

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДИОДА

Практикум



Пермь 2017

УДК 621.37

Составители: канд. физ.-мат. наук, доц. **И. Л. Вольхин**,
канд. физ.-мат. наук, доц. **А. С. Ажеганов**

Исследование суперлюминесцентного диода: практикум / сост. И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – 35 с.: ил.

Рассмотрены принципы работы полупроводниковых инжекционных лазеров и суперлюминесцентных диодов. Даны описания макетов, методика выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Радиофизика» и «Нанотехнологии и микросистемная техника», специальностям «Информационная безопасность автоматизированных систем», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также смежных специальностей.

*Печатается по постановлению методической комиссии
физического факультета Пермского государственного
национального исследовательского университета*

Издается в рамках программы кооперации Высшей школы и организаций, реализующих комплексные проекты в сфере высоких технологий, комплексный проект «Разработка базовой технологии и создание производства фотонных интегральных схем для приборов, систем и комплексов оптоэлектронного навигационного приборостроения», договор №02.G25.31.0113

© Вольхин И. Л., Ажеганов А. С.
составление, 2017

© ПГНИУ, 2017

© ПАО ПНППК, 2017

1. Введение

Создание в Пермском крае на базе ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» кластера «Фотоника» предполагает организацию подготовки высококвалифицированных специалистов с углубленным изучением физических принципов работы передающих оптоэлектронных модулей, изготовленных на основе полупроводниковых инжекционных лазеров и суперлюминесцентных диодов.

В работе изложены физические принципы рекомбинационного суперлюминесцентного излучения полупроводников. Приведены основные характеристики когерентного лазерного излучения. Описаны конструкции современных светодиодов, полупроводниковых инжекционных лазеров и суперлюминесцентных диодов.

В начале 70-х годов XX века в НИИ «Полюс» и в НИИ Прикладной физики были проведены исследования полупроводниковой лазерной структуры с узким активным каналом и наклонными торцевыми гранями кристалла в режиме усиления собственного спонтанного излучения. Прибор с такой структурой был назван суперлюминесцентным диодом (СЛД). Спектральные характеристики СЛД оказались похожими на характеристики полупроводникового светодиода (СД), а мощность излучения на порядки выше и приближалась к мощности лазерного диода (ЛД).

Высокая выходная мощность при широкой полосе длин волн и соответственно малой длине когерентности излучения определили области практического применения СЛД.

СЛД используются в датчиках деформаций и напряжений, в датчиках газоанализаторов (угарный газ, метан и др.), в качестве источников излучения и широкополосных оптических усилителей в оптоволоконных линиях связи большой протяженности, в качестве источников света в оптической когерентной томографии для получения изображений биологических тканей с микронным разрешением.

В настоящем практикуме интерес представляет использование СЛД при создании волоконно-оптических гироскопов. Ма-

лое время и малая длина когерентности излучения позволяют устранить паразитные интерференционные явления от различных неоднородностей в их оптической системе.

Суперлюминесцентные диоды используются также для тестирования оптических элементов, так как позволяют определять характеристики в относительно широкой полосе частот, например хроматическую дисперсию оптического волокна. Приведем кратко основные преимущества суперлюминесцентных диодов:

- широкий спектр излучения;
- высокая выходная мощность;
- возможность создания излучателей в широком оптическом диапазоне (от 660 до 1700 нм);
- простота ввода излучения в одномодовый световод;
- малые габариты светоизлучающего модуля с волоконным выходом, как следствие – простота интеграции в оптоэлектронные схемы и установки;
- большой ресурс работы (до десятков тысяч часов);
- сравнительно невысокая стоимость.

Авторы выражают благодарность студентам 2 курса магистратуры физического факультета направления «Физика» А.П.Гуляеву, П.В. Карнаушкину, А.А. Ощепковой, А.Р. Хасаншиной, И.Д. Шитоеву за помощь в создании стенда лабораторной работы «Исследование суперлюминесцентного диода» и подготовке первого варианта методического описания на базе лабораторного корпуса ПГНИУ кластера «Фотоника» ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания.

2. Типы лазеров

Лазер – это устройство, преобразующее энергию накачки (тепловую, световую, электрическую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

Слово лазер (laser) является аббревиатурой от полного английского названия “light amplification by stimulated emission of radiation”, что в переводе на русский означает “усиление света посредством вынужденного излучения”. Термином “свет” обозначают электромагнитное излучение в ультрафиолетовой (0,01÷0,4 мкм), видимой (0,4÷0,8 мкм) и инфракрасной (0,8÷340 мкм) областях спектра. В отечественной литературе наряду с термином “лазер” используется название “*оптический квантовый генератор*” (ОКГ).

Всем ОКГ присущи общие черты:

- 1) в основе работы ОКГ лежит явление индуцированного (вынужденного) излучения;
- 2) излучающая среда находится в особом неравновесном состоянии – инверсном состоянии, когда число частиц на верхнем энергетическом уровне больше, чем на нижнем;
- 3) в ОКГ имеется внутренняя положительная обратная связь в оптическом резонаторе.

2.1. Лазеры с оптической накачкой

Необходимыми элементами любого лазера являются:

– *Активная среда* – рабочее вещество, в котором имеется неравновесная инверсная заселенность энергетических уровней.

– *Система накачки* – преобразует энергию внешнего воздействия (светового, электрического, химического и т.д.) во внутреннюю энергию *активной среды*, создавая инверсию заселенности ее энергетических уровней.

– *Оптический резонатор* – элемент, в котором происходит интенсивное взаимодействие излучения с веществом активной среды, в результате которого энергия возбужденных частиц (молекул, атомов, ионов) преобразуется в энергию когерентного светового излучения.

6

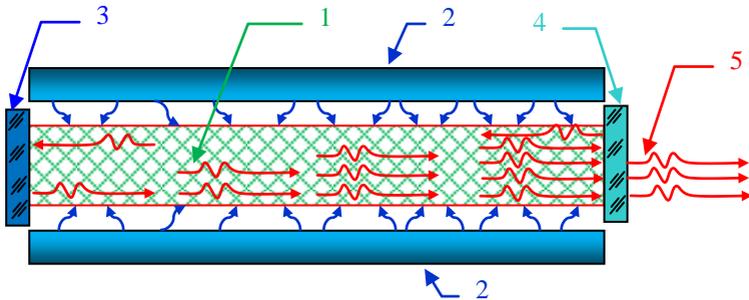


Рис. 1. Схема лазера: 1 – активная среда; 2 – система накачки; 3 – отражающее зеркало; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – когерентное излучение

– Устройство, обеспечивающее вывод энергии в виде узконаправленного светового луча.

– Дополнительные элементы: приборы управления лучом, модуляторы и т.д.

Схема лазера с оптической накачкой приведена на рис. 1. В активную среду 1 от системы накачки 2 поступает энергия внешнего источника. Оптический резонатор состоит из отражающего зеркала 3 и полупрозрачного зеркала 4, которое обеспечивает вывод когерентного светового излучения 5.

Активная среда лазера может быть различна по агрегатному состоянию. По этому признаку различают твердотельные, жидкостные и газовые лазеры. Соответственно различается и устройство *активных элементов* лазеров, относящихся к разным группам. Активный элемент твердотельного лазера представляет собой стержень с кристаллической или аморфной структурой. В жидкостных лазерах – это кювета с жидкостью. В газовых лазерах он имеет вид трубки, заполненной газом или их смесью.

