

ПЕРМСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ:

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Допущено методическим советом  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета в качестве  
учебно-методического пособия для студентов,  
обучающихся по направлениям подготовки магистров  
«Нанотехнологии и микросистемная техника»  
и «Радиофизика»*



Пермь 2024

УДК 537.86: 530.145: 537.312(075.8)  
ББК 32.86я73  
Ф505

**Физические** основы лазерной техники: лабораторный  
Ф505 практикум [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие  
/ И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. И. Булатов, Ю. А. Конин,  
А. С. Луценко, Н. А. Мальков ; Пермский государственный  
национальный исследовательский университет. – Электронные  
данные. – Пермь, 2024. – 6,48 Мб, 210 с. – Режим доступа:  
[http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-  
posobiya/Fizicheskie-osnovy-lazernoj-tekhniki-laboratornyj-  
praktikum.pdf](http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Fizicheskie-osnovy-lazernoj-tekhniki-laboratornyj-praktikum.pdf). – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4198-7

В учебно-методическом пособии рассмотрены физические основы работы лазерной техники твердотельных и волоконно-оптических лазеров, твердотельных суперлюминесцентных диодов, волоконно-оптических усилителей и усилителей спонтанной эмиссии. Дано описание макетов, методики выполнения лабораторных работ и обработки полученных результатов.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям магистратуры и специалитета «Радиофизика», «Нанотехнологии и микросистемная техника» и «Приборостроение» Пермского государственного национального исследовательского университета, «Фотоника и оптоинформатика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», а также для слушателей курсов дополнительного образования по программам «Атмосферная лазерная связь» и аналогичным, по образовательным программам консорциума «Фотоника», для студентов смежных специальностей.

**УДК 537.86: 530.145: 537.312(075.8)**  
**ББК 32.86я73**

*Издается по решению ученого совета физико-математического института  
Пермского государственного национального исследовательского университета*

*Рецензенты:* кафедра общей физики ПНИПУ (зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, доцент **А. В. Перминов**);

главный технолог волоконно-оптических технологий ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», канд. физ.-мат. наук **О. Л. Кель**

© ПГНИУ, 2024

© ПАО «ПНИПК», 2024

© Вольхин И. Л., Ажеганов А. С., Булатов М. И.,

Конин Ю. А., Луценко А. С., Мальков Н. А., 2024

ISBN 978-5-7944-4198-7

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие «Физические основы лазерной техники» содержит описание физических принципов работы и различных конструкций полупроводниковых суперлюминесцентных и лазерных диодов, волоконно-оптических лазеров и усилителей, а также усилителей спонтанной эмиссии. Приведено подробное описание экспериментальных установок для исследования их основных характеристик, а также методики выполнения лабораторных работ и обработки полученных результатов.

Целью лабораторного практикума является закрепление знаний, полученных студентами в ходе изучения материалов по курсу «Физические основы лазерной техники», приобретение навыков экспериментального исследования и практического использования активных элементов волноводной фотоники.

При подготовке к лабораторным работам и защите отчётов следует ознакомиться с рекомендуемой литературой, краткими инструкциями по работе с приборами, приведёнными в приложениях, списке вопросов для самоконтроля и требованиями к оформлению отчёта. В пособии даны теоретические основы работы лазерной техники, а основные характеристики приборов приведены в приложениях.

В процессе модернизации лабораторные работы могут быть изменены, измерительные приборы могут быть заменены аналогичными, поэтому сборку установок необходимо проводить под контролем инженера.

Отчёт о выполненной лабораторной работе представляется каждым студентом индивидуально на текущем или следующем занятии. Отчёт должен содержать:

- 1) краткие теоретические сведения о физических процессах в изучаемых устройствах;
- 2) схему экспериментальной установки;
- 3) полученные экспериментальные данные (в виде таблиц и графиков) и результаты проведённых расчётов;
- 4) анализ результатов и выводы.

# Работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА

## 1.1. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов

*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 переводится на русский как «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).

В основе работы ОКГ лежит явление индуцированного (вынужденного) излучения. Его излучающая (активная) среда находится в особом неравновесном состоянии – в инверсном состоянии, при котором число частиц на верхнем энергетическом уровне больше, чем на нижнем. В ОКГ имеется внутренняя положительная обратная связь в оптическом резонаторе.

### 1.1.1. Лазеры с оптической накачкой

Необходимыми элементами любого лазера являются:

- *активная среда* – рабочее вещество, в котором создаётся неравновесная инверсная заселённость энергетических уровней;
- *система накачки* – система, в которой энергия внешнего воздействия (светового, электрического, химического и т. д.) преобразуется во внутреннюю энергию *активной среды*, создавая инверсию заселённости ее энергетических уровней;
- *оптический резонатор* – элемент, в котором происходит интенсивное взаимодействие излучения и вещества активной

среды, в результате которого энергия возбужденных частиц (молекул, атомов, ионов) преобразуется в энергию когерентного светового излучения;

– 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. 1.1.

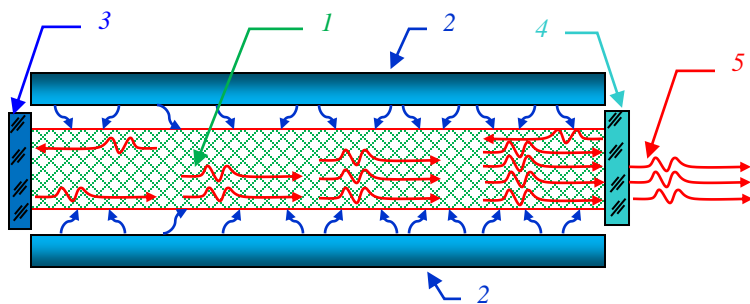


Рис. 1.1. Схема лазера: 1 – активная среда; 2 – система накачки;  
3 – отражающее зеркало; 4 – полупрозрачное зеркало;  
5 – когерентное излучение

В активную среду 1 из системы накачки 2 поступает интенсивное световое излучение, энергия которого преобразуется во внутреннюю энергию активной среды (рабочего вещества). Оптический резонатор состоит из отражающего зеркала 3 и полупрозрачного зеркала 4, которое обеспечивает вывод когерентного светового излучения 5.

Активная среда лазера может быть различной 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 смесью газов.

### 1.1.2. Инжекционные полупроводниковые лазеры

Схема инжекционного полупроводникового лазера представлена на рис. 1.2. Активной средой 1 является тонкий слой собственного полупроводника (*i*-типа). Этот слой, ограниченный зеркалами 3 и 4, является оптическим резонатором. Зеркалами служат грани полупроводникового кристалла. Роль системы накачки 2 выполняют слои полупроводников *n*- и *p*-типа, инжектирующие в *i*-слой электроны и дырки. Энергия, выделяющаяся 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 зачернённой поверхностью корпуса.

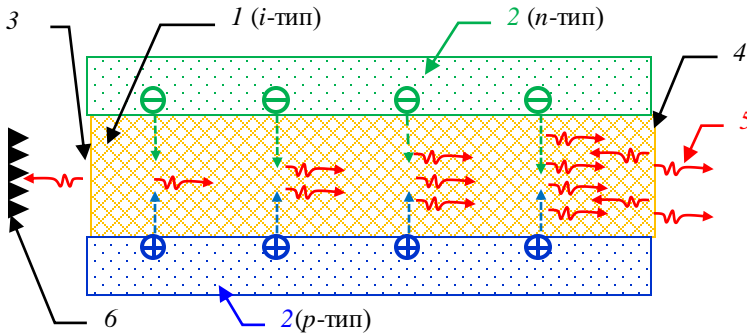


Рис. 1.2. Схема инжекционного полупроводникового лазера:  
1 – активная среда; 2 – система накачки;  
3 и 4 – грани кристалла;  
5 – когерентное излучение; 6 – поглотитель

На рис. 1.3 изображены энергетические уровни дна зоны проводимости  $W_c$  и верха валентной зоны  $W_v$  собственного полупроводника *i*-типа.

Электрон может самопроизвольно (спонтанно) перейти с уровня зоны проводимости в более низкое энергетическое состояние, на уровень валентной зоны (рекомбинировать с дыркой, см. рис. 1.3, *a*), испустив при этом квант света (фотон) с энергией:

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

(1.1)

Спонтанные переходы являются случайными. Излучённые фотоны имеют случайные 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  $h\nu \geq W_c - W_v$ , сопровождающееся переходом электрона с уровня  $W_v$  на уровень  $W_c$  (см. рис. 1.3, б).

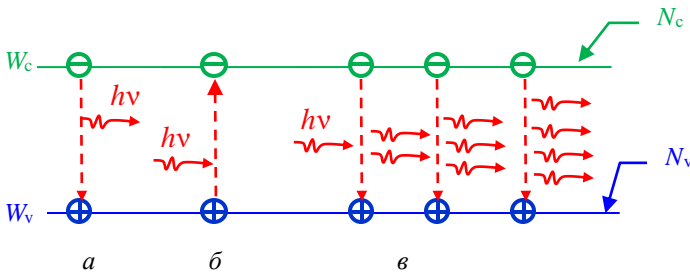


Рис. 1.3. Процессы в активной среде инжекционного лазера:  
*a* – спонтанное излучение; *б* – поглощение;  
*в* – стимулированное излучение

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 (см. рис. 1.3, в). При этом испускаемый фотон 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  $\alpha$  называют коэффициентом усиления активной среды. В реальной активной среде происходит также обратный процесс – снижение интенсивности излучения в результате поглощения, а также при рассеянии на неоднородностях, примесях, которые переводят энергию излучения в тепло. Эти потери учитывают в коэффициенте  $\beta$ . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде определяется как



$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x]. \quad (1.2)$$

Если  $\alpha > \beta$ , то интенсивность световой волны растёт при прохождении через активную среду.

### 1.1.3. Инжекционный лазер на основе многослойных гетероструктур

Инжекционные лазеры изготавливают на основе многослойных гетероструктур, в которых между широкозонными полупроводниками  $p$ - и  $n$ -типа имеется тонкий слой узкозонного собственного полупроводника  $i$ -типа. 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 с излучением квантов света.

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, равна 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:

$$l = \frac{\lambda_q}{2} q, \quad (1.3)$$

где  $\lambda_q$  – длина волны лазерного излучения в резонаторе,  $\lambda_q = \lambda_0/n$ , здесь  $n$  – показатель преломления кристалла полупроводника (активной среды);  $q$  – число полуволин излучения, укладываемых на длине резонатора,  $q = 1, 2, 3, \dots$

На рис. 1.4 и 1.5 показано изменение мощности и спектра излучения при переходе из светодиодного в лазерный режим при увеличении плотности инжекционного тока  $j$ .

При низком уровне инжекции  $j < j_{\text{пор}}$  в  $i$ -слое преобладает спонтанная рекомбинация электронов и дырок. Возникает некогерентное излучение низкой интенсивности. При плотности тока

выше пороговой  $j_{\text{пор}}$  преобладает стимулированная квантами излучения рекомбинация электронов и дырок. Интенсивность индуцированного когерентного излучения резко возрастает, и спектр излучения сужается.

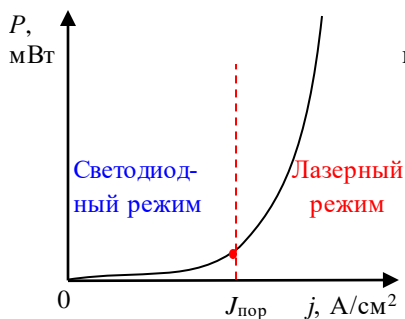


Рис. 1.4. Зависимость мощности излучения  $P$  от плотности тока  $j$

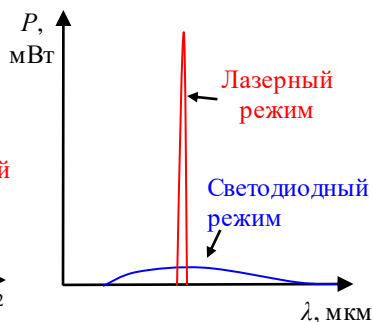


Рис. 1.5. Изменение спектра при переходе из светодиодного в лазерный режим излучения

На рис. 1.6 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 заключён между двумя широкозонными областями:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $p$ -типа и  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$   $n$ -типа.

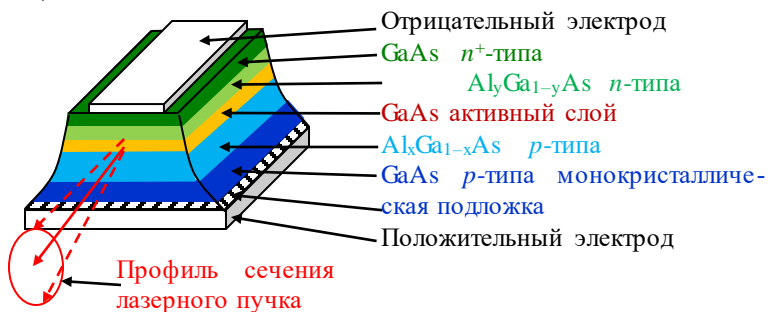


Рис. 1.6. Структура инжекционного лазерного диода

Для создания хорошего электрического контакта наращивается высоколегированный слой GaAs  $n^+$ -типа, на который напыляется отрицательный электрод. Зеркалами резонатора являются грани самого полупроводникового кристалла, получаемые обычно скалыванием его краёв перпендикулярно к плоскости активного слоя. Вынужденное излучение в активном слое генерируется параллельно  $p$ - $n$ -переходу вдоль длинной стороны кристалла. Для предотвращения возникновения паразитного лазерного излучения в поперечном направлении боковые грани 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 счёт явления дифракции при выходе излучения из активного слоя профиль сечения лазерного пучка получается эллиптическим, как показано на рис. 1.6.

Инжекционные лазеры отличаются от других типов лазеров 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 счёт изменения плотности тока накачки и длины объемного резонатора  $l$  при нагревании.

## 1.2. Основные характеристики лазерного излучения

По структуре пучка излучения лазеры делятся на одномодовые и многомодовые. В зависимости от конструкции резонатора и среды распространения лазером излучаются различные типы волн.

### 1.2.1. Структура лазерного излучения внутри резонатора с плоскопараллельными зеркалами

В резонаторе, образованном плоскопараллельными зеркалами, волны можно считать поперечными ТЕМ $_{mnq}$ , здесь индексы  $m$ ,  $n$  – горизонтальный и вертикальный индексы поперечной моды,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  (при этом число полуволн в установившейся стоячей волне на ширине и толщине объемного резонатора –  $m + 1$  и  $n + 1$ , а число узлов –  $m$  и  $n$  соответственно),  $q$  – индекс продольной моды,  $q = 1, 2, 3, \dots$ .

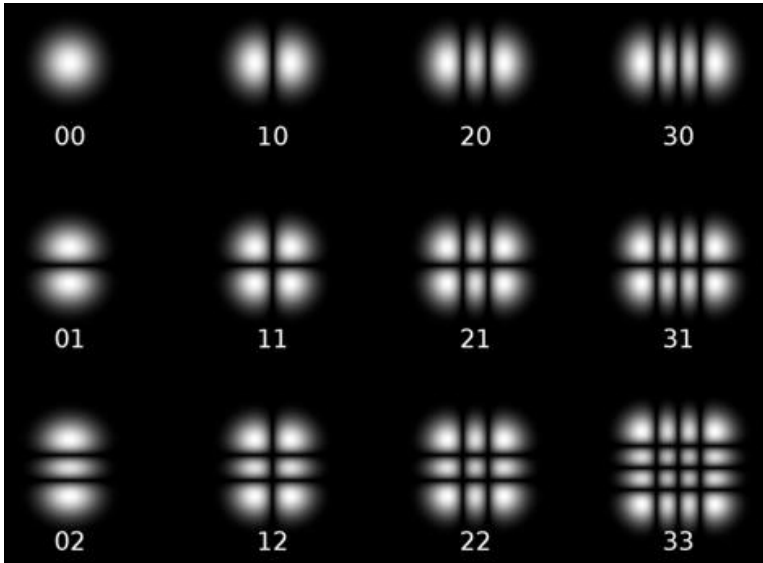


Рис. 1.7. Распределение интенсивности излучения поперечных мод в оптическом резонаторе с плоскопараллельными зеркалами.

Рисунок взят из источника [7]

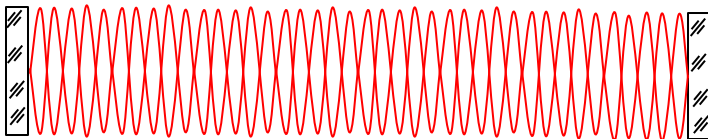


Рис. 1.8. Распределение напряжённости электрического поля в оптическом резонаторе с плоскопараллельными зеркалами, иллюстрирующее образование продольных мод

На рис. 1.7 показано распределение интенсивности поперечных мод, а на рис. 1.8 – электрического поля стоячих волн продольных мод. В одномодовом режиме генерации  $m = n = 0$ . Индекс  $q$  равняется числу полуволн  $\lambda_q/2$ , уложившихся вдоль оси оптического резонатора  $l$ :

$$q = \frac{l}{\lambda_q/2}. \quad (1.4)$$

Следует отметить, что вдоль реальных оптических резонаторов укладывается до тысячи длин полуволн ( $q \sim 10^3$ ).

### 1.2.2. Основные характеристики лазерного излучения

Излучение инжекционного лазера в общем случае является многомодовым. Спектр излучения состоит из ряда продольных мод, отличающихся длиной волны.

