

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания  
по дисциплине  
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ»  
(специальность 013800 радиофизика и электроника)

Часть IV

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ.  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ.  
ПЕРЕДАЮЩИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ

Ростов-на-Дону

2006

Кафедра прикладной электродинамики и компьютерного  
моделирования

Методические указания разработаны кандидатом физико-математических наук, доцентом Нойкиным Ю.М.

Ответственный редактор: доктор физико-математических наук Латуш Е.Л.

Компьютерный набор и вёрстка ассистента Грибниковой Е.И., студента Пашина Ю.А.

Печатается в соответствии с решением кафедры ПЭКМ физического факультета РГУ, протокол №13 от 7 февраля 2006г.

# ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ. ПЕРЕДАЮЩИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ.

## АННОТАЦИЯ

Рассмотрен процесс излучательной рекомбинации и упрощённая гетероструктура. Проанализирован принцип действия светоизлучающих диодов и лазерных диодов, их характеристики и параметры. Дано описание основных элементов передающего оптического модуля и схем построения.

## 1 ИЗЛУЧЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Значительные по своей актуальности перспективы возникли в той области физики полупроводников, которая изучает люминесценцию – излучательную рекомбинацию электронов и дырок. Это явление позволило создать полупроводниковые источники света – светодиоды и инжекционные лазеры.

Первые открытия здесь были сделаны в нашей стране ещё в 1923г. О.В. Лосевым, работавшим в Ленинградском физико-техническом институте и Нижегородской радиотехнической лаборатории. Лосев писал: «У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе всего 0,4мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынерционный источник света».

Однако реализованы на практике эти идеи были лишь в 60-70-е годы, после обнаружения эффективной люминесценции полупроводниковых соединений типа  $A^{III}B^V$ -фосфида и арсенида галлия и их твёрдых растворов. В итоге на их основе были созданы светодиоды и таким образом заложен фундамент новой отрасли техники – оптоэлектроники.

Советские учёные внесли в развитие данной области существенный вклад.

Ж.И. Алфёров (академик, директор физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, лауреат Ленинской премии) получил золотую медаль Американского физического общества за исследования гетероструктур на основе  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ещё в 70-х годах. В 2000 г., когда стало ясно, как велико значение этих работ для развития науки и техники, насколько важны их практические применения для человечества, ему была присуждена Нобелевская премия, которую он разделил с Н.Б. Крамером (США), также работавшим в этой области.

### 1.1 Процесс возникновения излучения в p-n-переходе

Если в образце создан p-n-переход, т.е. граница между областями с дырочной (p-) и электронной (n-) проводимостью, то при положительной полярности внешнего источника тока на контакте к p-области (и отрицательной – на контакте к n-области) потенциальный барьер в p-n-переходе понижается и электроны из n-области инжектируют в p-область.

В отсутствие смещения ( $U=0$ ) уровень Ферми одинаков во всём переходе  $E_{\phi P} = E_{\phi N}$  и барьеры для основных носителей выше, чем при прямом смещении p-n-перехода, когда уровни раздвигаются на величину  $eU = E_{\phi N} - E_{\phi P}$ .

Инжектированные электроны и дырки рекомбинируют, передавая свою энергию либо квантам света  $h\nu$  (излучательная рекомбинация), либо, через дефекты и примеси, – тепловым колебаниям решётки (безызлучательная рекомбинация) (рисунок 1).

Высвобождающаяся при рекомбинации энергия  $E$  обеспечивает рождение фотона. Длина волны, соответствующая этому фотону, определяется соотношением

$$\lambda_{изл} = \frac{ch}{E} = \frac{1,24}{E}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;

$h$  – постоянная Планка.

В этой формуле длина волны выражена в микрометрах, а энергия в электрон-вольтах. Поэтому для обеспечения генерации излучения в требуемом спектральном диапазоне длин волн необходимо подбирать материалы с соответствующей шириной запрещённой зоны  $E_z$ .

Для обеспечения генерации в области первого окна прозрачности

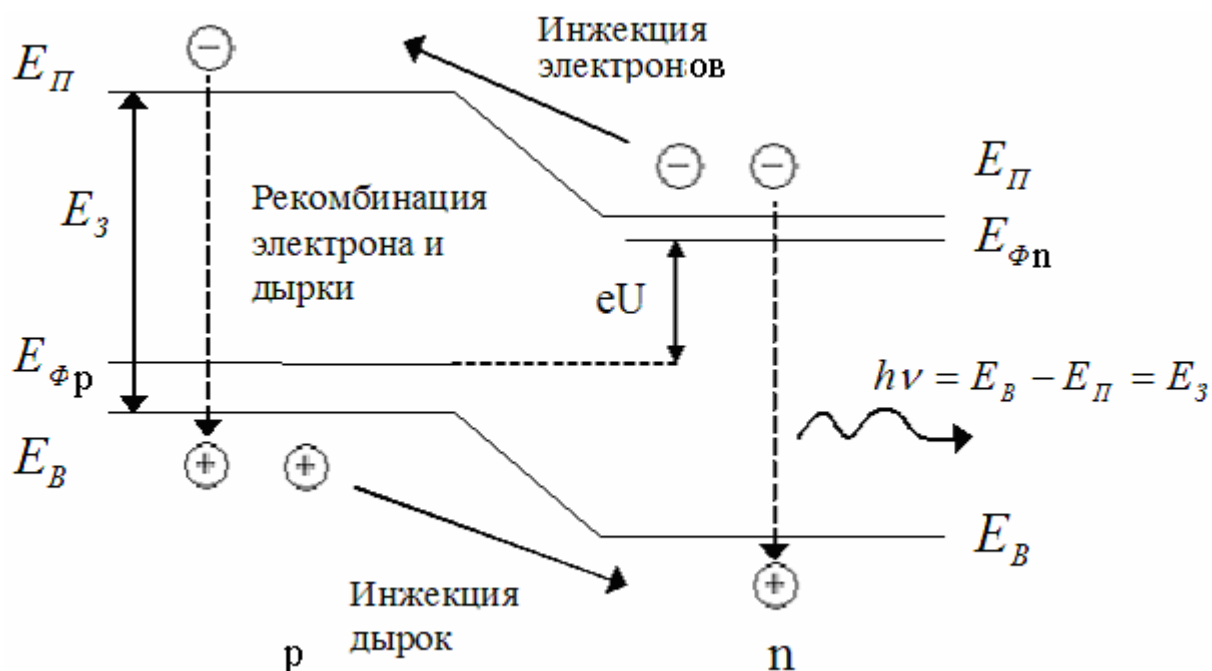


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма обычного (гомогенного) р-п-перехода в полупроводнике при прямом смещении  $U$

волоконного световода ( $\lambda=0,8 - 0,9\text{мкм}$ ) используют соединения на основе арсенида галлия (GaAs), а для следующих окон прозрачности ( $\lambda=1,3\text{мкм}$  и  $\lambda=1,5\text{мкм}$ ) – соединения на основе фосфида индия (InP).

Очевидно, что интенсивность излучения напрямую связана с величинами концентраций носителей в р-п-переходе и увеличивается при их одновременном росте. Это достигается за счёт увеличения тока, протекающего через переход. Таким образом, энергия внешнего источника, обеспечивающего протекание тока,

преобразуется в энергию излучаемых фотонов. Этот ток принято называть током накачки ( $I_H$ ).

Обычно для оптимизации процесса генерации в источниках, реализованных на практике, при изготовлении переходов добиваются, чтобы концентрация основных носителей в одном из полупроводников была бы существенно выше, чем в другом. Типичные значения величин следующие:

$$N_n = 10^{24} (1 / \text{м}^3); P_p = 10^{22} (1 / \text{м}^3).$$

То есть, разница в величинах  $N_n$  и  $P_p$  велика. Поэтому можно считать, что ток накачки в основном обусловлен инжекцией электронов в полупроводнике р-типа.

Вероятность излучательной рекомбинации пропорциональна концентрации электронно-дырочных пар, поэтому наряду с повышением концентраций основных носителей в р- и n-областях желательно уменьшать толщину активной области, в которой идёт рекомбинация. Но в обычных р-п-переходах эта толщина не может быть меньше диффузионной длины – среднего расстояния, на которое диффундируют инжектированные носители заряда, пока не рекомбинируют.

Задача ограничения активной области рекомбинации решена в конце 60-х годов Ж.И. Алфёровым и его сотрудниками. Были предложены и практически изготовлены гетероструктуры, сначала на основе GaAs и его твёрдых растворов типа GaAlAs, а затем и на основе других полупроводниковых соединений. В гетероструктурах толщина активной области рекомбинации может быть много меньше диффузионной длины.