2.2. Инжекционные полупроводниковые лазеры

Схема инжекционного полупроводникового лазера представлена на рис. 2. Активной средой 1 является тонкий слой собственного полупроводника (i – типа). Роль системы накачки 2 выполняют слои полупроводников n - и p -типов инжектирующие в i -слой электроны и дырки. Зеркалами 3 и 4 служат грани полупроводникового кристалла. Энергия, выделяющаяся

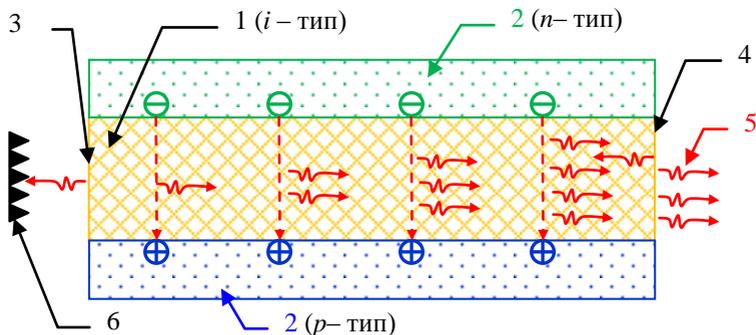


Рис. 2. Схема инжекционного полупроводникового лазера:
 1 – активная среда; 2 – система накачки; 3 и 4 – грани кристалла;
 5 – когерентное излучение; 6 – поглотитель

при рекомбинации электронов и дырок, преобразуется в энергию светового излучения 5, которое выводится через одну из граней 4. Излучение, вышедшее через противоположную грань 3, как правило, поглощается специальным поглотителем 6, например зачерненной поверхностью корпуса.

3. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Люминесценция – нетепловое свечение вещества, атомы которого приведены в возбужденное состояние. В светодиодах люминесценция происходит в результате спонтанных излучательных переходов электронов с уровней энергии дна зоны проводимости на уровни энергии верха валентной зоны. Возникшее излучение является некогерентным и ненаправленным.

Суперлюминесценция – люминесценция веществ с инверсной заселённостью энергетических уровней, вызванная усилением спонтанного излучения за счёт вынужденного испускания. Это явление наблюдается в суперлюминесцентных диодах и инжекционных лазерах. Излучение лазеров является когерентным и направленным. В суперлюминесцентных диодах, в отличие от лазеров, нет оптического резонатора, поэтому спектр излучения у них более широкий, чем у лазера, но более узкий по сравнению со светодиодным.

3.1. Взаимодействие излучения с атомами активной среды инжекционного лазера

Активной средой в инжекционном лазере является тонкий слой собственного полупроводника i -типа. На рис. 3 изображены энергетические уровни дна зоны проводимости W_c и верха валентной зоны W_v .

Электрон может самопроизвольно (спонтанно) перейти с уровня зоны проводимости в более низкое энергетическое состояние на уровень валентной зоны (рекомбинировать с дыркой, рис. 3,а), испустив при этом квант света (фотон):

$$h\nu \geq W_c - W_v.$$

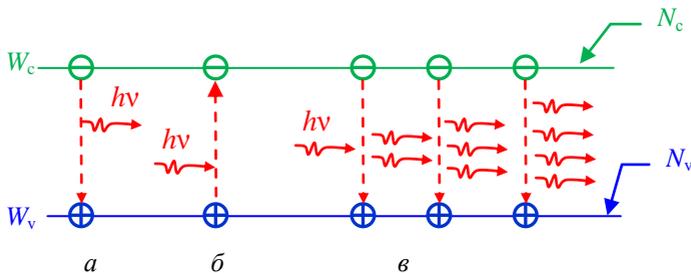


Рис. 3. Процессы в активной среде инжекционного лазера: а – спонтанное излучение; б – поглощение; в – стимулированное излучение

Спонтанные переходы случайны и не зависят от внешнего электромагнитного поля. Излученные фотоны имеют случайную частоту (в пределах полосы спектра испускания), фазу, поляризацию и направление распространения. Спонтанное излучение некогерентное. Такое излучение создают все естественные источники света: солнце, лампы накаливания и т.д.

Другим оптическим процессом является поглощение кванта света с переходом электрона с уровня W_v на уровень W_c (рис. 3,б).

В основе работы лазеров лежит явление индуцированного излучения. Фотон с частотой $\nu \geq (W_c - W_v)/h$ может инициировать процесс рекомбинации электрона и дырки. Испускаемый фотон полностью идентичен инициирующему фотону (они

имеют одинаковые частоту, фазу, поляризацию и направление распространения).

При распространении световой волны вдоль активной среды интенсивность индуцированного излучения экспоненциально возрастает: $I = I_0 \exp(\alpha x)$. Коэффициент α называют коэффициентом усиления активной среды. В реальной активной среде происходит также обратный процесс – уменьшение интенсивности излучения за счет поглощения, а также при рассеянии на неоднородностях, примесях, которые переводят энергию излучения в тепло. Эти потери учитываются коэффициентом β . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде

$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x]. \quad (1)$$

если $\alpha > \beta$, то происходит усиление интенсивности световой волны I_0 при прохождении через активную среду. На рис. 4 показано экспоненциальное возрастание амплитуды падающей световой (затравочной) волны при прохождении через активную среду

$$E = E_0 \exp(\alpha' x),$$

где $\alpha' = \frac{\alpha - \beta}{2}$. Двойка в знаменателе возникла потому, что интенсивность световой волны пропорциональна квадрату ее амплитуды $I \sim E^2$.

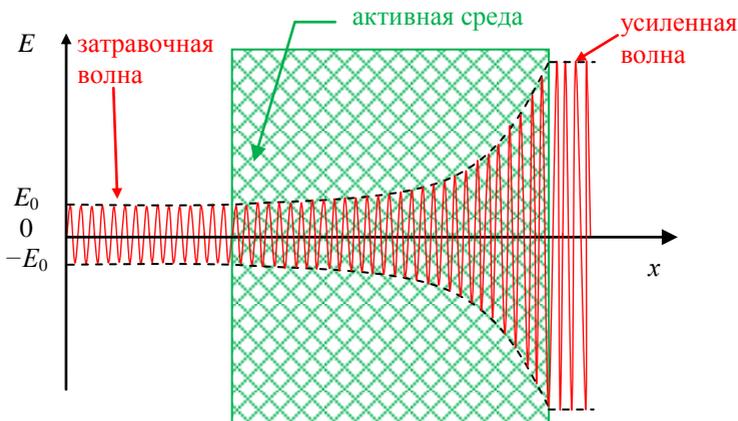


Рис. 4. Усиление амплитуды световой волны в активной среде

3.2. Прямые и не прямые межзонные переходы

В кристалле полупроводника электроны движутся в поле периодического электрического потенциала кристаллической решетки. Допустим, в некотором направлении x атомы, а следовательно и периодический потенциал, повторяются с частотой, соответствующей периоду решетки a . Электрон, движущийся в направлении x , может иметь различные значения волнового вектора k_x и импульса $p_x = \hbar k_x$, за исключением

$$\begin{aligned} k_x &= \pm(\pi/a)n, \\ p_x &= \pm(\hbar\pi/a)n \end{aligned} \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$, при которых длина волны де Бройля $\lambda = 2\pi/k$ оказывается кратной периоду решетки $n\lambda = 2a$. Это значит, что величины энергии, соответствующие значениям $k_x = \pm(\pi/a)n$, являются запрещенными. Зона проводимости разделяется на ряд зон (зон Бриллюэна) разрешенных значений энергии.

В обычных условиях зона проводимости является частично заполненной зоной, в которой электроны занимают уровни расположенные вблизи дна зоны. Эти уровни будут соответствовать самым нижним уровням первой зоны Бриллюэна ($|k_x| \ll \pm\pi/a$). В этой области, при малых значениях импульса электрона, энергия электрона W описывается зависимостью, аналогичной зависимости $W(p)$ свободного электрона:

$$W = \frac{p_x^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} k_x^2. \quad (3)$$

Кривая зависимости энергии электрона от волнового вектора $W(k)$ показана на рис. 5. Аналогично может быть построена кривая зависимости энергии электрона от волнового вектора в валентной зоне. Как и в предыдущем случае, интерес представляют уровни первой зоны Бриллюэна вблизи верха валентной зоны. Именно здесь находятся свободные уровни, которые интерпретируются как дырки (рис. 5).

Из рис. 5 можно видеть, что запрещенная зона полупроводника представляет собой зазор между экстремумами двух параболических кривых (3) первых зон Бриллюэна.

