

Светодиоды и полупроводниковые лазеры



Содержание

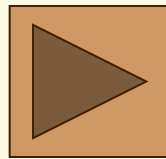
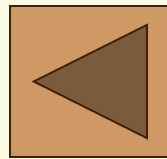
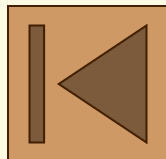
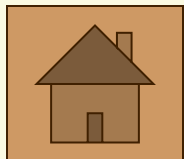
- Светодиоды
- П/п лазеры
- П/п лазеры на
фотонных
кристаллах

Светодиоды. Light-Emitting Diode (LED)

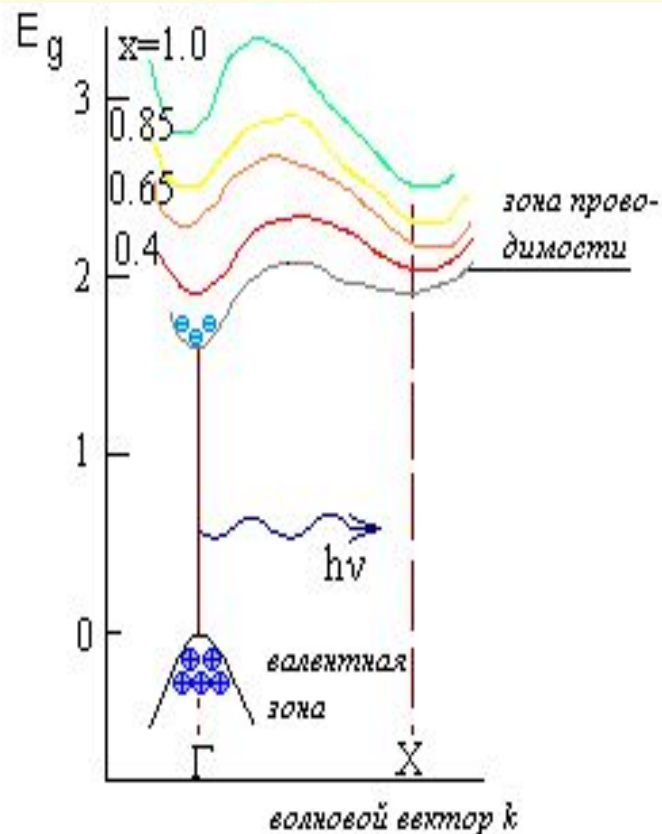
Светодиодом, или *излучающим диодом*, называют полупроводниковый прибор (р-n переход), излучающий кванты света при протекании через него прямого тока.

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

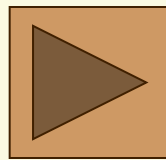
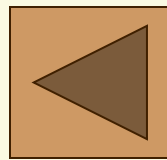
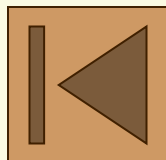
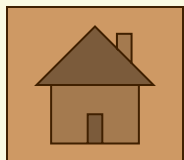
Светодиоды выпускаются **красного** ($\text{GaP} : \text{ZnO}$, $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$), **оранжевого** ($\text{GaAs}_{0,35}\text{P}_{0,65}$), **зеленого** (GaP), **желтого** ($\text{GaAs}_{0,14}\text{P}_{0,86}$), **голубого** ($\text{GaAs} - \text{ErYb}$, SiC), **фиолетового** (GaN) цветов свечения, а также с переменным цветом свечения. Последние имеют два электронно-дырочных перехода. Общий свет свечения зависит от соотношения токов, протекающих через эти переходы. Светодиоды чаще всего используют как индикаторные устройства. Поскольку глаз чувствителен только к свету с энергией $h\nu \sim 1.8 \text{ эВ}$ ($\sim 0.7 \text{ мкм}$), то полупроводники, которые могут быть использованы для создания светодиодов видимого диапазона, должны иметь ширину запрещённой зоны больше этого значения. На практике наибольший интерес представляет $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$.



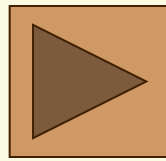
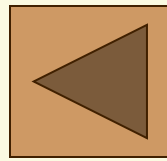
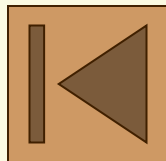
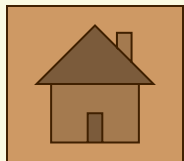
На рис. приведена зависимость запрещенной от волнового вектора для нескольких значений x , из которой следует, что зона проводимости имеет два минимума. Те минимумы, которые расположены в точке Γ , являются прямыми, тогда как другие, расположенные на оси x , не прямые.

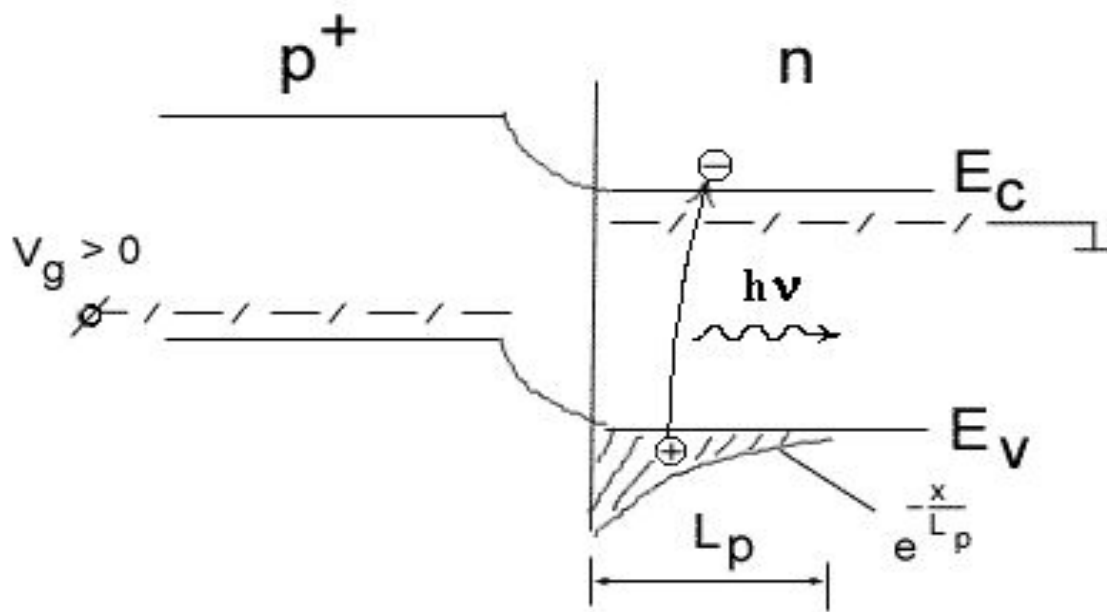


Энергетическая зонная структура $\text{GaAs}(1-x)\text{P}(x)$
Значения состава соответствуют красному ($x=0,4$),
оранжевому (0,65), жёлтому (0,85) и зелёному свету (1,0)