## 1.2 Гетероструктуры

Мы обсудили р-п-переходы, названные гомопереходами. Такие переходы получаются из полупроводников с одинаковой шириной запрещённой зоны. Однако существуют совершенно различные полупроводниковые материалы,

которые, тем не менее, имеют одинаковые или почти одинаковые постоянные кристаллической решётки. Поэтому они могут образовывать один монокристалл. На границе между ними меняется ширина запрещённой зоны, диэлектрическая проницаемость и другие свойства. Такие материалы образуют гетеропереходы.

Таким образом, гетеропереходами называются переходы между полупроводниками из разных материалов с различной шириной запрещённых зон, но имеющих согласованные кристаллические решётки.

Гетеропереходы наиболее перспективны для изготовления светодиодов и полупроводниковых лазеров, что будет пояснено дальше.

Чтобы получить гетеропереходы с достаточно хорошими характеристиками, кристаллическая решётка должна с минимальным количеством нарушений переходить в кристаллическую решётку другого полупроводника, для чего и требуются близкие параметры полупроводников, образующих гетеропереход.

В гетеропереходах каждый из полупроводников может быть р-типа или n-типа. Таким образом, могут быть реализованы четыре комбинации. Если использовать для широкозонного материала обозначения прописной буквой N или P, а для узкозонного – строчной n или p, то возможны следующие переходы с различными свойствами: n – N, p – P, n – P и p – N.

Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры, в которой между внешними p- и n-областями полупроводника с большими величинами ширины запрещённой зоны  $E_{31}$  и  $E_{33}$  расположен тонкий слой с меньшей шириной  $E_{32}$ . Толщину этого слоя  $d$  можно сделать очень малой, порядка сотен или даже десятков атомных слоёв. Помимо потенциального барьера обычного p-n-перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов  $\Delta E_n$  и дырок  $\Delta E_p$ . Если приложить к переходу прямое смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой (рисунок 2).

Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх – к потолку

валентной зоны в слое, где минимальны их энергии.

Широкозонные внешние части гетероперехода можно сильно легировать с обеих сторон, добиваясь больших концентраций в них равновесных носителей. И тогда, даже не легируя активную узкозонную область примесями, удаётся достичь при инжекции значительных концентраций неравновесных электронно-дырочных пар в слое. Отказ от легирования активной области принципиально важен, поскольку атомы примеси, как уже говорилось, могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Попадая в потенциальную яму, инжектированные

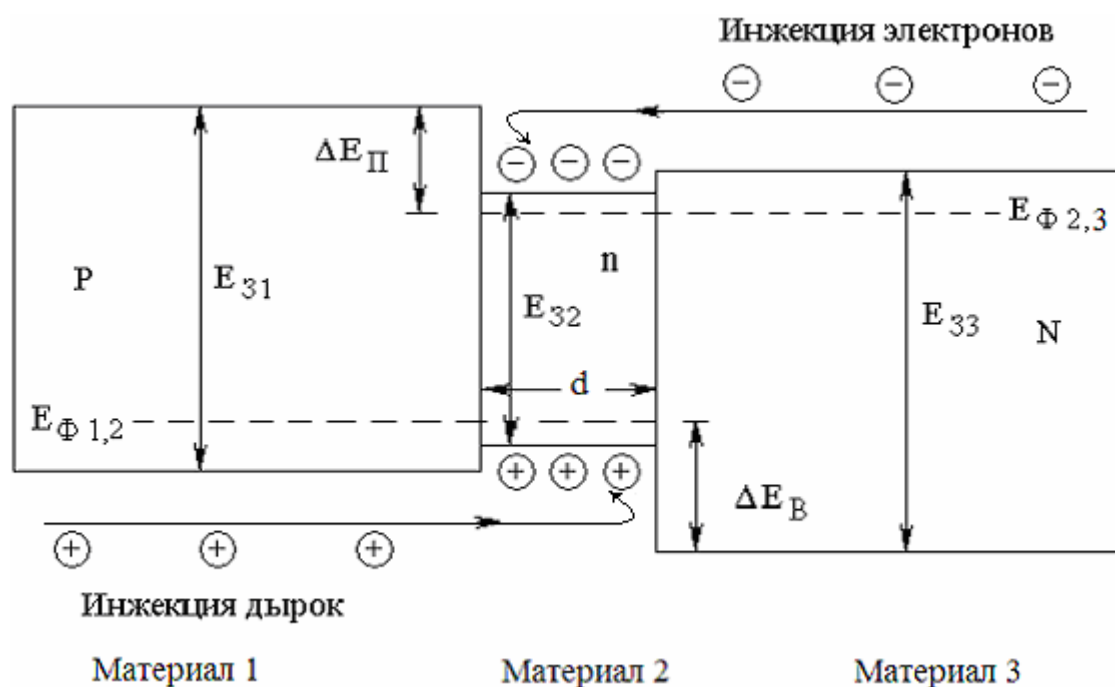


Рисунок 2 – Упрощённая зонная диаграмма уровней энергии электронов гетероструктуры при прямом смещении

электроны наталкиваются на потенциальный барьер  $\Delta E_{\Pi}$ , а дырки — на потенциальный барьер  $\Delta E_B$ . Поэтому и те, и другие перестают диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое, если он содержит малое количество дефектов, с испусканием фотона с энергией  $E_{32}$ .

Гетероструктуры по сравнению с обычными p-n-переходами обладают двумя важными отличительными особенностями:



1) Односторонняя инжекция. Скачки потенциалов на границах представляют собой потенциальные барьеры для неосновных носителей, что приводит к локализации зарядов.

2) Резкое различие оптических свойств различных областей кристалла. Оно проявляется, прежде всего, в том, что длина волны излучения, генерируемого в узкозонной базе, лежит ниже «красной границы» поглощения эмиттерной области. В связи с этим говорят об эмиттере как о широкозонном «окне», через которое излучение выводится из светодиода практически без поглощения.

Типичными и наиболее хорошо разработанными являются гетероструктуры в тройном соединении вида  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , где  $x$  – доля компонента (молярная масса)  $0 \leq x \leq 1$ . Это соединение получается путём замещения в кристалле GaAs части атомов галлия алюминием. По мере увеличения доли  $x$  замещённых атомов ширина запрещённой зоны изменяется от  $E_g \approx 1,42 \text{ эВ}$  (для чистого GaAs) до  $E_g \approx 2,17 \text{ эВ}$  (для чистого AlAs).

### 1.3 Условия максимальной эффективности излучения

Чтобы достичь максимальной эффективности излучения света, необходимо выполнить следующие условия:

1) При оптических переходах электронов из зоны проводимости полупроводника в валентную должен соблюдаться закон сохранения энергии. Поэтому ширина запрещённой зоны  $E_{g2}$  в активной области структуры должна быть близка к нужной энергии квантов излучения.

2) Одновременно должен соблюдаться закон сохранения импульса. Точнее – квазиимпульса, так как электрон (и дырка) в кристалле уже не свободная частица – он движется в поле периодически упорядоченных ионных остовов, представляя собой фактически возбуждённое состояние твёрдого тела. Движение этих возбуждений (электронных и дырочных) очень напоминает свободное

распространение заряженных частиц, поэтому их называют квазичастицами. И энергии  $\mathcal{E}$  отдельных квазичастиц связаны с их квазиимпульсами  $p$  так же, как у свободных частиц:  $\mathcal{E} = p^2 / 2m$ , только вместо массы электрона  $m_0 \sim 10^{-30}$  кг фигурируют эффективные массы  $m_n$  и  $m_p$  электронов и дырок в данном полупроводнике, которые по величине могут значительно отличаться от массы электрона.

3) Импульс  $p_\phi$ , уносимый излучённым фотоном, пренебрежимо мал по сравнению с квазиимпульсами рекомбинирующих квазичастиц. В самом деле, для фотона  $p_\phi = E_\gamma / c$ , для электрона при рекомбинации  $p_\gamma = 2m_n E_\gamma$ ; их отношение  $(p_\phi / p_\gamma) \ll 1$ . Поэтому при излучательной рекомбинации квазиимпульс электронов не меняется, а это возможно только у прямозонных полупроводников (рисунок 3), у которых максимум валентной зоны проводимости располагается в пространстве квазиимпульсов в центре зоны Бриллюэна (области однозначного задания квазиимпульса в кристалле).