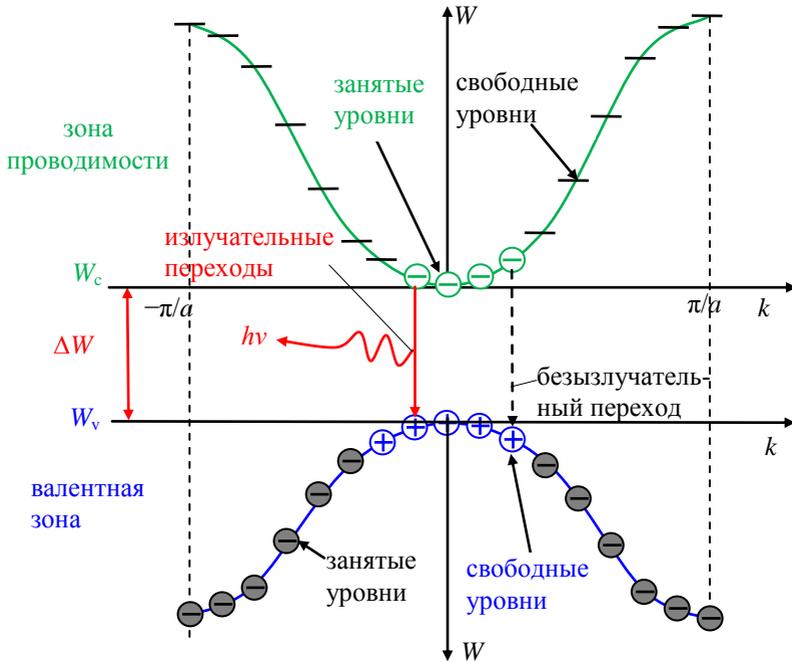


Рис. 5. Зависимость энергии электрона от волнового вектора в прямозонном полупроводнике

Мы рассмотрели одномерную задачу. В реальном трехмерном кристалле электрон может двигаться в произвольном направлении, при этом картина зон Бриллюэна получается более сложной. Картина усложняется и за счет того, что в разных кристаллах зоны проводимости и валентная образуются расщеплением различных уровней электронных оболочек атомов. Сложная зависимость энергии от импульса приводит к тому, что положение экстремума (минимума или максимума) функции $W(k)$ может быть сдвинуто относительно нулевого значения k . Кроме того, оказывается возможным наличие нескольких экстремумов в зоне Бриллюэна, причем минимум, смещенный относительно $k = 0$, может быть более глубоким, т.е. соответствует меньшему значению энергии по сравнению с минимумом, находящимся в точке $k = 0$ (рис. 6).

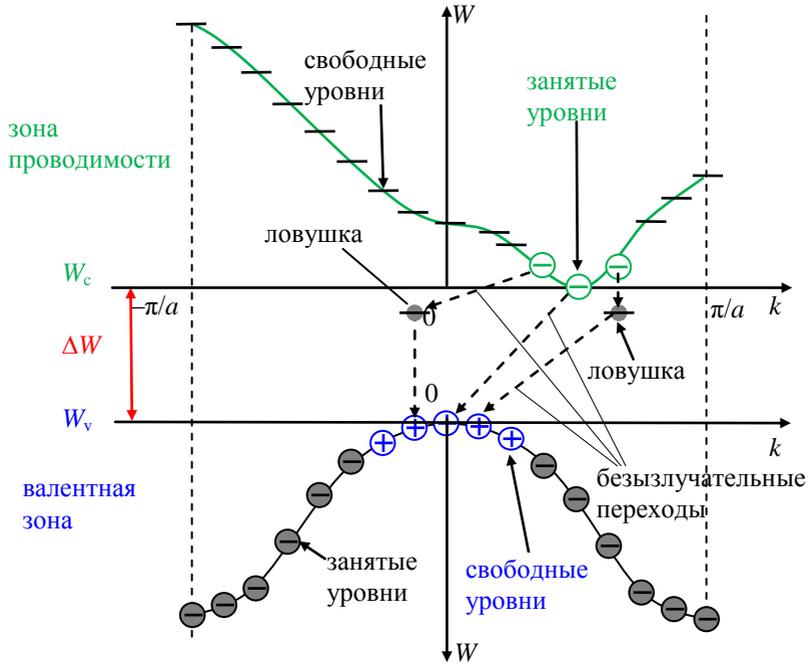


Рис. 6. Зависимости энергии электрона от волнового вектора в непрямозонном полупроводнике

Различают прямые и непрямые переходы электронов из зоны в зону. Прямые переходы (прямая межзонная рекомбинация) совершаются практически без изменения импульса электрона и могут сопровождаться выделением фотона (рис. 5). Прямые переходы возможны в прямозонных полупроводниках, когда экстремумы расположены один над другим (в точке $p = 0$). Строго говоря, прямой переход сопровождается отдачей импульса фотона $p = h\nu/c$. Однако этот импульс настолько мал, что считают, что переход электрона из зоны в зону происходит без изменения импульса. Следовательно, при прямом переходе изменяется лишь потенциальная энергия электрона. Кинетическая энергия электрона (3) остается постоянной.

В непрямозонных полупроводниках (рис. 6) происходит переход электрона из зоны в зону с изменением импульса в результате взаимодействия электрона с решеткой. Непрямой пере-

ход всегда заканчивается выделением энергии в виде фононов (элементарных квантов тепловых колебаний кристаллической решетки). Импульс фонона определяется относительным положением минимумов первых зон Бриллюэна в зоне проводимости и в валентной зоне. Рекомбинация без излучения фотона называется безызлучательной рекомбинацией. В непрямозонных полупроводниках возможны также переходы с предварительным захватом электрона рекомбинационной ловушкой. Рекомбинационные ловушки являются своеобразным посредником, получающим от электрона и передающим решетке импульс фонона (рис. 4).

Кремний и германий являются непрямозонными полупроводниками. Для них характерны не прямые переходы и безызлучательная рекомбинация на примесных центрах. Поэтому эти материалы в светодиодах и лазерах не используются.

4. Инжекционные оптоэлектронные приборы

Современные инжекционные оптоэлектронные полупроводниковые приборы создают на основе многослойных *гетероструктур* в которых между *широкозонными* полупроводниками *p*- и *n*-типа имеется тонкий слой *узкозонного* собственного полупроводника. Эта область является активной средой – потенциальной ямой, в которой накапливаются электроны и дырки при прямом смещении *p-i-n*-перехода. При высоком уровне инжекции концентрация свободных носителей заряда в *i*-слое становится на несколько порядков (четыре и более) выше равновесной и происходит интенсивная рекомбинация электронов и дырок. При правильно выбранных материалах гетероструктуры рекомбинация происходит с излучением кванта света. Это явление используется для создания полупроводниковых инжекционных люминесцентных диодов (светодиодов), суперлюминесцентных диодов и лазеров.

4.1. Материалы для изготовления инжекционных светодиодов и лазеров

В настоящее время для изготовления светоизлучающих диодов и лазеров используются кристаллы соединений типов $A_{III}B_V$ (элементов III и V групп таблицы Менделеева):

- арсенид галлия GaAs, $\Delta W = 1,42$ эВ, максимум излучения лежит в инфракрасной области $\lambda = 0,89$ мкм;
- фосфид галлия GaP, $\Delta W = 2,27$ эВ, максимум излучения в зеленой области спектра $\lambda = 0,55$ мкм;
- нитрид галлия GaN, который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны $\Delta W = 3,4$ эВ, что позволяет получать излучение в синей области вплоть до фиолетового.

Тройные соединения $GaAs_{x-1}P_x$ и $GaAs_{x-1}Al_x$, где x – концентрация фосфора или алюминия, используют, в основном, для получения диодов красного цвета свечения. Кроме того, находят применение и другие широкозонные полупроводники, например:

- карбид кремния SiC ($A_{IV}B_{IV}$) – свечение в диапазоне $\lambda = 0,56-0,63$ мкм;
- сульфид цинка ZnS ($A_{II}B_{VI}$) $\Delta W = 3,74$ эВ, максимум спектрального распределения излучения на длине волны $\lambda = 0,38$ мкм (фиолетовая часть спектра).

Основными легирующими примесями в светодиодах на основе соединений $A_{III}B_V$ являются:

- элементы II группы Zn и Mg – акцепторы;
- элемент V группы N – изоэлектронная примесь;
- элементы VI группы S, Se, Te – доноры;
- комплексы Zn-O, Cd-O, которые играют роль глубоких ловушек для электронов.

