

# Полупроводниковые лазеры



Выполнил:  
Студент группы  
21614  
Федотов Роман

# Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковым лазером называют оптоэлектронное устройство, генерирующее когерентное излучение при пропускании через них электрического тока.

Генерация стимулированного когерентного излучения, или лазерный эффект, были разработаны для газовых лазеров и хорошо описаны, используя представление об электронных уровнях в атомных системах.

# Оптические переходы

В твердых телах переходы электронов между состояниями возможны либо с испусканием, либо с поглощением квантов света. В зависимости от начального и конечного состояния различают 4 типа переходов:

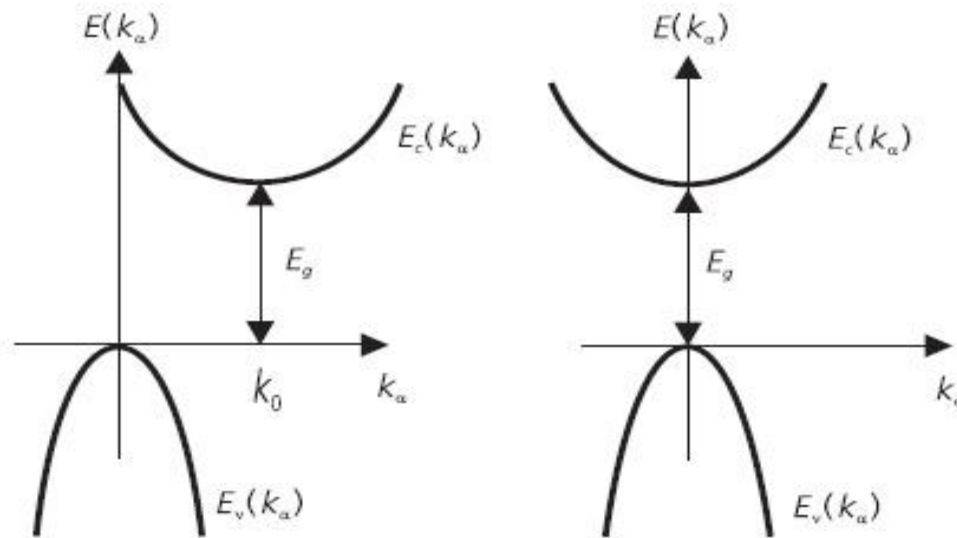
- А - межзонные переходы, т.е. переходы электронов между состояниями, расположенными в зоне проводимости и валентной зоне,
- В - внутрizonные переходы, т.е. переходы электронов между состояниями, расположенными только в зоне проводимости или только в валентной зоне,
- С - переходы между примесными состояниями, энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне,
- D - переходы между примесными состояниями и состояниями для электронов в зоне проводимости или валентной зоне.

Для оптоэлектронных устройств наиболее важными являются оптические переходы типа А и типа D.

Межзонные переходы типа А обуславливают наиболее сильное поглощение или испускание света, с энергией близкой к ширине запрещенной зоны.  $h\nu > E_g$ . Эти переходы называют фундаментальными.

# Оптические переходы

Все полупроводниковые соединения можно подразделить на два типа - прямозонные и непрямозонные. В прямозонных полупроводниках энергетический минимум зоны проводимости находится при  $K=0$ , также как и соответствующий максимум валентной зоны. В непрямозонных полупроводниках энергетический минимум зоны проводимости находится при  $K$  отличном от нуля.



# Оптические переходы

К полупроводникам с прямозонной энергетической структурой относятся GaAs, GaP, InGaAsP. К полупроводникам с непрямоzonной энергетической структурой относятся Ge и Si.

Очевидно, что квазиимпульс фотона на несколько порядков меньше, чем квазиимпульс электрона. Отсюда следует, что при межзонных переходах в непрямоzonных полупроводниках необходимо участие третьей частицы с малой энергией, но большим квазиимпульсом. Такой частицей в твердых телах является акустический фонон. Поскольку вероятность излучательных переходов с участием трех частиц ниже, чем двух, то следовательно в непрямоzonных полупроводниках вероятность излучательной рекомбинации будет всегда меньше, чем в прямоzonных.

Таким образом, для оптоэлектронных устройств, предпочтительнее использовать полупроводниковые соединения с прямоzonной энергетической структурой и спектральный диапазон которых лежит в области фундаментального поглощения.

# Методы инжекции

- Инжекция неосновных носителей заряда через потенциальный барьер гомо- или гетероперехода
- возбуждение ударной ионизацией в сильном электрическом поле
- Возбуждение при туннелировании через потенциальный барьер

Основным методом создания неравновесных носителей в оптоэлектронных устройствах является инжекция неосновных носителей через прямосмещённый электронно-дырочный переход (p-n-или гетеропереход)

# Условие односторонней инжекции в p-n переходе

Вольт-амперная характеристика p-n перехода для гомоструктур описывается следующим соотношением:

$$j = \left( \frac{q p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{q n_{p0} D_n}{L_n} \right) (e^{\beta V_g} - 1)$$

При прямом смещении в токе p-n-перехода присутствуют обе инжекционные компоненты: электронная и дырочная. Для большинства оптоэлектронных устройств необходимо, чтобы в инжекционном токе присутствовала только одна компонента - или электронная, или дырочная.