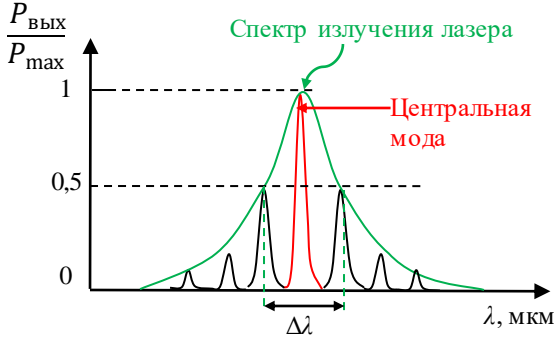


Рис. 1.9. Нормированная спектральная характеристика лазерного диода

Наибольшую интенсивность имеет мода с максимальным коэффициентом усиления  $(\alpha - \beta)$ , находящаяся в центре спектра излучения диода (рис. 1.9). Длина волны центральной моды

$$\lambda_q = 2 \frac{l}{q}, \quad (1.5)$$

а длины волн соседних мод

$$\lambda_{q+1} = 2 \frac{l}{q+1} \text{ и } \lambda_{q-1} = 2 \frac{l}{q-1}.$$

В случае одномодового режима генерации и распространения излучения в воздухе излучается плоская электромагнитная волна типа ТЕМ (TEM-wave, Transverse Electromagnetic Wave) или близкая к ней. Такая электромагнитная волна является волной *поперечной* (Trans Versed Wave, shear wave). Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  ортогональны, лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, и образуют с *волновым вектором*  $\vec{k}$

правую тройку векторов (рис. 1.10). Направление волнового вектора  $\vec{k}$  определяет направление распространения волны.

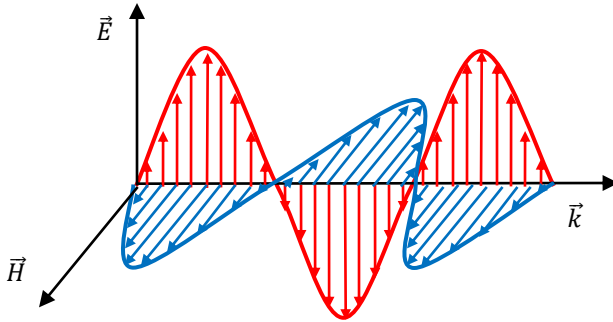


Рис. 1.10. Структура плоской электромагнитной волны

Волна, распространяющаяся вдоль оси  $OZ$ , запишется как

$$\begin{aligned} \vec{E}_x &= E_0 \cos(2\pi vt - kz - \varphi_0); \\ \vec{H}_y &= H_0 \cos(2\pi vt - kz - \varphi_0), \end{aligned} \quad (1.6)$$

где  $k$  – модуль волнового вектора, или волновое число,  $k = 2\pi/\lambda$ .

Соотношение амплитуд напряжённостей  $E$  и  $H$

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H. \quad (1.7)$$

Плотность потока энергии электромагнитной волны  $S$  (интенсивность света  $I \sim S$ )

$$S = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E^2. \quad (1.8)$$

*Волновой фронт* (волновая поверхность) – геометрическое место точек с одинаковой фазой волны.

В *плоской волне* волновой фронт – плоскость, перпендикулярная направлению распространения.

Простейшие формы волнового фронта – сферическая (у волны от точечного источника), *плоская* (у волны от удалённого источника). Волновой вектор  $\vec{k}$  перпендикулярен к поверхности волнового фронта в каждой его точке.

Луч – линия, нормальная к волновому фронту. Под направлением распространения волн понимают направление лучей.

Монохроматическим называют свет с одной определённой длиной волны.

Когерентными называют излучения с одинаковыми длинами волн и постоянной разностью их фаз.

Малая ширина лазерной линии  $\Delta\lambda$  (на уровне половинной мощности) определяет монохроматичность лазерного излучения.

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

Время когерентности  $\tau_{\text{ког}}$  определяется шириной полосы лазерного излучения  $\Delta f$ :

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta f}, \quad \Delta f = \frac{1}{\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (1.9)$$

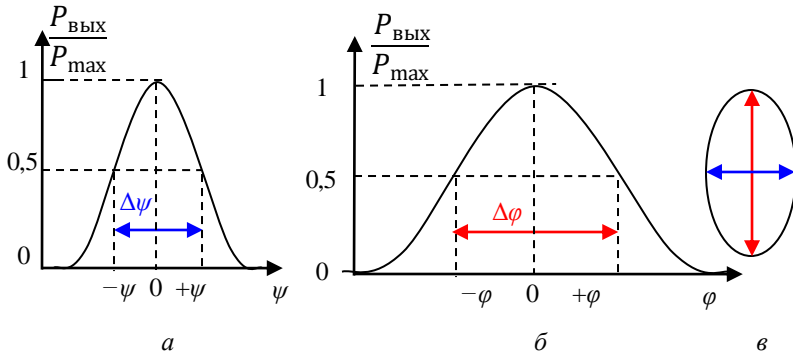


Рис. 1.11. Диаграмма направленности излучения лазерного диода в плоскости: *a* – горизонтальной; *б* – вертикальной, *в* – поперечное сечение пучка излучения

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

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

На рис. 1.11 показана диаграмма направленности излучения инжекционного лазерного диода, структура которого изображена на рис. 1.6. Угловую ширину луча (углы дифракции на выходе излучения из узкой полоски активного слоя в воздух) на уровне половинной мощности можно оценить по формулам:

в горизонтальной плоскости –  $\Delta\psi \approx \lambda/\delta$ ,

в вертикальной плоскости –  $\Delta\varphi \approx \lambda/d$ ,

где  $d$  – толщина активного слоя,  $\delta$  – ширина активного слоя.

Типичные значения  $\Delta\psi \sim 10$  градусов,  $\Delta\varphi \sim \frac{1\text{мкм}}{2\text{мкм}}$  радиан  $\sim \frac{1\text{мкм}}{2\text{мкм}} \frac{360}{2\pi} \sim 30$  градусов. Таким образом, пучок имеет эллиптическое сечение (см. рис. 1.11, в). Угловая расходимость генерируемого излучения является существенным недостатком инжекционных лазеров, затрудняет его ввод в оптическое волокно с малой числовой апертурой. Уменьшение расходимости требует применения специальных фокусирующих устройств.

В оптических волокнах могут распространяться волны, имеющие продольные составляющие электрических и/или магнитных полей:

- электрические E, или поперечно-магнитные ТМ, в которых электрическая составляющая вдоль оси волновода не равна нулю;
- магнитные H, или поперечно-электрические ТЕ, в которых магнитная составляющая вдоль оси волновода не равна нулю;
- гибридные, или смешанные, в которых векторы электрического и магнитного полей имеют отличные от нуля поперечные и продольные составляющие.

В гибридной волне HE-типа структуру поля определяет в основном продольная составляющая магнитного поля и волна ближе по структуре к H-волне. Соответственно, в гибридной волне EH-типа структуру поля определяет в основном продольная составляющая электрического поля и волна ближе по структуре к E-волне.



К буквам E (TM), H (TE), HE и EH добавляют индексы  $m$  и  $n$ , например  $E_{mn}$ ,  $H_{mn}$ ,  $HE_{mn}$  или  $EH_{mn}$ . Индекс  $m$  (радиальный) соответствует количеству полных изменений поля по диаметру, а индекс  $n$  (угловой) – числу полных изменений поля по окружности, как показано на рис. 1.12.

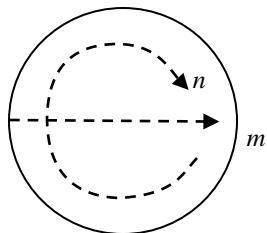


Рис. 1.12. Индексы типов волн:  $m$  (радиальный),  $n$  (угловой)

Для волн класса  $E_{mn}$  или  $TM_{mn}$  индексы  $m = 1, 2, 3, \dots$  и  $n = 1, 2, 3, \dots$ , т. е. имеют любые целые положительные значения, при этом ни один из индексов не может принимать значение, равное нулю.

Для волн  $H_{mn}$  или  $TE_{mn}$  один из коэффициентов  $m$  или  $n$  может принимать значение, равное нулю. Ввиду этого возможны волны  $H_{m0}$  или  $H_{0n}$ .

Основным типом волн (фундаментальной модой) в одномерных оптических волокнах является поперечно-электрическая волна  $TE_{11}$ . В литературе данный тип волны часто называют волной типа  $HE_{11}$ . Структуры её электрических и магнитных полей в поперечном и двух продольных сечениях волновода приведены на рис. 1.13, *a*, *b* и *в* соответственно. На рисунке также показано направление распространения волны  $\vec{v}_\phi$ .

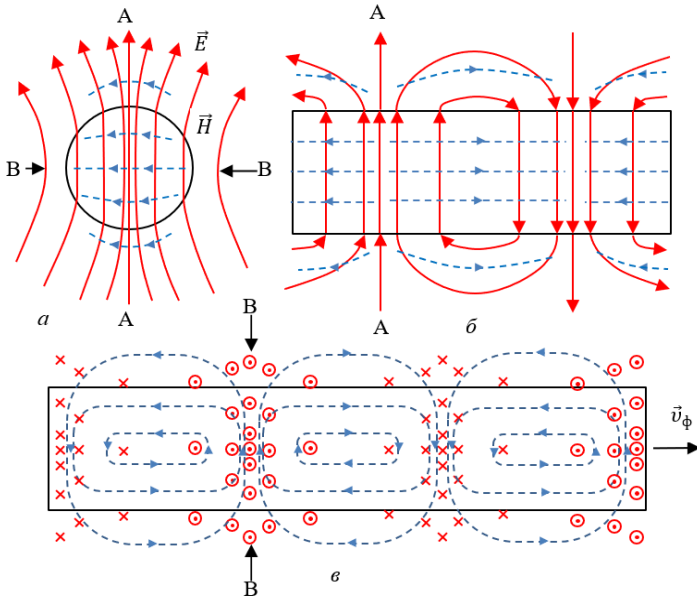


Рис. 1.13. Структура поперечно-электрической волны  $TE_{11}$  в оптическом волноводе в сечении:  $a$  – поперечном  $A \leftrightarrow A, B \leftrightarrow B$ ;  $b$  – продольном  $A \leftrightarrow A$ ;  $c$  – продольном  $B \leftrightarrow B$

Излучение полупроводниковых лазеров обычно частично поляризовано. Пучок излучения можно условно разделить на две основных компоненты, одна из которых поляризована линейно, а вторая – не поляризована и не имеет постоянного соотношения фаз с линейно поляризованной компонентой.

Степень поляризации излучения  $q$  можно определить по формуле

$$q = I_{\text{лин}} / I_{\text{полн}}, \quad (1.10)$$

где  $I_{\text{лин}}$  – интенсивность линейно поляризованной компоненты излучения;  $I_{\text{полн}}$  – полная интенсивность излучения.

Коэффициент полезного действия (КПД) лазера

$$\eta = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{эл}}} \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

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

### 1.3. Порядок выполнения работы

*Цель работы:* изучить основные оптические характеристики полупроводникового инжекционного лазера с длиной волны 976 нм.

#### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Марка	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналог	1
3. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999CHP 3CN01351DL или аналог	1
4. Драйвер лазерного диода	Maiman MBL1500	1

## Задания

### 1. Исследование ватт-амперной характеристики лазерного диода

1.1. Собрать установку для измерения оптической мощности лазерного диода (рис. 1.14).

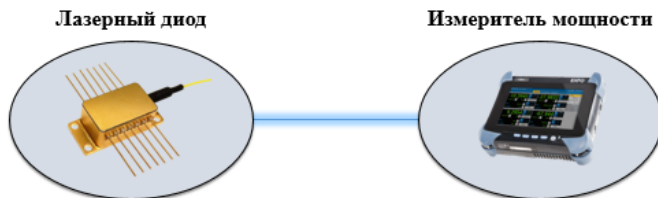


Рис. 1.14. Схема установки для измерения оптической мощности лазерного диода

Для этого:

– Достать модуль твердотельного инжекционного лазера 1999СНР из укладки (рис. П4.1) и убедиться, что на его выходе имеется оптоволокну с коннектором FC. При отсутствии приварить коннектор под руководством инженера.

– Установить модуль твердотельного инжекционного лазера 1999СНР в контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500.

**Внимание! Установку производить с заземляющим браслетом.**

– Подключить модуль инжекционного лазера 1999СНР к измерителю оптической мощности EXFO LTB-1. Произвести настройку измерителя оптической мощности (см. прил. 2): рабочая длина волны 976,00 нм.

– Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (прил. 1). Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения показан на рис. 1.15.

1.2. Установить значение тока накачки 10,0 мА. Зафиксировать величину оптической мощности. Результат занести в табл. 1.1.

1.3. Повысить значение тока накачки на 10,0 мА. Величину оптической мощности занести в табл. 1.1.

1.4. Повторять п. 1.3. до достижения тока накачки 200,0 мА.

1.5. Отключить подачу тока накачки. Выключить измеритель мощности.



Рис. 1.15. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

Таблица 1.1  
Результаты измерения ватт-амперной характеристики полупроводникового инжекционного лазера

Номер измерения	Напряжение на лазерном диоде $U$ , В	Ток накачки $I_n$ , мА	Электрическая мощность $P_{эл}$ , мВт	Оптическая мощность излучения, $P_{опт}$ , мВт	КПД, %
1		10			...
2		20			...
...		...			...
20		200			...

1.6. Построить график зависимости оптической мощности от тока накачки  $P_{опт} = P_{опт}(I)$ . Определить пороговый ток накачки  $I_{пор}$ .

1.7. Для каждой силы тока накачки рассчитать коэффициент полезного действия лазера

$$\eta = \frac{P_{опт}}{P_{эл}} \cdot 100\%. \quad (1.12)$$

1.8. Построить график зависимости  $\eta = \eta(I)$ .

## 2. Исследование зависимости спектральных характеристик полупроводникового инжекционного лазера от тока накачки

2.1. Собрать установку для измерения спектра излучения полупроводникового лазера (рис. 1.16).

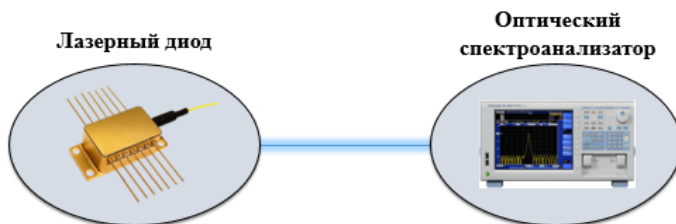


Рис. 1.16. Схема установки для измерения спектра излучения лазерного диода

Для этого:

– Подключить модуль твердотельного инжекционного лазера 1999CHP к анализатору оптического спектра Yokogawa AQ6370D.

– Произвести настройку анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D согласно прил. 3. Установить основные настройки согласно табл. 1.2.

Таблица 1.2  
Настройки анализатора оптического спектра

RESOLUTION	0,1	Разрешение дифракционных решеток
START WL	975	Начальная длина волны
STOP WL	976,5	Конечная длина волны
SAMPLING INTERVAL	0,002	Шаг записи данных
SENS / MODE	HIGH 3	Режим чувствительности измерения
LEVEL	LINEIR	Режим отображения в линейной шкале мощности

2.2. Установить значение тока накачки 10,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

2.3. Установить значение тока накачки 50,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

2.4. Установить значение тока накачки 100,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

2.5. Установить значение тока накачки 150,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

2.6. Отключить подачу тока накачки.

2.6.1. Построить нормированный на единицу график зависимости оптической мощности (1.13) от длины волны, при различных токах накачки (рис.1.17).

$$P_{\text{норм}} = \frac{P_i}{P_{\text{max}}}. \quad (1.13)$$

2.6.2. Построить линию, соответствующую половине оптической мощности, как показано на рис. 1.17.

2.6.3. Графически определить  $\lambda_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{max}}$ . Вычислить ширину спектра по формуле

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}. \quad (1.14)$$

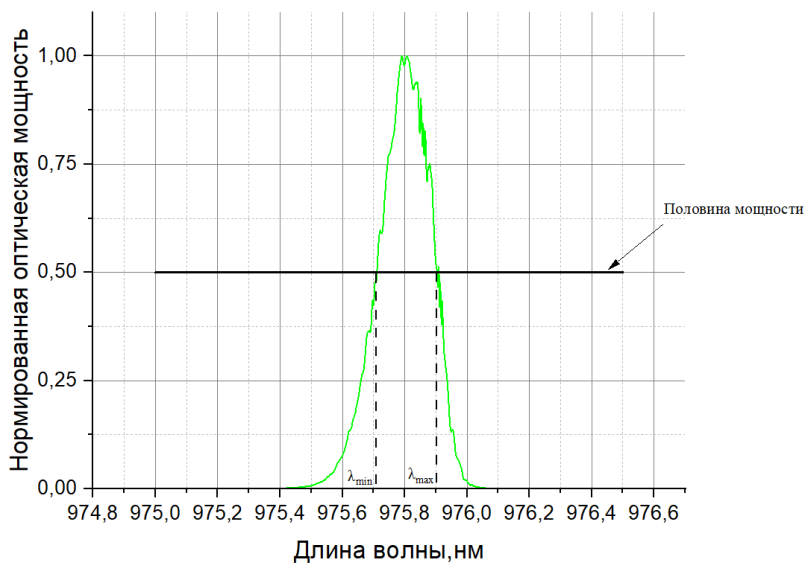


Рис. 1.17. Пример графического измерения ширины спектра излучения лазерного диода

2.7. По семейству нормированных спектров (рис. 1.18) построить график зависимости ширины спектра излучения от тока накачки  $\Delta\lambda = \Delta\lambda(I_n)$ .

