного и имеет максимум для зеленого цвета. По длинам волн этот диапазон находится от 0.39 до 0.77 мкм, что соответствует энергии квантов от 2.8 до 1.8 эВ

Следовательно в качестве излучательной среды в светодиодах видимого диапазона следует использовать прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны 1.8 – 2.8 эВ. Одним из распространенных соединений, удовлетворяющим перечисленным характеристикам, является твердый раствор $GaAs(1-x)P_x$



Цифрами
указаны длины
волн
монохроматиче-
ского
излучения,
соответствующ-
ие тому или
иному цвету

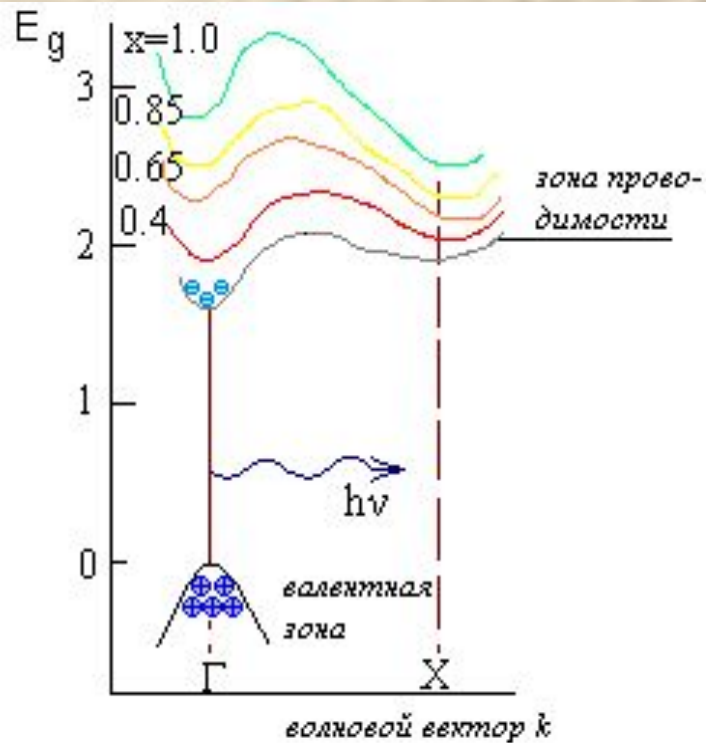
Цифрами в
кружках
отмечено
расположени-
е типовых
светодиодов



Все
многообразие
цветов – внутри
этого контура

Диаграмма хроматичности, показывающая соотношение между тремя основными компонентами цвета (красный, зеленый, синий), необходимыми для получения заданного цвета



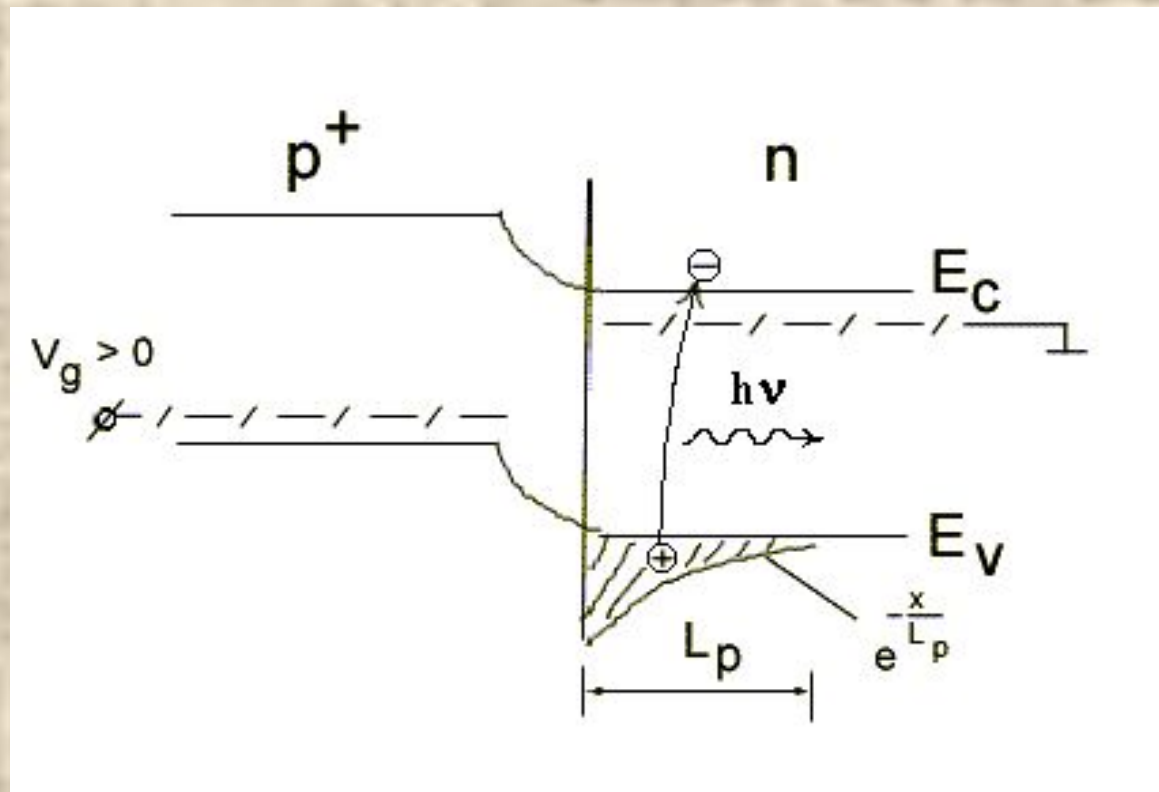


Энергетическая зонная структура $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$
 Значения состава соответствуют красному ($x=0,4$),
 оранжевому ($0,65$), жёлтому ($0,85$) и зелёному свету ($1,0$)