# Условие односторонней инжекции в p-n переходе

Из предыдущего соотношения следует, что доминирующая инжекционная компонента будет того типа, концентрация основных носителей в котором выше, т.е. в несимметричных p-n-переходах будет происходить преимущественно инжекция дырок (в случае p+ - n) или электронов (в случае n+ - p) соответственно.

Для несимметричных p-n-переходов величина основной инжекционной компоненты в токе p-n-перехода выражается соотношением:

$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = \frac{j_p}{j_p + j_n} = \frac{1}{1 + \frac{j_n}{j_p}} = \frac{1}{1 + \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}} \approx 1 - \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}$$



# Условие односторонней инжекции в p-n переходе

Таким образом, для реализации односторонней инжекции в p-n-переходе необходимо иметь эмиттер этого перехода легированным, как правило, до вырождения, а базу слабо легированной, по крайней мере на 3-4 порядка меньше чем эмиттер.

# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Для гетеропереходов величина полного тока также выражается соотношением:

$$j = \left( \frac{q p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{q n_{p0} D_n}{L_n} \right) (e^{\beta V_g} - 1)$$

При анализе вкладов дырочного и электронного инжекционного тока необходимо учесть, что p- и n- области в гетеропереходах состоят из различных полупроводников. В связи с этим значения собственной концентрации  $n_i$ , диффузионной длины и коэффициентов диффузии будут различными.

# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Как правило, в гетеропереходах ширина запрещённой зоны компонент гетероперехода отличается в 1.5-2 раза. Вследствие этого значение собственной концентрации  $n_i$ , будут отличаться на много порядков. Если электронное сродство одинаково, для гетеропереходов доля инжекционного тока в полном токе гетероперехода будет:

$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = \frac{j_p}{j_p + j_n} = \frac{1}{1 + \frac{j_n}{j_p}} = \frac{1}{1 + \frac{n_{iЭ}^2}{n_{iБ}^2} \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}} \approx 1 - \frac{n_{iЭ}^2}{n_{iБ}^2} \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}$$

Из уравнения следует, что при прочих равных условиях инжекционная компонента тока из широкозонного полупроводника будет всегда выше, чем из узкозонного. Использование гетеропереходов может обеспечить одностороннюю инжекцию из слаболегированного полупроводника в сильнолегированный, что невозможно для р-п гомопереходов.

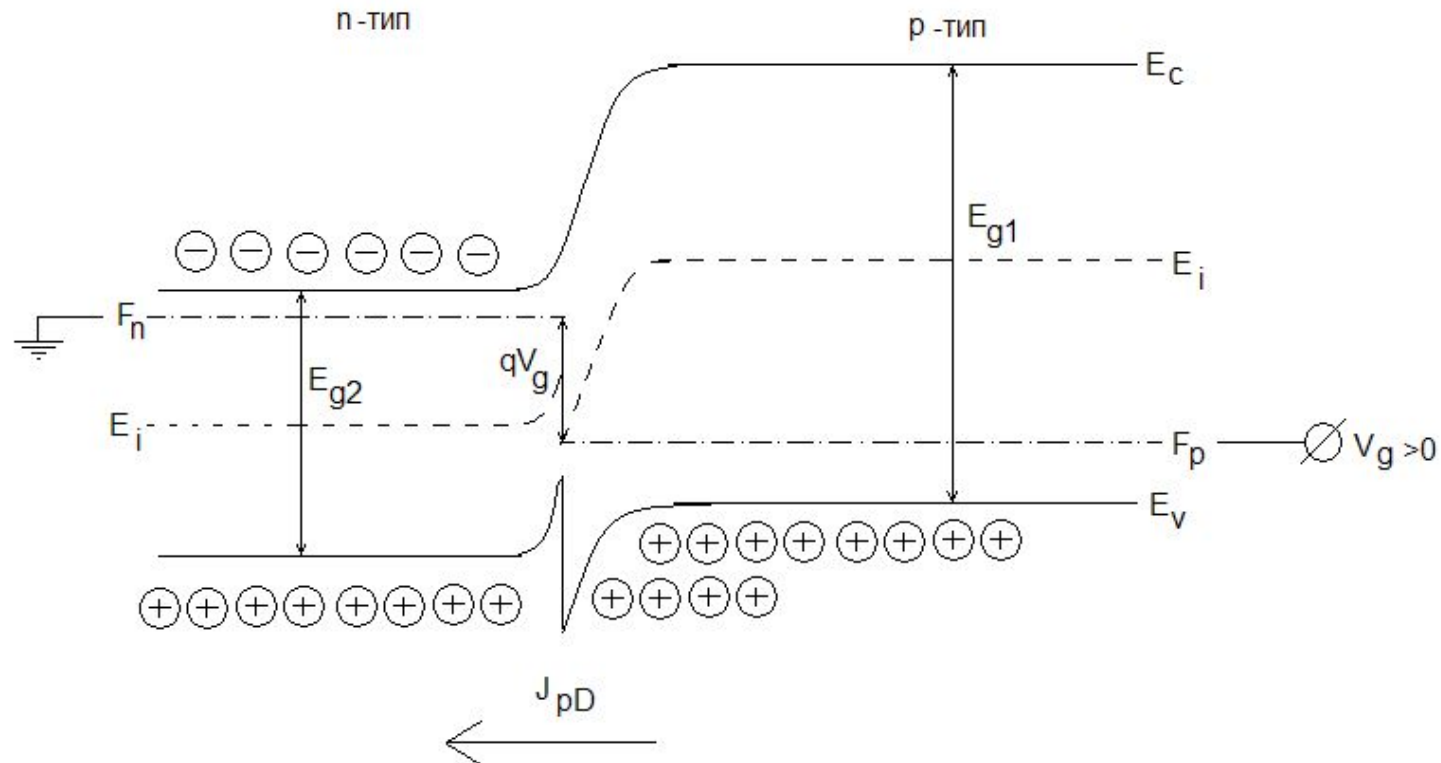
# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Если у р-п гетероперехода ширина запрещённой зоны п-полупроводника больше, чем у р-полупроводника, то потенциальный барьер для инжекции электронов из полупроводника п-типа будет меньше, чем для инжекции дырок из полупроводника р-типа. И наоборот если ширина запрещённой зоны р-полупроводника больше, чем у п-полупроводника, то потенциальный барьер инжекции дырок из полупроводника р-типа будет меньше, чем барьер инжекции электронов из полупроводника п-типа.