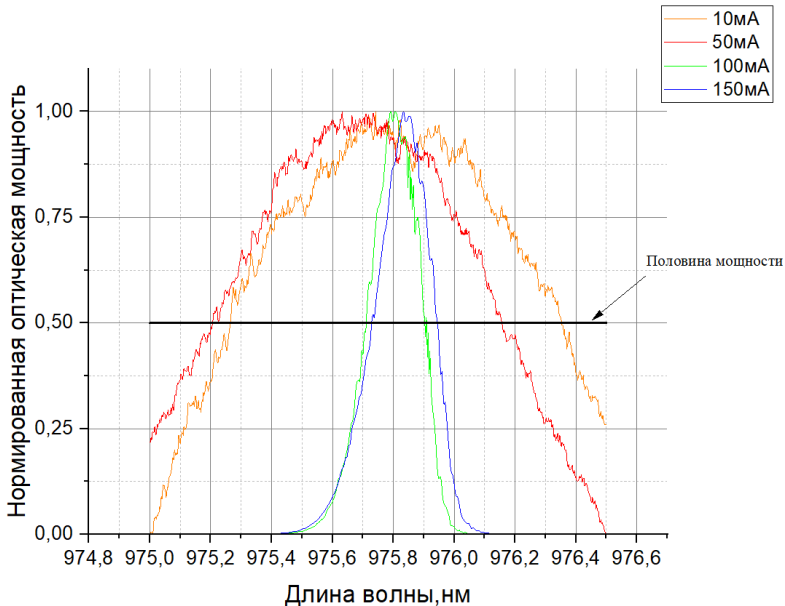


Рис. 1.18. Нормированные спектры излучения лазерного диода при различных токах накачки

### 3. *Исследование зависимости спектральных характеристик полупроводникового инжекционного лазера от температуры*

3.1. На драйвере лазерного диода установить ток накачки 100 мА, температуру диода установить 16 °С. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

3.2. Повысить температуру диода на 2 °С. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на спектроанализатор.

3.3. Повторять п. 3.2 до достижения температуры 34 °С.

3.4. Отключить подачу тока накачки. Выключить оптический спектроанализатор.

3.5. Построить графики зависимости оптической мощности от длины волны с учетом температуры лазерного диода (рис. 1.19).



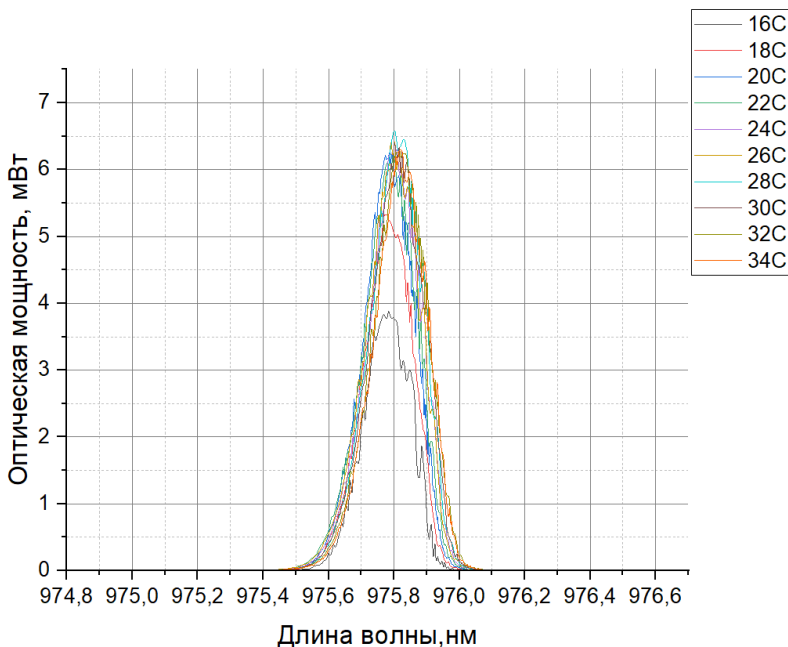


Рис. 1.19. Спектры излучения лазерного диода при различных температурах

3.6. Определить центральную длину волны каждого спектра по формуле

$$\lambda_{\text{ц}} = \frac{\sum_i^N (\lambda_i P_i)}{\sum_i^N P_i}. \quad (1.15)$$

3.7. Построить график зависимости смещения центральной длины волны от температуры, как показано на рис. 1.20. Определить константу пропорциональности смещения длины волны от температуры по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T}. \quad (1.16)$$

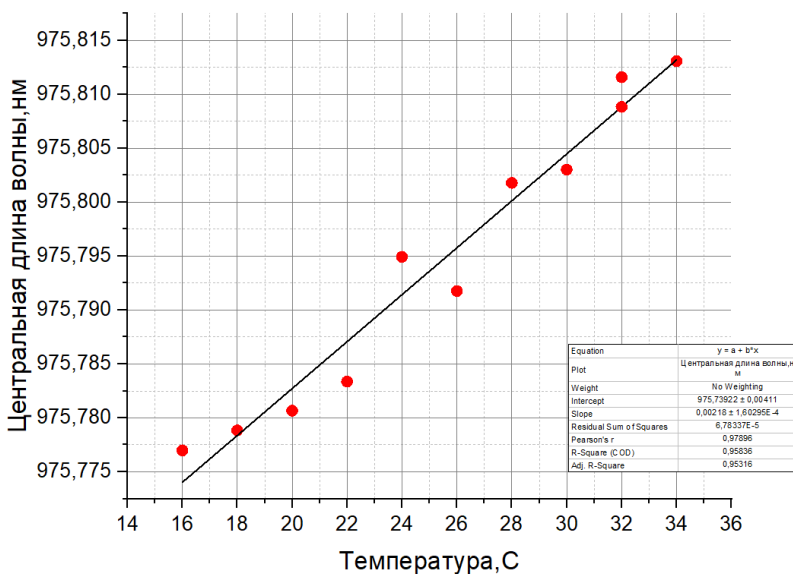


Рис. 1.20. График зависимости смещения центральной длины волны излучения лазерного диода от температуры

### 1.4. Контрольные вопросы

1. Определение понятия «лазер». Схема и основные элементы его конструкции.
2. Заселённость энергетических уровней: нормальная и инверсная.
3. Полупроводниковые материалы твердотельных инжекционных лазеров.
4. Конструкции зеркал и распределение энергии в открытых лазерных резонаторах.
5. Конструкция и принцип работы полупроводникового инжекционного лазера.
6. Основные статические характеристики лазерного диода: вольт-амперная и ватт-амперная.
7. Зависимость спектральных характеристик от температуры.

8. Основные характеристики лазерного излучения: моды продольные и поперечные, когерентность временная и пространственная, диаграммы направленности, поляризация.

9. В каких устройствах применяют полупроводниковые инжекционные лазерные диоды? В чем их преимущества?

10. Объясните полученные результаты исследования лазерного модуля.

### Список литературы

1. User Guide. EXFO LTB-1, 388 p. URL: <http://www.EXFO.com> (accessed 21 March 2022).

2. Измеритель оптической мощности FTBx-1750. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exforus.ru/products/index.php?id=168> (дата обращения: 21.09.2024).

3. Спектрометр для инфракрасного диапазона ASP-IR-1.7 [Электронный ресурс]. URL: <http://avesta.ru/product/asp-ir-spektrometr-dlya-infrakrasnogo-diapazona/> (дата обращения: 21.09.2024).

4. Контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maimanelectronics.com/product-page/benchttop-laser-diode-tec-controller-mbl1500a> (дата обращения: 21.09.2024).

5. Модуль твердотельного инжекционного лазера 1999CHP [Электронный ресурс]. URL: [https://3sptechnologies.com/data/File/3SP\\_DS\\_1999CHP\\_RCLIMA\\_DSH00000017\\_14.pdf](https://3sptechnologies.com/data/File/3SP_DS_1999CHP_RCLIMA_DSH00000017_14.pdf) (дата обращения: 21.09.2024).

6. Вольхин И. Л., Ажеганов А. С. Квантовая и полупроводниковая электроника: лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2018. 168 с.

7. Hermite-Gaussian Modes. URL: [http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M01\\_C03/co/Contenu\\_13.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C03/co/Contenu_13.html) (accessed 03 October 2024).

## Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДИОДА

### 2.1. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов

*Люминесценция* – нетепловое свечение вещества, атомы которого приведены в возбужденное состояние. В светодиодах люминесценция возникает в результате спонтанных излучательных переходов электронов с уровней энергии дна зоны проводимости на уровни энергии верха валентной зоны. 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.

#### 2.1.1. Взаимодействие излучения с атомами активной среды суперлюминесцентного диода

Активной средой в суперлюминесцентном диоде является тонкий слой собственного полупроводника  $i$ -типа. На рис. 2.1 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, см. рис. 2.1, *a*), испустив при этом квант света (фотон):

$$h\nu \geq W_c - W_v. \quad (2.1)$$

Спонтанные переходы являются случайными и не зависят от внешнего электромагнитного поля. Излучённые фотоны имеют случайные 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, сопровождающееся переходом электрона с уровня  $W_v$  на уровень  $W_c$  (см. рис. 2.1, б).

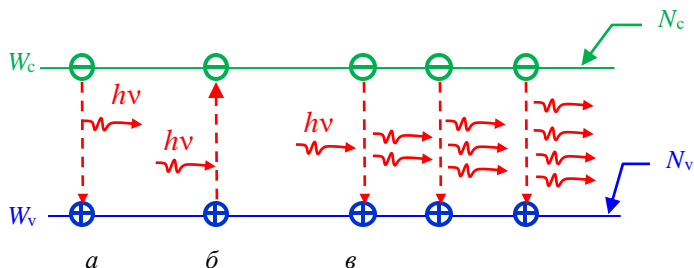


Рис. 2.1. Процессы в активной среде суперлюминесцентного диода:  
 а – спонтанное излучение; б – поглощение;

В основе работы суперлюминесцентных диодов лежит явление индуцированного излучения. Фотон с  $\nu \geq (W_c - W_v)/h$  может инициировать процесс рекомбинации электрона и дырки. Испускаемый фотон 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  $\alpha$  называют коэффициентом усиления активной среды. В реальной активной среде происходит также обратный процесс – снижение интенсивности излучения в результате поглощения, а также при рассеянии на неоднородностях, примесях, которые переводят энергию излучения в тепло. Эти потери учтены в коэффициенте  $\beta$ . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде определяется как

$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x]. \quad (2.2)$$

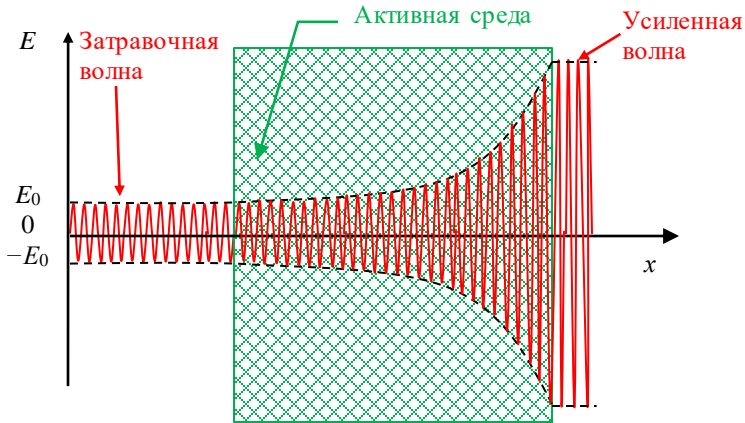


Рис. 2.2. Увеличение амплитуды световой волны в активной среде

Если  $\alpha > \beta$ , то интенсивность световой волны растет при прохождении через активную среду. На рис. 2.2 показано экспоненциальное увеличение амплитуды падающей световой (затравочной) волны при прохождении через активную среду:

$$E = E_0 \exp(\alpha' x), \quad (2.3)$$

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

### 2.1.2. 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.

## 2.2. Конструкция и принцип работы суперлюминесцентного диода

Схема суперлюминесцентного диода (СЛД, *англ.* SLD – Superluminescent Diode) представлена на рис. 2.3. Как и в полупроводниковом лазере (см. рис. 1.2), в нем имеются активная среда 1 (слой собственного полупроводника) и система накачки, образованная полупроводниками *n*- и *p*-типа 2 и 3. Однако у СЛД отсутствуют отражающие зеркала. Для уменьшения отражения от задней поверхности 4 её скашивают под углом  $10^\circ$  либо на неё наносят слой поглощающего материала. Со стороны оптического выхода нанесено просветляющее покрытие 5. Такая схема обеспечивает условие однократного прохождения оптического излучения через активную среду. Затрабочная волна 6, возникшая в результате спонтанного излучения, проходя через активную среду, усиливается, и на выходе СЛД возникает излучение высокой интенсивности 7. Ввиду этого мощность выходного излучения СЛД выше, чем у светодиода, и сравнима с мощностью ана-

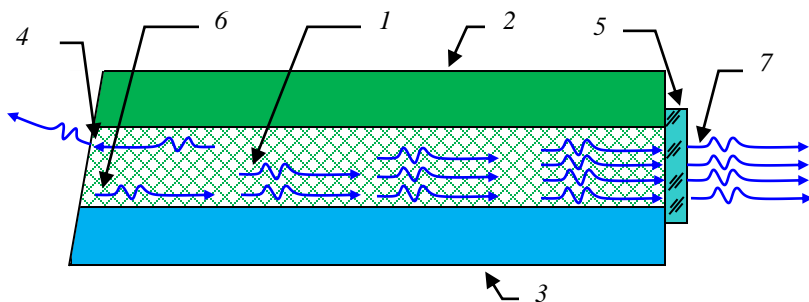


Рис. 2.3. Схема суперлюминесцентного диода: 1 – активная среда; 2 – полупроводник *n*-типа; 3 – полупроводник *p*-типа; 4 – скошенная грань; 5 – просветляющее покрытие; 6 – затравочная волна; 7 – когерентное излучение

логичного инжекционного полупроводникового лазера. Её типичная величина составляет десятки–сотни милливатт, существуют и более мощные СЛД. Для увеличения выходной мощности длину активной среды СЛД увеличивают по сравнению с длиной активной среды инжекционных лазеров.

### 2.3. Основные характеристики суперлюминесцентных диодов

Суперлюминесцентный диод занимает промежуточное положение между светодионом и полупроводниковым инжекционным лазером. Исходя из этого, для удобства сравнения ниже приведены нормированные основные характеристики трёх типов светоизлучающих приборов.

Все три прибора изготавливаются на основе многослойных гетероструктур и имеют вольт-амперные характеристики (ВАХ), качественно похожие на ВАХ полупроводникового диода (рис. 2.4).

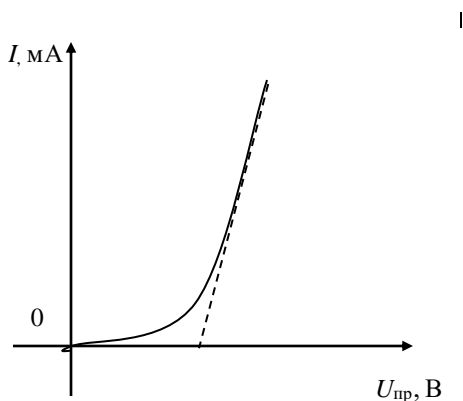


Рис. 2.4. Вольт-амперная характеристика светодиода

Зависимости мощности излучения от прямого тока через  $p$ - $n$ -переход (ватт-амперные характеристики) представлены на



рис. 2.5. Они имеют качественные отличия. Начальный участок у светодиода близок к прямой линии (см. рис. 2.5, а), а у суперлюминесцентного диода – нелинеен (см. рис. 2.5, б). Лазер при малых токах накачки работает в светодиодном режиме, а при превышении величины порогового тока  $I_{\text{пор}}$  переходит в лазерный (см. рис. 2.5, в).

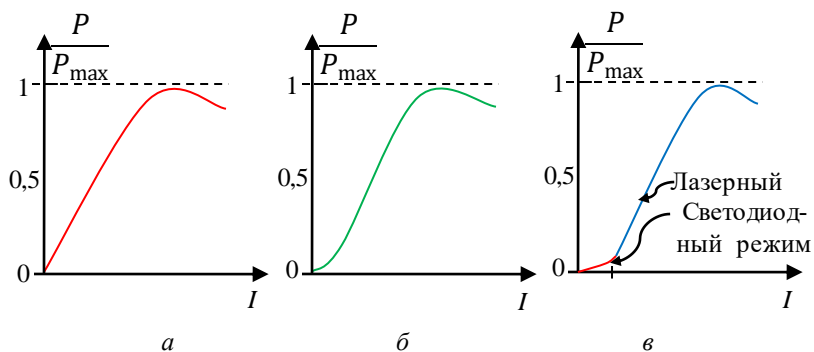


Рис. 2.5. Нормированные ватт-амперные характеристики:  
 а – светодиода, б – суперлюминесцентного диода,  
 в – одномодового инжекционного лазера

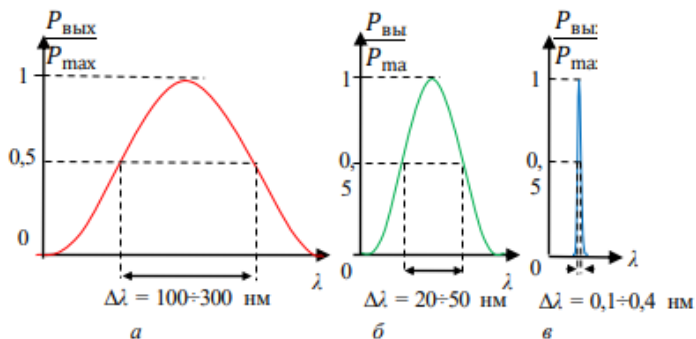


Рис. 2.6. Нормированные спектральные характеристики:  
 а – светодиода, б – суперлюминесцентного  
 диода, в – одномодового инжекционного лазера

На рис. 2.6, *а, б, в* приведены нормированные спектральные полосы излучения светодиода, суперлюминесцентного диода и инжекционного лазера соответственно. Типичная ширина спектральной полосы излучения суперлюминесцентного диода составляет 20÷50 нм, что примерно на порядок меньше, чем у светодиода, и на один-два порядка больше, чем у лазера.