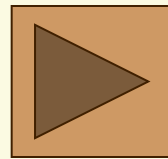
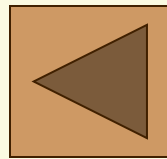
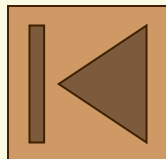
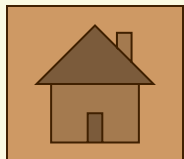


Электроны в прямом минимуме зоны проводимости и дырки в максимуме валентной зоны обладают одинаковыми квазиимпульсами; электроны в непрямом минимуме имеют другое значение квазиимпульса. Для таких прямозонных полупроводников, как $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ ($x < 0.45$) квазиимпульс при межзонных переходах сохраняется, поэтому эти переходы характеризуются высокой степенью вероятности. При этом энергия фотона приблизительно равна ширине запрещённой зоны полупроводника. В прямозонных материалах процесс излучательной рекомбинации является доминирующим. В то же время для $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ при $x > 0.45$ и GaP , у которых запрещённая зона не прямая, вероятность междузонных переходов чрезвычайно мала, поскольку в этом случае для преобразования квазиимпульса при переходе требуется участие фононов или других факторах рассеяния. Поэтому для усиления излучательных процессов в непрямозонных полупроводниках, таких, например, как GaP , специально создаются **рекомбинационные центры**. Эффективные центры излучательной рекомбинации в $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ могут быть созданы путём внедрения специальных примесей, например азота. Азот, внедрённый в полупроводник, замещает атомы фосфора в узлах решётки. Азот и фосфор имеют одинаковую внешнюю электронную структуру (оба относятся к V группе элементов периодической системы), а структуры их внутренних оболочек сильно различаются. Это приводит к возникновению вблизи зоны проводимости **электронного уровня захвата**. Полученный таким образом рекомбинационный центр называется **изоэлектронным центром**. В нормальном состоянии изоэлектронные центры нейтральны. В материале р-типа инжектированный электрон сначала захватывается на центр. Заряженный отрицательно центр затем захватывает дырку из валентной зоны, формируя связанный экситон. Последующая аннигиляция этой электронно-дырочной пары приводит к рождению фотона с энергией, примерно равной разности между шириной запрещённой зоны и энергией связи центра. Так как захваченный электрон сильно локализован на центре, его импульс рассеивается. Таким образом обеспечивается преобразование квазиимпульса, вследствие чего вероятность прямого перехода существенно возрастает. В непрямозонных материалах, таких, как GaP , описанный механизм излучательной рекомбинации является преобладающим.

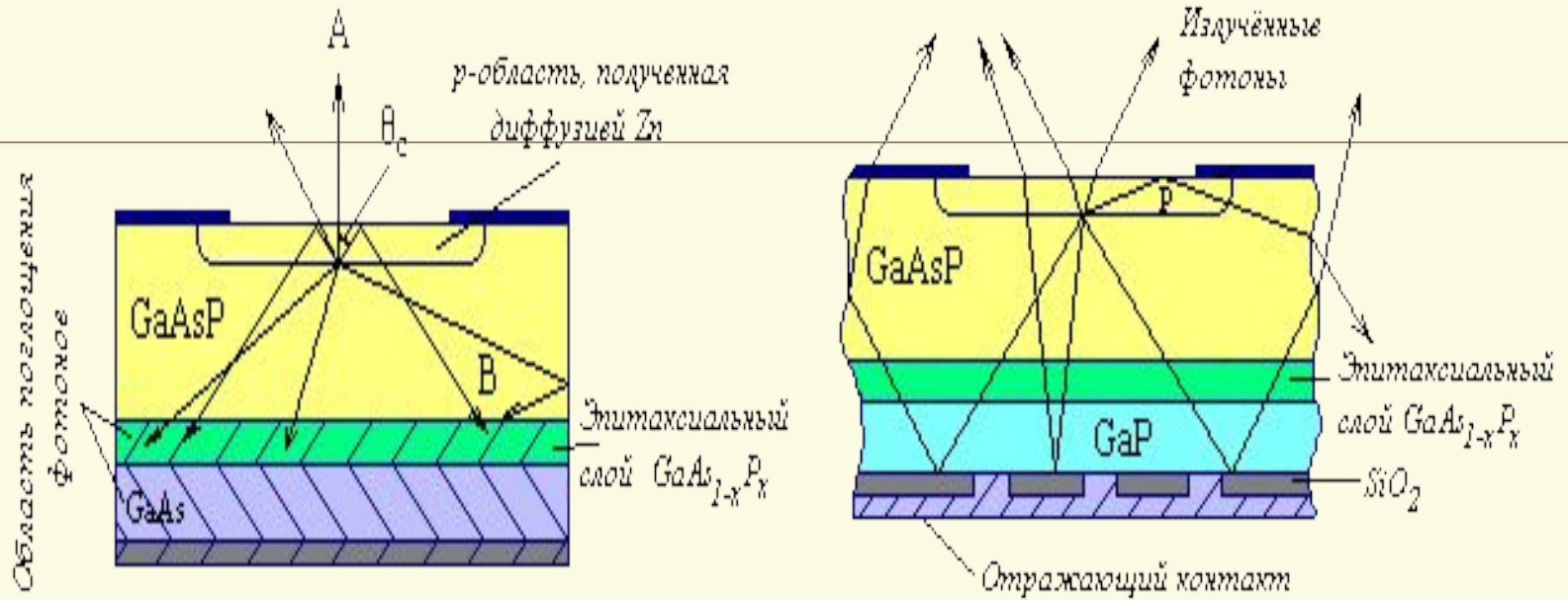




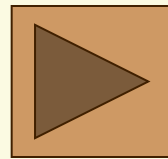
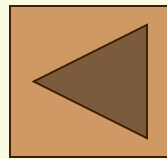
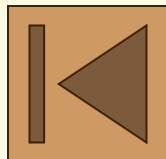
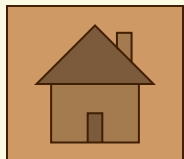
Принцип действия светодиода основан на излучательной рекомбинации инжектированных носителей в прямосмещенном p-n переходе



Конструкции светодиодов.