В условиях термодинамического равновесия инжекционные компоненты тока уравниваются дрейфовыми компонентами и суммарный ток равен нулю.

# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Рассмотрим p-n-переход, у которого ширина запрещённой зоны n-полупроводника больше, чем у p-полупроводника.



# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

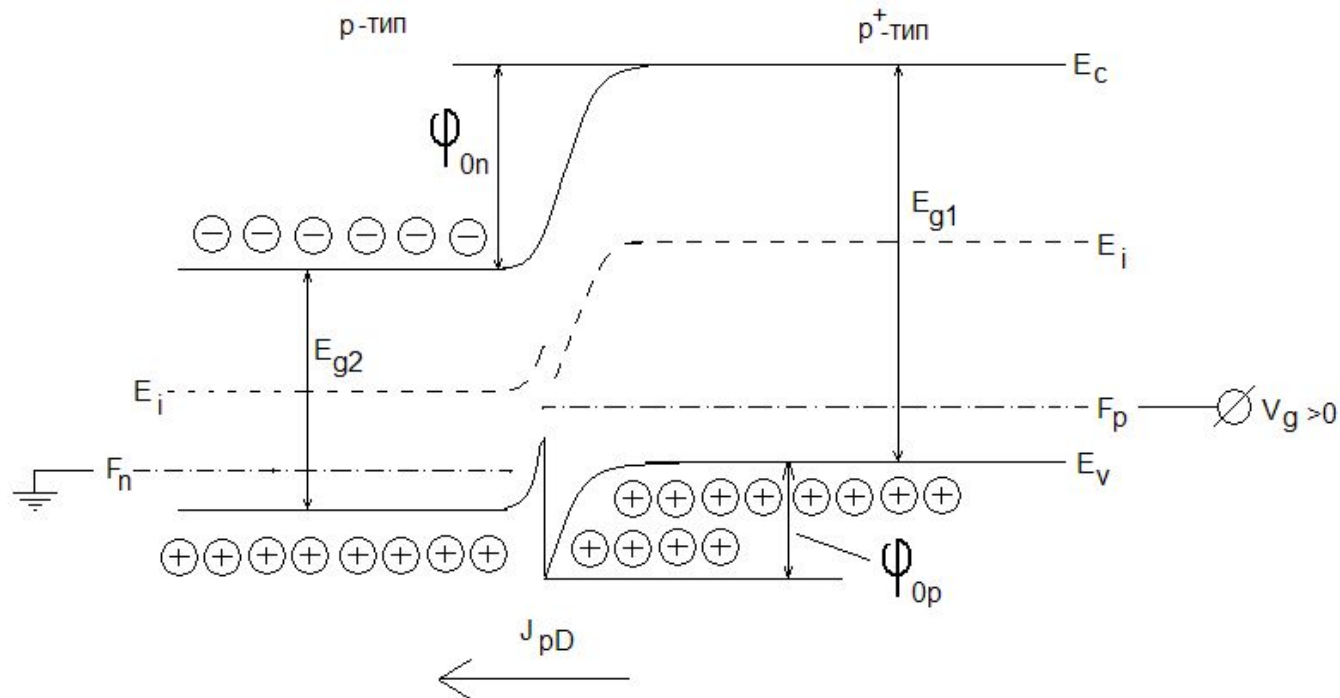
При приложении внешнего напряжения, смещающего p-n-гетеропереход в прямом направлении, происходит возрастание инжекционной компоненты тока. Как видно из энергетической диаграммы такого перехода, приведённой на рисунке высота энергетического барьера для электронов, движущихся из n-области в p-область  $\Delta\varphi_{0n}$ , гораздо больше энергетического барьера для дырок, движущихся из p-области в n-область  $\Delta\varphi_{0p}$ . В таком гетеропереходе реализуется эффект односторонней инжекции дырок.