## **2.4. Основные характеристики модулей полупроводниковых суперлюминесцентных диодов, исследуемых в работе**

### ***2.4.1. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906***

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906 предназначен для генерации оптического излучения с широкой спектральной полосой на центральной длине волны 960÷990 нм с низким уровнем шума. Выходная оптическая мощность – 5 мВт. Его внешний вид показан в прил. 5 на рис. П5.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П5.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.

### ***2.4.2. Модуль суперлюминесцентного лазерного диода EXS210007-01***

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210007-01 предназначен для применения в области медицины, навигации, оптической сенсорики, метрологии, а также для научных целей. Выходная оптическая мощность – до 10 мВт на длине волны 1070 нм. Его внешний вид показан в прил. 6 на рис. П6.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П6.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.

### **2.4.3. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01**

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 предназначен для применения в области медицины, навигации, оптической сенсорики, метрологии, а также для научных целей. Выходная оптическая мощность – до 15 мВт на длине волны 1550 нм. Его внешний вид показан в прил. 7 на рис. П7.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П7.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.

### **2.4.4. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602**

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 предназначен для генерации оптического излучения с широкой спектральной полосой излучения на центральной длине волны 1590÷1630 нм с низким уровнем шума. Выходная оптическая мощность – 5 мВт. Его внешний вид показан в прил. 8 на рис. П8.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П8.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.

## **2.5. Порядок выполнения работы**

*Цель работы:* изучить основные оптические характеристики суперлюминесцентного диода.

### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Марка	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналог	1

Наименование	Марка	Кол-во
3. Суперлюминесцентный диод 1550 нм	Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01	1
4. Суперлюминесцентный диод 970 нм	Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906	1
5. Суперлюминесцентный диод 1610 нм	Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602	1
6. Суперлюминесцентный диод 1070 нм	Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210007-01	1
7. Драйвер лазерного диода	Maiman MBL1500	1

**Примечание:**

По заданию преподавателя студентам будет предложено исследовать один из четырех модулей полупроводниковых суперлюминесцентных диодов IPSDD0906; EXS210007-01; EXS210108-01; IPSDD1602 или несколько в зависимости от целей изучения дисциплины «Физические основы лазерной техники».

Ниже приведены задания по изучению основных характеристик модулей полупроводниковых суперлюминесцентных диодов на примере EXS210108-01 с центральной длиной волны 1550 нм. Исследования остальных моделей проводятся аналогично.

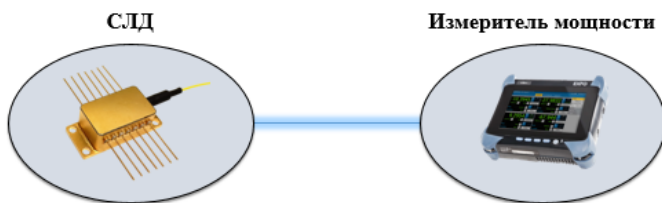


Рис. 2.7. Схема измерения оптической мощности суперлюминесцентного диода

### Задания

#### 1. Исследование ватт-амперной характеристики суперлюминесцентного диода

1.1. Собрать установку для измерения оптической мощности суперлюминесцентного диода, представленную на рис. 2.7:

Для этого:

- Достать модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 из укладки (см. рис. П8.1) и убедиться, что на его выходе имеется оптоволокно с коннектором FC. При его отсутствии приварить коннектор под руководством инженера.

- Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 в контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500.

**Внимание! Установку производить с заземляющим браслетом.**

- Подключить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 к измерителю оптической мощности EXFO LTB-1. Произвести настройку измерителя оптической мощности (см. прил. 2), рабочая длина волны – 1550,00 нм.

- Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1). Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения приведён на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

1.2. Установить значение тока накачки 10,0 мА. Зафиксировать величину оптической мощности. Результат занести в табл. 2.1.

1.3. Повысить значение тока накачки на 10,0 мА. Величину оптической мощности занести в табл. 2.1.

1.4. Повторять п.1.3 до достижения тока накачки 200,0 мА.

1.5. Отключить подачу тока накачки. Выключить измеритель мощности.

1.6. Построить график зависимости оптической мощности от тока накачки  $P_{\text{опт}} = P_{\text{опт}}(I)$ .

1.7. Для каждого значения силы тока накачки рассчитать коэффициент полезного действия суперлюминесцентного диода:

$$\eta = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{эл}}} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Таблица 2.1

Результаты измерения ватт-амперной характеристики полупроводникового суперлюминесцентного диода

Номер измерения	Напряжение на модуле СЛД $U$ , В	Ток накачки $I_n$ , мА	Электрическая мощность $P_{\text{эл}}$ , мВт	Оптическая мощность излучения, $P_{\text{опт}}$ , мВт	КПД $\eta$ , %
1		10			...
2		20			...
...		...			...
20		200			...

## **2. Исследование зависимости спектральной характеристики суперлюминесцентного диода от тока накачки**

2.1. Собрать установку для измерения оптических спектров суперлюминесцентного диода, как показано на рис. 2.9.

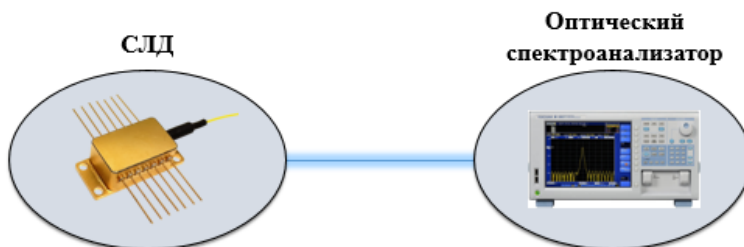


Рис. 2.9. Схема измерения оптических спектров суперлюминесцентного диода

Для этого:

– Подключить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 к анализатору оптического спектра Yokogawa AQ6370D.

– Произвести настройку анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D согласно прил. 3. Установить основные настройки согласно табл. 2.2.

2.2. Установить значение тока накачки 10,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D.

2.3. Установить значение тока накачки 50,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор спектра.

2.4. Установить значение тока накачки 100,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор спектра.

2.5. Установить значение тока накачки 150,0 мА. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор спектра.

Таблица 2.2

Настройки анализатора оптического спектра

RESOLUTION	0,5	Разрешение дифракционных решёток
START WL	1450	Начальная длина волны
STOP WL	1630	Конечная длина волны
SAMPLING INTERVAL	0,1	Шаг записи данных
SENS/MODE	HIGH 2	Режим чувствительности измерения
LEVEL	LINEIR	Режим отображения в линейной шкале мощности

2.6. Отключить подачу тока накачки.

2.7. Построить графики зависимости оптической мощности от длины волны при различных токах накачки.

2.8. Построить линии, соответствующие половине оптической мощности как показано на рис. 2.10.

2.9. Графически определить  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$ . Вычислить ширины спектров по формуле  $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$

2.10. Построить нормированные на единицу графики зависимости оптической мощности от длины волны (рис. 2.11).

2.11. Определить ширины измеренных спектров по уровню половинной мощности (рис. 2.10).

2.12. Построить график зависимости ширины спектра излучения от тока накачки  $\Delta\lambda = \Delta\lambda(I_{\text{н}})$ .



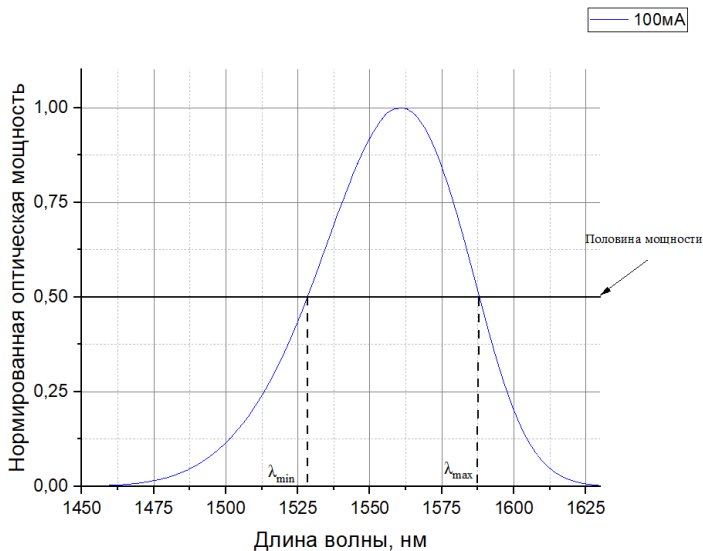


Рис. 2.10. Пример графического измерения ширины спектра излучения СЛД

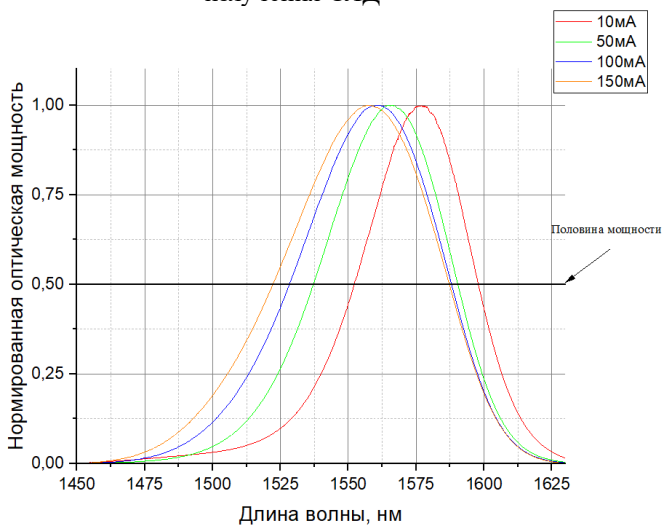


Рис. 2.11. Нормированные спектры излучения суперлюминесцентного диода при различных токах накачки

### 3. Исследование зависимости спектральных характеристик суперлюминесцентного диода от температуры

3.1. На драйвере лазерного диода установить ток накачки 100 мА, температуру диода установить 16 °С. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор спектра.

3.2. Повысить температуру диода на 2 °С. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на анализатор спектра.

3.3. Повторять п. 3.2 до достижения температуры 34 °С.

3.4. Отключить подачу тока накачки. Выключить оптический спектроанализатор.

3.5. Построить графики зависимости оптической мощности от длины волны при разных температурах суперлюминесцентного диода (рис. 2.12).

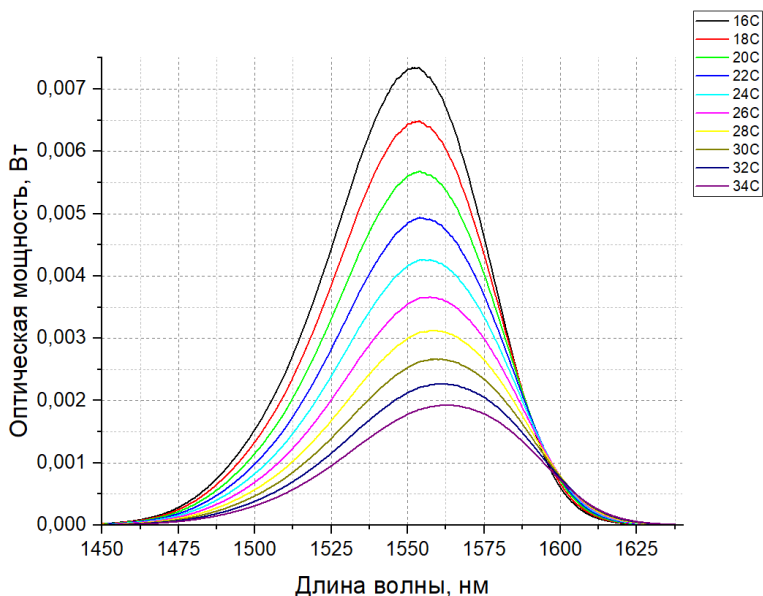


Рис. 2.12. Спектры излучения суперлюминесцентного диода при различных температурах

3.6. Определить центральную длину волны каждого спектра по формуле

$$\lambda_{\text{ц}} = \frac{\sum_i^N (\lambda_i P_i)}{\sum_i^N P_i}. \quad (2.6)$$

3.7. Построить график зависимости смещения центральной длины волны от температуры (рис. 2.13). Определить константу пропорциональности смещения длины волны от температуры по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T}. \quad (2.7)$$

3.8. Построить график зависимости оптической мощности суперлюминесцентного диода на центральной длине волны от температуры.

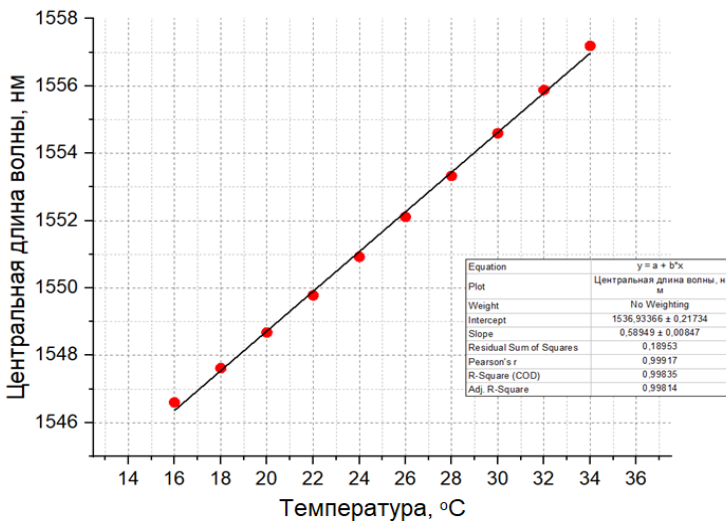


Рис. 2.13. График зависимости смещения длины волны СЛД от температуры

## 2.6. Контрольные вопросы

1. Определение понятия «суперлюминесцентный диод». Схема и основные элементы его конструкции.
2. Заселённость энергетических уровней: нормальная и инверсная.
3. Конструкция и принцип работы суперлюминесцентного диода.
4. Основные статические характеристики суперлюминесцентного диода: вольт-амперная и ватт-амперная.
5. Зависимость спектральных характеристик от тока инжекции.
6. Зависимость спектральных характеристик от температуры.
7. Сравнить статические характеристики (вольт-амперные и ватт-амперные) полупроводниковых суперлюминесцентных диодов и инжекционных полупроводниковых лазеров (получены в работе 1).
8. Сравнить спектральные характеристики полупроводниковых суперлюминесцентных диодов и инжекционных полупроводниковых лазеров (получены в работе 1).
9. В каких устройствах применяют суперлюминесцентные диоды? В чем их преимущества?
10. Объясните полученные результаты исследования суперлюминесцентного диода.

## Список литературы

1. User Guide. EXFO LTB-1, 388 p. URL: <http://www.EXFO.com> (accessed 21 March 2022).
2. Измеритель оптической мощности FTBx-1750. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exforus.ru/products/index.php?id=168> (дата обращения: 21.03.2024).
3. Спектрометр для инфракрасного диапазона ASP-IR-1.7 [Электронный ресурс]. URL: <http://avesta.ru/product/asp-ir-spektrometr-dlya-infrakrasnogo-diapazona/> (дата обращения: 21.03.2024).
4. Контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.maimanelectronics.com/product-page/benchtop-laser-diode-tec-controller-mbl1500a> (дата обращения: 21.03.2024).

5. Модуль суперлюминесцентного диода IPSDD1602 [Электронный ресурс]. URL: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1647769148&tld=ru&lang=en&name=IPSDD1602\\_Rev\\_1.51.pdf&text=IPSDD1602&url=https%3A%2F%2Fwww.inphenix.com%2Fpro%2FSuperluminescent%2520Diodes%2520Device%2FIPSDD1602\\_Rev\\_1.51.pdf&lr=50&mime=pdf&l10n=ru&sign=171c5a54bb9fd7e4c4f78aed9b7861fb&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1647769148%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DIPSDD1602\\_Rev\\_1.51.pdf%26text%3DIPSDD1602%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.inphenix.com%2Fpro%2FSuperluminescent%252520Diodes%252520Device%2FIPSDD1602\\_Rev\\_1.51.pdf%26lr%3D50%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D171c5a54bb9fd7e4c4f78aed9b7861fb%26keyno%3D0%26nosw%3D1](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1647769148&tld=ru&lang=en&name=IPSDD1602_Rev_1.51.pdf&text=IPSDD1602&url=https%3A%2F%2Fwww.inphenix.com%2Fpro%2FSuperluminescent%2520Diodes%2520Device%2FIPSDD1602_Rev_1.51.pdf&lr=50&mime=pdf&l10n=ru&sign=171c5a54bb9fd7e4c4f78aed9b7861fb&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1647769148%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DIPSDD1602_Rev_1.51.pdf%26text%3DIPSDD1602%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.inphenix.com%2Fpro%2FSuperluminescent%252520Diodes%252520Device%2FIPSDD1602_Rev_1.51.pdf%26lr%3D50%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D171c5a54bb9fd7e4c4f78aed9b7861fb%26keyno%3D0%26nosw%3D1) (дата обращения: 21.03.2022).