Арсенид галлия GaAs является прямозонным полупроводником. В прямозонных полупроводниках могут происходить как излучательные, так и безызлучательные рекомбинации. Соотношение между излучательными и безызлучательными рекомбинациями характеризует внутренний квантовый выход, который является важнейшим показателем светоизлучающего диода:

$$\eta_{\text{внут}} = \frac{N_{\text{изл}}}{N_{\text{инж}}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{изл}}$ – число излученных фотонов, а $N_{\text{инж}}$ – число инжектированных носителей в единицу времени.

Внутренний квантовый выход определяется соотношением концентраций и сечений захвата центров излучательной и безызлучательной рекомбинации. Поэтому в окрестности p – n -перехода стремятся снизить количество дефектов кристаллической решетки и нежелательных примесей с целью уменьшения скорости безызлучательной рекомбинации.

В видимой области спектра внутренний квантовый выход $\eta_{\text{внут}}$ у диодов с гомопереходом составляет единицы процентов. Поэтому в современных инжекционных светодиодах и лазерах используют гетероструктуры, в которых квантовый выход излучения значительно больше.

4.2. Инжекционный светодиод на основе многослойных гетероструктур

Современные светодиоды (CD, англ. light-emitting diode, LED) изготавливают в виде многослойных гетероструктур. Зонная диаграмма прямосмещенной гетероструктуры AlGaIn-InGaIn-GaN изображена на рис. 7.

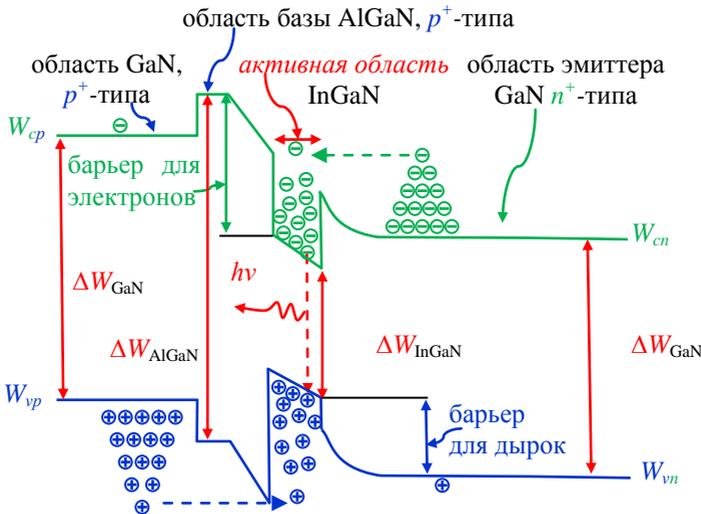


Рис. 7. Зонная диаграмма прямосмещенной гетероструктуры AlGaIn-InGaIn-GaN

Область эмиттера n^+ -типа изготовлена на основе монокристалла нитрида галлия GaN с шириной запрещенной зоны $\Delta W_{\text{GaN}} = 3,4$ эВ. В монокристалл GaN введены примесные атомы Si (IV группа), замещающие атомы Ga (III группа), что обеспечивает высокую концентрацию электронов в зоне проводимости $n_n = 10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Активная область представляет собой тонкий слой ($2 \div 3$ нм) тройного соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. При значениях параметра $x = 0,2 \div 0,4$ ширина запрещенной зоны составляет $\Delta W_{\text{InGaN}} = 2,8 \div 2,4$ эВ. Примеси в активную область не вводятся. Область высоколегированной базы p^+ -типа изготовлена основе тройного соединения $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ с добавлением примеси магния (II группа). Ширина запрещенной зоны зависит от соотношения Al и Ga. Для $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ ширина $\Delta W_{\text{AlGaN}} \approx 4$ эВ. На легированную магнием p^+ -область GaN наносится металлический контакт никель-золото. Второй металлический контакт титан-алюминий, наносится на нижний слой GaN n^+ -типа, как показано на рис. 8.

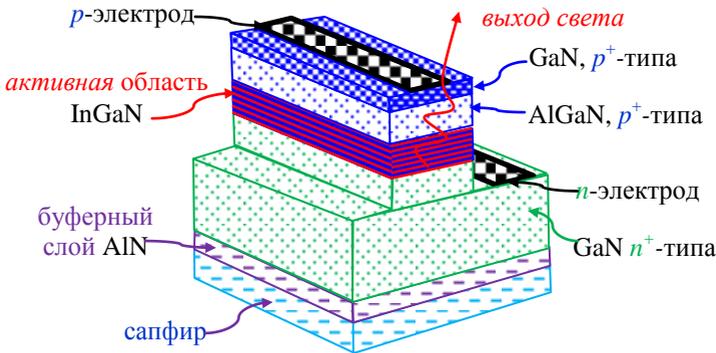


Рис. 8. Схема инжекционного светодиода на основе гетероструктуры AlGaN-InGaN-GaN

При прямом смещении гетероструктуры электроны из эмиттера и дырки из базы диффундируют в активную область и скапливаются в потенциальных ямах у дна зоны проводимости и верха валентной зоны соответственно. Барьеры для электронов и дырок, показанные на рис. 7 препятствуют их дальнейшему перемещению. Активная область тонкая, примесей, которые могут быть центрами безизлучательной рекомбинации, в ней мало,

а концентрация неравновесных носителей в потенциальных ямах велика. Это создает хорошие условия для прямого межзонного перехода электронов с уровня энергии дна зоны проводимости на уровень верха валентной зоны с испусканием квантов света.

Изменяя концентрацию индия и галлия в трехкомпонентной смеси InGaN, можно изменять ширину запрещенной зоны в i -слое ΔW_{InGaN} и длину волны светового излучения от 450 до 580 нм, что перекрывает видимый спектр от голубого до желтого света. Гетеропереходы на основе соединения AlInGaP–GaP перекрывают длинноволновую часть видимого спектра от 580 до 700 нм, а на основе AlGaAs–GaAs – ближнюю инфракрасную область от 700 до 900 нм.

Для повышения внешнего квантового выхода оптическое излучение выводят вверх через широкозонные полупроводники, прозрачные для квантов света с энергией $\Delta W_{\text{InGaN}} = 2,8 \div 2,4$ эВ. Верхний электрод делают кольцевым, а нижний сплошной электрод выполняет функцию зеркала. Для формирования диаграммы направленности излучения и уменьшения внутреннего отражения в кристалле изготавливают пластмассовую линзу с параболической поверхностью, как показано на рис. 9.

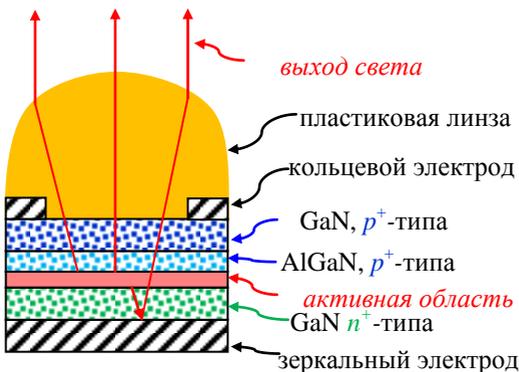


Рис. 9. Схема инжекционного светодиода с пластмассовой линзой

4.3. Инжекционный лазер на основе многослойных гетероструктур

Современные инжекционные лазеры изготавливают на основе многослойных гетероструктур, аналогичных структурам светодиодов. Как и в любом генераторе для работы лазера необходимо выполнить два условия: условие баланса амплитуд и условие баланса фаз. Энергия, поступающая от источника питания в активную среду оптического резонатора, равняется энергии лазерного излучения плюс энергии потерь в самом резонаторе. Условие баланса фаз обеспечивается подбором длины оптического резонатора l , таким образом, чтобы на частоте генерации внутри него возникала стоячая волна

$$l = \frac{\lambda_p}{2} n, \quad (5)$$

где λ_p – длина волны лазерного излучения в резонаторе, $n = 1, 2, 3, \dots$ – число полуволин излучения, укладываемых на длине резонатора.