Как видно из энергетической диаграммы такого перехода, высота энергетического барьера для электронов, движущихся из n-области в p-область  $\Delta\varphi_{0n}$  гораздо меньше энергетического барьера для дырок, движущихся из p-области в n-область  $\Delta\varphi_{0p}$ . Поэтому при подачи на такой гетеропереход прямого напряжения будет преобладать инжекция электронов, т.е. получится односторонняя инжекция. Этим гетеропереход принципиально отличается от гомоперехода.

Гетеропереход может быть создан на основе полупроводников одного типа проводимости.

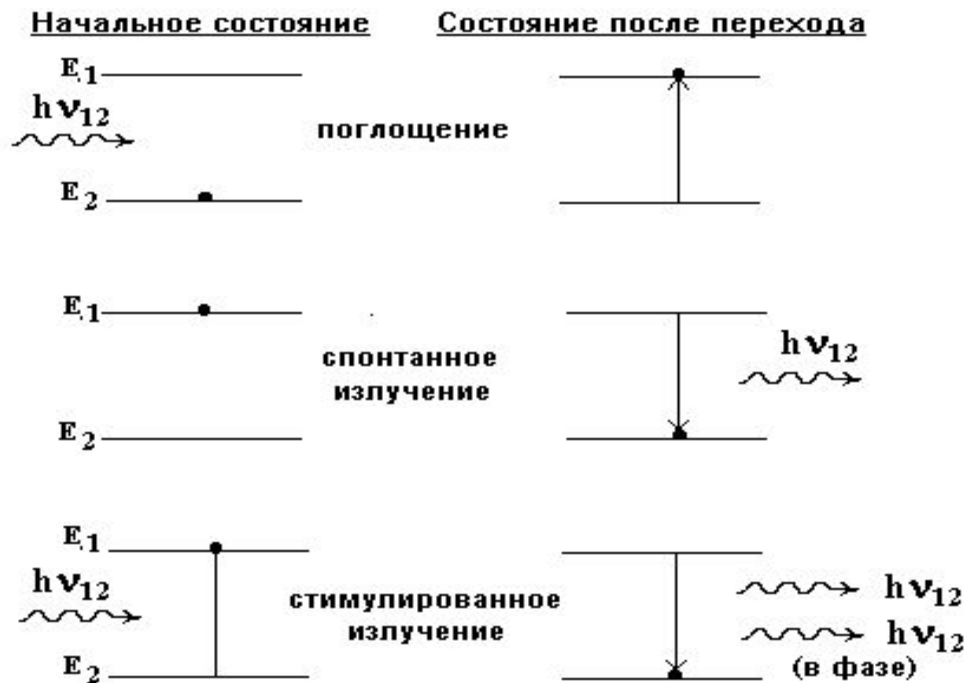
# Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Гетеропереход может быть создан на основе полупроводников одного типа проводимости (p-p+ или n-n+).



# Полупроводниковые лазеры

Рассмотрим два энергетических уровня  $E_1$  и  $E_2$ , один из которых  $E_2$  характеризует основное, а другой  $E_1$  - возбужденное состояние.



$$h\nu_{12} = E_1 - E_2$$



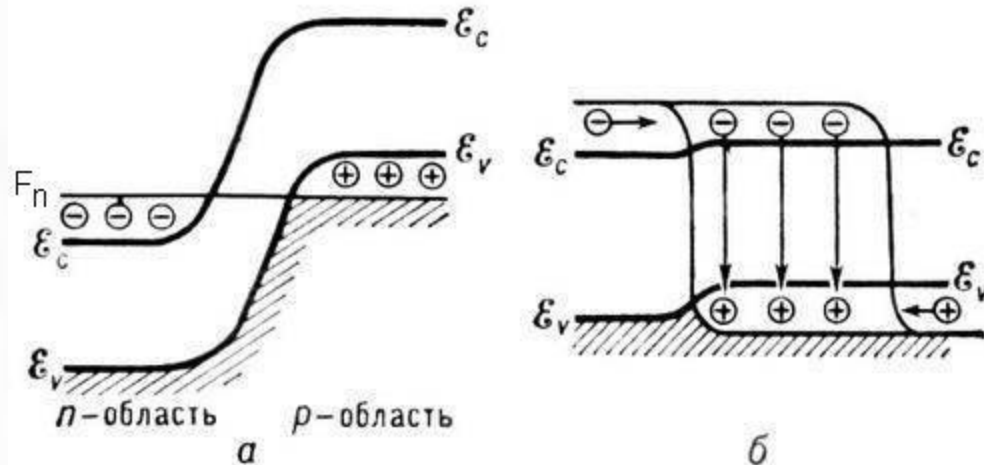
# Полупроводниковые лазеры

Любой переход между этими состояниями сопровождается испусканием или поглощением фотона с частотой  $\nu_{12}$ , определяемой из соотношения  $h\nu_{12}=E_1-E_2$ . 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  $E_2$  поглощает фотон и переходит в возбужденное состояние  $E_1$ . 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 непрямая) 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).