6. Вольхин И. Л., Ажеганов А. С. Квантовая и полупроводниковая электроника: лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2018. 168 с.

7. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 559 с.

### Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Слово *лазер* (laser) является аббревиатурой от полного английского названия Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что переводится на русский как «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 русскоязычной литературе наряду с термином «лазер» используется эквивалентное название «*оптический квантовый генератор*» (ОКГ).

*Волоконный лазер* – это лазер, активная среда и резонатор которого являются элементами оптического волокна.

*Когерентность* – согласованность нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени и при сложении колебаний получается колебание той же частоты.

*Спонтанное излучение* – самопроизвольное излучение фотона возбужденным атомом или молекулой при переходе электрона на более низкий энергетический уровень. Поскольку спонтанные переходы являются случайными и невязанными, возникшее излучение является некогерентным, некогерентным, имеет случайные направления поляризации и распространения.

*Вынужденное (индуцированное) излучение* – принудительное излучение фотона возбужденным атомом или молекулой под действием внешней электромагнитной волны. При этом частота, направление распространения, фаза и поляризация вторичной волны совпадают с характеристиками исходного излучения.

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

*Суперлюминесценция* – люминесценция веществ с инверсной заселённостью энергетических уровней, вызванная усилением спонтанного излучения за счёт вынужденного испускания. Это явление наблюдается в суперлюминесцентных диодах и лазерах. Излучение когерентное и направленное.

### 3.1. Основные элементы лазера

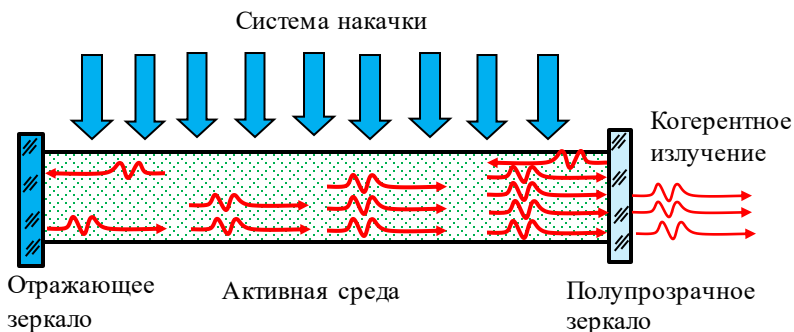


Рис. 3.1. Схема лазера

Необходимыми элементами любого лазера являются (рис. 3.1):

- *активная среда* – рабочее вещество, в котором создается неравновесная инверсная заселённость энергетических уровней;
- *система накачки* – система, в которой энергия внешнего воздействия преобразуется во внутреннюю энергию *активной среды*;

- *оптический резонатор* – элемент, в котором происходит интенсивное взаимодействие излучения с веществом активной среды, в результате которого внутренняя энергия активной среды преобразуется в энергию когерентного светового излучения. Оптический резонатор – объём между отражающим и полупрозрачным зеркалами. Полупрозрачное зеркало обеспечивает вывод когерентного светового излучения во внешнюю среду.

Рабочее вещество лазера, в котором происходит преобразование энергии накачки в энергию когерентного излучения, может находиться в одном из четырех агрегатных состояний вещества: твёрдом, жидком, газообразном или плазменном. Основными

способами накачки энергии являются оптическая и электрическая, существуют и другие, реже используемые виды, такие как газодинамическая, химическая, ядерная и т. д. Лазерное излучение может быть непрерывным или импульсным. В настоящей работе будут рассмотрены твердотельные волоконные лазеры с оптической накачкой непрерывного излучения.

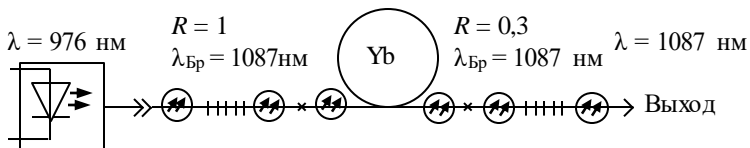
Волноводный характер распространения излучения накачки и генерируемого когерентного светового излучения сводит к минимуму потери на излучение через боковые поверхности волокна. Относительно большая площадь поверхности по сравнению с размером сердцевины обеспечивает эффективный теплоотвод, что препятствует образованию «тепловой линзы».

Мощность непрерывного лазерного излучения может в зависимости от конструкции находиться в интервале от единиц нановатт до десятков киловатт и более [2].

### 3.2. Устройство волоконного иттербиевого лазера

Схема волоконного иттербиевого лазера с накачкой в сердцевину активного оптического волокна представлена на рис. 3.2. Излучение полупроводникового лазерного диода накачки с длиной волны  $\lambda = 976$  нм поступает в германо-силикатную сердцевину оптического волокна и через левую по рисунку волоконную брэгговскую решётку ( $\lambda_{бр} = 1087$  нм) направляется в катушку активного волокна, в которой практически полностью поглощается активными ионами  $Yb^{3+}$ . Зеркалами резонатора служат волоконные брэгговские решётки с длиной волны отражения  $\lambda_{бр} = 1087$  нм. Левая по рисунку с коэффициентом отражения  $R = 1$  выполняет функцию «глухого» зеркала, а правая с  $R = 0,3$  – полупрозрачного. Возникшее когерентное излучение поступает на выход волоконного лазера. Для удобства использования в схеме предусмотрено два оптических коннектора: входной для ввода излучения накачки и выходной для вывода лазерного излучения. Катушка активного оптического волокна сварена с волоконными брэгговскими решётками.





Условные графические обозначения:

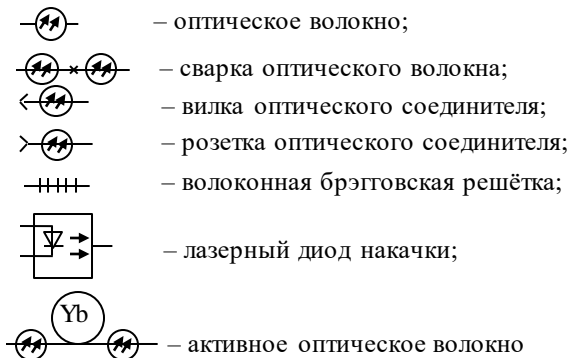


Рис. 3.2. Структурная схема волоконного лазера

Основным элементом (активной средой) волоконного иттербиевого лазера является одномодовое оптическое волокно из кварцевого стекла с диаметром сердцевины  $3\div 9$  мкм, которая легирована примесью, повышающей показатель преломления, например  $\text{GeO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и редкоземельными ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Его продольное сечение показано на рис. 3.3. Длина активного волокна зависит от концентрации иттербия в сердцевине и обычно составляет от 5 до 8 м.

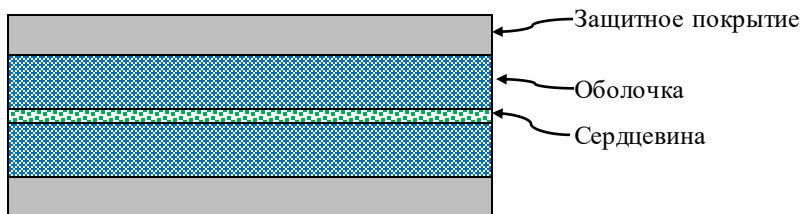


Рис. 3.3. Структура активного оптического волокна

Верхний предел концентрации ионов иттербия определяется возникновением эффекта кооперативной ап-конверсии – явления, при котором возможно образование кластеров из двух и более ионов иттербия, в результате чего происходит обмен энергией – один переходит в состояние с ещё большей энергией, а второй безызлучательно релаксирует на основной уровень. Средняя концентрация ионов иттербия составляет  $10^{17} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Сердцевина окружена оболочкой из чистого кварца диаметром 125 мкм. Защитное покрытие волокна диаметром 250 мкм имеет большой коэффициент преломления и эффективно выводит из оболочки постороннее излучение.

Лазеры с отражателями на основе брэгговских решёток находят наибольшее распространение как в случае накачки в сердцевину, так и при накачке в оболочку. Брэгговские решётки могут быть записаны непосредственно на активном волокне, однако для унификации волоконно-оптических компонентов они записываются на стандартных пассивных волокнах, которые затем свариваются с активным волокном.

### **3.3. Физические основы работы иттербиевого волоконного лазера непрерывного излучения**

Особенностью иттербиевых лазеров является относительно простая схема энергетических уровней – расщепление двух энергетических уровней  ${}^2F_{7/2}$  и  ${}^2F_{5/2}$  на семь подуровней  $a-g$ , как показано на рис. 3.4.

Спектр поглощения оптического волокна, сердцевина которого легирована ионами иттербия, имеет четыре линии поглощения на длинах волн 900, 950, 976 и 1037 нм. На рис. 3.5,  $a$  представлен нормированный на единицу спектр поглощения указанного волокна производства ПАО «ПНППК», использованного в настоящей работе. В связи с особенностями технологии изготовления, предполагающей введение легирующих элементов, в спектре поглощения наблюдаются два пика на длинах волн 923 нм (это слившиеся широкие линии 900 и 950 нм) и 976 нм, а линия поглощения на длине волны 1037 нм в нем практически отсутствует, так как заселённость подуровня  $b$  много меньше заселённости нижнего уровня  $a$ .



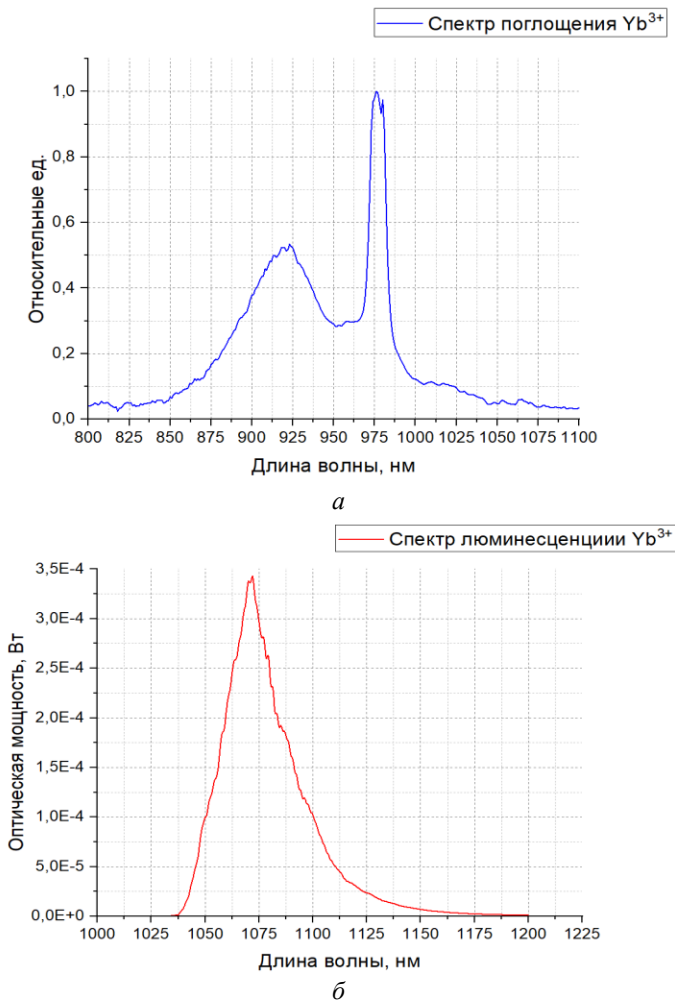


Рис. 3.5. Спектры оптического волокна, легированного иттербием:  
*а* – поглощения; *б* – люминесценции

На рис. 3.5, *б* видно, что максимум поглощения соответствует длине волны 976 нм, при этом электрон переходит с подуровня *a* на метастабильный *e*, как показано на рис. 3.4. Накопившиеся на метастабильном уровне электроны создают инверсную заселённость энергетического уровня *e* относительно подуровней

$b, c, d$ . Переход на подуровень  $d$  сопровождается люминесценцией на 1090 нм. Затем следует переход электрона на подуровень  $a$  и последующая накачка на  $e$ , и цикл повторяется.

Физические процессы, происходящие при переходах с уровня энергии  $e$  на уровень  $d$ , представлены на рис. 3.6.

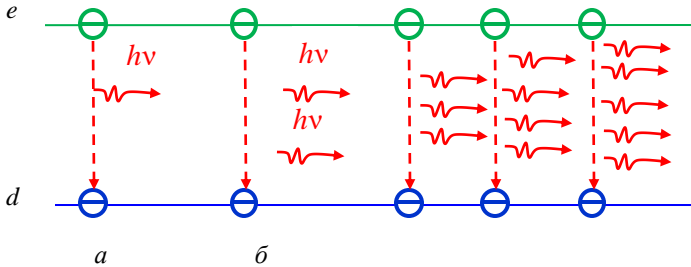


Рис. 3.6. Процессы в активной среде оптического волокна:  $a$  – спонтанное излучение;  $б$  – стимулированное излучение

Электрон может самопроизвольно (спонтанно) перейти с метастабильного уровня  $e$  в более низкое энергетическое состояние, на подуровень  $d$ , а также на подуровни  $b, c$  и основной уровень  $a$  (см. рис. 3.6), испустив при этом квант света (фотон) с энергией

$$h\nu = W_e - W_d, \quad (3.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота излучения,  $W_e$  – энергия метастабильного уровня  $e$ ,  $W_d$  – энергия подуровня  $d$ .

В основе работы лазеров лежит явление *вынужденного (индуцированного) излучения*. Фотон с энергией, согласно формуле (3.1), может инициировать процесс следующего перехода, при этом вновь возникший фотон идентичен инициирующему фотону (они имеют одинаковые частоту, фазу, поляризацию и направление распространения), как показано на рис. 3.6.

При распространении световой волны вдоль активной среды интенсивность индуцированного излучения экспоненциально возрастает:

$$I = I_0 \exp(\alpha x), \quad (3.2)$$

где  $I$  – интенсивность индуцированного излучения,  $I_0$  – интенсивность исходного излучения,  $\alpha$  – коэффициент усиления активной среды,  $x$  – длина активной среды.

В реальной активной среде происходит также обратный процесс – снижение интенсивности излучения в результате поглощения, а также при рассеянии на неоднородностях или примесях, которые преобразуют энергию излучения в тепло. Эти потери учитывают в коэффициенте  $\beta$ . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде определяется как

$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x]. \quad (3.3)$$

Если  $\alpha > \beta$ , то интенсивность световой волны растет при прохождении через активную среду. На рис. 3.7 показано экспоненциальное увеличение амплитуды падающей затравочной световой волны при прохождении через активную среду:

$$E = E_0 \exp(\alpha'x), \quad (3.4)$$

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

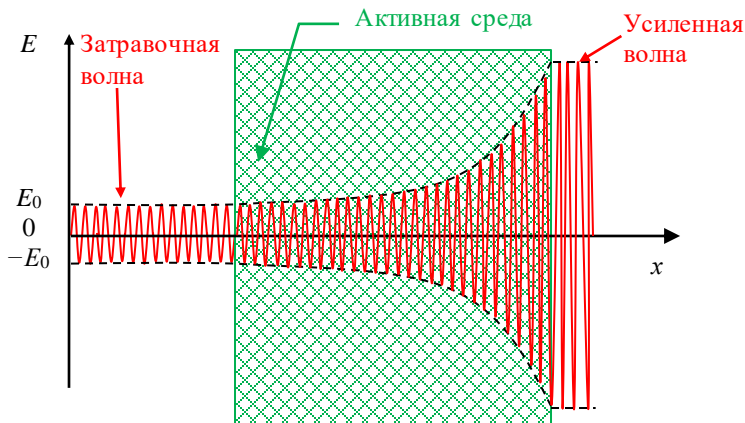


Рис. 3.7. Усиление световой волны в активной среде

Как и в любом генераторе, для работы лазера необходимо выполнить два условия: условие баланса амплитуд и условие баланса фаз. Энергия, поступающая от источника излучения накачки в активную среду оптического резонатора за единицу

времени, равна энергии лазерного излучения плюс энергии потерь в самом резонаторе.

Условие баланса фаз обеспечивается подбором длины оптического резонатора  $L$  таким образом, чтобы на частоте индуцированного излучения внутри него возникала стоячая волна:

$$L = \frac{\lambda_q}{2} q, \quad (3.5)$$

где  $\lambda_q$  – длина волны лазерного излучения в резонаторе,  $q$  – число полуволин излучения, укладываемых на длине резонатора,  $q = 1, 2, 3 \dots 1000 \dots$  (в волоконном лазере это очень большое число).