Зависимость запрещенной зоны от волнового вектора для нескольких значений x , из которой следует, что зона проводимости имеет два минимума. Те минимумы, которые расположены в точке Γ , являются прямыми, тогда как другие, расположенные на оси x , непрямые.



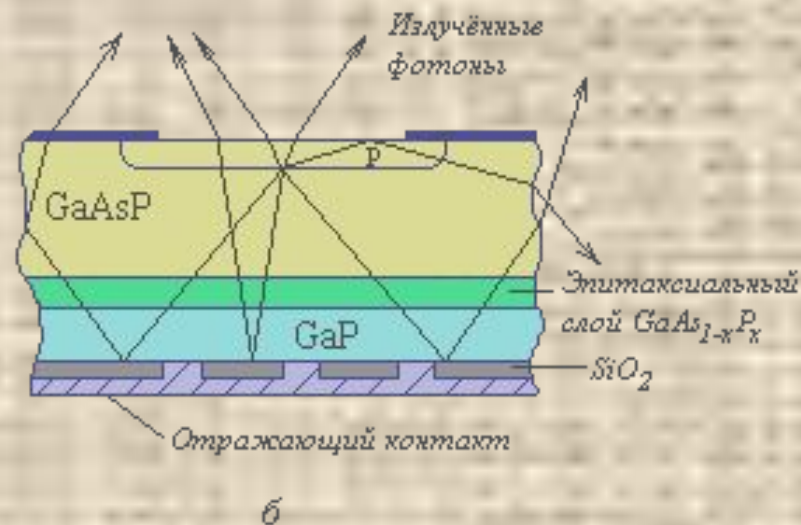
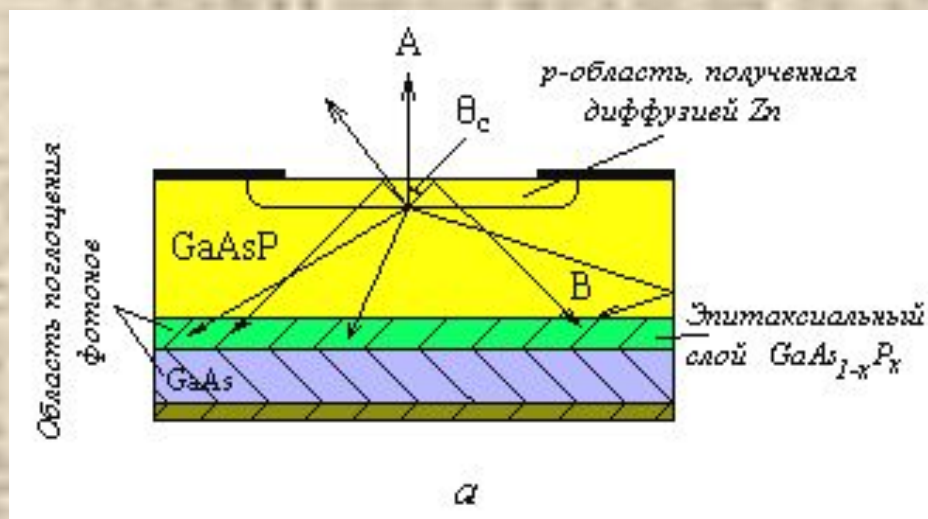
Принцип действия светодиода



Принцип действия светодиода основан на излучательной рекомбинации инжектированных носителей в прямосмещенном p-n переходе, где L_p - диффузионная длина (~ 250 мкм).



Конструкция светодиода



Среди светодиодных структур основной является структура с плоской геометрией. Обычно прямозонные светодиоды (красное излучение) формируются на подложках GaAs (а), тогда как непрямозонные (оранжевое, жёлтое и зелёное излучения) - на подложках GaP (б). При использовании подложки GaAs на неё наращивается переходный слой $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ переменного состава с x , изменяющимся в пределах 0-0.4, а затем слой $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ с постоянным составом.