# Зонная диаграмма

Инверсная населенность, необходимая для стимулированного когерентного излучения, формируется путем инжекции через прямосмещенный  $p$ - $n$ -переход. Резонатор, необходимый для усиления когерентного излучения, формируется путем шлифовки граней кристалла. Для того чтобы переходы с излучением преобладали над переходами с поглощением, необходимо область рекомбинации в полупроводниковом лазере легировать до вырождения. В подобных лазерах  $p$ - и  $n$ -области выполнены на одном материале. При такой концентрации уровень Ферми  $F_n$  для  $p$ -области попадает в валентную зону, а уровни Ферми  $F_n$  для  $n$ -области — в зону проводимости.



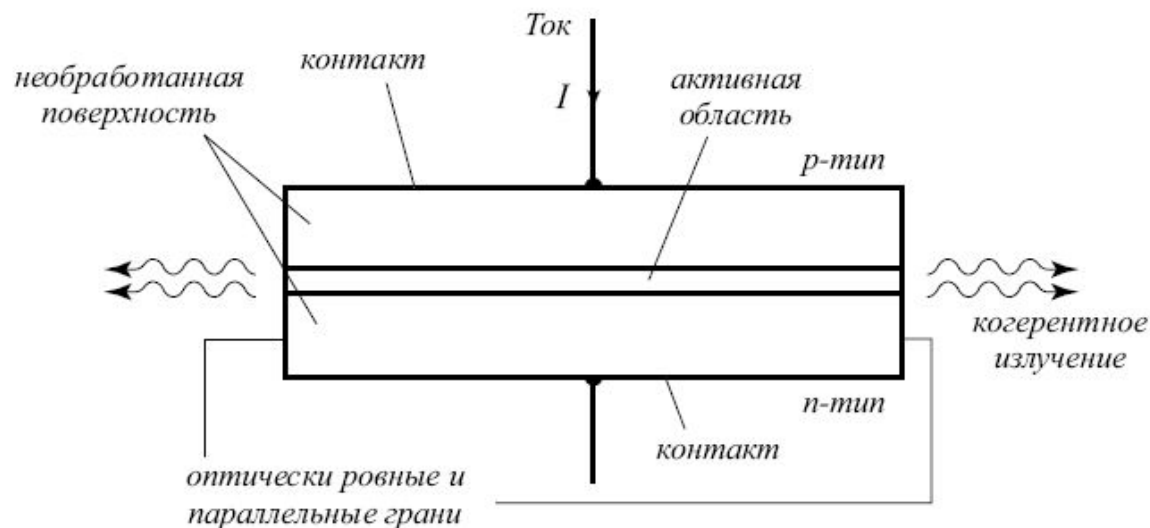
$$\Delta E = eU$$

# Зонная диаграмма

В отсутствие напряжения оба уровня имеют одну и ту же энергию. Когда напряжение будет приложено, то оба уровня расщепляются на величину  $\Delta E = eU$ . Из рисунка видно, что в области *p-n*-перехода, а также на расстоянии порядка диффузионной длины в квазинейтральном объеме возникает инверсная заселенность. В силу того что энергия оптических переходов с излучением меньше, чем энергия переходов с поглощением, вероятность первых переходов выше, чем вторых. Дальнейший процесс рекомбинации вызовет лазерную генерацию.

# Конструкция лазера

Конструктивно активный слой из *p-n*-перехода помещается между двумя металлическими электродами. Типичные размеры активной области не превышают 200–500 мкм, отражающие поверхности создаются путем скалывания выходных граней полупроводникового монокристалла. В таком виде полупроводниковый лазер имеет недостаток, заключающийся в том, что размер лазерного пучка (~5 мкм) значительно превышает активную область в поперечном направлении ( $d = 1$  мкм). В результате чего проникает далеко в *p*- и *n*-области, где испытывает сильное поглощение. По этой причине пороговая плотность тока достигает большой величины (~ $10^5$  А/см для GaAs) и лазер быстро выходит из строя от перегрева. Работоспособен такой лазер только в импульсном режиме, а для непрерывного режима излучения необходимо глубокое охлаждение.