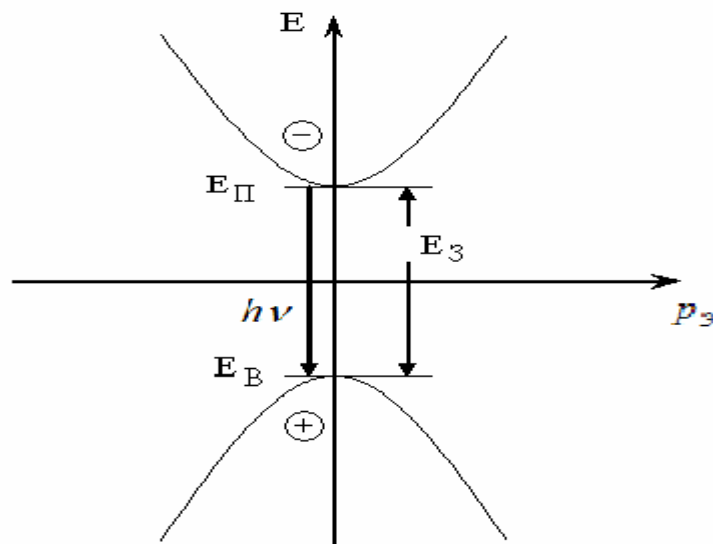


Рисунок 3 – Зависимость энергии электронов от квазиимпульса для прямозонных полупроводников (Стрелкой показан переход электронов из зоны проводимости в валентную, сопровождающийся излучением кванта)

4) Кроме того, кристалл полупроводника должен быть по возможности бездефектным, как и границы между разными слоями, поскольку дефекты на них (например, дислокации) тоже порождают безызлучательную рекомбинацию. Поэтому особого внимания требует подбор пар материалов с точки зрения согласования параметров их элементарных ячеек, так как на границе несогласованных решёток возникает много дислокаций. Работы группы Алфёрова показали, что в гетероструктурах группы  $A^{III}B^V$  могут быть созданы практически идеальные границы.

Насколько успешно удалось решить все эти задачи, можно судить по значениям ряда параметров. О вероятности излучательной рекомбинации в узкозонном слое говорит внутренний квантовый выход излучения  $\eta_i$  (отношение числа излучаемых фотонов к числу электронно-дырочных пар). В гетероструктурах величина  $\eta_i$  может быть близка к единице. Для практики, однако, важнее внешний квантовый выход излучения  $\eta_e$  (отношение числа излучаемых во внешнюю среду квантов света к числу электронно-дырочных пар, пересекающих р-п-переход). Он характеризует преобразование электрической энергии в световую и, помимо внутреннего квантового выхода ( $\eta_i$ ), учитывает коэффициент инжекции пар в активную область ( $\gamma$ ) и коэффициент вывода света во внешнюю среду ( $\eta_0$ ):

$$\eta_e = \gamma \eta_i \eta_0. \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия светоизлучающего прибора ограничивается ещё и потерями на джоулево тепло, поэтому сопротивление всех областей структуры и омических контактов на выводах должно быть малым.

## 2 СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ (СИД)

Светодиод – это полупроводниковый прибор с двумя контактами, преобразующий энергию электрического тока в световую.

У СИД излучение спонтанное, некогерентное и неполяризованное.

Малые размеры полупроводниковых светодиодов отличают их от ламп накаливания – СИД почти точечный источник света с площадью кристалла  $(0,25 \times 0,25) - (0,5 \times 0,5) \text{ мм}^2$ .

Светодиод потребляет очень небольшую энергию: при напряжении 2– 4В и токе 10 – 30мА электрическая мощность варьируется от 20 до 120мВт. При КПД в 5 – 25% в виде света излучается 1 – 30мВт (сила света 1 – 30кд). Для сравнения – миниатюрная лампа накаливания работает при напряжении 12В и токе 50 – 100мА.

### 2.1 Принцип действия СИД

Для СИД применяются в основном прямозонные полупроводники, такие как GaAs, InAs, InP или твердые растворы на их основе типа  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , где  $x$ -доля компонента (молярная масса),  $0 \leq x \leq 1$ . Указанные соединения излучают свет с длиной волны  $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$ . Если выращивать на подложке InP четырехкомпонентное химическое соединение, например  $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ , то в зависимости от отношения долей  $x$  и  $y$  ( $0 \leq x \leq 0,37$   $0 \leq y \leq 0,43$ ) светоизлучение будет изменяться в диапазоне длин волн  $\lambda = 1,3 - 1,55 \text{ мкм}$ , так как в соответствии с соотношением компонентов изменяется энергия запрещённой зоны  $E_g$ .

Физической основой СИД является люминесценция. Механизм инжекционной люминесценции в светодиоде состоит из трёх основных процессов:

– инъекции избыточных неосновных носителей заряда в базу СИД;

- излучательной рекомбинации;
- вывода излучения из области генерации.

Рассмотрим эти процессы подробнее.

*Инжекция.* Использование двойной гетероструктуры в СИД обеспечивает локализацию инжектированных зарядов в базе при уменьшении её толщины вплоть до нескольких микрон и приводит к повышению быстродействия по сравнению с приборами с односторонней гетероструктурой.

*Излучательная рекомбинация.* В простейшем случае электроны зоны проводимости рекомбинируют с дырками, находящимися в валентной зоне. При этом энергия, примерно соответствующая ширине запрещённой зоны, выделяется в виде электромагнитного излучения из полупроводника. Рекомбинация носителей может происходить как в прилегающих к р-п-переходу областях, так и в самом р-п-переходе.

*Вывод излучения.* Конструкция СИД выбирается с таким расчётом, чтобы уменьшить собственное перепоглощение излучения, обеспечить режим работы при высокой плотности тока и увеличить эффективность ввода излучения в волокно. В ВОЛС применяются в основном две конфигурации диодов: с торцевым (рисунок 4,а,б) и боковым (рисунок 5,в) излучением.

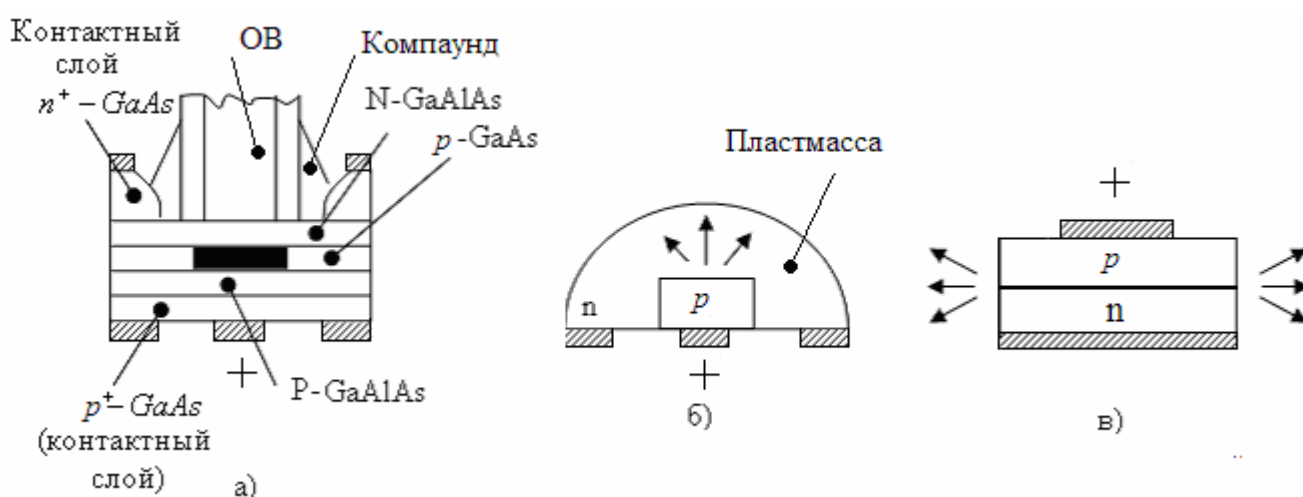


Рисунок 4 –Схема поперечного сечения СИД с торцевым (а, б) и боковым (в) излучением

В первой конфигурации используется двойная гетероструктура. Фотоны, родившиеся в результате рекомбинации носителей в обеднённом слое, покидают его, распространяясь в поперечном направлении. Прежде чем дойти до поверхности излучателя, фотоны испытывают значительное отражение от поверхности раздела полупроводник – внешняя среда. По такой технологии изготавливаются самые простейшие излучатели, которые используются в устройствах, где не требуется большая оптическая мощность.