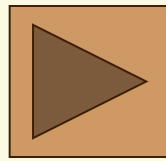
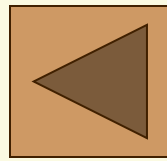
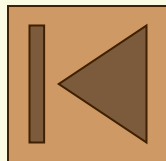
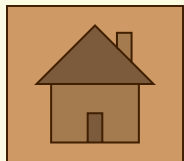


Среди светодиодных структур основной является структура с плоской геометрией (см. рис.). Обычно прямозонные светодиоды (красное излучение) формируются на подложках GaAs (а), тогда как непрямозонные (оранжевое, жёлтое и зелёное излучения) - на подложках GaP (б).



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.

Переходная область ограничивает образование безызлучательных центров, обусловленных различием решёток. 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.

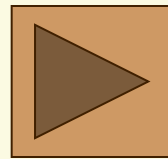
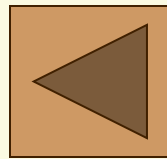
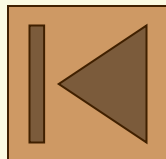
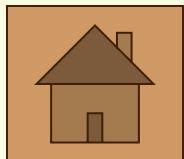


Полная эффективность преобразования электрического сигнала в оптический даётся следующим выражением:

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

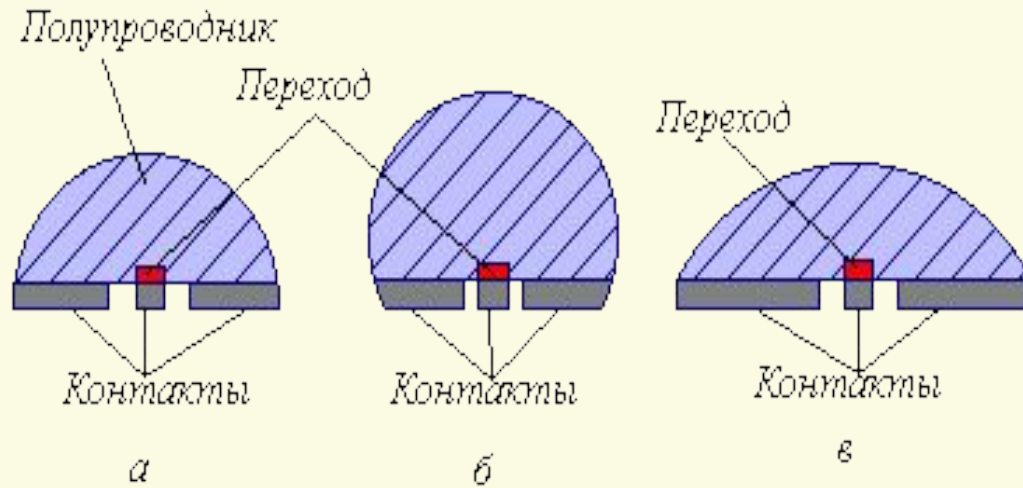
$$\eta_F \approx \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} (1 - \cos \theta_c)$$

где P -мощность на входе, $4n_1 n_2 / (n_2 + n_1)^2$ - 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 фотонов/(с·см²), R_1 - коэффициент отражения от тылового контакта, α_1 и x_1 соответственно коэффициенты поглощения и толщина р- и n-областей прибора



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

Разрез трёх светодиодов



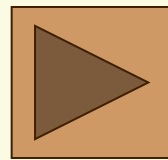
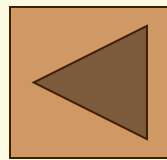
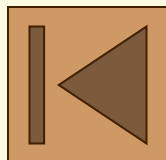
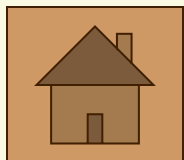
а-полусфера; б-усечённая сфера; в-параболоид

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.

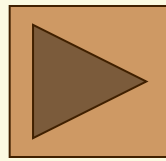
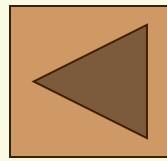
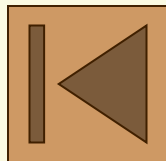
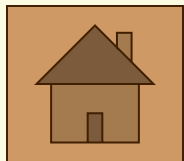


Инфракрасные светодиоды

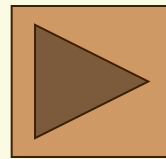
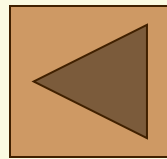
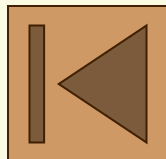
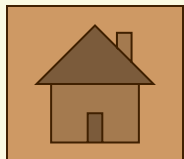
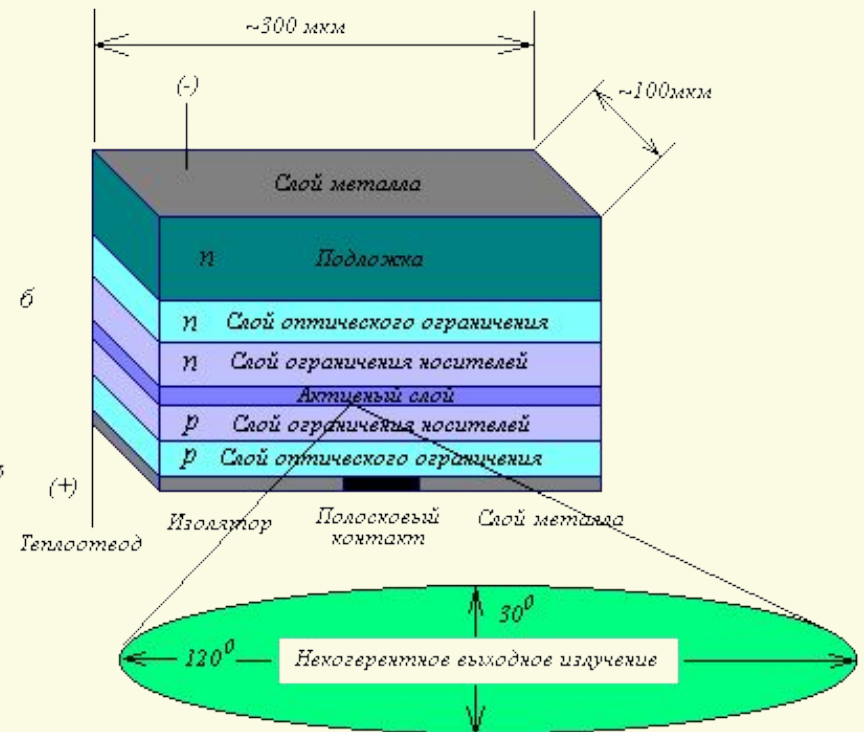
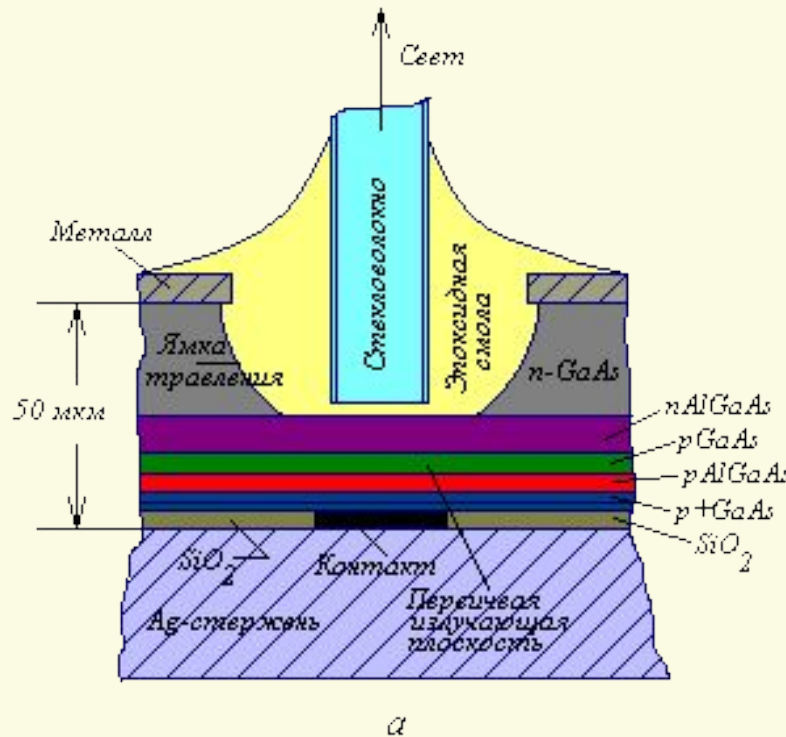
Областями применения диодов ИК-излучения являются оптронные устройства коммутации, оптические линии связи, системы дистанционного управления.