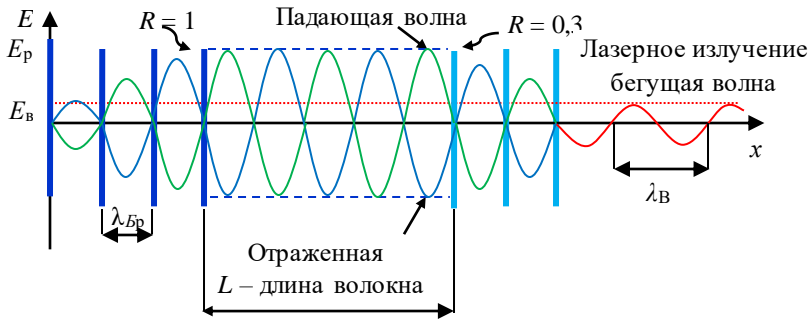


Рис. 3.8. Распределение напряжённости электрического поля  $E$

На рис. 3.8 показано распределение напряжённости электрического поля в активной среде оптического резонатора  $E_p$  (стоячая волна) и в сердцевине оптического волокна, приваренного к волокну с брэгговской решёткой  $E_v$  (бегущая волна). Также указаны коэффициенты отражения  $R_1$  и  $R_2$  от брэгговских решёток. Напряжённость электрического поля прошедшей волны

$$E_v = (1 - R_2)E_p. \quad (3.6)$$

На рис. 3.9 и 3.10 показаны изменения мощности и спектра излучения при переходе из режима спонтанного излучения в лазерный режим с увеличением светового потока накачки  $\Phi_n$ . Видно, что при потоке выше порогового  $\Phi_{n,пор}$  мощность излучения резко возрастает, а спектр излучения сужается.

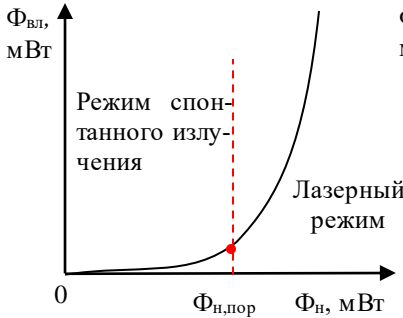


Рис. 3.9. Зависимость мощности лазерного излучения  $\Phi_{вл}$  от светового потока накачки  $\Phi_n$

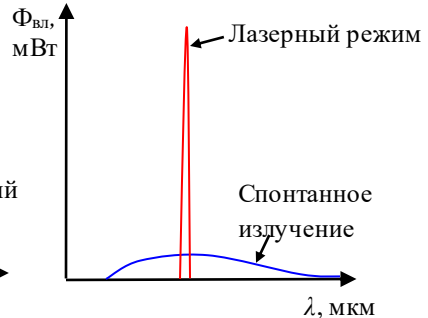


Рис. 3.10. Изменение спектра излучения при переходе из режима спонтанного излучения в лазерный режим

Волоконные иттербиевые лазеры непрерывного излучения отличаются высоким КПД (до 80 %) и простотой накачки. Перестройка лазера по частоте возможна в небольших пределах за счёт изменения шага брэгговской решётки при нагревании.

### 3.4. Основные характеристики лазерного излучения

*Ширина спектральной линии* лазерного источника излучения измеряется на уровне половинной мощности:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta \lambda, \quad (3.7)$$

где  $c$  – скорость света,  $\lambda_0$  – центральная длина волны излучения,  $\Delta \lambda$  – *ширина спектра излучения* на уровне половинной мощности,  $\Delta \lambda = \lambda_n - \lambda_v$ , где  $\lambda_n$  и  $\lambda_v$  – нижняя и верхняя длины волн, соответствующие падению мощности излучения в два раза.

*Время когерентности*  $\tau_{\text{ког}}$  определяется шириной спектральной линии  $\Delta f$ :

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta f} = \frac{\lambda_0^2}{c \Delta \lambda}. \quad (3.8)$$

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



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

*Угловая расходимость* – угловая мера увеличения диаметра профиля излучения, внутри которого распространяется исходная мощность, по мере удаления от оптической апертуры.

*Мощность оптического непрерывного излучения (поток излучения) волоконного лазера*

$$\Phi_{\text{вл}} = \frac{dW_{\text{вл}}}{dt}, \quad (3.9)$$

где  $dW_{\text{вл}}$  – энергия лазерного излучения,  $dt$  – время измерения энергии излучения.

*Мощность оптического излучения (поток излучения) лазерного диода накачки*

$$\Phi_{\text{лд}} = \frac{dW_{\text{лд}}}{dt}, \quad (3.10)$$

где  $dW_{\text{лд}}$  – энергия излучения лазерного диода накачки,  $dt$  – время измерения энергии излучения.

*Дифференциальная квантовая эффективность волоконного лазера* – коэффициент преобразования оптической энергии накачки в энергию лазерного излучения:

$$\eta_d = \frac{dW_{\text{вл}}}{dW_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{d\Phi_{\text{вл}}}{d\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\%, \quad (3.11)$$

где  $dW_{\text{лд}}$  – оптическая энергия накачки.

*Коэффициент полезного действия волоконного лазера*

$$\eta_{\text{вл}} = \frac{\Phi_{\text{вл}}}{P_{\text{лд}}} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

где  $\Phi_{\text{вл}}$  – мощность лазерного излучения, а  $P_{\text{лд}}$  – электрическая мощность, потребляемая системой оптической накачки – лазерным диодом.

Наибольшей выходной мощностью среди волоконных лазеров обладают иттербиевые лазеры, дифференциальная квантовая эффективность которых достигает ~80 %, а КПД преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения ~20 %.

«Мировой рекорд» по мощности непрерывного волоконного лазера на 2023 год составляет около 100 кВт (фирма IPG). Но выходное излучение такого лазера не является одномодовым. В одномодовых же лазерах достигнута выходная мощность ~10 кВт [4].

### 3.5. Порядок выполнения работы

*Цель работы:* исследовать основные характеристики волоконного лазера непрерывного излучения.

#### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Примечание	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналог	1
3. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999СНР 3СN01351DL, контроллер MBL1500 или аналоги	1
4. Комплект волоконных решёток Брэгга (ВБР)*	– 1087 нм, коэффициент отражения –100 %; – 1087 нм, коэффициент отражения –30 %	1
5. Волокно, легированное Yb <sup>3+</sup> (активное волокно)	Длина 6 м	1
6. Соединительный оптический кабель одномодовый	Коннектор FC/APC	2
7. Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт, скальватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	1
* Допускается применение комплекта волоконных решёток Брэгга с другой длиной волны отражения, находящейся в диапазоне люминесценции активного волокна.		

## Задания

### 1. Измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода накачки

1.1. Собрать установку для измерения оптической мощности лазерного диода накачки, как показано на рис. 3.11.

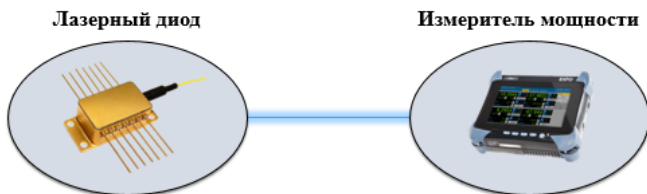


Рис. 3.11. Схема измерения оптической мощности

Для этого:

– установить модуль полупроводникового лазерного диода 1999СНР 3СN01351DL в контроллер лазерных диодов согласно инструкции на оборудование (прил. 4);

– соединить измеритель оптической мощности EXFO-LTV-1 и модуль лазерного диода одномодовым оптическим кабелем.

1.2. Включить контроллер лазерных диодов согласно инструкции в прил. 1. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и тока диода  $I_{\text{лд}} = 0,0\text{ mA}$ .

1.3. Включить измеритель оптической мощности EXFO-LTV-1 согласно инструкции в прил. 2, выбрав значение спектральной чувствительности фотоприемника, соответствующее диапазону излучения лазерного диода.

1.4. Повысить значение тока лазерного диода на  $10\text{ mA}$ . Зафиксировать значения тока  $I_{\text{лд}}$ , напряжения  $U_{\text{н}}$  и оптической мощности  $\Phi_{\text{лд}}$ . Результаты записать в табл. 3.1.

1.5. Повторять измерения по п. 1.4 до достижения тока лазерного диода  $280\text{ mA}$ .

1.6. Отключить подачу тока лазерного диода.

1.7. Разобрать схему измерения.

Таблица 3.1

Результаты измерения ватт-амперной характеристики  
лазерного диода накачки

Но- мер изме- ре- ния	Ток ла- зерного диода $I_{\text{лд}}$ , мА	Напряже- ние $U_{\text{лд}}$ , В	Электриче- ская мощ- ность $P_{\text{лд}}$ , мВт	Оптическая мощность лазерного диода $\Phi_{\text{лд}}$ , мВт	КПД лазер- ного диода $\eta_{\text{лд}} =$ $= \frac{\Phi_{\text{лд}}}{P_{\text{лд}}} \cdot 100\%$
1	20				
2	40				
...	...				
$N$	280				

## 2. Измерение оптической мощности волоконного $\text{Yb}^{3+}$ лазера

2.1. Собрать установку для измерения оптической мощности волоконного лазера (рис. 3.12).

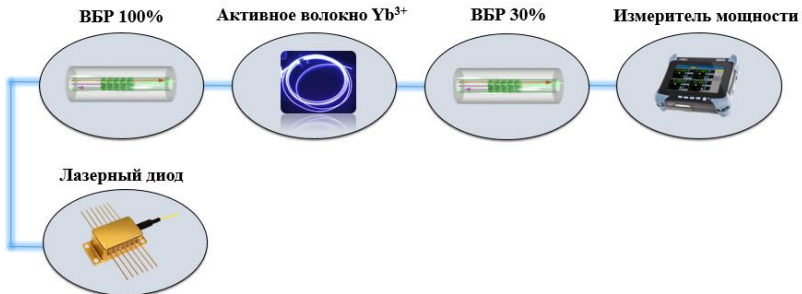


Рис. 3.12. Схема измерения оптической мощности

Для этого:

– установить модуль полупроводникового лазерного диода в контроллер лазерных диодов согласно инструкции на оборудование (прил. 1);

– последовательно соединить лазерный диод, волоконную брэгговскую решётку (БРП) с коэффициентом отражения 100 %, активное волокно, легированное иттербием, длиной 6 м, БРП с коэффициентом отражения 30 %;

– соединить измеритель оптической мощности EXFO-LTV-1 и выходное волокно из ВБР 30 % оптическим кабелем одномодовым.

2.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода 25 °С и тока диода  $I_{\text{лд}} = 0,0$  А.

2.3. Включить измеритель оптической мощности, выбрав значение спектральной чувствительности фотоприемника, соответствующее диапазону излучения иттербия.

2.4. Повысить значение тока лазерного диода накачки на 10 мА. Зафиксировать значения тока  $I_{\text{лд}}$  и оптической мощности волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}}$ . Результаты записать в табл. 3.2.

2.5. Повторять измерения по п. 2.4 до достижения тока лазерного диода 280 мА.

2.6. Отключить подачу тока лазерного диода накачки.

Таблица 3.2

Результаты измерения оптической мощности  
волоконного лазера

Номер измерения	Ток лазерного диода накачки $I_{\text{лд}}$ , мА	Оптическая мощность диода накачки $\Phi_{\text{лд}}$ , мВт	Оптическая мощность волоконного лазера $\Phi_{\text{вл}}$ , мВт	КПД волоконного лазера $\eta_{\text{лд}} = \frac{\Phi_{\text{вл}}}{P_{\text{лд}}} \cdot 100\%$
1	10			
2	20			
...	...			
N	280			

**Примечание:** значения оптической мощности диода накачки, зависящие от тока, приведены в табл. 3.1.

### 3. Измерение спектральных характеристик излучения волоконного $\text{Yb}^{3+}$ лазера

3.1. Собрать установку для измерения спектра излучения волоконного лазера, как показано на рис. 3.13.

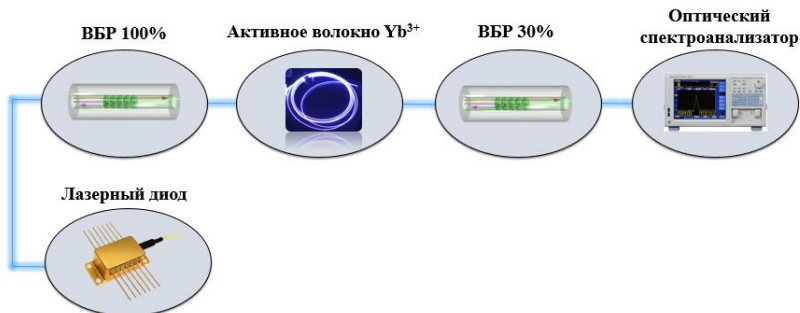


Рис. 3.13. Схема измерения спектра излучения волоконного лазера

Для этого:

– заменить измеритель мощности в схеме измерения оптической мощности на оптический спектроанализатор.

3.2. Включить оптический спектроанализатор согласно инструкции в прил. 3. Установить основные настройки согласно табл. 3.3.

Таблица 3.3

Основные настройки спектроанализатора

Настройка	Значение	Единица измерения
START WL	900	Начальная длина волны, нм
STOP WL	1200	Конечная длина волны, нм
RESLN	0,5	Разрешение измерений
AVG	1	Время усреднения
SMPL	2001	Количество выбранных точек для измерений
HIGH 1	–	Чувствительность измерения

3.3. Установить такое значение тока накачки лазерного диода, чтобы оптическая мощность волоконного лазера не превышала 100 мВт. Руководствоваться табл. 3.2.

3.4. Сохранить спектр излучения волоконного лазера согласно инструкции на спектроанализатор.

### Обработка результатов измерений

Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т. д.), с целью описания и графического представления зависимостей.

1. Обработка результатов измерения ватт-амперной характеристики лазерного диода накачки

По результатам измерений, приведенным в табл. 3.1:

– рассчитать потребляемую лазерным диодом электрическую мощность  $P_{\text{лд}} = U_{\text{лд}} I_{\text{лд}}$ . Результаты записать в табл. 3.1;

– построить вольт-амперную характеристику лазерного диода  $I_{\text{лд}} = I_{\text{лд}}(U_{\text{лд}})$ ;

– построить ватт-амперную характеристику лазерного диода  $\Phi_{\text{лд}} = \Phi_{\text{лд}}(I_{\text{лд}})$ , из которой определить пороговый ток  $I_{\text{пор,лд}}$  начала лазерного излучения, как показано на рис. 3.14;

– для всех токов рассчитать коэффициент полезного действия лазерного диода:

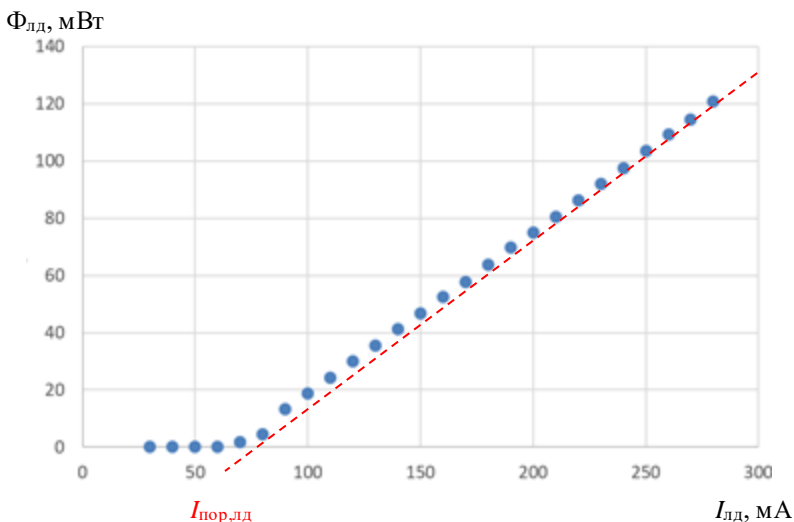


Рис. 3.14. Зависимость мощности излучения лазерного диода  $\Phi_{\text{лд}}$  от тока  $I_{\text{лд}}$

$$\eta_{\text{лд}} = \frac{\Phi_{\text{лд}}}{P_{\text{лд}}} 100 \%. \quad (3.13)$$

Результаты записать в табл. 3.1;

– построить график зависимости КПД от тока лазерного диода  $\eta_{\text{лд}} = \eta_{\text{лд}}(I_{\text{лд}})$ .

2. Обработка результатов измерения оптической мощности волоконного  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера

По данным табл. 3.2 построить ватт-амперную характеристику волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}} = \Phi_{\text{вл}}(I_{\text{лд}})$ , как показано на рис. 3.15.