На рис. 10 показано распределение напряженностей электрического поля в активной среде оптического резонатора E_p (стоячая волна) и воздухе E_b (бегущая волна). Также указаны коэффициенты отражения зеркал: “глухого” ($R_1 \approx 1$) и полупрозрачного ($R_2 < 1$). Напряженность электрического поля прошедшей волны

$$E_b = (1 - R_2) E_p. \quad (6)$$

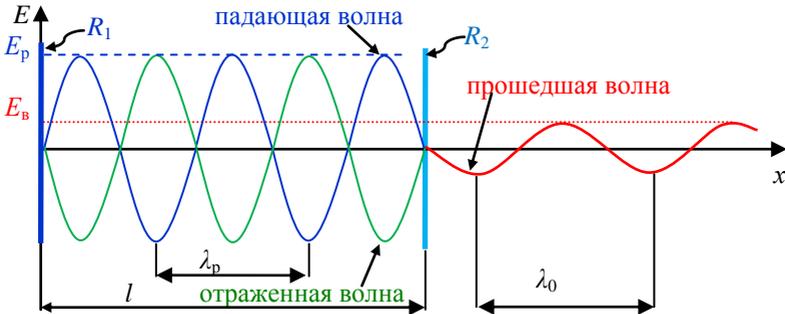


Рис. 10. Распределение напряженностей электрического поля E

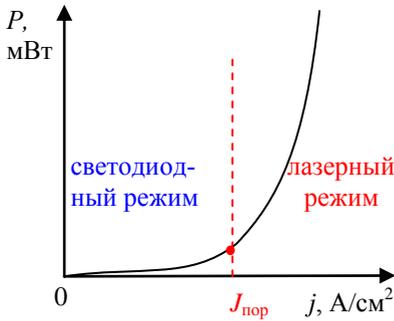


Рис. 11. Зависимость мощности излучения P от плотности тока j

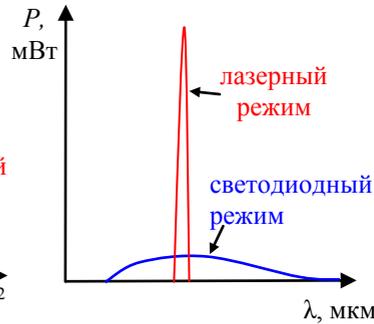


Рис. 12. Изменение спектра при переходе из светодиодного в лазерный режим излучения

На рис. 11 и 12 показано изменение мощности и спектра излучения при переходе из светодиодного в лазерный режим при увеличении плотности инжекционного тока j . Из рисунков видно, что при плотности тока выше пороговой $j_{\text{пор}}$ мощность излучения резко возрастает, а спектр излучения сужается.

На рис. 13 приведена структура инжекционного лазерного диода на основе гетероперехода GaAs-AlGaAs. Для обеспечения теплового режима его размещают на радиаторе. Многослойная гетероструктура, изготовлена на основе монокристалла GaAs p -типа. Узкозонный активный слой GaAs толщиной $1 \div 3$ мкм, заключен между двумя широкозонными областями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ p - и $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ n -типов. Для создания хорошего контакта наращивается высоколегированный слой GaAs n^+ -типа, на который напыляется отрицательный электрод. Зеркалами резонатора являются грани самого полупроводникового кристалла, получаемые

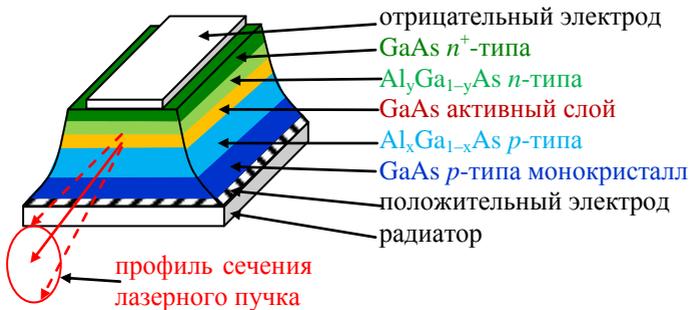


Рис. 13. Структура инжекционного лазерного диода

обычно скалыванием его краев перпендикулярно к плоскости активного слоя. Вынужденное излучение в активном слое проходит параллельно $p-n$ -переходу вдоль длинной стороны кристалла. Для предотвращения возникновения паразитного лазерного излучения в поперечном направлении боковые части кристалла стравливают под некоторым углом. Типичные размеры лазерного кристалла: длина от 100 до 500 мкм, ширина от 200 до 400 мкм, высота от 80 до 100 мкм. Толщина активного слоя на два порядка меньше его ширины и соизмерима с длиной волны лазерного излучения, поэтому за счет явления дифракции при выходе излучения из активного слоя профиль сечения лазерного пучка получается эллиптическим как показано на рис. 13.

Инжекционные лазеры по сравнению с другими типами лазеров отличаются высоким КПД (до 80% в инфракрасной области спектра), простотой возбуждения, малыми размерами, низким напряжением источника питания. Перестройка лазера по частоте возможна в небольших пределах за счет изменения величины плотности тока накачки и длины объемного резонатора l при нагревании. Фотографии лазерных модулей приведены на рис. 14, *а* и *б*.

Лазерные модули, используемые в волоконной оптике, обычно включают в себя излучатель, термистор, элемент Пельтье, фотодиод, коллимирующую линзу и оптический изолятор. Для стабилизации частоты лазерного излучения температура гетероструктуры в процессе работы должна поддерживаться постоянной. Для этого используют внешний контроллер, датчиком температуры которого является термистор, а выходной ток, про-

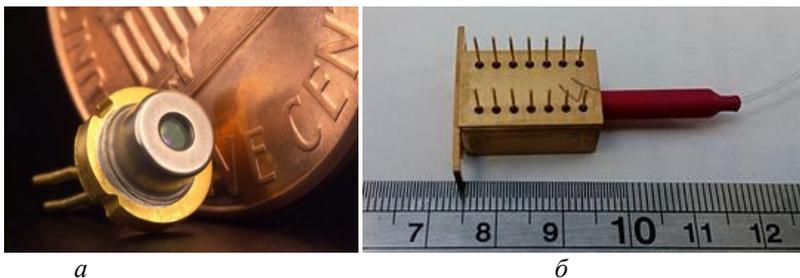


Рис. 14. Лазерный диод: *а* – с открытым выходом; *б* – с оптоволоконным выходом

текающий через элемент Пельте, поддерживает постоянную температуру гетероструктуры. Коллимирующая линза служит для ввода лазерного пучка в оптическое волокно, а оптический изолятор защищает лазер от повреждения паразитным отраженным сигналом.

4.4. Основные характеристики лазерного излучения

По структуре пучка излучения лазеры делятся на одномодовые и многомодовые. Лазером излучается плоская электромагнитная волна типа TEM (TEM-wave; transverse electromagnetic wave) или близкая к ней. Внутри оптического резонатора волны можно считать поперечными TEM_{mnq}, здесь индексы $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – горизонтальный и вертикальный индексы поперечной моды (m – число полувольт, укладываемых по ширине и n – по толщине активной области), $q = 1, 2, 3, \dots$, – индекс продольной моды, см. рис. 10. В одномодовом режиме генерации индексы $m = n = 0$. Индекс q равняется числу полувольт $\lambda_q/2$, уложившихся вдоль оси оптического резонатора l

$$q = \frac{l}{\lambda_q/2}.$$

Следует отметить, что вдоль реальных оптических резонаторов укладываются сотни – тысячи длин полувольт ($q \sim 10^3$).

Излучение инжекционного лазера в общем случае является многомодовым. Спектр излучения состоит из большого числа продольных мод

$$f_q = \frac{c/n}{\lambda_q} = \frac{cq}{2ln},$$

находящихся в пределах ширины спектра излучения лазерного диода (рис.15). Наибольшую интенсивность имеет мода с максимальным коэффициентом усиления, находящаяся в центре спектра излучения диода.

Малая ширина лазерной линии Δf (на уровне половинной мощности) определяет монохроматичность лазерного излучения.