Повышение эффективности ввода излучения в волокно может быть обеспечено созданием углубления в кристалле для приближения торца волокна к активной области (рисунок 4,а) или с помощью прозрачной полусферы (рисунок 4,б). В последнем случае кристалл покрывается выпуклым или плоским пластмассовым колпачком размерами 3–10мм. Показатель преломления пластмассы выбирается так, чтобы увеличить коэффициент вывода излучения  $\eta_0$ . Конструкция колпачка обеспечивает фокусировку излучения в нужном телесном угле 5 – 45°. Излучаемые световые кванты должны выходить во внешнюю среду в заданном телесном угле с минимальным поглощением их внутри прибора. Держатель кристалла отводит тепло от активной области.

У СИД с боковым излучением (рисунок 4,в) вывод спонтанного излучения происходит через внутренний волновод, обусловленный односторонним гетеропереходом. В этой конфигурации за счёт специальных технологических приёмов обеспечивается распространение рождающихся фотонов из обеднённого слоя к боковой поверхности. Для оптической волны он представляет собой отрезок диэлектрического волновода, поскольку обеднённый слой обладает более высоким значением диэлектрической проницаемости по сравнению с окружающими его материалами. Поэтому на его границах выполняются условия полного внутреннего отражения. Потери на отражение от границы раздела полупроводник – внешняя среда (воздух) и потери при распространении до неё в материале излучателя в этом случае существенно меньше. Боковые размеры

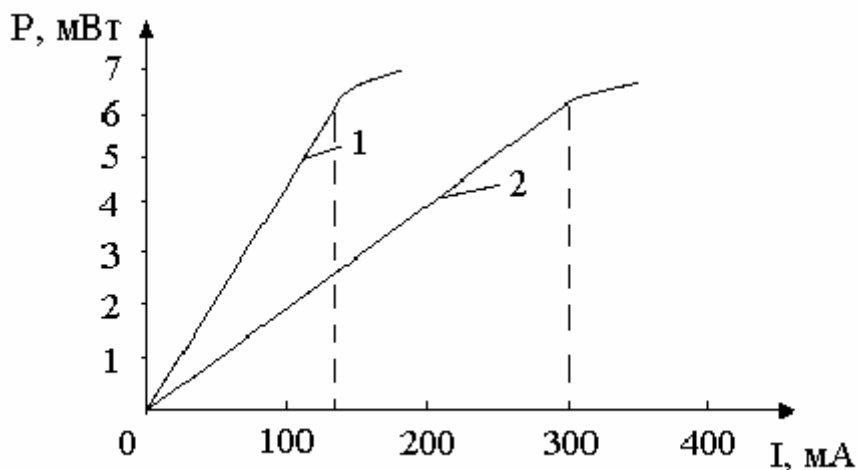
излучающей области подгоняются под размеры волокна, но обычно составляют 20 – 40мкм.

## 2.2 Характеристики СИД

Свойства СИД с точки зрения их применения характеризуются:

- мощностью излучения;
- диаграммой направленности;
- длиной волны излучения;
- спектральной шириной;
- быстродействием;
- сроком службы.

*Мощность излучения.* Мощность излучения СИД зависит от тока. Зависимость мощности, излучаемой оптическим источником, от тока, протекающего через его р-п-переход, называется ватт-амперной характеристикой (рисунок 5).



1 – с боковым излучением; 2 – с торцевым излучением

Рисунок 5 – Ватт-амперные характеристики СИД

Следует отметить, что СИД не очень чувствительны к перегрузкам, обладают хорошей линейной зависимостью между выходной мощностью

излучения и током инжекции, что обуславливает широкое применение СИД в линиях связи с аналоговыми методами модуляции. Типичный ток инжекции 100 – 200мА, выходная мощность 1 – 5мВт.

*Диаграмма направленности.* Диаграмма направленности света является важной характеристикой для волоконно-оптических приложений. После выхода света из источника начинается расширение светового пучка, и только малая его часть в действительности попадает в волокно. Чем уже выходная диаграмма, тем большая часть света может попасть в волокно. Хорошие источники должны иметь малые диаметры выходных пучков света и малую апертуру. Диаметр выходного пучка определяет величину его поперечного сечения. Апертура определяет диапазон углов, в которых происходит излучение света. Если диаметр выходного пучка или его апертура превышают соответствующие характеристики волокна, в которое вводится свет, некоторая часть излучения теряется и не попадает в волокно. На рисунке 6 представлена типичная диаграмма излучения СИД. Углы расходимости составляют 30 – 40% на уровне половинной мощности.

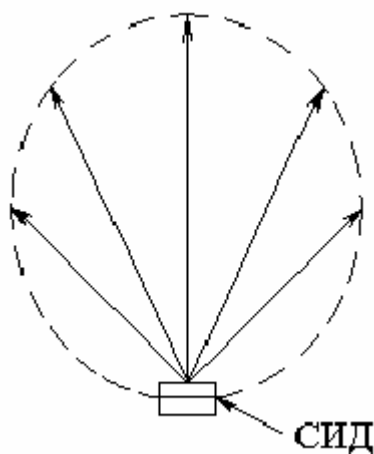


Рисунок 6 – Диаграмма направленности СИД

*Длина волны излучения.* Длиной волны излучения считается длина волны  $\lambda_0$ , на которой выходная мощность максимальна.

*Спектральная ширина.* Диоды не являются идеально монохромными, они



излучают в некотором диапазоне длин волн. Этот диапазон известен как спектральная ширина источника. Он определяется на 50%-м уровне мощности относительно максимума, соответствующего центральной длине волны  $\lambda_0$  (рисунок 7). Например, если источник имеет центральную длину волны  $\lambda_0=850\text{нм}$  и спектральную ширину  $\Delta\lambda=30\text{нм}$ , то его выходное излучение занимает диапазон от  $\lambda_{\text{Н}}=835\text{нм}$  до  $\lambda_{\text{В}}=865\text{нм}$ , а при  $\lambda_0=1300\text{нм}$  имеет спектральную ширину  $\Delta\lambda=90\text{нм}$ .

На длине волны  $\lambda_0=850\text{нм}$  материальная дисперсия примерно равна  $D=0,1$  нс/(км\*нм). Использование СИД со спектральной шириной  $\Delta\lambda=30\text{нм}$  приводит к дисперсии 3 нс/(км\*нм), что достаточно много.

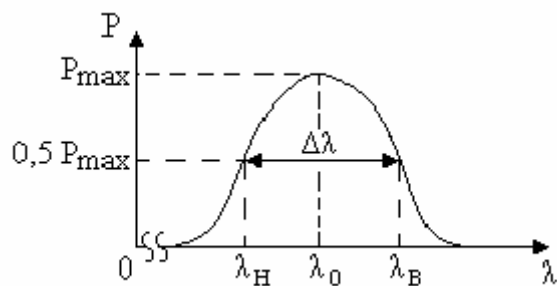


Рисунок 7 – Типичная спектральная характеристика СИД

Как правило, спектральная ширина не сказывается на качестве линии длиной в несколько километров, работающей на частотах до 100МГц. Она является критическим параметром для высокоскоростных протяжённых одномодовых оптических систем. В этом случае спектральная ширина ограничивает скорость передачи информации.

*Быстродействие.* Скорость включения и выключения источника должна быть достаточно высокой, чтобы соответствовать требованиям ширины рабочей полосы пропускания оптической системы. Она определяется временем нарастания  $\tau_{\text{нар}}$  и временем спада  $\tau_{\text{спад}}$  сигнала.

Для оценки  $\tau_{\text{нар}}$  и  $\tau_{\text{спад}}$  сигнала обычно используют уровни 0,1 и 0,9 от

установившегося значения мощности. Часто быстроедействие источников излучения оценивается максимальной частотой модуляции  $f_{\max}$ . Для СИД эта частота может достигать  $f_{\max} = 200\text{МГц}$ . Ограничение частоты модуляции СИД связано со временем жизни неосновных носителей.

Времена нарастания и спада позволяют получить информацию о полосе пропускания  $\Delta F$ . Если предположить, что они равны между собой (а это не всегда так), то полосу пропускания можно определить по приближенной формуле:

$$\Delta F = \frac{0,35}{\tau_{\text{нар}}} [\text{Гц}], \quad (3)$$

из которой следует, что время нарастания в несколько наносекунд приводит к значениям ширины полосы пропускания в десятки и сотни мегагерц. Например, время нарастания  $\tau_{\text{нар}}=5\text{нс}$  позволяет работать в полосе  $\Delta F=70\text{МГц}$ , а время нарастания  $\tau_{\text{нар}}=1\text{нс}$  – в полосе  $\Delta F=350\text{МГц}$ .