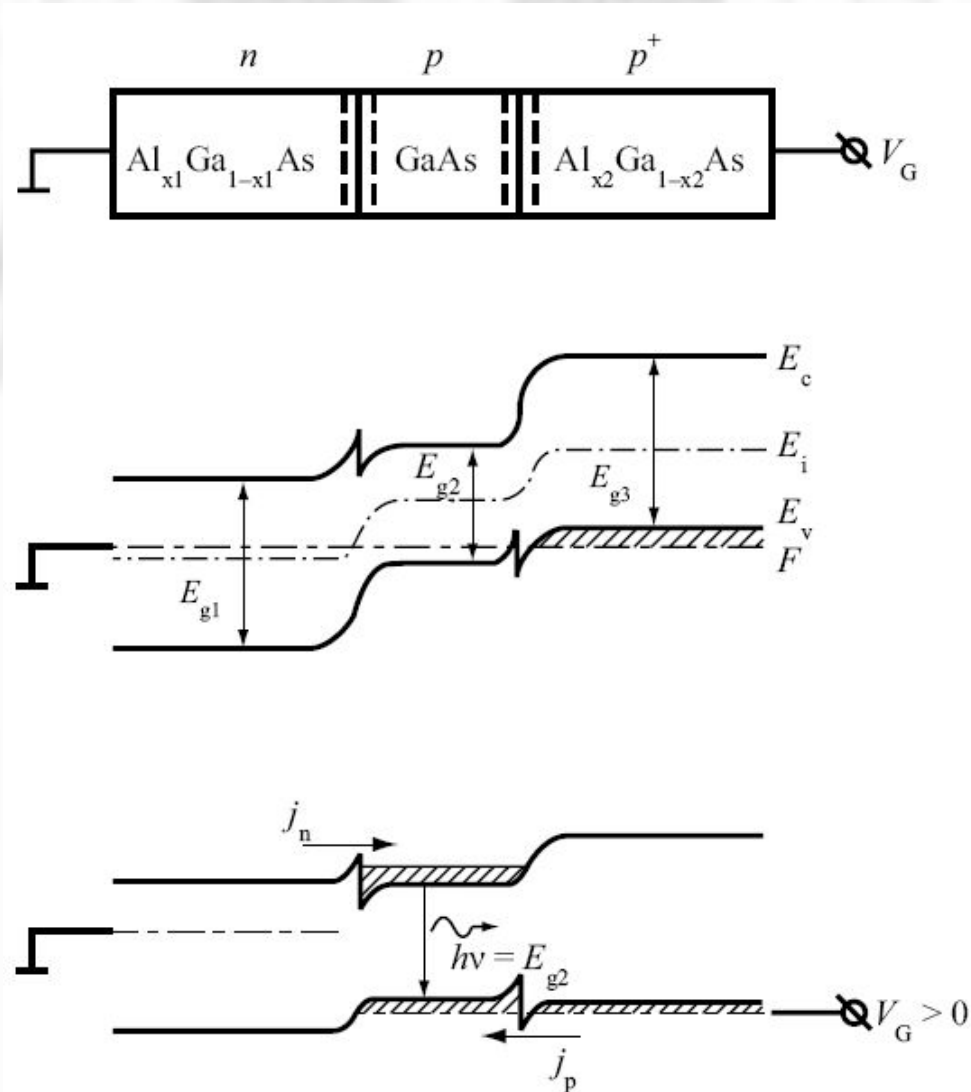


# Лазеры на гетероструктурах

С целью уменьшения пороговой плотности тока были реализованы лазеры на гетероструктурах (с одним гетеропереходом —  $n\text{-GaAs-p-Ge}$ ,  $p\text{-GaAs-n-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$ ; с двумя гетеропереходами —  $n\text{-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As-p-GaAs-p-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$ . Использование гетеро-перехода позволяет реализовать одностороннюю инжекцию при слаболегированном эмиттере лазерного диода и существенно уменьшить пороговый ток.

В структуре с двумя гетеропереходами носители сосредоточены внутри активной области, ограниченной с обеих сторон потенциальными барьерами; излучение также ограничено этой областью вследствие скачкообразного уменьшения показателя преломления за ее пределы. Эти ограничения способствуют усилению стимулированного излучения и соответственно уменьшению пороговой плотности тока. В области гетероперехода возникает волноводный эффект, и излучение лазера происходит в плоскости, параллельной гетеропереходу.

# Лазеры на гетероструктурах



# Лазеры на гетероструктурах

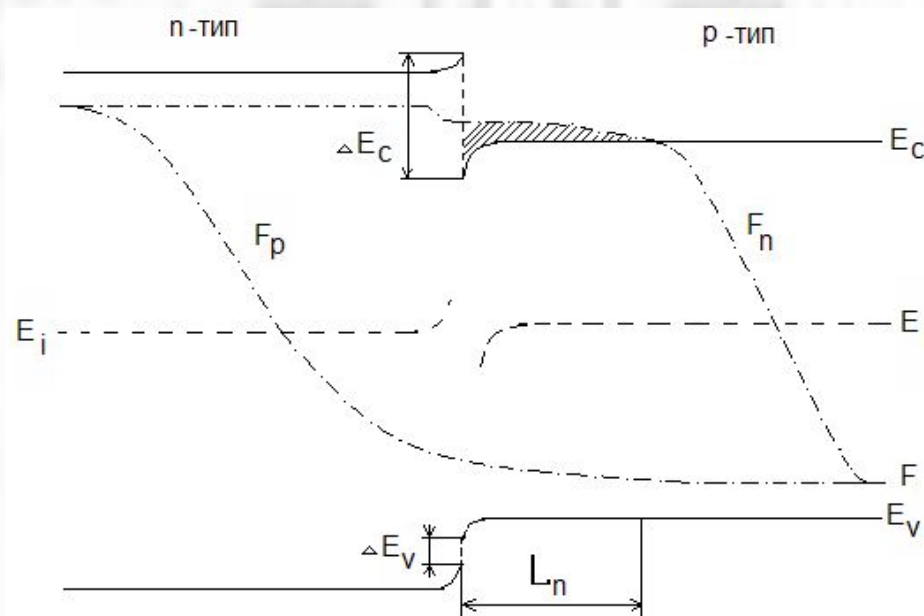
Активная область представляет собой слой  $p$ -GaAs толщиной всего 0,1–0,3 мкм. В такой структуре удалось снизить пороговую плотность тока почти на два порядка по сравнению с устройством на гомопереходе. В результате чего лазер получил возможность работать в непрерывном режиме при комнатной температуре. Уменьшение пороговой плотности тока происходит из-за того, что оптические и энергетические характеристики слоев, участвующих в переходах, таковы, что все инжектированные электроны и оставшиеся дырки эффективно удерживаются только в активной области; лазерный пучок сосредоточен также только в активной области, где и происходит его основное усиление и распространение; лазерный пучок не испытывает по этим причинам поглощения в областях, соседних с активной.