Из графика определить:

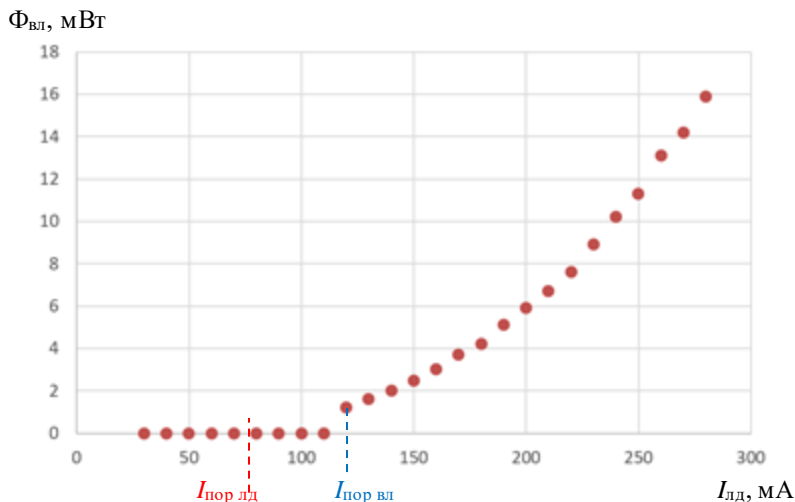


Рис. 3.15. Зависимость мощности излучения волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}}$  от тока лазерного диода накачки  $I_{\text{лд}}$

– пороговый ток  $I_{\text{пор вл}}$  начала лазерного излучения волоконного лазера;

– для всех токов лазерного диода накачки рассчитать коэффициент полезного действия волоконного лазера:

$$\eta_{\text{вл}} = \frac{\Phi_{\text{вл}}}{P_{\text{лд}}} 100 \%. \quad (3.14)$$

Результаты записать в табл. 3.2;



- построить график зависимости КПД волоконного лазера от тока лазерного диода накачки  $\eta_{\text{вл}} = \eta_{\text{вл}}(I_{\text{лд}})$ ;
- построить график зависимости мощности излучения волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}}$  от оптической мощности накачки  $\Phi_{\text{лд}}$ , как показано на рис. 3.16;

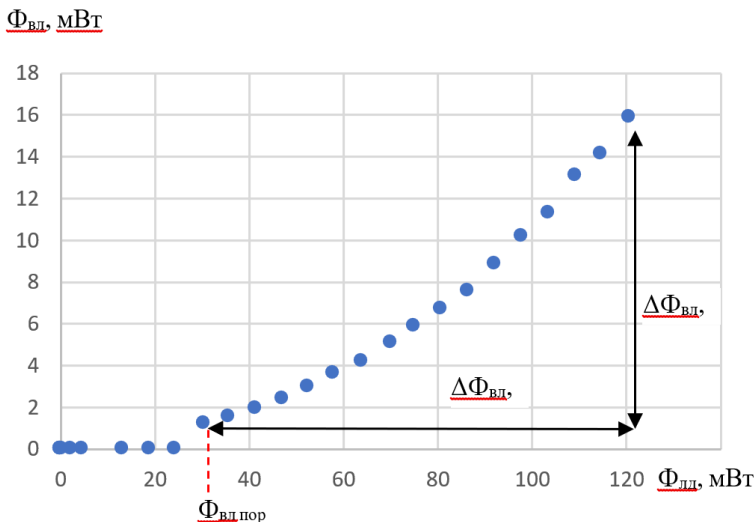


Рис. 3.16. Зависимость мощности излучения волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}}$  от оптической мощности накачки  $\Phi_{\text{лд}}$

- определить коэффициент преобразования энергии оптического излучения накачки в энергию излучения волоконного лазера (дифференциальную эффективность волоконного лазера):

$$\eta_d = \frac{\Delta\Phi_{\text{вл}}}{\Delta\Phi_{\text{лд}}} 100 \%. \quad (3.15)$$

### 3. Обработка спектральной характеристики излучения волоконного лазера

Используя сохраненный спектр излучения волоконного лазера, построить график зависимости оптической мощности волоконного лазера  $\Phi_{\text{вл}}$  от длины волны излучения  $\lambda$  и определить:

3.1. Центральную длину волны  $\lambda_c$  излучения волоконного лазера по формуле

$$\lambda_c = \frac{\sum_i^N (\lambda_i \Phi_{\text{вл}i})}{\sum_i^N \Phi_{\text{вл}i}}$$

Величины, входящие в формулу, приведены на рис. 3.17.

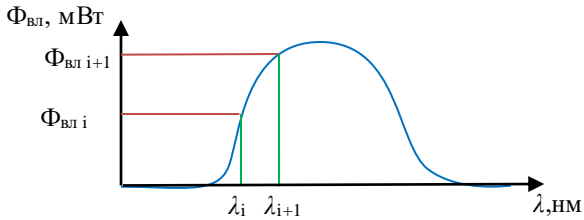


Рис. 3.17. Метод определения центральной длины волны

3.2. Ширину спектра  $\Delta\lambda$  по уровню половины мощности по формуле

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$$

Методика определения величин  $\lambda_{\text{max}}$  и  $\lambda_{\text{min}}$  представлена на рис. 3.18.

Результаты занести в табл. 3.4.

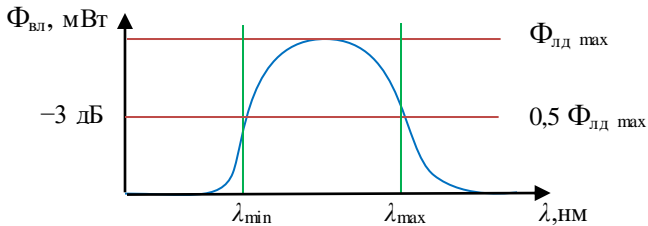


Рис. 3.18. Метод определения ширины спектра по уровню половины мощности

Таблица 3.4

Основные характеристики спектра излучения волоконного иттербиевого лазера

Квантовый генератор	Центральная длина волны $\lambda_c$ , нм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ , нм
Волоконный Yb <sup>3+</sup> лазер		

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Принципиальная схема волоконного лазера.
2. Физический смысл использования резонатора в лазере.
3. Какое явление лежит в основе работы лазера?
4. Из чего состоит активное волокно иттербиевого лазера?
5. Спектры поглощения и люминесценции иттербиевого волокна.
6. Основные характеристики непрерывного лазерного излучения.
7. Какие преимущества имеет иттербиевый лазер по сравнению с другими лазерами микронного и полуторомикронного диапазонов?
8. Сравнить КПД лазерного диода накачки с КПД волоконного лазера.
9. Почему отличаются пороговые токи лазерной генерации диода накачки и волоконного лазера?
10. Области применения иттербиевых лазеров.
11. Объяснить полученные результаты.

### Список литературы

1. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Single-Mode Fiber Lasers URL: <https://www.ipgphotonics.com/products/lasers/industrial-cw-fiber-lasers/industrial-single-mode-lasers> (дата обращения: 17.12.2024).
3. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 559 с.

4. Laser welding of AlSi12 and S355 with a 10 kW single mode fiber laser / Drechsel, Jan & Schille, Joerg & Hanelt, Kevin & Loeschner, Udo // Journal of Laser Applications. 2019. No. 31. 022415. DOI: [10.2351/1.5096139](https://doi.org/10.2351/1.5096139) (accessed 25 May 2024).

5. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков [и др.]; Изд. центр УлГУ. Ульяновск, 2012. 184 с.

6. Квантовая и оптическая электроника: лабораторный практикум. Ч. 2. Оптическая электроника: учеб.-метод. пособие / И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. П. Булатов, Н. А. Мальков, М. А. Ветошкин, К. А. Овчинников; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2022. 120 с.

7. Active Components Pump Laser Modules 1999CHP. Data Sheet. URL: [www.symphotony.com](http://www.symphotony.com) (accessed 25 May 2024).

8. Курков А. С., Дианов Е. М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 10. С. 881–900.

## Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА С ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ

### 4.1. Физические принципы работы волоконного импульсного лазера

*Пассивный оптический затвор* – элемент устройства, обеспечивающий перекрытие и пропускание излучения в течение определённого времени, определяемого пороговой энергией насыщения среды.

*Добротность резонатора* – безразмерный коэффициент, определяемый как отношение начальной энергии, запасённой в резонаторе, к энергии, выходящей из резонатора за один период колебаний.

*Модуляция добротности* – метод, при котором намеренно уменьшается добротность резонатора на время накопления энергии в активной среде. В это время лазер не излучает, и создаётся высокий уровень инверсной заселённости энергетических уровней активной среды. Затем добротность резко увеличивается на несколько порядков, и вся энергия превращается в энергию короткого мощного импульса лазерного излучения.

С целью повышения пиковой мощности лазера был реализован принципиально отличающийся от стационарного режима генерации излучения импульсный режим. Импульсные лазеры могут генерировать одиночные или регулярно повторяющиеся во времени импульсы.

Получить регулярно повторяющиеся импульсы лазерного излучения можно несколькими способами: используя лазер в непрерывном режиме и манипулируя включением и выключением излучения накачки, или используя методы модуляции добротности резонатора, либо методы синхронизации мод.

Временные зависимости интенсивности лазерного излучения в различных режимах работы: непрерывном и последовательности повторяющихся импульсов (представлены на рис. 4.1, *а-в* соответственно).

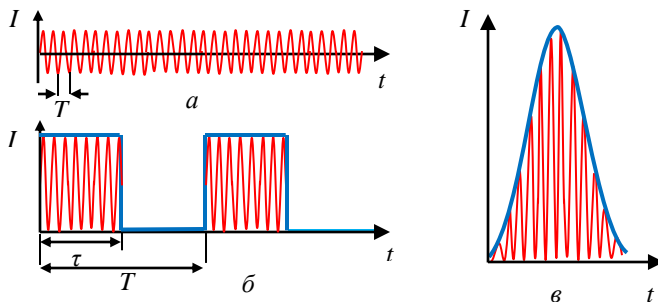


Рис. 4.1. Временная зависимость интенсивности излучения лазера в режиме работы: *а* – непрерывном; *б* – последовательности повторяющихся импульсов; *в* – форма импульса

Из рисунка видно, что преимуществом импульсных лазеров перед непрерывными является большая пиковая мощность при малой длительности импульса. Это позволяет кратковременно воздействовать на облучаемые объекты и при достаточной мощности производить изменения их структуры: переводить из одного агрегатного состояния в другое (плавить, испарять или создавать плазменные образования), прожигать отверстия, создавать микронеоднородности (например, для нанесения маркировки). Также их можно использовать для локации объектов на дальнем расстоянии.

Дальность оптической связи при передаче информации может быть существенно увеличена при использовании импульсных лазеров. Благодаря высокой пиковой мощности сигнала по сравнению с мощностью непрерывного лазерного излучения происходит увеличение соотношения сигнал / шум.

#### 4.1.1. Метод манипуляции источником накачки активной среды

Одним из наиболее простых способов генерации лазерных импульсов является метод манипуляции источником накачки активной среды. В упрощённом виде происходящие физические процессы представлены на рис. 4.2. Энергия коротковолнового излучения накачки (синие осцилляции на рис. 4.2, *a*) создаёт инверсную заселённость  $N$  метастабильного уровня энергии в активной среде. После превышения порогового уровня  $N_{\text{пор}}$  (момент времени  $\tau$ ) создаются условия для начала лазерной генерации. Однако она начинается не сразу, а только после того спонтанного перехода, который становится «затравочной» волной, инициирующей когерентное излучение. Напряжённость электрического поля лазерного излучения изображена красной кривой. Период её осцилляций больше периода излучения накачки.

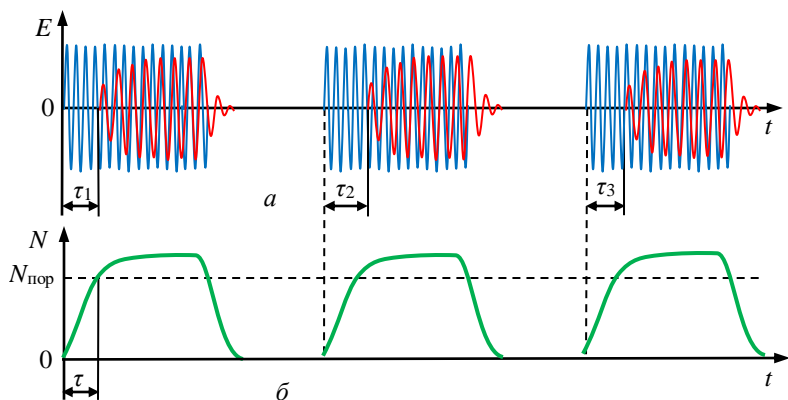


Рис. 4.2. Временные зависимости: *a* – напряжённости электрического поля излучения накачки (синяя кривая) и лазера (красная кривая) в режиме манипуляции источником накачки; *b* – заселённость метастабильного уровня энергии

Затем накачка выключается и через некоторое время включается снова. Цикл генерации повторяется. Однако в следующих циклах спонтанный переход, инициирующий затравочную волну, происходит в другом месте активной среды и через другое время

относительно включения источника накачки ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  на рис. 4.2, а). Заселённость метастабильного уровня и накопленная энергия оказываются другими, в общем случае возможна генерация нескольких мод. Выходное излучение является комбинацией нерегулярно повторяющихся импульсов с разной амплитудой, и случайной фазой. Мощность и интенсивность в импульсе не превосходят мощности и интенсивности излучения при непрерывной генерации. Режим нерегулярной пучковой генерации с перескоком фазы приводит к тому, что метод манипуляции излучением накачки на практике редко используется.

#### 4.1.2. Метод модуляции добротности лазерного резонатора

Идея метода модуляции добротности ( $Q$ -модуляция,  $Q$ -switch) лазерного резонатора состоит в следующем: в течение длительного времени накопить энергию  $W$  в активной среде при низкой добротности резонатора, а затем резко повысить добротность и высвободить накопленную энергию в виде мощного («гигантского») импульса лазерного излучения за короткий промежуток времени.

Схема лазера с модуляцией добротности резонатора с помощью быстродействующего электрооптического затвора показана на рис. 4.3. Действие затвора основано на использовании эффекта Керра (эффект Керра – возникновение двойного лучепреломления в ряде прозрачных веществ, помещённых в электрическое поле большой напряжённости).

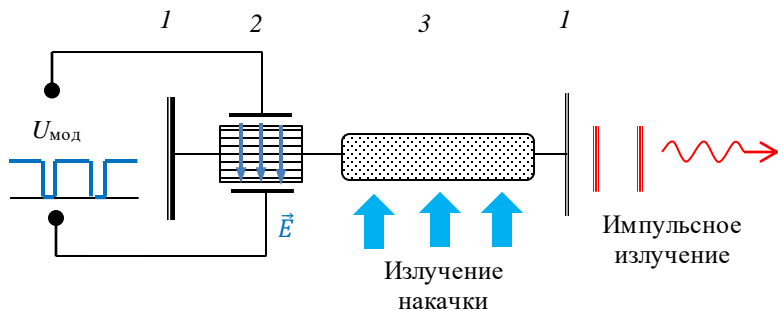


Рис. 4.3. Схема лазера с модуляцией добротности: 1 – зеркала резонатора, 2 – электрооптический затвор, 3 – активная среда



Электрооптический затвор расположен между зеркалами резонатора. При высоком напряжении модулирующего сигнала затвор находится в закрытом состоянии. Создаётся высокая инверсная заселённость уровней в активной среде. Её значение ограничивается только спонтанным излучением. После достижения максимального уровня инверсной заселённости быстро выключается напряжение модуляции и восстанавливается высокая добротность резонатора. Заселённость верхнего уровня оказывается много выше порогового значения. Происходит лавинный, экспоненциальный рост интенсивности излучения. Индуцированное излучение обедняет верхний уровень, и генерация прекращается. В результате получается короткий (десятки наносекунд) импульс излучения. Пиковая мощность может в тысячи раз превышать мощность излучения лазера в режиме непрерывной генерации, поскольку вся накопленная энергия излучается в одном импульсе.

После излучения импульса подаётся высокое напряжение модуляции, закрывающее оптический затвор. Начинается накопление энергии в активной среде для создания следующего импульса.

В данной схеме лазера использован затвор с внешним управлением, в связи с этим реализованный в ней метод называют методом *активной* модуляции добротности. Преимуществом метода является большая пиковая мощность и синхронизация лазерного импульса с управляющим сигналом.

Форма импульса лазера с  $Q$ -модуляцией показана на рис. 4.4. С момента  $t_0$  установления максимальной добротности резонатора начинается усиление спонтанного излучения. Интенсивность излучения экспоненциально возрастает ( $\tau_{yc} + \tau_{фр}$ ). После достижения максимума происходит спад интенсивности ( $\tau_{сп}$ ), вызванный обеднением верхнего уровня в активной среде. При каждом из этих процессов происходит многократный обход света между зеркалами резонатора. Время одного обхода порядка 1 нс ( $t_{обх} \sim L/c \sim 10^{-9}$  с).

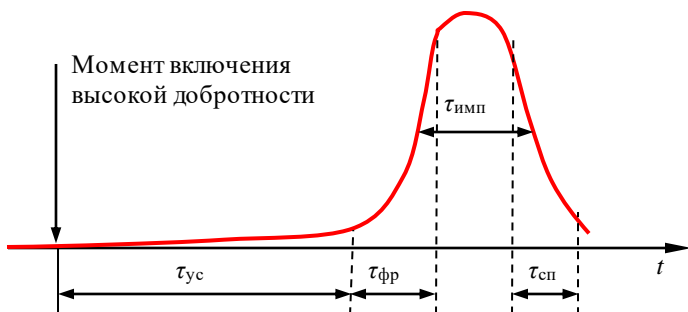


Рис. 4.4. Форма импульса лазера с  $Q$ -модуляцией:  
 $\tau_{ус}$  – время усиления интенсивности от уровня спонтанного излучения,  $\tau_{фр}$  – длительность переднего фронта,  $\tau_{сп}$  – длительность заднего фронта,  $\tau_{имп}$  – длительность импульса на уровне полувысоты

Значительно более простое устройство имеет импульсный лазер с пассивной модуляцией добротности.

Для реализации метода пассивной модуляции добротности в схему лазера, состоящую из системы накачки, объёмного резонатора и активной среды, дополнительно устанавливается нелинейный насыщающийся поглотитель (часто используется термин «просветляющийся поглотитель») (рис. 4.5).