*Срок службы.* По мере эксплуатации источника излучения его характеристики постепенно ухудшаются – падает мощность излучения, и, в конце концов, он выходит из строя. Это связано с деградацией полупроводникового слоя. Надёжность полупроводникового излучателя определяется средней наработкой на отказ. Нарботка на отказ СИД составляет 50тыс. часов или более 5 – 8 лет. Гарантируемое время службы источника определяется уровнем 50% (3дБ) уменьшения выходной мощности.

### 3 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ (ЛД)

Полупроводниковый лазерный диод – это излучающий полупроводниковый прибор, как правило, с двойным гетеропереходом, предназначенным для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию вынужденного светового излучения.

У ЛД излучение индуцированное, поляризованное и когерентное.

Полупроводниковый лазер – одно из лучших прикладных достижений физики конца XX века. В этом приборе удалось достичь удобного и эффективного прямого преобразования электрической энергии в энергию когерентного светового излучения.

Впервые использовать полупроводниковые материалы для создания лазеров предложили в 1961 г. советские учёные Н.Г. Басов, Ю.М. Попов и О.Н. Крохин. В 1964г. за фундаментальные исследования, приведшие к созданию полупроводниковых квантовых генераторов, группе советских учёных была присуждена Государственная премия.

Полупроводниковые лазеры, изготовленные на основе двойного гетероперехода, были впервые предложены в СССР Жоресом Ивановичем Алфёровым. Основное различие между СИД и ЛД состоит в том, что излучение в СИД спонтанное и некогерентное, а в ЛД индуцированное и когерентное. Чтобы светодиод стал генерировать когерентное оптическое излучение необходимо произвести инверсию населённостей и поместить его в резонатор, обеспечивающий необходимую положительную оптическую обратную связь. В ЛД зеркалами резонатора служат грани полупроводникового кристалла, сколотые вдоль естественных кристаллических плоскостей и перпендикулярные плоскости р-п-перехода. Из-за разности показателей преломления на границе “кристалл–воздух” получается достаточно высокий коэффициент отражения (примерно 30%). Иногда наносят дополнительно отражающее покрытие на заднюю грань кристалла.

### 3.1 Квантовые переходы в веществе и процессы испускания и поглощения света.

Чтобы понять принцип работы лазера, рассмотрим упрощённую модель, имеющую два энергетических уровня  $E_1$  и  $E_2$ . При переходе между состояниями с энергией  $E_1$  и  $E_2$  ( $E_2 > E_1$ ) излучение имеет частоту

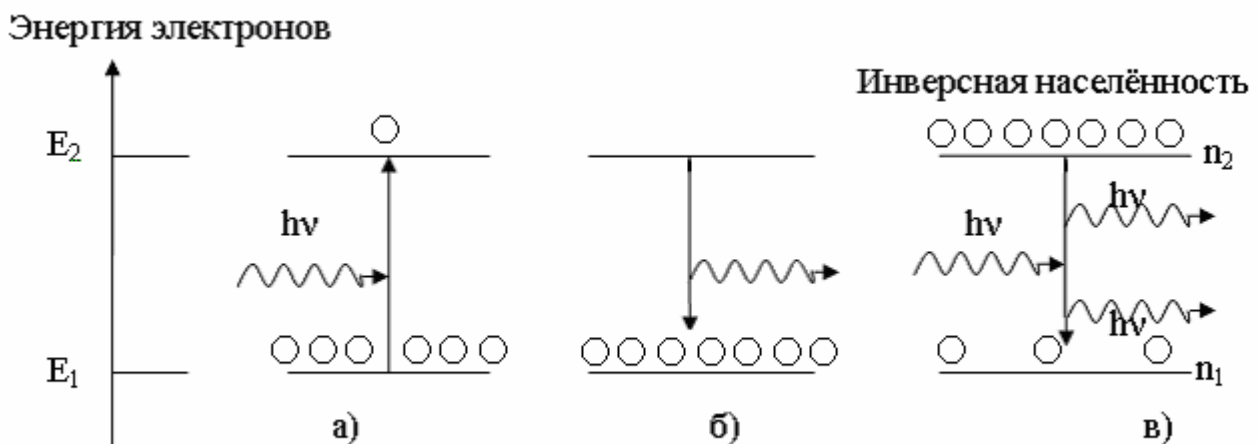
$$\nu_{21}=(E_2 - E_1)/h, \quad (4)$$

т.е. в свободном пространстве длина волны излучения будет

$$\lambda_{21}=hc/(E_2 - E_1), \quad (5)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

При взаимодействии излучения с атомом, находящимся в нижнем энергетическом состоянии, может произойти поглощение кванта излучения и атом перейдет на верхний уровень (рисунок 8, а). Находящийся на уровне  $E_2$  атом может перейти на уровень  $E_1$  не только под действием первичного фотона, но и самопроизвольно или, как обычно говорят, спонтанно (рисунок 8, б). Если атом находится на верхнем энергетическом уровне, то пролетающий фотон с энергией  $E_2 - E_1$  может вызвать (индуцировать) переход  $E_2 \rightarrow E_1$ , т.е. возвращение атома на нижний уровень. Переход  $E_2 \rightarrow E_1$  сопровождается испусканием фотона (рисунок 8, в). Новый фотон, как и исходный фотон, имеет энергию  $E_2 - E_1$ . Более того, он имеет такое же направление импульса и такую же поляризацию. Иными



а – поглощение; б – спонтанное излучение; в – индуцированное излучение для идеализированной атомной системы с двумя разрешёнными энергетическими состояниями  $E_1$  и  $E_2$

Рисунок 8 – Схематическое представление процессов поглощения и излучения

словами, вторичный фотон (фотон, испущенный атомом в процессе перехода

$E_2 \rightarrow E_1$ ) оказывается в том же самом состоянии, в каком находится *первичный* фотон (фотон, вызвавший рассматриваемый переход).

Рассмотренный процесс называют *вынужденным (индуцированным)* испусканием света. Чем больше имеется первичных фотонов, тем выше вероятность того, что атом, находящийся на уровне  $E_2$ , совершит переход на уровень  $E_1$ .

Предположим, что имеется много атомов на уровне  $E_2$ . Пролетая мимо них, первичный фотон может инициировать переход  $E_2 \rightarrow E_1$  во многих атомах, т.е. может инициировать рождение не одного, а целой *лавины* вторичных фотонов. Все эти фотоны будут рождаться в том же самом состоянии, в каком находится первичный фотон.

### 3.2 Инверсия населённостей

Фотон с энергией  $E_2 - E_1$  может с равной вероятностью инициировать как переход  $E_1 \rightarrow E_2$ , так и переход  $E_2 \rightarrow E_1$ . Всё дело в том, на каком энергетическом уровне находится взаимодействующий с фотоном активный центр. Если на нижнем рабочем уровне ( $E_1$ ) находится больше активных центров, чем на верхнем уровне ( $E_2$ ), то будут преобладать процессы поглощения света. Если же, наоборот, на уровне  $E_1$  находится меньше активных центров, чем на уровне  $E_2$ , то будут преобладать процессы вынужденного испускания света.

Нам важно, чтобы наоборот, преобладали процессы вынужденного испускания света. Следовательно, необходимо, чтобы населённость верхнего рабочего уровня оказалась выше населённости нижнего уровня, т.е. чтобы выполнялось условие

$$n_2 > n_1,$$

называемое условием *инверсии* (обращения) населённостей рабочих уровней. Активную среду, для активных центров которой выполняется условие инверсии, называют *инвертированной* активной средой.

### 3.3 Принцип действия ЛД

Для создания оптического генератора необходимо, как и для обычного генератора радиодиапазона, ввести положительную обратную связь и выполнить амплитудные и фазовые условия.

Простое повышение тока накачки ещё не обеспечит генерацию оптической волны. В этом случае для появления индуцированного излучения необходимо в область обеднённого слоя ввести внешний сигнал – поток фотонов с заданной энергией, который индуцирует начало процесса формирования монохроматической волны. Такое устройство при наличии инверсии населённостей будет выполнять функции оптического усилителя.

Поскольку энергия фотона вынужденного излучения равна энергии первоначальных спонтанных фотонов, то их длины волн также равны. Таким образом, спонтанные фотоны рождают подобные себе вынужденные фотоны: они имеют те же длины волн, фазы и направление распространения, что и спонтанные фотоны. Другими словами, падающий фотон приводит к излучению ещё одного такого же фотона. При многократном повторении этого процесса число фотонов растёт лавинообразно, и излучение усиливается.

*Положительная обратная связь.* Упрощённая физическая модель лазера приведена на рисунки 9.