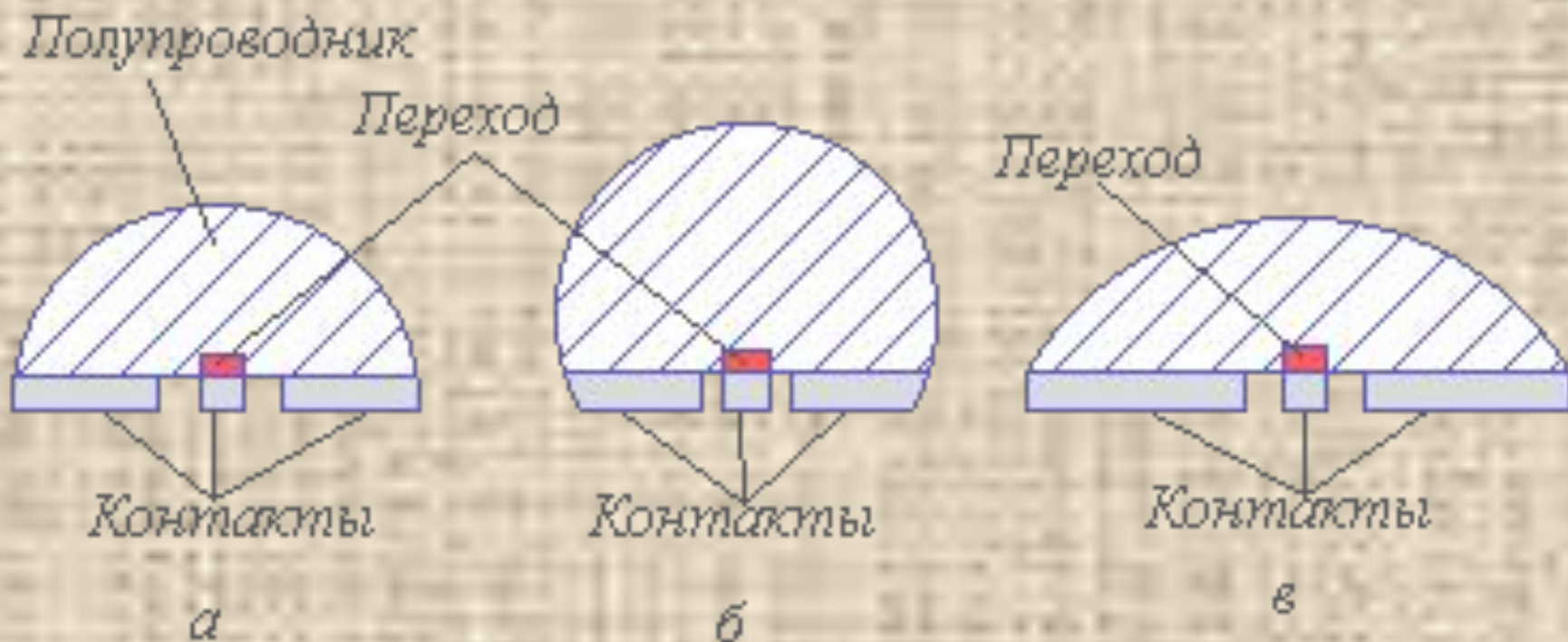


Фотоны, генерируемые в области перехода, испускаются во всех направлениях, однако наблюдателя достигает лишь та их часть, которая проходит через поверхность. Уменьшение количества излучаемых светодионом фотонов обусловлено поглощением в материале светодиода, потерями за счёт отражения и потерями за счёт полного внутреннего отражения. Потери, связанные с поглощением, весьма существенны в светодиодах на подложках GaAs (а), т.к. в этом случае подложка поглощает примерно 85% фотонов, излучаемых переходом. В светодиодах на подложках GaP (б) поглощение составляет ~25%, и эффективность излучения может быть существенно увеличена.



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

Разрез трёх светодиодов



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



Полная эффективность преобразования электрического сигнала в оптический даётся следующим выражением:

$$\eta_F = \frac{q}{P} (1 - R)(1 - \cos \theta_c) \frac{\int \Phi(\lambda) (1 + R_1 e^{-2\alpha_1(\lambda)x_1}) e^{-\alpha_2(\lambda)x_2} d\lambda}{\int \Phi(\lambda) d\lambda}$$

$$\eta_F \approx \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} (1 - \cos \theta_c)$$

где P - мощность на входе, $4n_1 n_2 / (n_1 + n_2)^2$ - коэффициент передачи, равный $4n_2 / (n_2 + 1)^2$ для границы раздела полупроводник-воздух ($1 - \cos \theta_c$) - телесный угол, $\Phi(\lambda)$ - скорость генерации фотонов в единицах фотон/(с·см²), R_1 - коэффициент отражения от тылового контакта, α_1 и x_1 соответственно коэффициенты поглощения и толщина р- и n-областей прибора

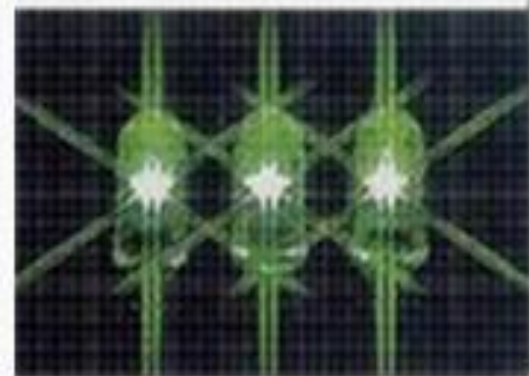


Инфракрасные светодиоды

Областями применения диодов ИК-излучения являются оптоэлектронные устройства коммутации, оптические линии связи, системы дистанционного управления.