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.

Светодиоды по сравнению с лазерами имеют как преимущества, так и недостатки. К последним относятся меньшая яркость, более низкие частоты модуляции и большая спектральная ширина линии излучения, типичное значение которой составляет 100-500 ангстрем, тогда как лазеры характеризуются шириной линии 0,1-1 ангстрем.



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



Важным параметром, который должен учитываться при конструировании светодиодов для оптических систем связи, является диапазон рабочих частот. При внешнем возбуждении скорость полной излучательной рекомбинации определяется выражением: $R_r = Bnp$

где B -константа излучательной рекомбинации, равная G/n_0p_0 (G -скорость полной термической генерации).

При достаточно низких уровнях возбуждения, таких, что в материале p -типа p примерно равно p_0 , время жизни излучательной рекомбинации становится равным

$$\tau_r = \frac{(n - n_0)}{R_r} \cong \frac{l}{Bp_0}$$

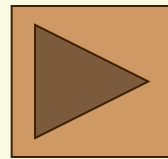
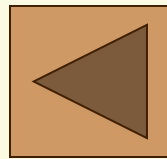
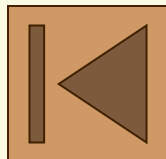
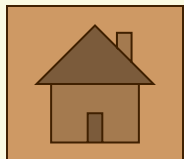
а для материала n -типа, когда n примерно равно n_0 :

$$\tau_r = \frac{(p - p_0)}{R_r} \cong \frac{l}{Bn_0}$$

Предельная частота
светодиода

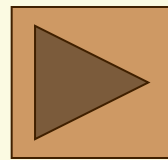
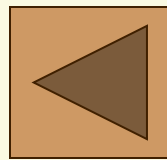
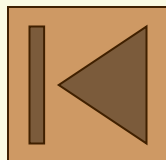
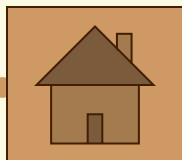
$$f_c = \frac{l}{2\pi\tau}$$

Экспериментально показано, что предельная частота возрастает с концентрацией p_0 . Для достижения высоких значений f необходимо уменьшать толщину рекомбинационной области и увеличивать концентрацию носителей

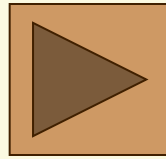
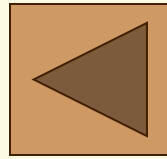
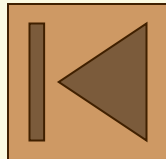


Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры, подобно другим лазерам (таким, как рубиновый лазер или же лазер на смеси He - Ne), испускают излучение, когерентное в пространстве и во времени. Это означает, что излучение лазера высоко монохроматично (имеет узкую полосу спектра) и создает строго направленный луч света. Вместе с тем по ряду важных характеристик полупроводниковые лазеры существенно отличаются от лазеров других типов.

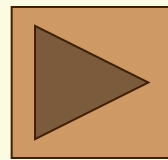
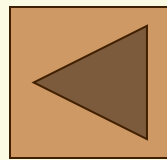
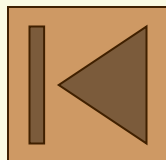
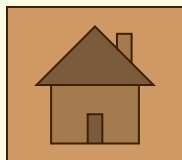


1. В обычных лазерах квантовые переходы происходят между дискретными энергетическими уровнями, тогда как в полупроводниковых лазерах переходы обусловлены зонной структурой материала.
2. Полупроводниковые лазеры имеют очень малые размеры ($\sim 0,1$ мм в длину), и так как активная область в них очень узкая (~ 1 мкм и меньше), расхождение лазерного луча значительно больше, чем у обычного лазера.
3. Пространственные и спектральные характеристики излучения полупроводникового лазера сильно зависят от свойств материала, из которого сделан переход (таких свойств, как структура запрещенной зоны и коэффициент преломления).
4. В лазере с р-п 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.



● Диапазон длин волн лазерного излучения охватывает область спектра от ультрафиолетовой до инфракрасной. В интервале длин волн вблизи 0,9 мкм в качестве источников излучения используются гетеролазеры на основе $\text{GaAs-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$.