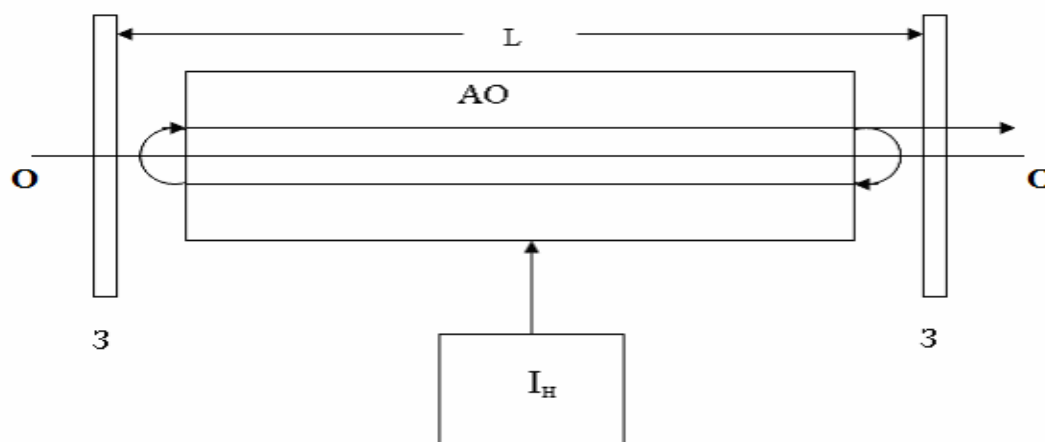


Рисунок 9 – Упрощённая физическая модель лазера

Активная область (АО), т.е. область, в которой реализуется инверсия населённости, заключена между двумя зеркалами 3 (рисунок 9), которые отражают часть потока фотонов и возвращают её в активную область. Этим обеспечивается положительная обратная связь по оптической мощности. Зеркала 3 представляют собой оптический открытый резонатор Фабри-Перо. Одно из зеркал должно быть полупрозрачным

Резонатор имеет характеристические резонансные частоты, генерируемые двухуровневой системой. Устанавливается равновесная плотность оптической мощности на каждой резонансной частоте, соответствующая равенству потерь и усиления на проход. В понятие потерь включена и та часть оптической мощности, которая проходит сквозь полупрозрачное зеркало и образует выходной лазерный пучок. Самовозбуждение не может начаться, пока усиление не превысит потери, которые возникают вследствие поглощения света в среде, находящейся внутри резонатора, или рассеяния части излучения через боковую поверхность.

*Амплитудное условие.* Достаточно сильный ток накачки  $I_H$  создаёт инверсную населенность уровней. Инверсная населенность представляет собой состояние, когда на верхнем уровне населенность электронов больше, чем на нижнем. При наличии инверсной населённости более вероятен процесс стимулированного излучения другого фотона. Для работы лазера требуется, чтобы усиление превысило потери, что достигается при превышении током накачки  $I_H$  некоторого порогового значения  $I_{\Pi}$  ( $I_H > I_{\Pi}$ ).

Источник тока накачки  $I_H$  создаёт необходимую концентрацию носителей в обеднённом слое – почти все нижние уровни зоны проводимости заселены электронами, а почти все верхние уровни валентной зоны свободны. Вероятность излучательной рекомбинации велика, что обеспечивает выполнение условия превышения усиления над потерями.

*Фазовое условие.* Из всего потока рождающихся фотонов с разными энергиями (с разными длинами волн) резонатор Фабри-Перо выбирает только те,

которые удовлетворяют условию резонанса – вдоль длины резонатора должно укладываться целое число полуволен  $\lambda_p$ :

$$L = k (\lambda_p / 2); \quad k = 1, 2, 3 \dots, \quad (6)$$

где  $L$  – длина пути, по которому распространяется излучение;

$k$  – целое число.

Такие фотоны эффективно отражаются зеркалами резонатора, что создаёт положительную обратную связь. Этим обеспечивается выполнение фазового условия генерации. Поэтому излучение возникает на длинах волн, для которых выполнено условие резонанса. В данном случае излучение представляет собой несколько "почти" монохроматических волн, каждой из которых сопоставляется продольная мода резонатора с соответствующим индексом  $k$ .

*Роль резонатора.* Спонтанные фотоны, случайно родившиеся в направлении оси ОО или достаточно близко к нему, будут проходить внутри АО относительно большой путь, который, к тому же, существенно увеличивается из-за многократных отражений излучения от зеркал резонатора. Взаимодействуя с возбуждёнными активными центрами, эти фотоны инициируют, в конечном счёте, мощную лавину вынужденно испущенных фотонов, которая и образует луч. Что же касается тех спонтанных фотонов, которые случайно родились в иных направлениях, то они (и соответствующие лавины вторичных фотонов) пройдут в активном элементе относительно короткий путь и быстро выйдут за пределы АО.

Таким образом, оптический резонатор выполняет принципиально важную роль. Бурно развивающиеся в инвертированной активной среде процессы вынужденного испускания (инициированные спонтанно родившимися фотонами) резонатор как бы упорядочивает, направляет в нужном направлении и в итоге формирует лазерное излучение с высокими когерентными свойствами. Поскольку свет заводится в оптическое волокно через одну из поверхностей ЛД, называемую фронтальной, то его задняя поверхность покрывается отражающим материалом для уменьшения потерь света.



### 3.4 Устройство ЛД

Наиболее распространены на сегодняшний день ЛД с двойной гетероструктурой (ДГС), которая образована переходами типа N-p-P и P-p-N. При их изготовлении требуется тщательная отработка технологического цикла, поскольку в области переходов происходит контакт двух различных материалов, отличающихся строением кристаллической решётки. От качества выращивания такой структуры в целом зависят все эксплуатационные характеристики излучателя.

За счёт применения ДГС появляется возможность:

- увеличения эффективности инжекции;
- увеличения внутренней квантовой эффективности;
- уменьшения потерь излучения на поглощение в материале ЛД.

На рисунке 10 показана упрощённая схема ЛД на основе ДГС типа N-p-P.

Она представляет собой поперечный разрез анализируемого элемента. Как правило, в современных ЛД используется осевое излучение, при котором формируемый поток фотонов распространяется вдоль обеднённого слоя.

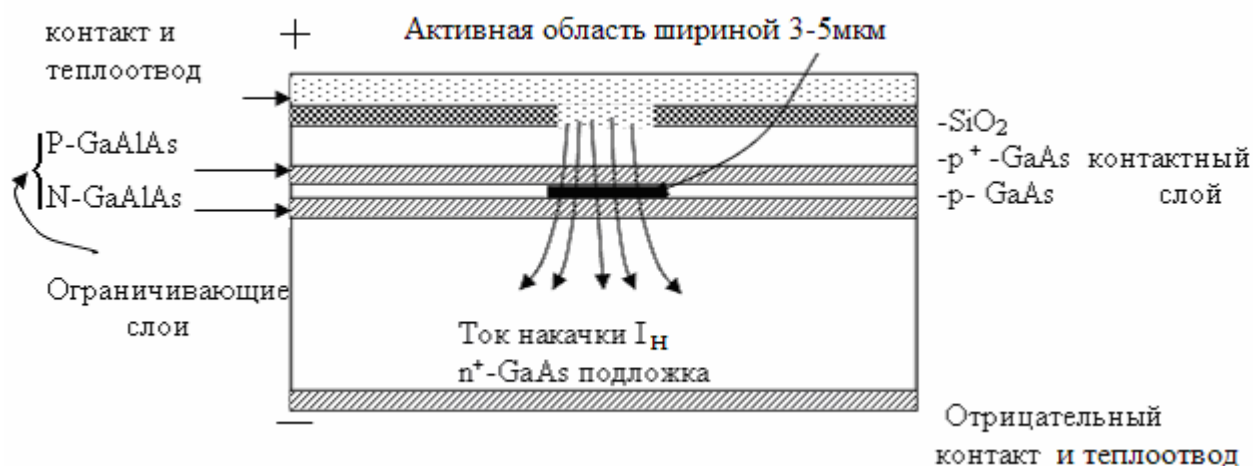


Рисунок 10 – Схема поперечного сечения полоскового лазера типа P-p-N

Активная область представляет собой материал с более высоким значением диэлектрической проницаемости. На её границах формируемая волна может

испытывать полное внутреннее отражение. Тогда активная область может быть представлена в виде отрезка диэлектрического волновода. Торцы области, выполняющие роль полупрозрачных зеркал, "превращают" активную область с волновой точки зрения в диэлектрический резонатор.

Для ВОЛС используются лазеры только полосковой геометрии. В них активная область лазера создаётся в форме полоски, заключённой внутри значительно более широкой пассивной части кристалла. Они обладают рядом важных преимуществ по сравнению с другими вариантами приборов:

- излучение выходит через площадку малой площади, что упрощает согласование лазера со световодом;
- лучше теплоотвод, так как активная область, в которой выделяется тепло, находится внутри более холодного неактивного полупроводника;
- уменьшается рабочий ток лазера.