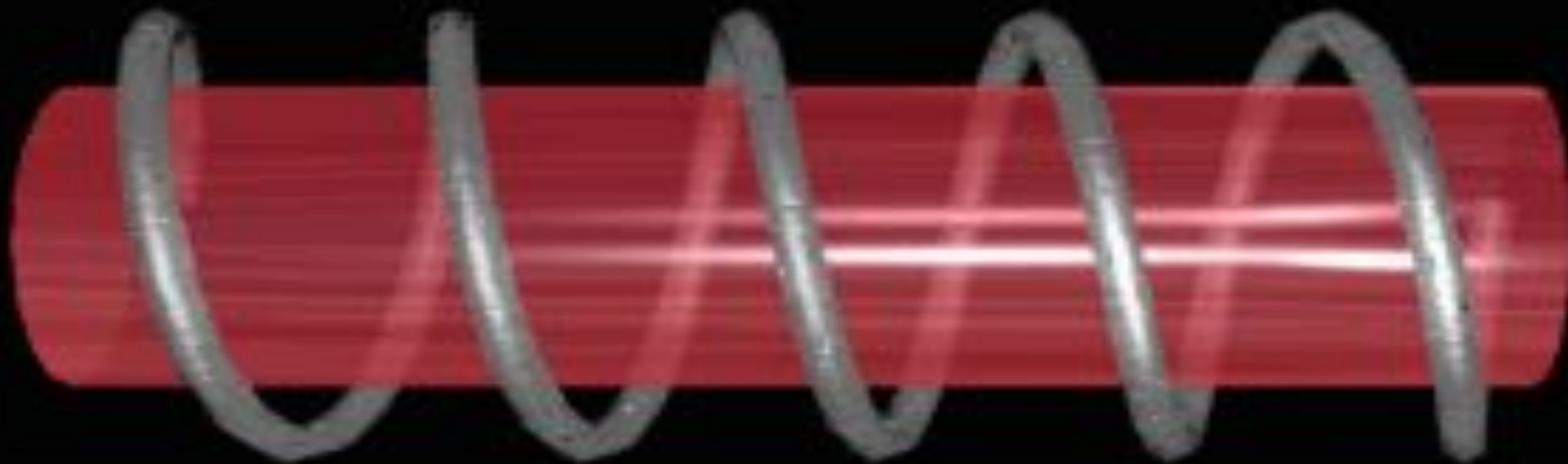
Наиболее распространённый в настоящее время инфракрасный источник - это светодиод на основе GaAs. Он обладает наибольшей эффективностью электролюминесценции в основном благодаря тому, что среди всех прямозонных полупроводников GaAs является технологически наиболее освоенным. Для изготовления инфракрасных светодиодов используются многие другие полупроводники, имеющие запрещённую зону шириной менее 1,5 эВ. К ним относятся твёрдые растворы, в состав которых входят три или четыре элемента III и V групп периодической системы. Среди них твердый раствор переменного состава GaInAsP.





Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры – оптоэлектронные устройства, генерирующие когерентное излучение при пропускании через них электрического тока. Также как и у других лазеров (рубиновый лазер или лазер на смеси He - Ne), излучение п/п лазера высоко монохроматично (имеет узкую полосу спектра) и создает строго направленный луч света.



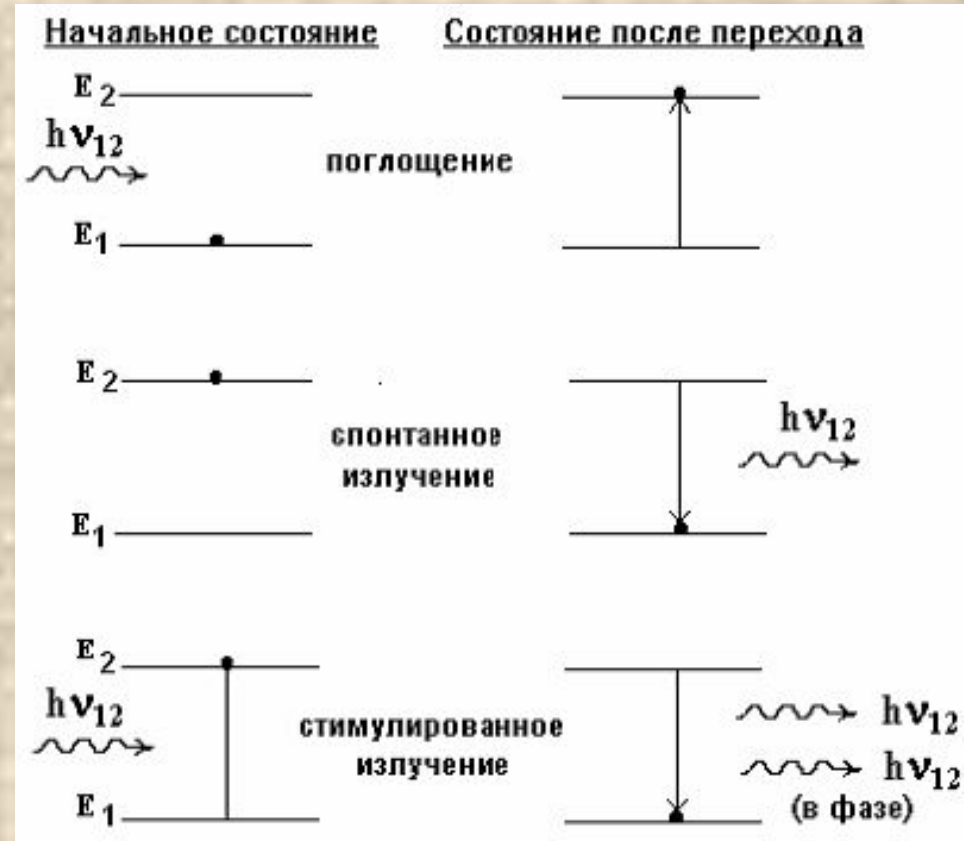
1. В обычных лазерах квантовые переходы происходят между дискретными энергетическими уровнями, тогда как в полупроводниковых лазерах переходы обусловлены зонной структурой материала.
2. Полупроводниковые лазеры имеют очень малые размеры ($\sim 0,1$ мм в длину), и так как активная область в них очень узкая (~ 1 мкм и меньше), расхождение лазерного луча значительно больше, чем у обычного лазера.
3. В лазере с p-n переходом лазерное излучение возникает непосредственно под действием тока, протекающего через прямосмещенный диод. В результате система очень эффективна, поскольку позволяет легко осуществлять модуляцию излучения за счет модуляции тока. Так как полупроводниковые лазеры характеризуются очень малыми временами стимулированного излучения, модуляция может проводиться на высоких частотах.
4. Принципиальным отличием лазерного диода (LD) является наличие встроенного оптического резонатора, что позволяет получить режим индуцированного излучения, которое характеризуется высокой степенью когерентности.