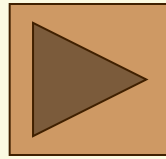
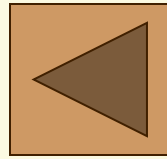
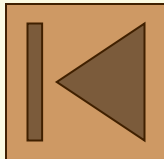
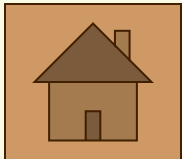
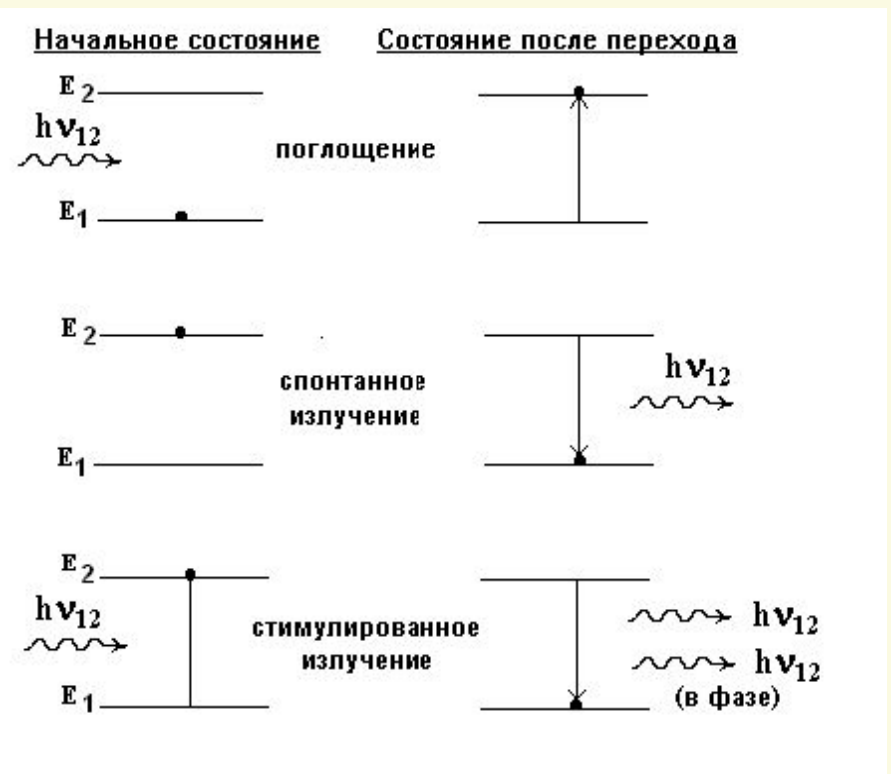
Вблизи длины волны 1,3 мкм в ВОЛС волокно имеет низкие потери (0,6 дБ/км) и слабую дисперсию, а в окрестности длины волны 1,55 мкм потери достигают минимального значения (0,2 дБ/км), поэтому в качестве источников излучения могут использоваться лазеры на основе $\text{Ga}(x)\text{In}(1-x)\text{As}(y)\text{P}(1-y)\text{-InP}$.



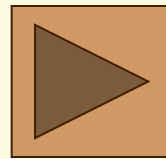
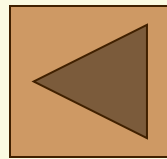
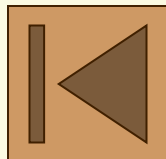
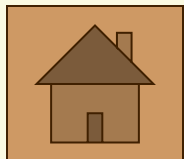
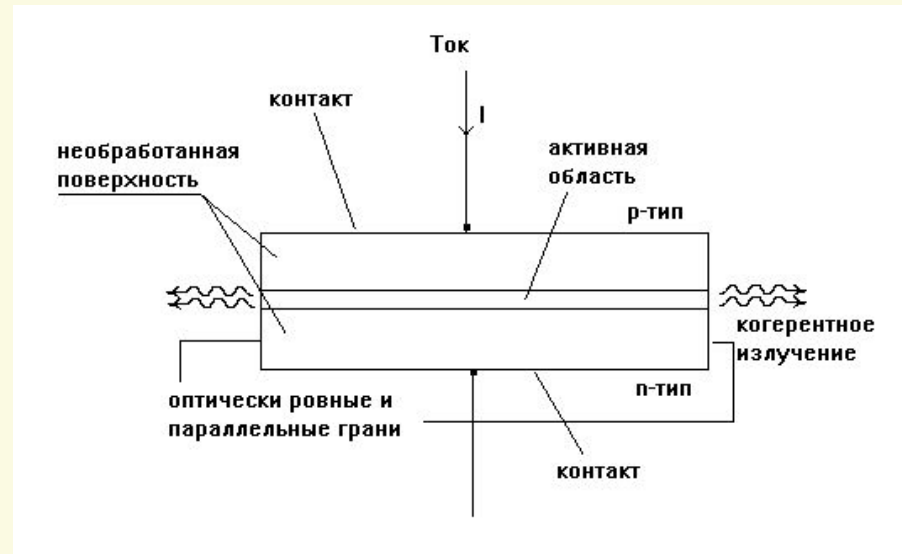
Стимулированное излучение.

Работа лазера связана с тремя основными процессами, обусловленными переходом носителей: поглощения, спонтанной эмиссии и стимулированным излучением. Рассмотрим два энергетических уровня E_1 и E_2 , один из которых E_1 характеризует основное, а другой E_2 - возбужденное состояние

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, находящемся 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).



На рис. показана базовая структура лазера с p-n 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 p-n переход испускает монохроматичный строго направленный луч света.



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.

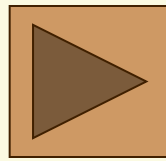
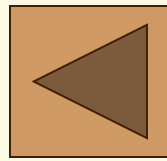
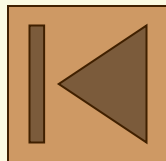
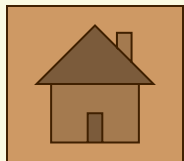
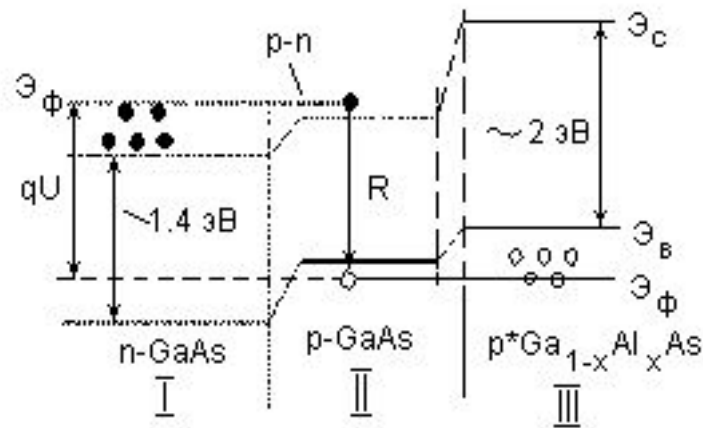
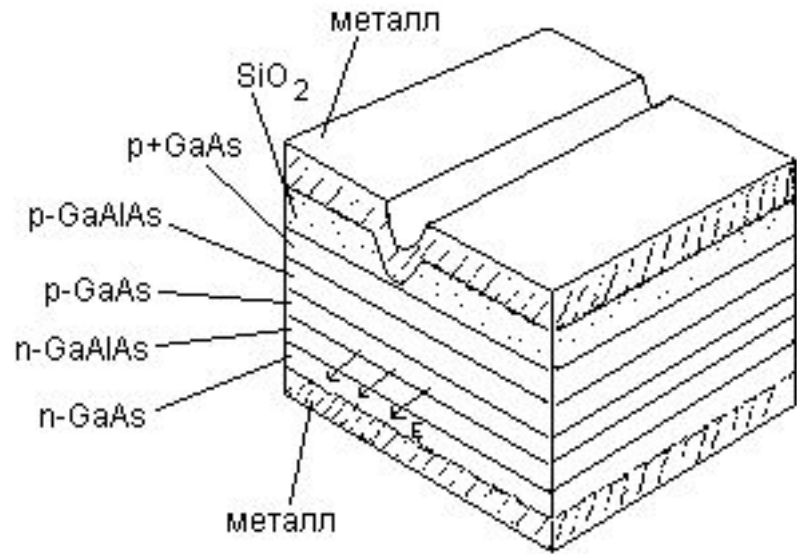