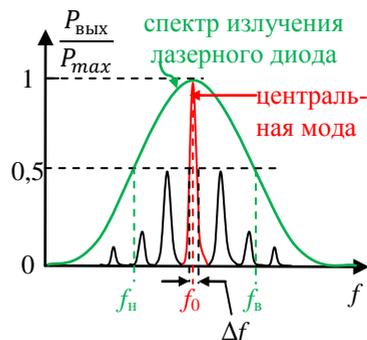


Рис. 15. Режим генерации продольных мод лазерного диода

Одной из основных характеристик лазерного излучения является его *когерентность*. Различают временную и пространственную когерентности.

Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ определяется шириной полосы лазерного излучения Δf

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{2\Delta f}. \quad (7)$$

Длина продольной когерентности $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$ – это максимальная разность хода интерферирующих лучей, при которой еще наблюдается их интерференция. Таким образом, чем уже спектр излучения, тем больше время и длина когерентности.

Максимальное расстояние между точками лазерного пучка, излучение в которых будет интерферировать, называется длиной поперечной когерентности (пространственной когерентности). Для многих лазеров длина поперечной когерентности равна диаметру пучка лазерного излучения.

При работе лазера в одномодовом режиме можно сфокусировать излучение в пятно малых размеров. На рис. 16 показана

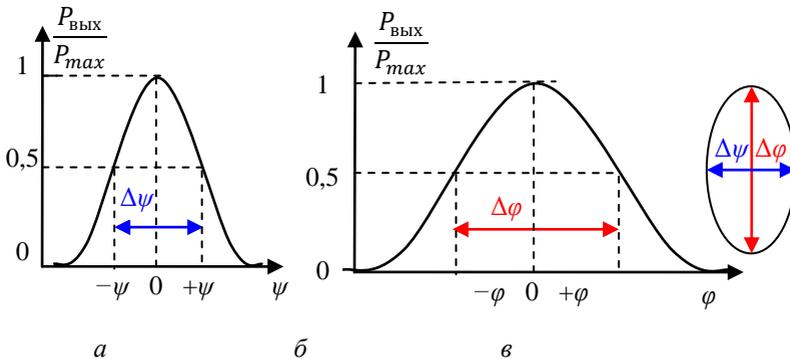


Рис. 16. Диаграмма направленности излучения лазерного диода в плоскости: *а* – горизонтальной; *б* – вертикальной, *в* – в разрезе

диаграмма направленности излучения инжекционного лазерного диода, структура которого изображена на рис. 13. Угловая ширина луча на уровне половинной мощности в горизонтальной плоскости составляет $\Delta\psi$, а в вертикальной – $\Delta\varphi$. Таким образом, пучок имеет эллиптическое сечение (рис. 16,в). Типичные величины $\Delta\psi \sim 1$ градуса, $\Delta\varphi \sim 10$ градусов. Расходимость из-

лучения является существенным недостатком инжекционных лазеров, для её уменьшения используют оптические линзы.

Инжекционные лазеры, изображенные на рис. 13, генерируют излучение с вертикальной поляризацией.

Коэффициент полезного действия (КПД) лазера

$$\eta = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{нак}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $P_{\text{изл}}$ и $P_{\text{нак}}$ – мощности лазерного излучения и накачки соответственно. КПД инжекционных лазеров может достигать до 80% в инфракрасном диапазоне.

4.5. Суперлюминесцентный диод

4.5.1. Конструкция и принцип действия суперлюминесцентного диода

Схема суперлюминесцентного диода (СЛД англ. super luminescent diode, SLD) представлена на рис. 17. Как и в полупроводниковом лазере (рис. 2) в нем имеется активная среда 1 (активный слой собственного полупроводника) и система накачки, образованная полупроводниками n - и p -типов 2 и 3. Однако у СЛД отсутствуют отражающие зеркала. Для уменьшения отражения от задней поверхности 4 её скашивают под углом 10 градусов, либо наносят слой поглощающего материала. Со стороны оптического выхода нанесено просветляющее покрытие 5. Такая схема обеспечивает условие однократного прохождения оптического излучения через активную среду. Затравочная волна 6

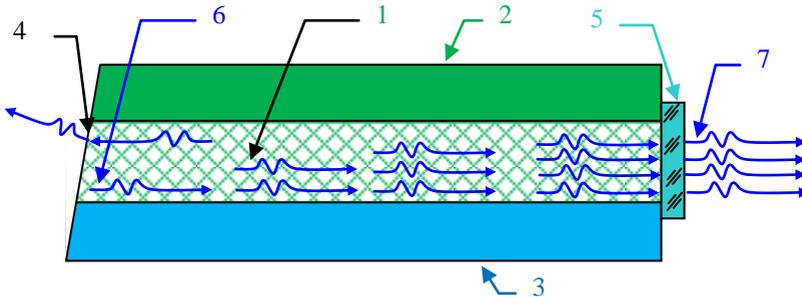


Рис. 17. Схема суперлюминесцентного лазерного диода: 1 – активная среда; 2 – полупроводник n -типа; 3 – полупроводник p -типа; 4 – скошенная грань; 5 – просветляющее покрытие; 6 – затравочная волна; 7 – когерентное излучение

проходя через активную среду усиливается, и на выходе СЛД возникает когерентное излучение 7. Поэтому мощность выходного излучения СЛД выше, чем у люминесцентного светодиода и сравнима с мощностью аналогичного инжекционного полупроводникового лазера. Её типичные величины составляют десятки – сотни мВт, существуют и более мощные СЛД. Для увеличения выходной мощности длину активной среды СЛД увеличивают по сравнению с длиной инжекционных лазеров.

На рис. 18, *а*, *б* и *в* приведены нормированные спектральные полосы излучения люминесцентного светодиода, суперлюминесцентного диода и инжекционного лазера, соответственно. Типичная ширина спектральной полосы излучения суперлюминесцентного диода составляет $20 \div 50$ нм, что примерно на порядок меньше, чем у светодиода и на один-два порядка больше, чем у лазера.

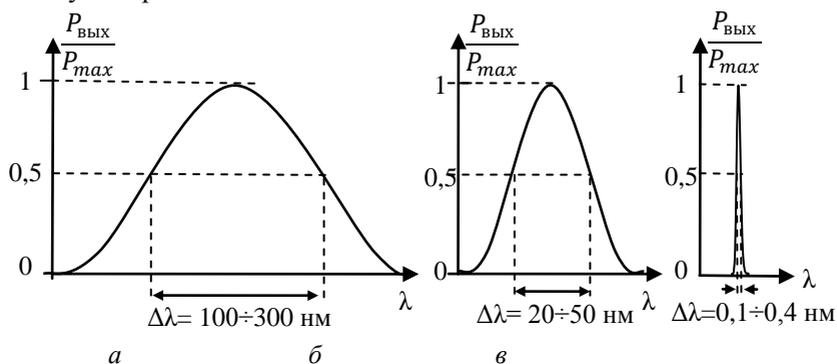


Рис. 18. Нормированные спектральные характеристики: *а* – люминесцентного светодиода, *б* – суперлюминесцентного диода, *в* – однододового инжекционного лазера

Для удобства эксплуатации СЛД выпускают в составе передающих оптоэлектронных модулей. Основными элементами модуля являются суперлюминесцентный диод, микроходильник, фотодиод обратной связи, оптический изолятор и однододовый световод с цилиндрической линзой в начале световода. Оптический изолятор в инжекционных он заменяется схемой оптической развязки представленной на рис. 19. Оптическое излучение, сформированное в активной среде 1, выходит через просветляющее покрытие 2 в воздух в виде расходящегося в верти-

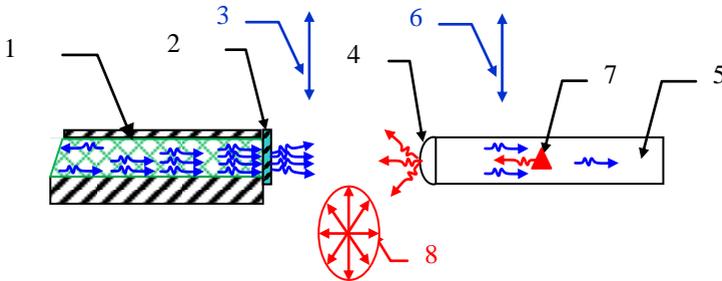


Рис. 19. Оптическая развязка суперлюминесцентного диода:

кальной плоскости пучка (см. рис. 19) с вертикальной поляризацией 3. Цилиндрическая собирающая линза 4, приклеенная к торцу оптического волокна, фокусирует в его сердцевину 5 излучение с вертикальной поляризацией 6. Возникшее на оптической неоднородности 7 отраженное излучение имеет эллиптическую поляризацию 8 и при вторичном прохождении цилиндрической линзы 4 частично рассеивается, а частично возвращается в активную среду СЛД. При этом амплитуда вертикальной составляющей отраженного излучения, которая может нарушить режим генерации, оказывается ослабленной на несколько порядков.