Дальнейшее развитие лазеров на двойной гетероструктуре лежит в области новых полупроводниковых материалов на основе нитрида галлия с использованием квантовых ям в качестве областей рекомбинации.

# Явление сверхинжекции в гетеропереходах

Использование гетеропереходов позволяет реализовать явление сверхинжекции, не наблюдаемое в гомопереходах.

Сверхинжекцией называют процесс инжекции через прямосмещённый гетеропереход, позволяющий получить концентрацию инжектированных неосновных носителей в базе выше, чем основных носителей в эмиттере. Схематично явление сверхинжекции приведено на рисунке:



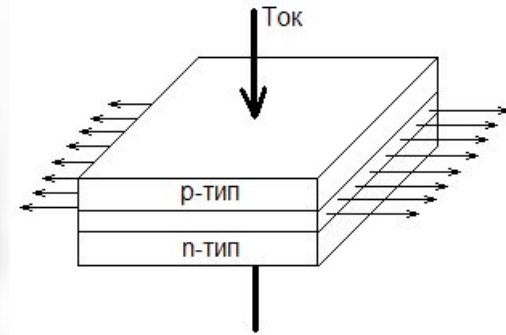
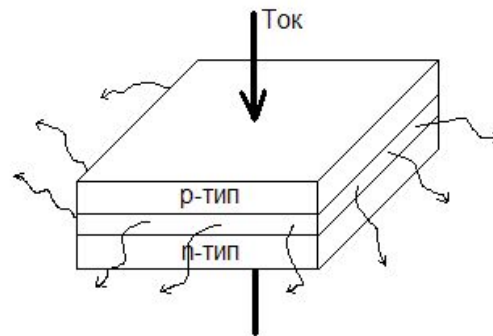
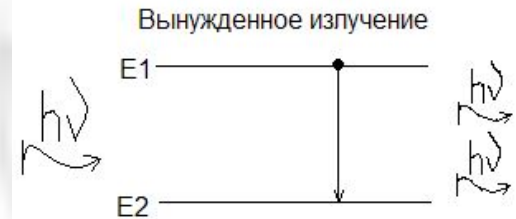
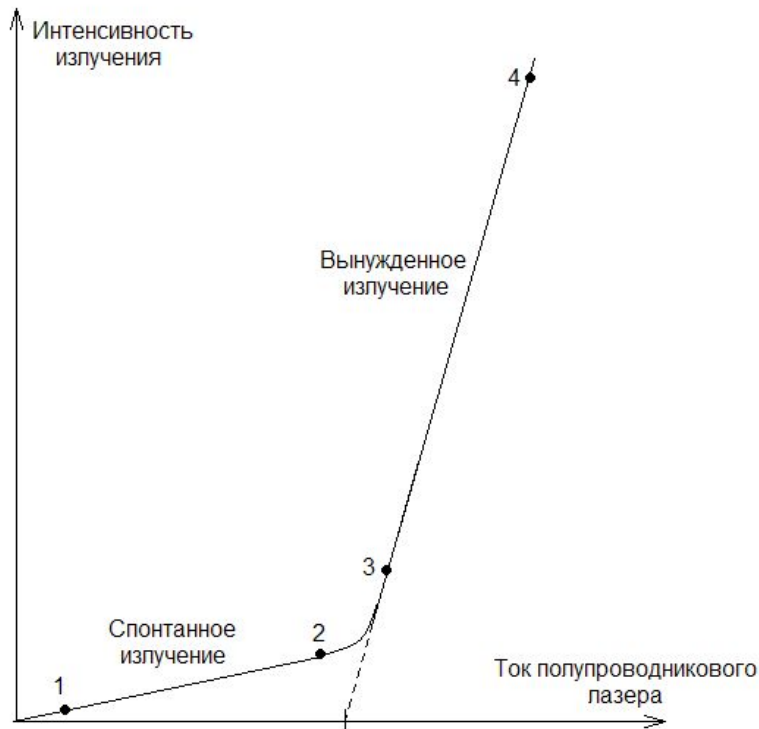