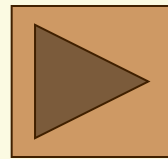
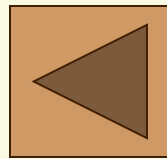
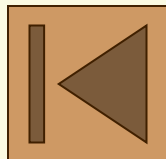
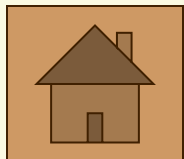
схема инжекционного лазера



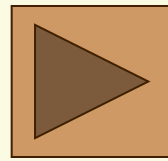
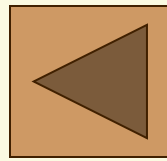
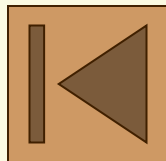
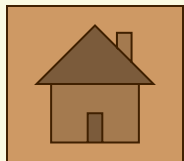
структура лазера с двумя переходами



На рис. приведена энергетическая зонная диаграмма лазера в присутствии внешнего напряжения U

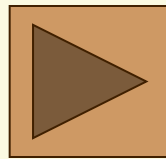
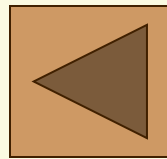
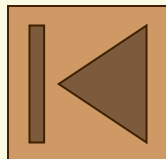
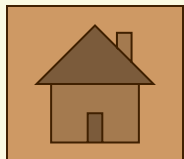


Через р - n - переход инжектируются электроны из n - области I в активную область II (толщиной $\sim 1\text{ мкм}$), где происходит излучение фотонов с энергией $h\nu=1.4\text{ эВ}$. Переход типа р - р⁺, т.е. несимметрично легированная область, между р - областью II и областью III создаёт барьер для электронов, попавших в активную II, и способствует накоплению электронов в этой области. Лазерный эффект достигается при определённых пороговых значениях тока через переход (примерно при 300К). Начиная с этих значений тока 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.



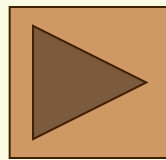
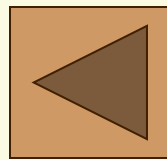
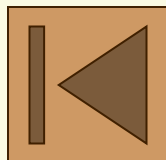
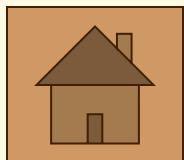
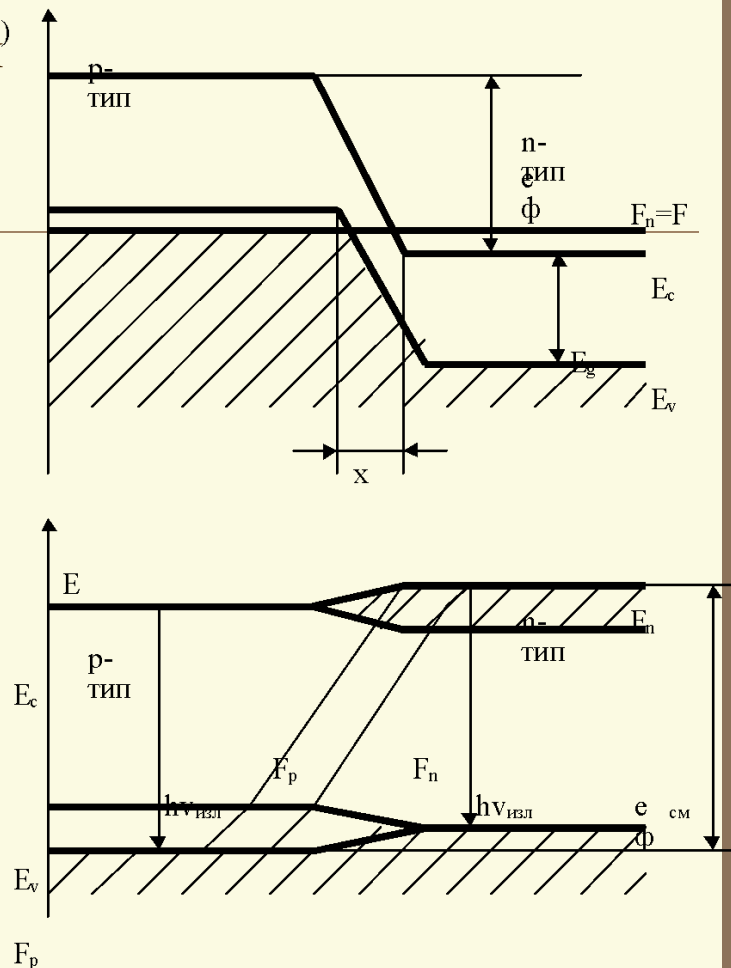
В качестве материала, инжектирующего электроны (вместо n - GaAs) может быть использован более широкозонный (рис.). В этом случае активный слой GaAs p - типа располагается между двумя широкозонными полупроводниками p - GaAlAs и n - GaAlAs, которые обладают более низким коэффициентом преломления. Это приводит к усилению отражения света от боковых слоёв и, следовательно, к уменьшению потерь света.

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 $1 - 10^{-9}$ с, напряжение питания не превышает 3В, а размеры нескольких мм. Модуляция светового тока может осуществляться изменением напряжения.

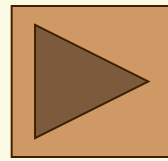
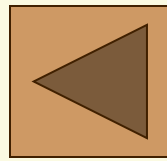
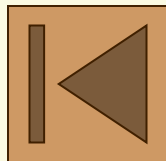
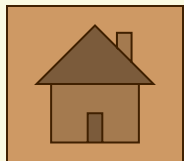


Наиболее легко и эффективно инверсия^{a)} населенности достигается в p-n-переходах за счет инжекции электронов.