4.5.2. Принцип действия просветляющего покрытия в суперлюминесцентном лазерном диоде

Принцип действия просветляющего покрытия поясняется на рис. 20. Слева на нем изображена активная область с показателем преломления n_a , в середине – тонкая пленка просветляющего покрытия с показателем преломления $n_{пл}$, а справа – воздух с $n_b = 1$. Толщина просветляющего покрытия $d = \frac{\lambda_{пл}}{4}$, где $\lambda_{пл}$ – длина световой волны в пленке. Падающая под углом 90° к границе раздела активная среда–просветляющее покрытие световая волна частично отражается, а частично проходит до границы раздела с воздухом, на которой образуется вторая отраженная волна. После вторичного прохождения через просветляющий слой фаза этой волны изменяется на π и в активной среде обе отраженные волны складываются в противофазе. При равенстве амплитуд 1-ой и 2-ой отраженных волн

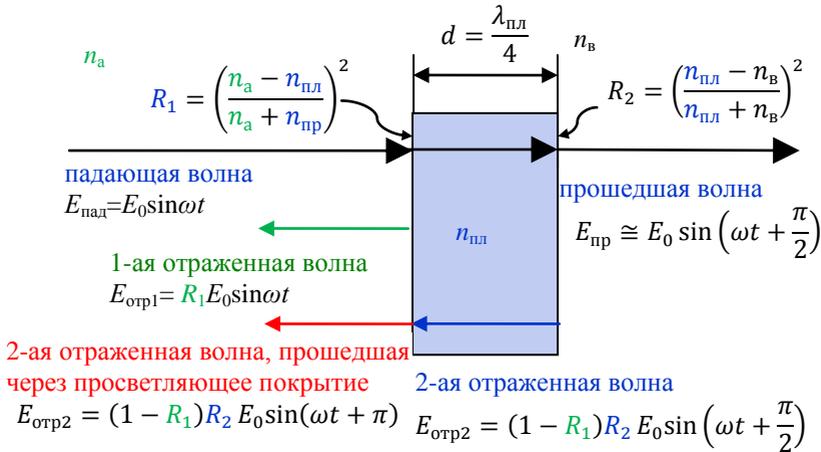


Рис. 20. Принцип действия просветляющего покрытия

$R_1 E_0 = (1 - R_1) R_2 E_0$, интерферирующие волны гасят друг друга, а волна, прошедшая в воздух, усиливается. Показатель преломления материала пленки $n_{пл} = \sqrt{n_a n_b}$ подбирают так, чтобы получить коэффициенты отражения $R_1 = \left(\frac{n_a - n_{пл}}{n_a + n_{пл}} \right)^2$ и $R_2 = \left(\frac{n_{пл} - n_b}{n_{пл} + n_b} \right)^2$, обеспечивающие равенство амплитуд отраженных волн.

Использование просветляющего покрытия позволяет уменьшить коэффициент отражения от сколотой поверхности кристалла GaAs ($n_a = 6,1$) с 37%, что характерно для полупроводникового лазера, до 1% в СЛД.

4.6. Основные характеристики передающего оптоэлектронного модуля с суперлюминесцентным диодом DL-CS5103A

Габаритные размеры и схема включения элементов передающего оптоэлектронного модуля с суперлюминесцентным диодом DL-CS5103A приведены на рис. 21. Он состоит из корпуса с размещенными в нем суперлюминесцентным диодом, микрохолодильником и терморезистором. Вывод оптического излучения происходит через одномодовое оптическое волокно с диаметром сердцевинки 10 мкм. Диаметры оболочки, защитного покрытия и наружной изоляции составляют 125, 245 и 900 мкм соответственно. Длина оптического волокна – 1 м, диаметр его

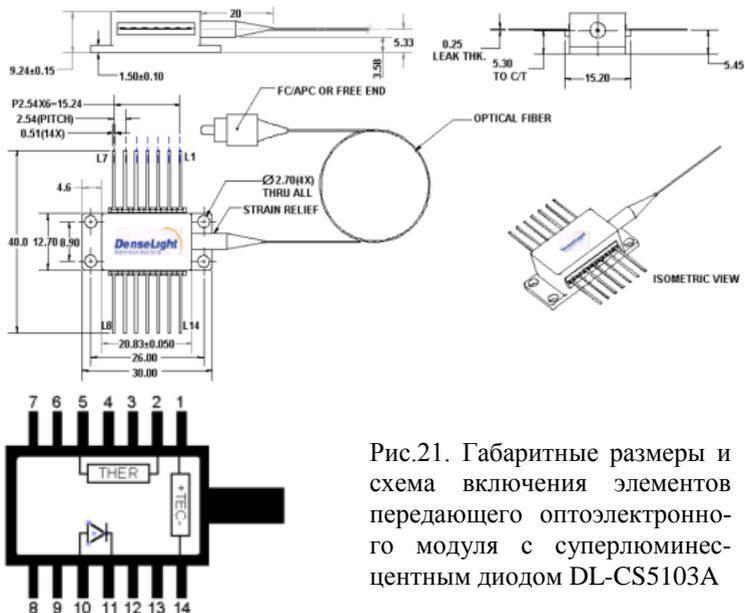


Рис.21. Габаритные размеры и схема включения элементов передающего оптоэлектронного модуля с суперлюминесцентным диодом DL-CS5103A

скрутки должен быть больше 40 мм. Тип оптического соединителя (коннектора) FC/FPC.

Основные характеристики приведены в табл.2. Вольт-амперная, ватт-амперная и спектральная характеристики изображены на рис. 12 – 24 соответственно.

Табл. 1. Характеристики суперлюминесцентного диода DL-CS5103A

Параметр	Значение минимальное	Значение типичное	Значение максимальное	Единица измерения
Напряжение		2	2,5	В
Сила тока		300	350	мА
Оптическая мощность	10			мВт
Центральная длина волны	1530	1550	1570	нм
Ширина спектра излучения	35			нм
Температура модуля	-40		+70	°С

Температура СЛД	0		+70	°C
Напряжение термоэлектрического охладителя		2,5	3,0	В
Сила тока термоэлектрического охладителя		1,1	1,8	А

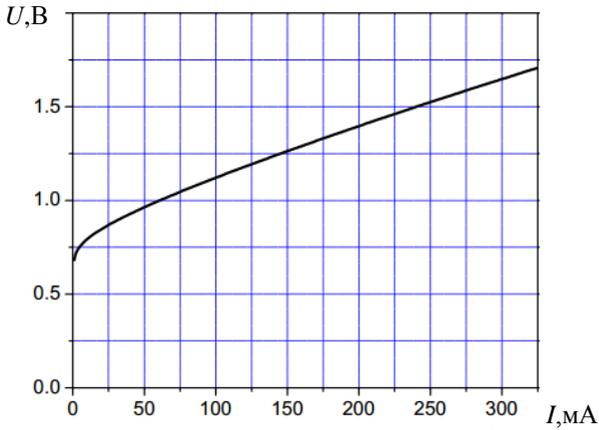
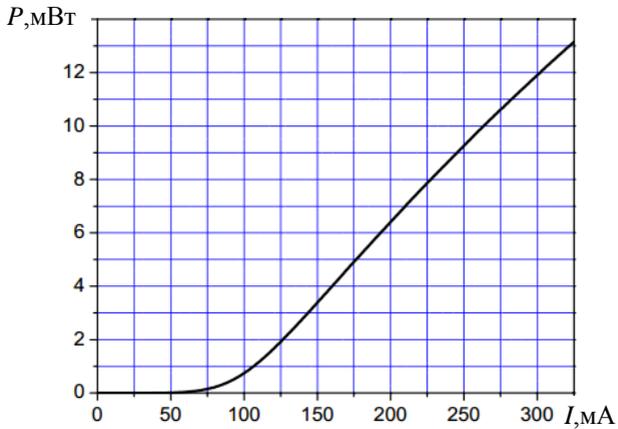