### 3.5 Характеристики ЛД

К числу основных характеристик полупроводникового лазера, определяющих возможность использования его в системах связи и передачи информации относятся:

- мощность излучения;
- диаграмма направленности излучения;
- длина волны излучения моды;
- спектральная ширина;
- поляризация излучения;
- быстродействие;
- срок службы.

*Мощность излучения.* Зависимость мощности излучения от тока накачки (ватт-амперная характеристика) при различных значениях температуры показана на рисунке 11.

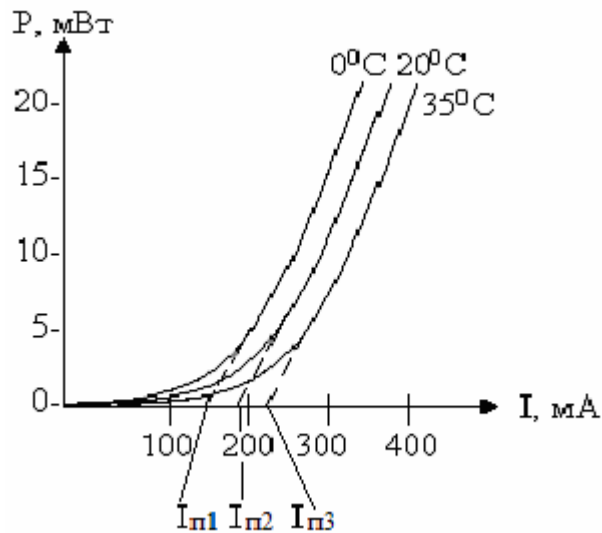


Рисунок 11 – Ватт-амперные характеристики полупроводникового ЛД

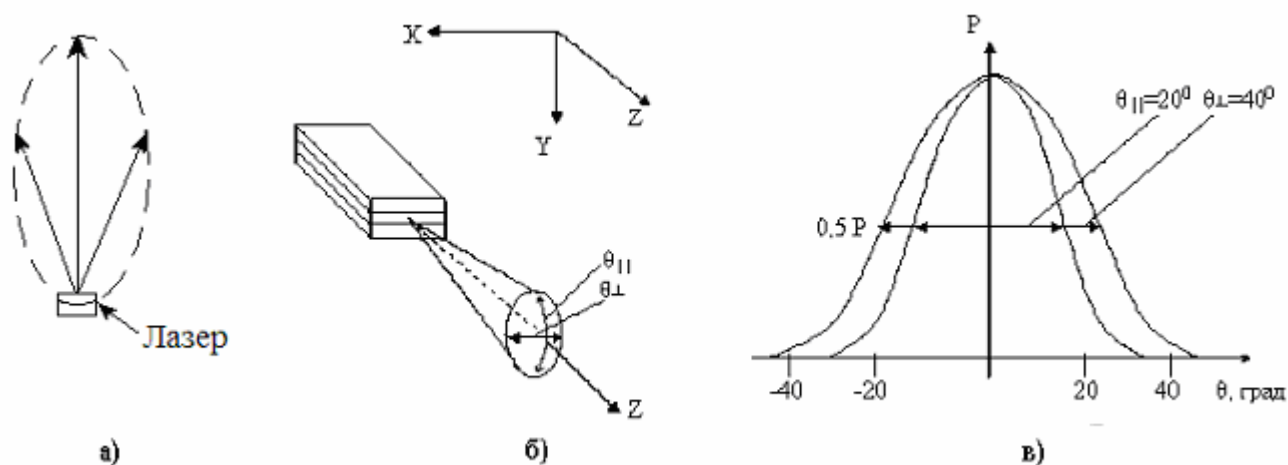
При малых токах накачки ( $I < I_{\text{п}}$ ) лазер работает подобно СИД: происходит спонтанная излучательная рекомбинация и излучение ЛД некогерентно и неполяризовано. При превышении порогового значения тока ( $I > I_{\text{п}}$ ) наступает лазерный эффект, генерируемая оптическая мощность резко возрастает, излучение становится вынужденным. Как видно, ватт-амперная характеристика существенно нелинейна. По этой причине модуляция выходного напряжения путём изменения аналоговым сигналом тока инжекции лазера без применения специальных мер линеаризации ватт-амперной характеристики практически не используется.

Обычно применяют импульсные методы модуляции тока инжекции и, соответственно выходной оптической мощности лазера. Следует особо подчеркнуть, что лазер является источником света с ограниченной пиковой мощностью. Это связано с тенденцией уменьшения мощности при больших токах накачки и с оптическим саморазрушением. Отметим ещё одну существенную особенность, присущую лазерному диоду: при изменении температуры окружающей среды происходит сдвиг ватт-амперных характеристик. Это приводит к изменению величин порогового тока и выходной мощности. Для

устранения этого недостатка используются электрические схемы компенсации, а также схемы термокомпенсации, управляющие работой микрохолодильника.

Для систем оптической связи используются лазеры у которых с одного торца резонатора излучается 5–20мВт при ширине полоскового контакта 10–20мкм. Такое значение мощности является разумным компромиссом между величиной тока накачки, требуемыми мощностью излучения и сроком службы излучателя. Если увеличить ширину полоскового контакта до 100мкм, то излучение с одного торца может достигнуть 100мВт.

*Диаграмма направленности.* Типичная диаграмма направленности оптического излучения ЛД показана на рисунке 12,а. Как видно, диаграмма излучения лазера несимметрична (рисунок 12,б). Её ширина, измеряемая на уровне половинной мощности, менее  $20^\circ$  в плоскости, параллельной переходу, и более  $40^\circ$  в перпендикулярной плоскости. На рисунке 12,в показана зависимость излучаемой мощности от угла во взаимно перпендикулярных направлениях.



а – диаграмма направленности; б – зависимость излучаемой мощности от угла во взаимно перпендикулярных направлениях; в – конус излучения

Рисунок 12 – Диаграмма направленности оптического излучения ЛД

Диаграмма направленности имеет форму эллиптического конуса. Достаточно большая угловая расходимость генерируемого излучения

препятствует эффективному её вводу в волокно с малой числовой апертурой, требуя применения специальных согласующих устройств.

*Длина волны излучения моды.* Длинной волны излучения моды считается длина волны  $\lambda_0$ , на которой выходная мощность максимальна.

*Спектральная ширина.* Реально полоса пропускания резонатора конечна и спектр излучения ЛД составлен из относительно узких линий. На рисунке 13 показана зависимость спектральной мощности  $P(\lambda)$  от длины волны для ЛД.

У многомодовых ЛД ширина каждой отдельной линии  $\Delta\lambda=1-3\text{ нм}$ , интервал между ними составляет  $2-5\text{ нм}$ . У одномодовых ЛД ширина линии  $\Delta\lambda=0,1-0,4\text{ нм}$ .

Главная отличительная черта спектра ЛД – линейчатая структура и значительно более узкий спектр по сравнению с СИД.

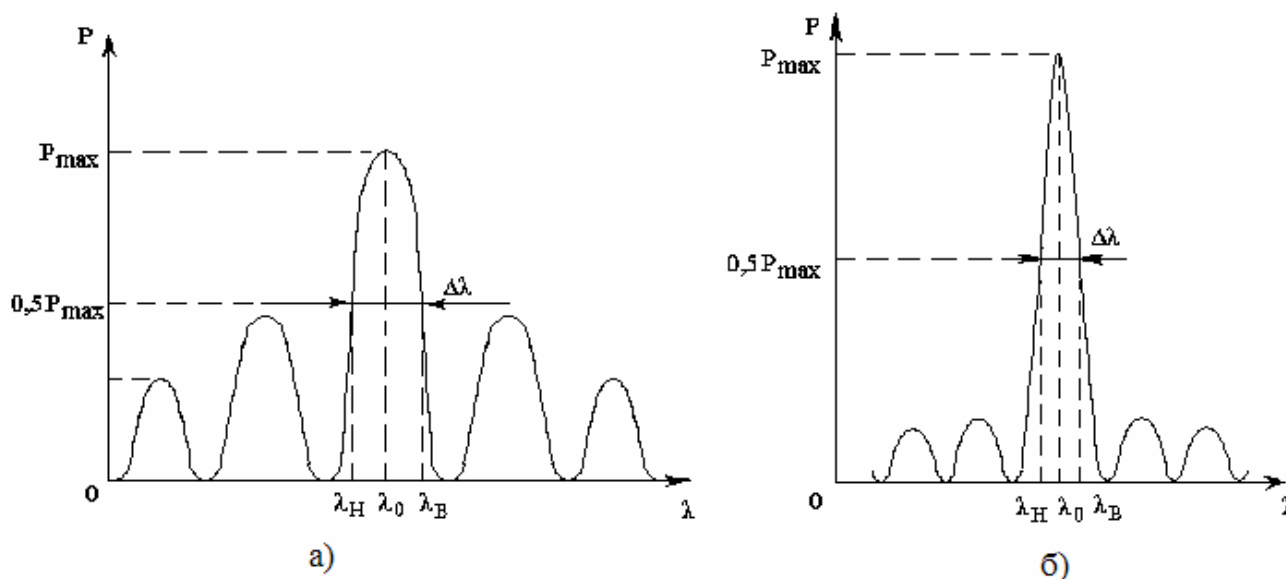


Рисунок 13 – Спектральная характеристика многомодового (а) и одномодового (б) ЛД

*Поляризация излучения.* Лазерный диод обеспечивает генерацию нескольких отдельных «почти» монохроматических волн, которые можно считать частично поляризованными – ориентация векторов электромагнитного поля определена