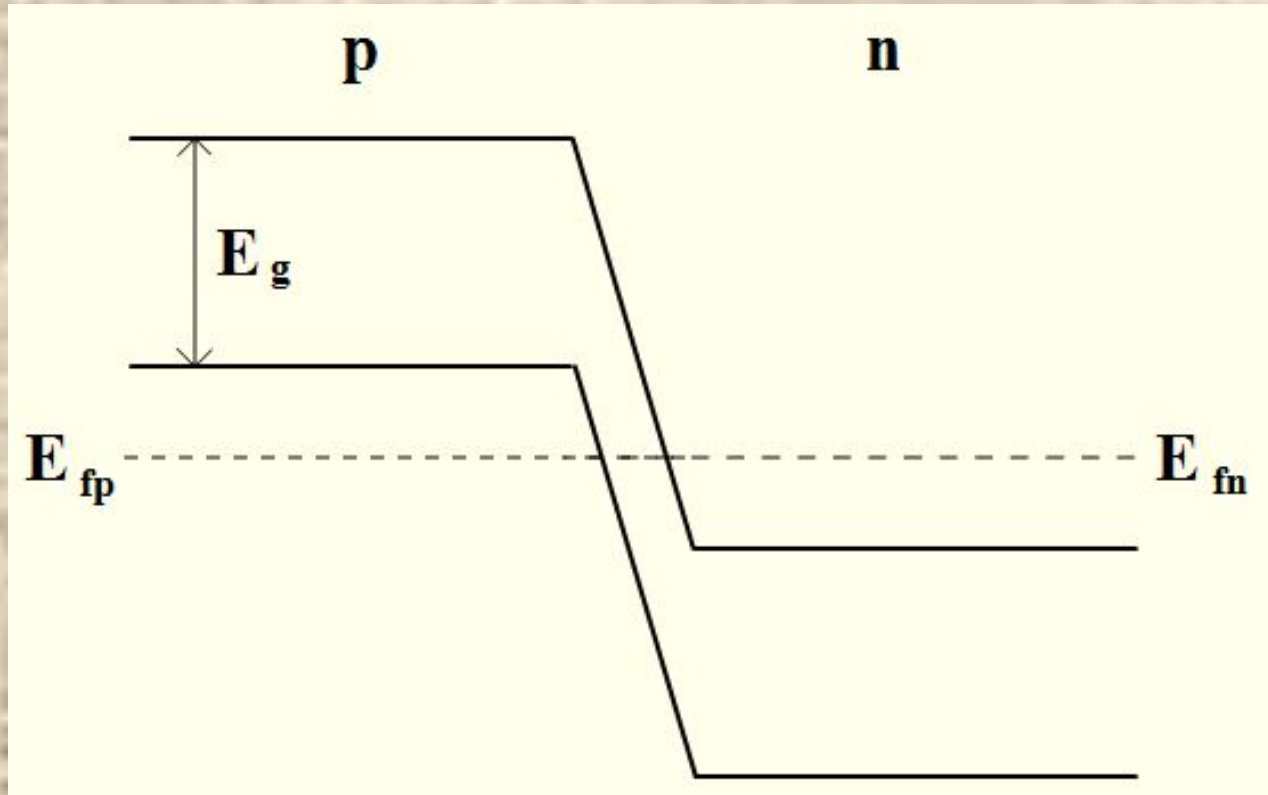
Стимулированное излучение.

Работа лазера связана с тремя основными процессами, обусловленными переходом носителей: поглощения, спонтанной эмиссии и стимулированным излучением. E_1 – энергетический уровень основного состояния, E_2 – возбужденного состояния.