Рис. 22. Вольт-амперная характеристика СЛД

Рис. 23. Ватт-амперная характеристика СЛД при $T=25^\circ\text{C}$

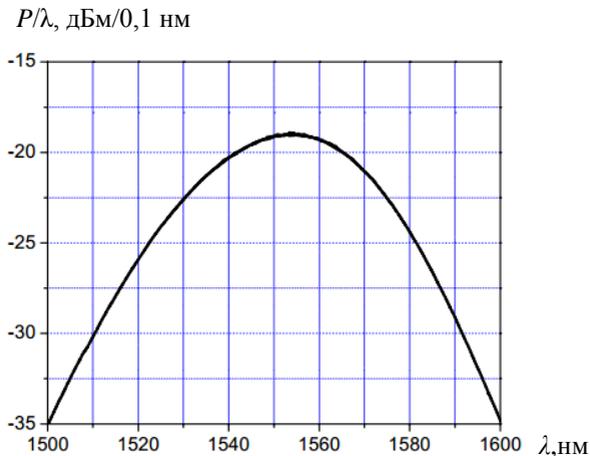


Рис. 24. Спектральная плотность мощности излучения

5. Порядок выполнения работы

Цель работы: изучить спектры излучения суперлюминесцентного диода при различных токах накачки, построить зависимости мощности и длины волны излучения от тока накачки.

Приборы и принадлежности: суперлюминесцентный диод DL-CS5103A (или аналогичный), анализатор оптического спектра YOKOGAWA AQ6370D, источник питания GW INSTRON GPS-74303, оптические соединительные кабели.

6.1. Блок-схема экспериментальной установки

Блок-схема установки для исследования суперлюминесцентного диода представлена на рис. 25. Фотографии используемых приборов: источника питания GW INSTRON GPS-74303, передающего оптоэлектронного модуля с суперлюминесцентным диодом DL-CS5103A и анализатора оптического спектра YOKOGAWA AQ6370D приведены на рис. 26.

5.2. Проведение измерений и обработка результатов

Внимание! При работе с источниками лазерного излучения необходимо соблюдать меры безопасности. **Не направлять луч лазера в глаза человека!**

1. Прочитать инструкции по эксплуатации источника питания GW INSTEK GPS-74303 и анализатора оптического спектра YOKOGAWA AQ6370D.

2. Изучить паспортные характеристики исследуемого суперлюминесцентного диода, записать величину рабочего напряжения, пороговый и максимальный ток накачки. Выбрать шаг изменения тока накачки для последующего проведения $6 \div 10$ измерений.

3. Включить источник питания и установить напряжение равное рабочему напряжению СЛД, а ограничение по току (в режиме короткого замыкания) – равным пороговому току накачки лазерного диода. Переключателем “OUTPUT ON OFF” выключить напряжение на выходных клеммах источника питания.

4. Однопроводными электрическими кабелями, соблюдая полярность, подключить исследуемый СЛД-модуль к источнику питания как показано на рис. 25.

5. Оптическим кабелем соединить оптический выход СЛД-модуля с оптическим входом анализатора оптического спектра.

6. Показать собранную схему инженеру или преподавателю.

7. Включить анализатор оптического спектра и подготовить его к работе согласно инструкции по эксплуатации.

8. Переключателем “OUTPUT ON OFF” источника питания подать напряжение питания на СЛД-модуль.

9. С помощью анализатора оптического спектра снять спектр излучения СЛД при различных токах накачки. Спектры сохранить в виде текстового файла и растрового изображения.

10. Для каждого полученного спектра определить: мощность излучения, центральную длину волны и ширину полосы излучения на уровне половинной мощности. Построить графики

зависимостей: мощности излучения, центральной длины волны и ширины полосы излучения от тока накачки.

11. Сравнить полученные результаты с паспортными данными СЛД.

6. Контрольные вопросы

1. Определение лазера. Схема и основные элементы его конструкции.
2. Заселенность энергетических уровней: нормальная и инверсная.
3. Прямые и непрямые межзонные переходы.
4. Материалы для изготовления оптоэлектронных приборов светодиодов и полупроводниковых инжекционных лазеров.
5. Конструкция и принцип действия светодиода на основе гетероперехода.
6. Конструкция и принцип работы полупроводникового инжекционного лазера.
7. Основные характеристики лазерного излучения.
8. Конструкция и принцип работы полупроводникового суперлюминесцентного диода.
9. Отличие конструкции и основных характеристик СЛД от светодиодов и инжекционных полупроводниковых лазеров.
10. Конструкции передающих оптоэлектронных СЛД-модулей.
11. Для чего внутри СЛД-модуля устанавливается элемент Пельтье и термистор?
12. В каких устройствах применяют суперлюминисцентные диоды? В чем их преимущества?
13. Объясните полученные результаты.

7. Список литературы

1. *Оптическая* и квантовая электроника: учеб. пособие / В.И. Светцов; Иван. гос. хим.-техн. ун-т, Иваново: 2004. 122 с.
2. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Том 4. Оптика. М.: Наука, 1985. 792 с.
3. *Качмарек Ф.* Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981. 540 с.

4. *Блистанов А. А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000. 432 с.
5. *Alphonse G. A. et al.*, High-power superluminescent diodes // *IEEE J. Quantum Electron.* 1988. 24 (12). P. 2454–2457.
6. Когерентность лазерного излучения. URL http://www.laserportal.ru/content_618 (Дата обращения 12.02.2017).
7. SPECIFICATIONS 1550 nm Superluminescent LED DL-CS5103A URL http://aosproducts.com/Denselight%20Datasheets/AOS-DL-CS5103A_RevB.pdf (Дата обращения 20.02.2017).
8. Суперлюминесцентный диод <https://ru.wikipedia.org/wiki> (Дата обращения 07.03.2017).
9. *Пихтин Н.А., Ильин Ю.В., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Станкевич А.Л., Тарасов И.С., Фетисова Н.В.* Мощный широкополосный одномодовый InGaAsP/InP суперлюминесцентный диод// *Письма ЖТФ.* 1999. Т. 25, вып. 15. С. 16–22.
10. Фундаментальные основы нанотехнологий Лекция 12. Физика наноструктур URL http://nano.msu.ru/files/basics/lecture12_Timoshenko.pdf (Дата обращения 07.03.2017).
11. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды. Изд. 2. М.: Физматлит, 2008. 497 с.

Оглавление

1. Введение	3
2. Типы лазеров	5
2.1. Лазеры с оптической накачкой	5
2.2. Инжекционные полупроводниковые лазеры	6
3. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов	7
3.1. Взаимодействие излучения с атомами активной среды инжекционного лазера	8
3.2. Прямые и непрямые межзонные переходы	10
4. Инжекционные оптоэлектронные приборы	13
4.1. Материалы для изготовления инжекционных светодиодов и лазеров	14
4.2. Инжекционный светодиод на основе многослойных гетероструктур	15
4.3. Инжекционный лазер на основе многослойных гетероструктур	18
4.4. Основные характеристики лазерного излучения	21
4.5. Суперлюминесцентный диод	23
4.5.1. Конструкция и принцип действия суперлюминесцентного диода	23
4.5.2. Принцип действия просветляющего покрытия в суперлюминесцентном лазерном диоде	25
4.6. Основные характеристики передающего оптоэлектронного модуля с суперлюминесцентным диодом DL-CS5103A	26
5. Порядок выполнения работы	29
6.1. Блок-схема экспериментальной установки	29
5.2. Проведение измерений и обработка результатов	31
6. Контрольные вопросы	32
7. Список литературы	32

Учебное издание

*Составители: Вольхин Игорь Львович,
Ажеганов Александр Сергеевич*

ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДИОДА

Практикум

Издано в авторской редакции
Компьютерная верстка: *И. Л. Вольхин*

Подписано в печать 18.04.2017. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 2,03. Тираж 100 экз.

Издательский центр
Пермского государственного национального
исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