топологической схемой ЛД, в отличие от СИД, где излучение не обладает поляризацией, т.е. векторы электромагнитного поля ориентированы случайным образом.

*Быстродействие.* Скорость включения и выключения источника должна быть достаточно высокой, чтобы соответствовать требованиям ширины рабочей полосы пропускания оптической системы. Скорость источника, как указывалось выше, определяется временем нарастания и спада сигнала. Лазеры имеют время нарастания  $\tau_{\text{нар}} < 1 \text{ нс}$ , в то время как  $\tau_{\text{нар}}$  у СИД – несколько наносекунд. Максимальная частота модуляции, которой оценивается быстродействие источников излучения, у ЛД достигает нескольких гигагерц, что значительно больше чем у СИД.

*Срок службы.* До недавнего времени лазерные диоды обладали значительно меньшей надёжностью, чем СИД, так как они требовали бóльших токов накачки. В настоящее время удалось значительно повысить надёжность ЛД и приблизить их к СИД по времени наработки на отказ, которое составляет 50 тыс. часов и более (5–8 лет).

## 4 ПЕРЕДАЮЩИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ (ПОМ)

### 4.1 Основные элементы ПОМ

Для организации передачи оптических сигналов не достаточно иметь только источник излучения. В любой конструкции ПОМ есть специальный держатель, который позволяет закрепить и защитить основные элементы передатчика:

- источник излучения (ЛД или СИД);
- узел электрического интерфейса;
- место сопряжения с волокном.

Иногда требуются дополнительные внутренние элементы для оптимального

присоединения волокна. Важным элементом лазерных диодов является цепь тока накачки, и система контроля температуры. Для сложных оптических систем добавляют мониторинг выходного оптического сигнала. Общая схема конструкции оптического передатчика, в которой не все элементы являются обязательными, показана на рисунке 14.

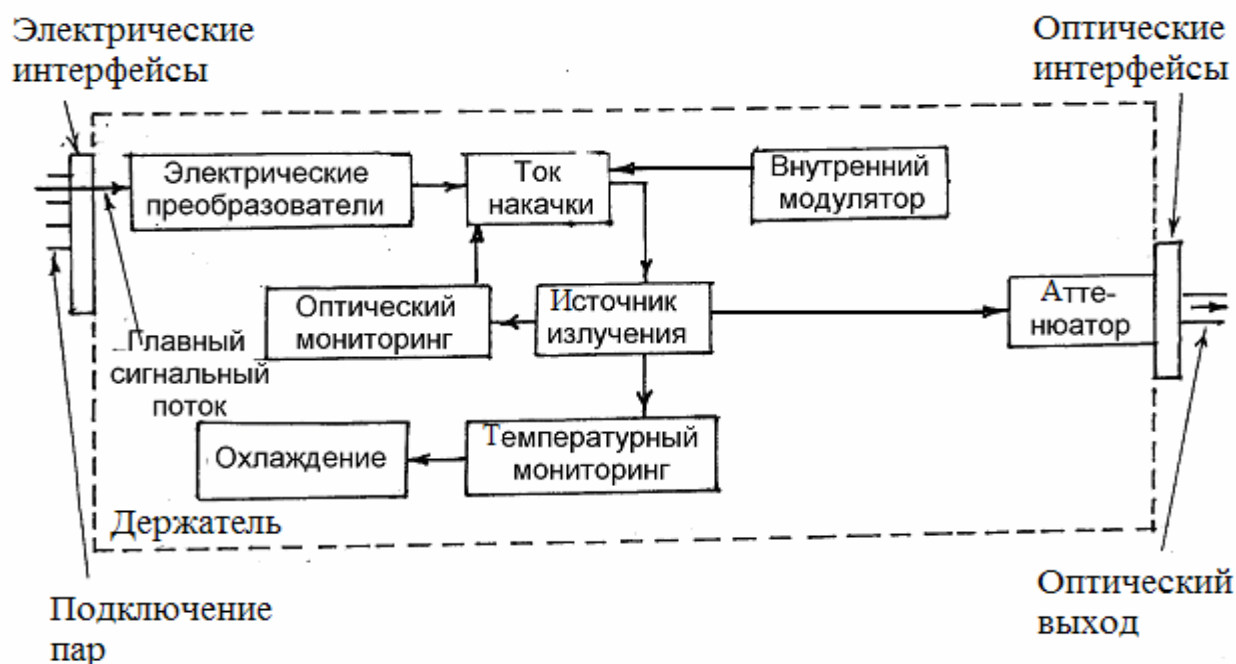


Рисунок 14 – Структурная схема ПОМ

Как видно из схемы ПОМ состоит из оптической части и электронной схемы, основным назначением которой является модуляция излучаемого света. В оптической головке с СИД размещается диод и модулятор тока накачки, а в оптической головке с ЛД должны находиться лазер, модулятор, фотодиод обратной связи и электронная схема, с помощью которой стабилизируется режим работы лазера. Необходимый для стабилизации сигнал поступает на вход схемы от фотодиода, регистрирующего интенсивность излучения лазера.

#### 4.2 Схема простейшего ПОМ

Принципиальная схема простейшего ПОМ с ЛД или СИД приведена на рисунке 15.

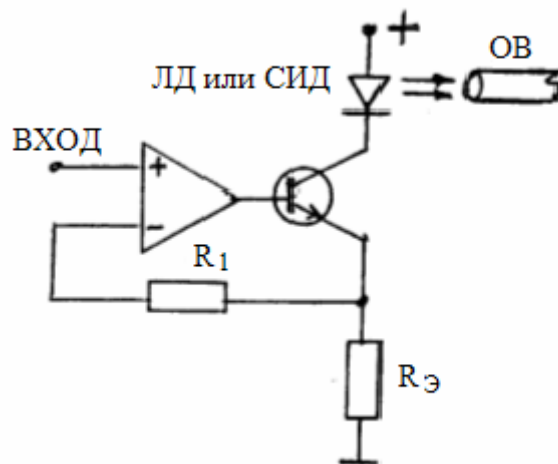


Рисунок 15 – Принципиальная схема простейшего ПОМ

Диод установлен на теплопроводящем радиаторе, излучение выводится из оптической головки наружу через отрезок оптического волокна, к которому в свою очередь, присоединяется внешнее оптическое волокно. Модулятор смонтирован в общем корпусе с оптической головкой и представляет собой микроэлектронную схему – преобразователь «напряжение – код» управляющую током в цепи питания СИД или ЛД.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Стерлинг Д.Д. Техническое руководство по волоконной оптике. – М.: ЛОРИ, 2001. – 288с.
2. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504с.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. - М.: Эко-Трендз, 1998. - 267с.
4. Гребнев А. К. и др. Оптоэлектронные элементы и устройства / А. К. Гребнев, В.Н. Гридин, В.П. Дмитриев. Под ред. Ю.В. Гуляева. - М.: Радио и связь, 1998. - 336с.
5. Иванов А. Г. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи, измерения. - М.: Компания Сайрус системс, 1999. - 327с.
6. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы/ Сборник статей под редакцией Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. - М.: Изд.- во «Connect», 2000. -376с.
7. Электронные приборы: учебник для ВУЗов/ В.Н. Дулин, Н.А. Аваев, В.П. Дёмин и др.; Под ред. Г.Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 496с.
8. Юнович А.Э. Свет из гетеропереходов // Природа.2001.№6.–С.3 – 16.
9. Тарасов Л.В. Лазеры: действительность и надежды. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 176с.