Любой переход между этими состояниями сопровождается испусканием или поглощением фотона с частотой ν_{12} , определяемой из соотношения $h\nu_{12}=E_2-E_1$. При обычных температурах большинство атомов находится в основном состоянии. Эта ситуация нарушается в результате воздействия на систему фотона с энергией, равной $h\nu_{12}$. Атом в состоянии E_1 поглощает фотон и переходит в возбужденное состояние E_2 . Это и составляет процесс поглощения излучения. Возбужденное состояние является нестабильным и через короткий промежуток времени без какого-либо внешнего воздействия атом переходит в основное состояние, испуская фотон с энергией $h\nu_{12}$ (спонтанная эмиссия). Время жизни, связанное со спонтанной эмиссией (т.е. среднее время возбужденного состояния), может изменяться в широком диапазоне, обычно в пределах 10^{-9} - 10^{-3} с, в зависимости от параметров полупроводника, таких, как структура зон (прямая или не прямая) и плотность рекомбинационных центров. Столкновение фотона, обладающего энергией $h\nu_{12}$, с атомом, находящимся в возбужденном состоянии, стимулирует мгновенный переход атома в основное состояние с испусканием фотона с энергией $h\nu_{12}$ и фазой, соответствующей фазе падающего излучения (стимулированное излучение).



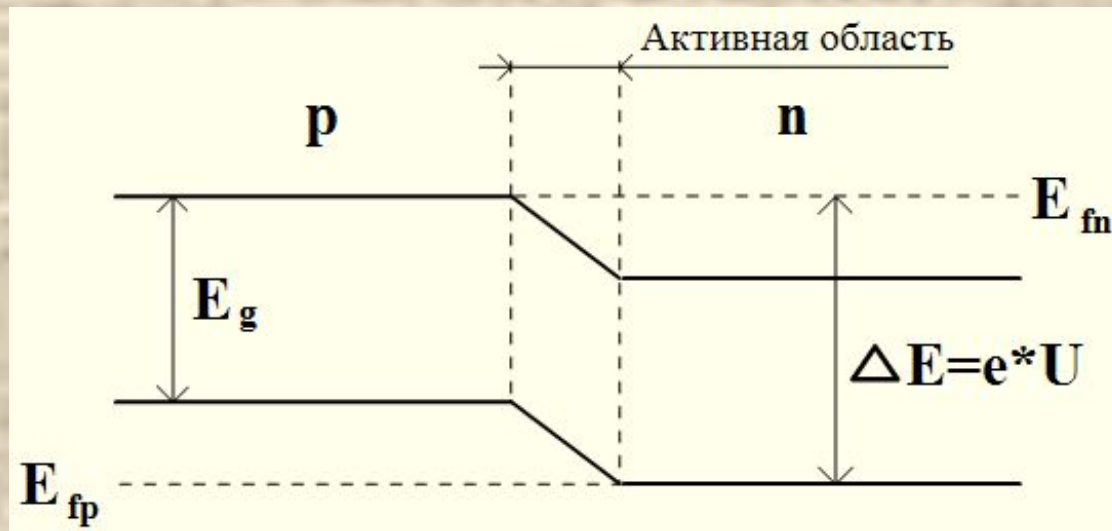
Зонная диаграмма и конструкция п/п лазера



Отсутствие смещения



Инверсная населенность, необходимая для стимулированного когерентного излучения, формируется путем инжекции через прямосмещенный р-п переход. Резонатор, необходимый для усиления когерентного излучения, формируется путем шлифовки граней кристалла. При приложении напряжения оба уровня ферми расщепляются на величину $\Delta E = eU$. В области р-п перехода возникает инверсная заселенность. В силу того что энергия оптических переходов с излучением меньше, чем энергия переходов с поглощением (т.к. область рекомбинации легирована до вырождения), вероятность первых переходов выше, чем вторых. Дальнейший процесс рекомбинации вызовет лавинную генерацию.