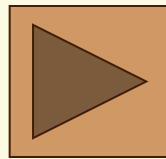
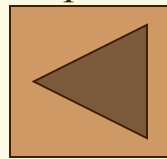
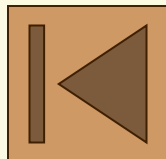
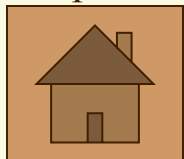
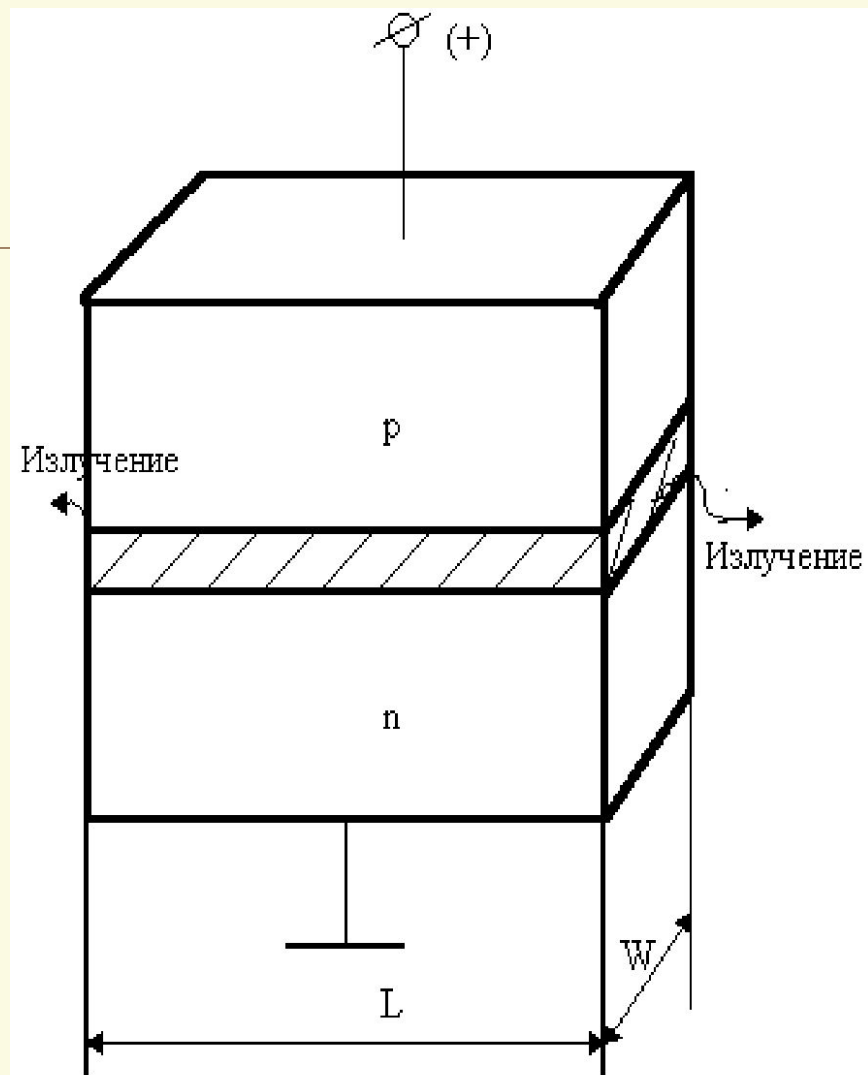
Известно, что в сильнолегированных (вырожденных) полупроводниках, когда одному и тому же значению энергии соответствуют различные электронные или дырочные состояния, в p- и n-областях уровни Ферми находятся в пределах разрешенных зон и при тепловом равновесии эти уровни для электронов и дырок совпадают (рис. а).



В области р-n-перехода образуется потенциальный барьер, не позволяющий переходить основным носителям из зоны в зону. Если же к переходу приложить напряжение U в прямом направлении, то потенциальный барьер в области р-n-перехода уменьшается на значение энергии, соответствующей этому напряжению. Как правило, это напряжение оказывается приложенным к переходу, вследствие чего равновесие носителей тока нарушается. Если при тепловом равновесии распределение электронов и дырок можно было описать с помощью квазиуровня Ферми, то при наличии приложенного электрического поля заполнение состояний нужно рассматривать отдельно для зоны проводимости и отдельно для валентной зоны. При включении прямого смещения возникает диффузионный поток электронов через р-n-переход, который стремится поднять квазиуровень Ферми F_n для электронов в р-n-области до его уровня в n-области.



Инжектированные электроны после диффундирования на небольшое расстояние, определяемое диффузионной длиной, рекомбинируют с дырками; в результате возникает стационарное состояние, при котором скорость рекомбинации электронов в точности сбалансирована скоростью их инжекции. Совершенно аналогичны рассуждения и для дырок в валентной зоне. При наличии стационарного состояния положение квазиуровней Ферми для двух типов носителей в области перехода меняется (рис. б). Основные носители вытягиваются из контакта, чтобы обеспечить условие нейтральности. В настоящее время лазерные диоды в основном изготавливают из GaAs или $Ga_{1-x}Al_xAs$. Структура лазерного диода на p-n-переходе представлена на рис.

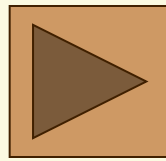
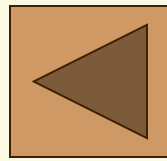
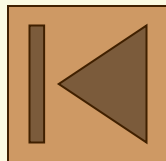
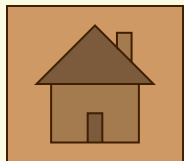


Деградация лазеров.

Деградация инжекционных лазеров обусловлена целым рядом механизмов. Выделяют три основных типа деградации: 1) катастрофическое разрушение; 2) образование дефектов темных линий; 3) постепенная деградация.

Катастрофическое разрушение происходит под действием больших мощностей излучения, приводящих к непрерывному повреждению зеркал лазера вследствие образования на их поверхности ямок и канавок.

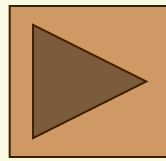
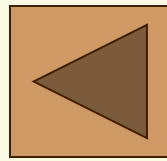
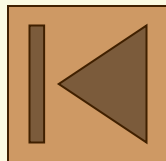
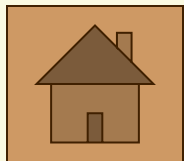
Дефекты темных линий представляют собой сетку дислокаций, которые могут формироваться в процессе работы лазера и внедряться внутрь резонатора. Появившись, она может сильно разрастись в течение нескольких часов и вызвать увеличение плотности порогового тока.