# Явление сверхинжекции в гетеропереходах

Сверхинжекция электронов может наблюдаться при инжекции из материала с меньшим сродством к электрону в материал с большим сродством. Механизм сверхинжекции иллюстрируется зонной картиной p - n-перехода в системе p-GaAs – n-GaAlAs. На рисунке выше изображена зонная схема гетероперехода p-GaAs - n-GaAlAs, изображены линии, отвечающие положению краёв зон и положению квазиуровней Ферми ( $F_n$   $F_p$ ), и разрывы зон. Условию квазиравновесия отвечает постоянство квазиуровней ферми в слое пространственного заряда. Благодаря скачку дна зоны проводимости  $E_c$  электронный квазиуровень ферми  $F_n$  в узкозонном полупроводнике p-типа оканчивается выше дна зоны проводимости  $E_c$ . Поэтому если условия квазиравновесия выполняются, то концентрация электронов в узкозонном полупроводнике оказывается больше, чем в широкозонном эмиттере. Так возникает неравновесный вырожденный электронный газ в полупроводнике p-типа, причём концентрация неравновесных электронов оказывается даже выше, чем в n-полупроводнике.

Такой рост концентрации неравновесных электронов  $n_p$  в p-полупроводнике при протекании инжекционного тока называют сверхинжекцией.

# Зависимость интенсивности излучения от тока



# Зависимость интенсивности излучения от приложенного тока

Как видно из приведённого графика, интенсивность излучения зависит от тока приложенного к структуре. Причём при малых значениях тока наблюдается спонтанное излучение, малой интенсивности (соответствует точкам 1 и 2), а при увеличении тока выше некоторого значения наблюдается вынужденное излучение (соответствует точкам 3 и 4). Точки 1 и 2, а также 3 и 4 отличаются только интенсивностью излучения

# Оптоволоконные лазеры

С 2000 г. широко применяются новые лазерные системы на так называемых оптоволоконных лазерах, в которых под воздействием лазерных диодов происходит накачка оптических волокон. Сердцевина волокон легирована редкоземельными элементами, такими как неодим (Nd), иттрий (Y), иттербий (Yb) и др. Оптоволоконные лазеры дают отличное качество излучения, обладают необходимой мощностью и отличной стабильностью работы.



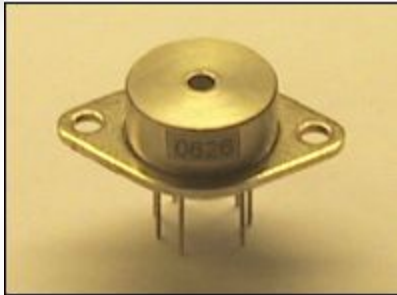
# Оптоволоконные лазеры

Лазер серии HLU-F	HLU25F200	HLU10F400	HLU30F400
<b>Оптические характеристики</b>			
мощность выхода (св)	25 / 15 / 15 W	10 W	30 / 25 / 20 W
длина волны по максимальной мощности	808 / 940 / 980 нм	808 нм	808 / 940 / 980 нм
отклонение	± 10 (± 3) нм	± 10 (± 3) нм	± 10 (± 3) нм
ширина спектра (FWHM)	5 (3) нм	5 (3) нм	5 (3) нм
тепловой дрейф	~ 0,3 нм/К	~ 0,3 нм/К	~ 0,3 нм/К
<b>Параметры волокна</b>			
диаметр волоконного сердечника	200 μm	400 μm	400 μm
числовая апартура	0,22	0,22	0,22
длина волокна	tbd	1,5 м	tbd
оптоволоконный коннектор	SMA905	SMA905	SMA905
<b>Электрические характеристики</b>			
рабочий ток	50 А	30 А	50 А
минимальный ток генерации излучения	8 А	10 А	8 А
КПД	30 %	23 %	36 %
крутизна мощности	0,65 W/A	0,55 W/A	0,83 W/A
рабочее напряжение	< 2 V	< 2 V	< 2 V
обратное напряжение	0 V	0 V	0 V
<b>Тепловые характеристики</b>			
рабочая температура	+15...30 °C	+15...30 °C	+15...30 °C
температура хранения	-20...+60 °C	-20...+60 °C	-20...+60 °C
<b>Прочие характеристики</b>			
срок службы	10000 ч	5000 ч	10000 ч
габариты лазерной головки	75 x 25 x 18 мм	75 x 25 x 18 мм	75 x 25 x 18 мм

# Полупроводниковые лазеры

Название	Длина волны излучения	Мощность
HLDH-635-A1001	635нм	10мВт
HLDH-650-A1001	650нм	10мВт
HLDH-660-A2001	660нм	20мВт
HLDH-660-A5001	658нм	50мВт
HLDH-808-B10001	808нм	1000мВт
ATC-C500-35	808нм	500 мВт
ATC-C2000-100	808нм	2мВт

# Полупроводниковые лазеры



ATC-C500-35



ATC-C2000-100



HLDH-660-A-5001



HLDH-808-B-20001

# Применение лазеров

В волоконно-оптической связи применяются лазеры на основе GaAs. В будущем, наверное, для этих целей больше подойдёт лазер на четверном сплаве InGaAsP с большим сроком службы.

Помимо применения в устройствах волоконно-оптической связи, лазеры широко нашли и используются в качестве головки в компакт-дисковых системах. Лазеры на сплавах GaInP или AlGaInP имеют излучение в видимой области оптического спектра, что позволило считывать более плотно записанную информацию.