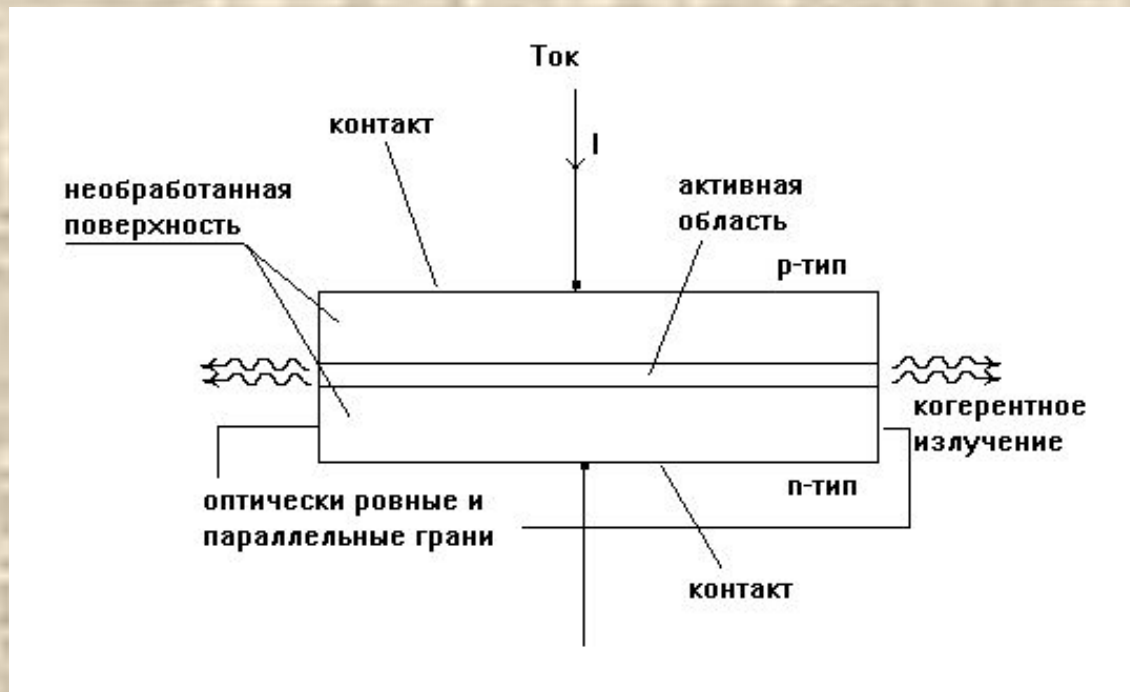


Смещение в прямом направлении

Анимация



На рис. показана базовая структура лазера с р-п переходом. Две боковые грани структуры скалываются или полируются перпендикулярно плоскости перехода. Две другие грани делаются шероховатыми для того, чтобы исключить излучение в направлениях, не совпадающих с главным. Такая структура называется резонатором Фабри-Перо. Смещение лазерного диода в прямом направлении вызывает протекание тока. Вначале, при низких значениях тока, возникает спонтанное излучение, распространяющееся во всех направлениях. При увеличении смещения ток достигает порогового значения, при котором создаются условия для стимулированного излучения, и р-п переход испускает монохроматичный строго направленный луч света.



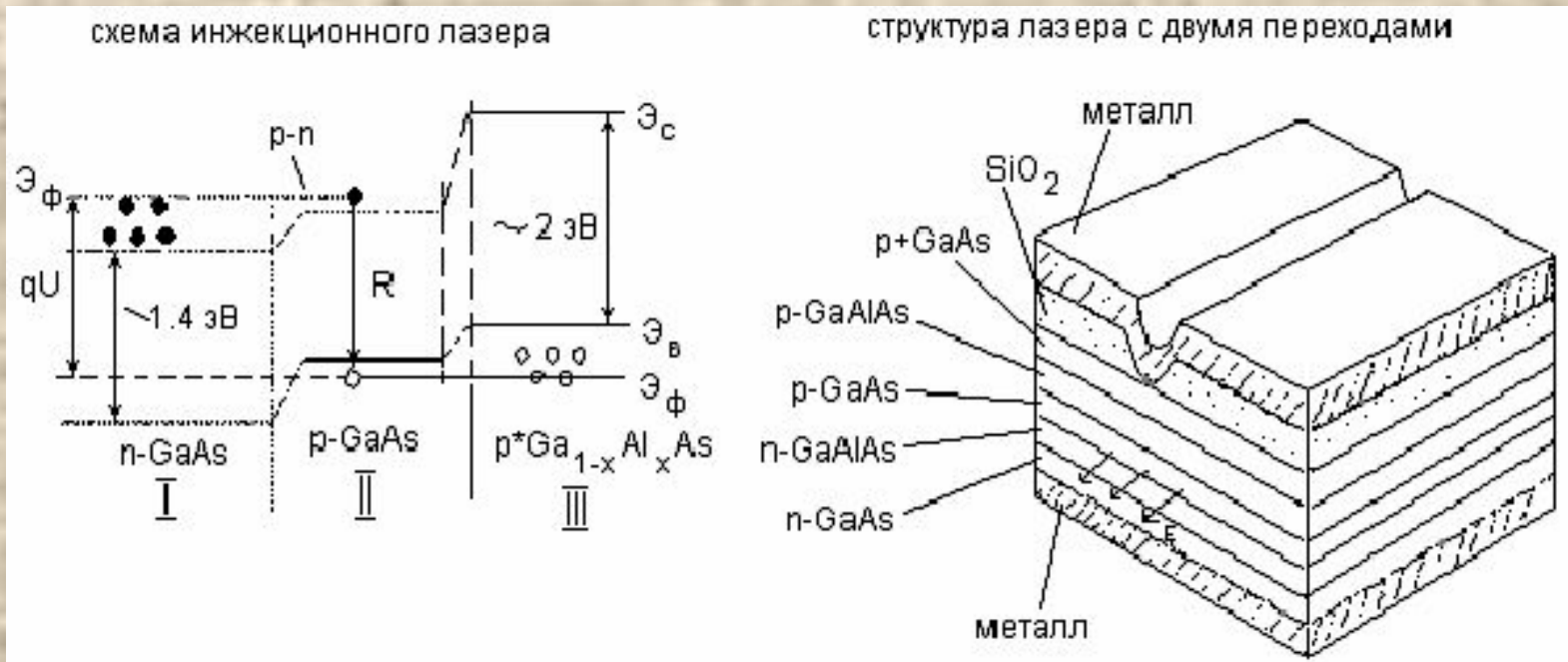
Анимация



Для изготовления лазеров используют полупроводники с прямыми зонами, например GaAs или GaAlAs, в которых возможны переходы электронов без участия фотонов. Создание инверсной заселённости уровней происходит при интенсивной инжекции неосновных носителей, что легче достигается в гетеропереходах (гомопереходы - p - n - переходы, созданные в одном и том же веществе, гетеропереходы получают между p - и n - областями материалов с различной шириной запрещённой зоны, что даёт, например, многоступенчатую форму p - n - перехода), изготовленных на основе материалов с высокой концентрацией примесей. Усиление света происходит только вдоль направлений, перпендикулярных поверхности зеркал, поэтому из области p - n - перехода через полупрозрачную отражающую поверхность выходит узкий луч когерентного излучения.