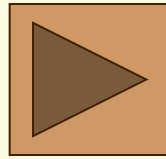
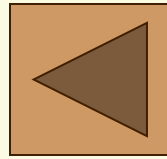
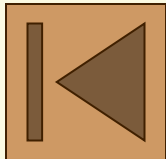
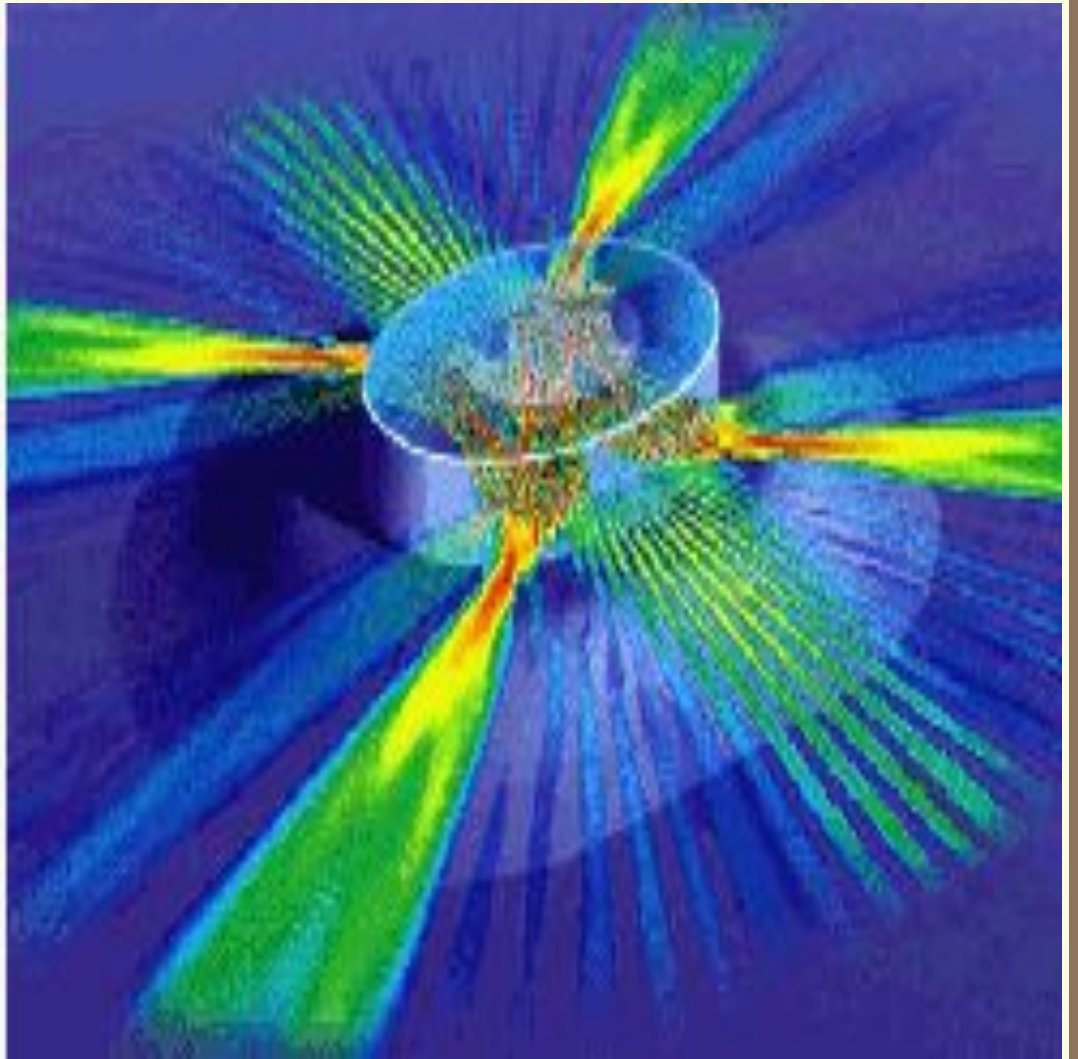


Полупроводниковые лазеры на фотонных кристаллах

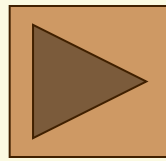
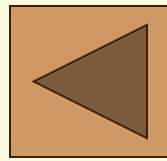
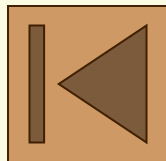
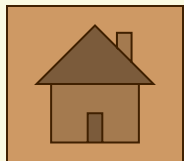
Ученым из компании Bell Labs удалось разработать лазер нового поколения, используя в качестве полупроводника для изготовления многокаскадного полупроводникового лазера фотонные кристаллы. Полученный лазер обладает уникальными свойствами. Например, его излучение может быть направлено в любом, заранее выбранном, направлении, что позволяет встраивать его в обычную полупроводниковую микросхему.

Обычный многокаскадный полупроводниковый лазер, представляющий собой набор слоев из тонких полупроводниковых пластин, может излучать свет лишь в стороны, как показано на втором рисунке. Новый лазер на фотонных кристаллах избавлен от этого недостатка и может излучать свет в любом, заранее выбранном направлении.

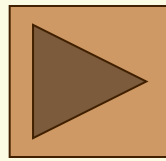
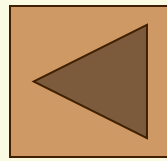
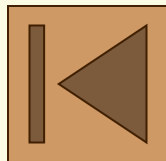
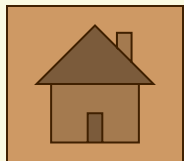




Фотонный кристалл, являющийся неотъемлемой частью нового лазера, представляет собой полупрозрачный диэлектрик с определенной периодической структурой и уникальными оптическими свойствами. Уникальность его заключается в том, что фотонный кристалл обеспечивает почти полное управление движением проходящего через него света. Такие возможности достигаются за счет наличия в кристалле диэлектрика равномерно распределенных мельчайших отверстий. Их диаметр подобран таким образом, что они пропускают световые волны лишь определенной длины, а остальные частично отражают или поглощают. При определенном физическом воздействии на кристалл, например, звуковыми волнами, длина световой волны, пропускаемой кристаллом, и направление ее движения могут значительно меняться.



Многокаскадный полупроводниковый лазер представляет собой этакий "сэндвич", состоящий из нескольких (более двух) тончайших, в несколько нанометров толщиной, чередующихся слоев полупроводника с несколько отличающейся проводимостью. Если приложить к разным концам такого сэндвича электрическое напряжение, то электроны потекут сквозь эти слои весьма специфичным образом: накопив достаточно энергии, они синхронно "перепрыгивают" сквозь слой (выражаясь научно, падают в квантовую яму), излучая затраченную на переход энергию в виде фотонов. Характерной особенностью такого лазера является то, что он излучает непрерывно и равномерно, строго параллельно плоскости, в которой лежат слои полупроводников.



**Полупроводниковые
лазеры
скоро встанут на
вооружение США**