Через р - n - переход инжектируются электроны из n - области I в активную область II (толщиной ~ 1 мкм), где происходит излучение фотонов с энергией $h\nu=1.4\text{эВ}$. Переход типа р - р⁺, т.е. несимметрично легированная область, между р - областью II и областью III создаёт барьер для электронов, попавших в активную II, и способствует накоплению электронов в этой области. Лазерный эффект достигается при пороговых значениях тока через переход (~300К), начиная с которых спектральная полоса излучения значительно сужается. Для уменьшения рабочих токов и ослабления нагрева активный слой часто сокращают до полоски шириной 5 - 20 мкм, идущей от одной отражающей поверхности до другой. Этого достигают применением узкого металлического электрода (верхнего на рис.). У подобных устройств снижается как пороговый ток (примерно до 100 мА при комнатной температуре), так и инерционность вследствие уменьшения ёмкости переходов.



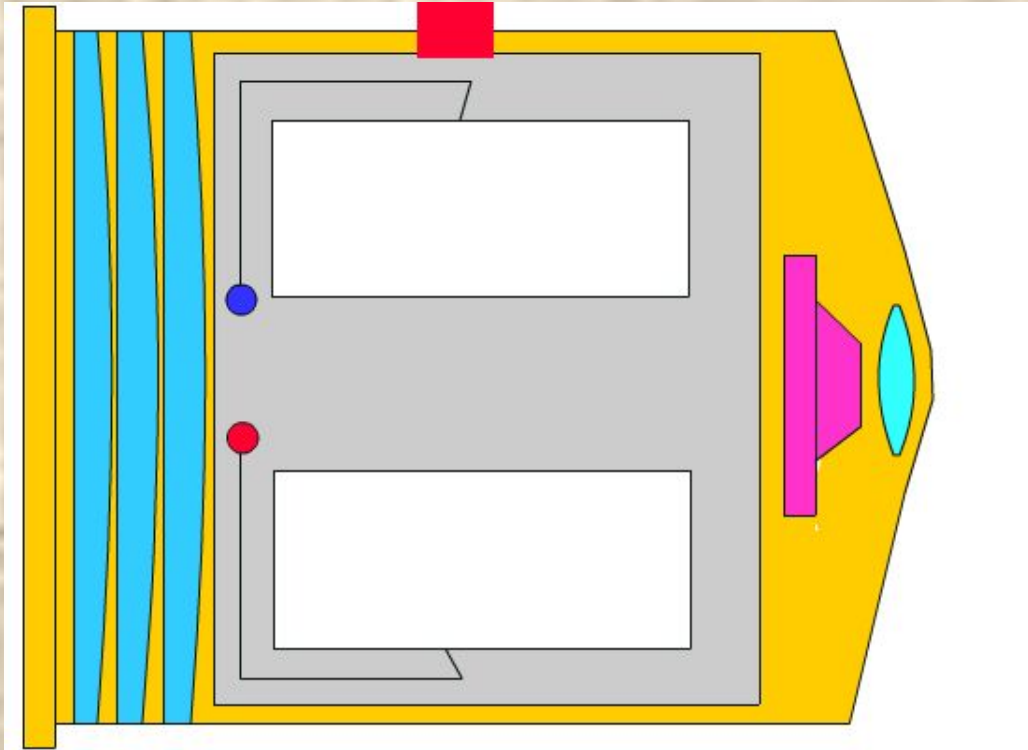
Мощность излучения лазеров, работающих в непрерывном режиме, составляет около 0.1 Вт. В случае импульсного возбуждения мощность может быть значительно повышена, т.к. нагрев прибора будет ослаблен. КПД инжекционных лазеров достигает 50%, инерционность составляет $\sim 10^{-9}$ с, напряжение питания не превышает 3В, а размеры нескольких мм. Модуляция светового тока может осуществляться изменением напряжения.



Применение лазеров

Такие достоинства полупроводниковых лазеров, как возможность перестройки длины волны узкой линии излучения, высокая стабильность, низкая потребляемая мощность, простота конструкции, открывают широкие перспективы их применения:

- ✓ в промышленности и фундаментальных исследованиях, таких как молекулярные и атомные спектроскопы, газовые спектроскопы высокого разрешения и контроль загрязненности атмосферы
- ✓ в качестве источников излучения для волоконно-оптических линий связи
- ✓ в лазерных принтерах
- ✓ в медицинских приборах (терапия, офтальмология, безболезненное удаление волос и т.д.)
- ✓ в качестве считывающей головки в cd-дисководах
- ✓ в лазерных указках и т.д.





Спасибо за внимание!!!