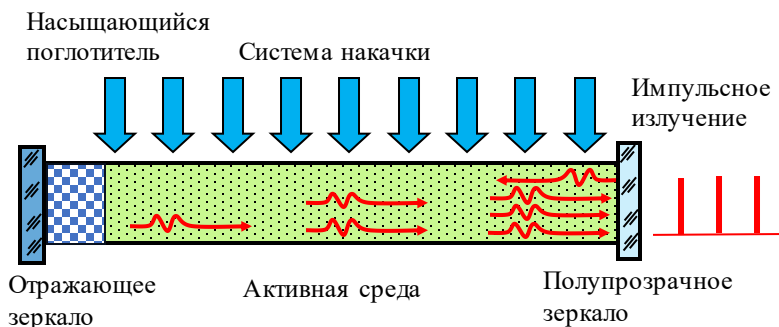


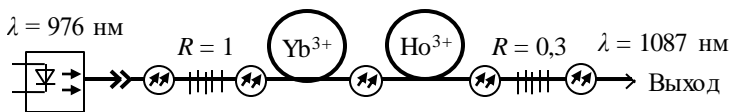
Рис. 4.5. Схема импульсного лазера с насыщающимся поглотителем

В качестве поглотителя используется вещество, имеющее полосу поглощения, совпадающую с длиной волны излучения лазера. Поглотитель помещают между отражающим зеркалом ( $R = 1$ ) и активным веществом. Коэффициент поглощения  $\beta$  зависит от толщины слоя вещества и концентрации в нем атомов или ионов, поглощающих фотоны. В результате коэффициент отражения от зеркала будет уменьшен –  $R = (1 - \beta)^2$  и, соответственно, уменьшена добротность  $Q$  резонатора. Величину  $\beta$  подбирают такой, чтобы генерация в лазере возникала при высокой заселённости  $N$  метастабильного уровня энергии в активной среде, существенно выше порога  $N_{\text{пор}}$  генерации в отсутствие поглотителя.

После включения накачки происходит рост заселённости метастабильного уровня в активной среде. При высокой заселённости  $N \gg N_{\text{пор}}$  начинается генерация излучения лазера. Высокая интенсивность излучения в резонаторе вызывает быстрое уменьшение заселённости нижнего (основного) уровня в поглотителе, и поглощение излучения прекращается. Поглотитель *просветляется*,  $\beta \rightarrow 0$ , и восстанавливается высокая добротность резонатора. Поскольку  $N \gg N_{\text{пор}}$ , интенсивность индуцированного излучения в резонаторе лавинообразно нарастает. Энергия, накопленная в активной среде, преобразуется в энергию *гигантского* импульса светового излучения. При очень высокой интенсивности излучения индуцированные переходы быстро обедняют метастабильный уровень ниже порогового значения. Генерация излучения прекращается, а в процессе релаксации восстанавливается высокая заселённость основного уровня в поглотителе. Затем при поглощении излучения накачки происходит процесс повышения заселённости метастабильного уровня в активном веществе до значения  $N \gg N_{\text{пор}}$ , и начинается генерация следующего импульса.

#### **4.1.3. Волоконный импульсный лазер с просветляющимся поглотителем**

Схема волоконного импульсного лазера с просветляющимся поглотителем показана на рис. 4.6.



Условные графические обозначения:

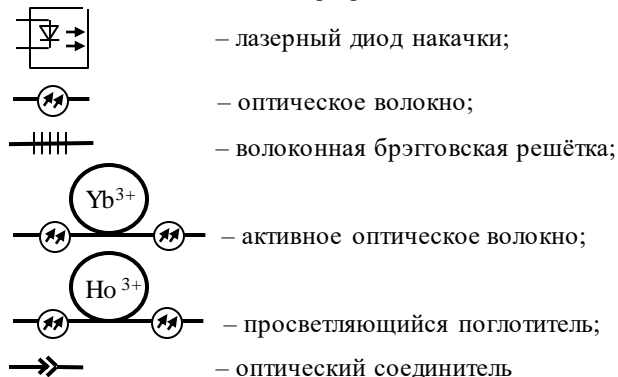


Рис. 4.6. Структурная схема волоконного импульсного лазера с просветляющимся поглотителем

Излучение полупроводникового лазерного диода накачки с длиной волны  $\lambda = 976$  нм поступает в оптическое волокно и через левую по рисунку волоконную брэгговскую решётку ( $\lambda_{\text{бр}} = 1087$  нм) направляется в катушку активного волокна, в которой поглощается активными ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Зеркалами резонатора служат волоконные брэгговские решётки с длиной волны отражения  $\lambda_{\text{бр}} = 1087$  нм. Левая по рисунку с коэффициентом отражения  $R = 1$  выполняет функцию «глухого» зеркала, а правая с  $R = 0,3$  – полупрозрачного. Возникающее когерентное излучение с  $\lambda = 1087$  нм поступает на выход волоконного лазера.

Между выходом катушки активного оптического волокна и правой по рисунку брэгговской решёткой с  $R = 0,3$  помещён просветляющийся поглотитель.

В волоконной оптике просветляющийся поглотитель – это активное оптическое волокно, легированное редкоземельным

элементом – ионами гольмия  $\text{Ho}^{3+}$ , в полосу поглощения которых попадает длина волны иттербиевого лазера.

Вначале рассмотрим работу иттербиевого лазера при отсутствии в нем гольмиевого поглотителя.

Полупроводниковый лазерный диод накачки генерирует непрерывное излучение, спектр которого показан на рис. 4.7. Максимум спектрального распределения 976 нм находится в полосе поглощения ионов иттербия в активном волокне (рис. 4.8).

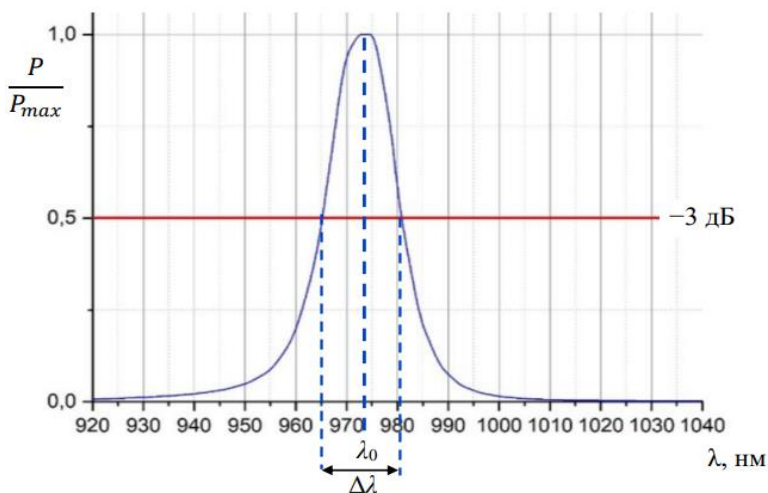


Рис. 4.7. Спектр излучения диода накачки 1999СНР

Энергетическая схема уровней ионов иттербия в кварцевом стекле представлена на рис. 4.8. На схеме показаны основной уровень  ${}^2F_{7/2}$  и возбуждённый уровень  ${}^2F_{5/2}$ , расщеплённые на семь подуровней  $a, b, c, d, e, f, g$ , между которыми возможны квантовые переходы с поглощением или излучением фотонов.

Ионы  $\text{Yb}^{3+}$ , поглощая кванты с  $\lambda = 976$  нм, переходят в возбуждённое состояние – переходят с нижнего подуровня  $a$  на верхний подуровень  $e$ . Одновременно идут обратные процессы спонтанных переходов ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в основное состояние. Чем выше

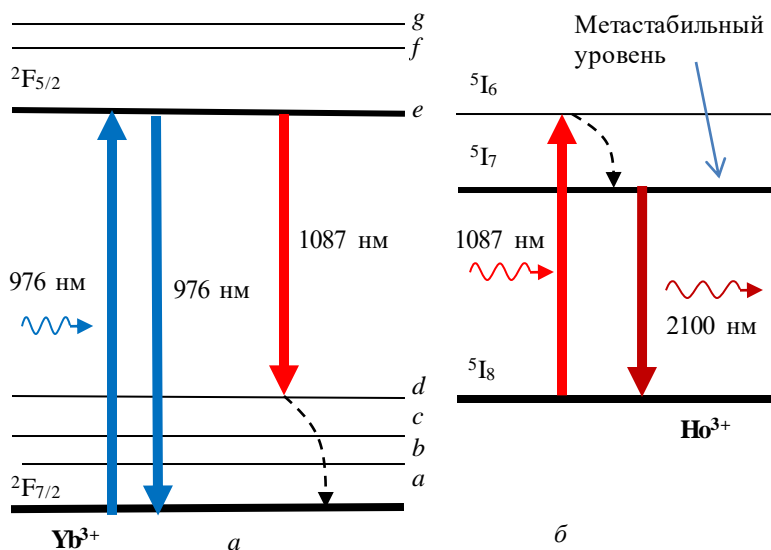


Рис. 4.8. Схема энергетических уровней ионов иттербия и гольмия

интенсивность излучения накачки, тем выше заселённость верхнего энергетического уровня  $e$ .

Основной энергетический уровень  $2F_{7/2}$  расщеплён на ряд подуровней. Заселённость интересующего нас подуровня  $d$  близка к нулю, поскольку он расположен выше уровня  $a$ . Образуется состояние с *инверсной* заселённостью энергетических уровней: заселённость верхнего уровня  $e$  оказывается много выше заселённости нижнего уровня  $d$ .

Возникают условия для генерации лазерного излучения с  $\lambda = 1087 \text{ нм}$ . Спонтанные переходы между уровнями  $e$  и  $d$  сопровождаются испусканием фотонов с  $\lambda = 1087 \text{ нм}$ . Они вызывают стимулированное излучение фотонов с такой же длиной волны возбуждёнными ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Отражаясь от брэгговских зеркал, излучение многократно проходит по активному волокну. С каждым проходом его интенсивность возрастает. Часть энергии излучения отводится из резонатора через правое брэгговское зеркало с коэффициентом отражения  $R = 0,3$ . Устанавливается динамическое равновесие между переходами  $a \rightarrow e$  с поглоще-

нием энергии излучения накачки и стимулированными переходами  $e \rightarrow d$ , создающими когерентное излучение лазера (с уровня  $d$  ионы безызлучательно релаксируют на уровень  $a$ ). Чем больше мощность излучения накачки, тем выше мощность непрерывного излучения лазера.

Теперь рассмотрим процессы в иттербиевом лазере при наличии в его резонаторе гольмиевого поглотителя (рис. 4.9).

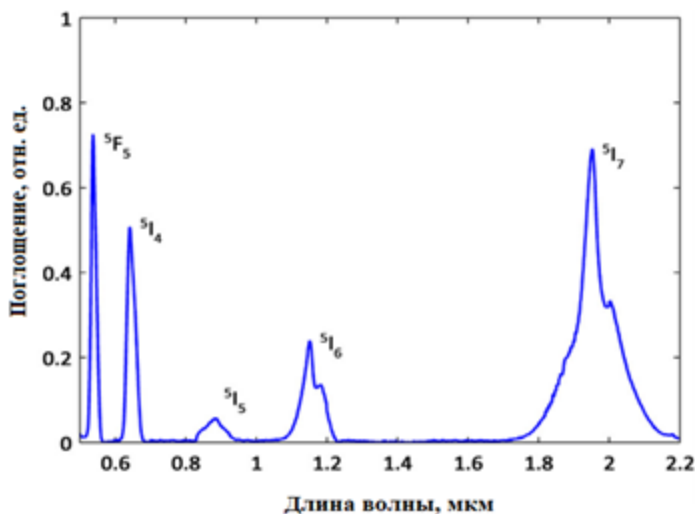


Рис. 4.9. Спектр поглощения насыщающегося поглотителя, легированного  $\text{Ho}^{3+}$

До включения излучения накачки ионы иттербия и гольмия находятся в основном состоянии со 100%-ной заселённостью нижнего (основного) уровня энергии (см. рис. 4.8). При включении накачки ионы  $\text{Yb}^{3+}$  поглощают кванты с  $\lambda = 976$  нм и переходят с нижнего (основного) энергетического уровня  $a$  на уровень  $e$ . Образуется состояние с *инверсной* заселённостью энергетических уровней: заселённость верхнего уровня  $e$  оказывается много выше заселённости нижнего уровня  $d$ . Возникают условия для генерации лазерного излучения с  $\lambda = 1087$  нм. Однако излучение с  $\lambda = 1087$  нм попадает в полосу поглощения ионов  $\text{Ho}^{3+}$  (см. рис. 4.9).

Ионы гольмия с основного уровня энергии  ${}^5I_8$  переходят на короткоживущий уровень  ${}^5I_6$ , с которого опускаются на метастабильный  ${}^5I_7$  (см. рис. 4.8). Заселённость основного уровня  ${}^5I_8$  постепенно снижается, и уменьшается поглощение в гольмиевом волокне (рис. 4.10, *a*). Становится возможным прохождение по иттербиевому волокну излучения, отражённого от брэгговских зеркал. Интенсивность излучения лавинообразно нарастает, а коэффициент поглощения падает. Наступает эффект *просветления* поглотителя.

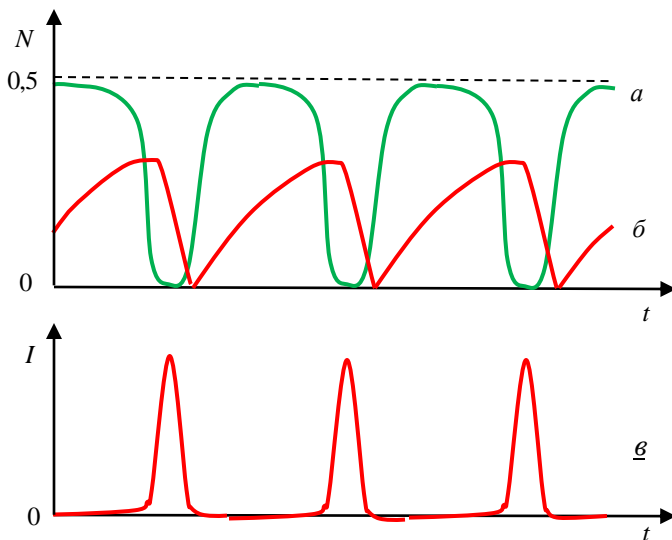


Рис. 4.10. Временные зависимости:  
*a* – заселённости основного уровня просветляющегося поглотителя, *b* – заселённости метастабильного уровня активной среды,  
*e* – интенсивности излучения лазера

В режиме просветления потери энергии в гольмиевом поглотителе уменьшаются практически до нуля (см. рис. 4.10, *a*), добротность оптического резонатора резко повышается. Энергия, накопленная в активной среде, преобразуется в энергию импульса светового излучения (рис. 4.10, *e*).

Уровень *e* ионов  $\text{Yb}^{3+}$  обедняется (рис. 4.10, *b*), интенсивность излучения уменьшается, а заселённость основного уровня  ${}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  возрастает (см. рис. 4.10, *a*). Возрастает коэффициент поглощения гольмиевого волокна, поглотитель затемняется,



и добротность резонатора падает. Генерация излучения прекращается. Лазер возвращается в исходное состояние, и начинается процесс подготовки к генерации следующего импульса излучения.

Следует отметить следующие особенности работы импульсного лазера с просветляющимся поглотителем:

1. При работе происходит двойное преобразование энергии: первое – лазерного диода накачки в энергию инверсной заселённости энергетических уровней иттербия. Второе – при просветлении поглотителя возникает когерентное излучение иттербиевого лазера.

2. Изменяя интенсивность излучения накачки лазерного диода, можно варьировать время следования импульсов. Чем больше мощность накачки, тем чаще следуют импульсы. Ограничение накладывает время релаксации просветляющегося поглотителя.

Лазер с просветляющимся поглотителем имеет ограниченный диапазон рабочих мощностей системы накачки. При её малой мощности не происходит просветления поглотителя, затем при достижении пороговой мощности начинается импульсный режим, а при дальнейшем повышении мощности наступает следующий порог, при котором поглотитель не успевает релаксировать и остается открытым. Огибающие импульсы накладываются друг на друга, как показано на рис. 4.11, и на осциллограмме появляется промодулированный по интенсивности пьедестал. При дальнейшем увеличении интенсивности характер генерации приближается к непрерывному режиму работы.

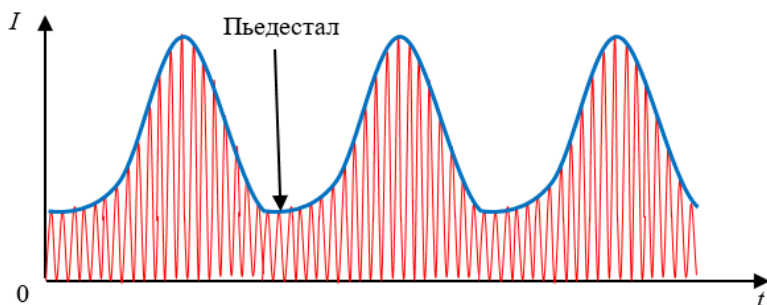


Рис. 4.11. Временные зависимости интенсивности лазерного излучения при высоком уровне накачки

## 4.2. Основные характеристики импульсного лазера с просветляющимся поглотителем

В работе будут исследованы *статические* и *динамические* характеристики импульсного режима генерации лазера с просветляющимся поглотителем.

*Статической* характеристикой является оптический спектр генерации лазера.

*Динамическими* характеристиками являются пиковая мощность, энергия, длительность, период и скважность импульсов.

## 4.3. Порядок выполнения работы

*Цель работы:* исследование основных характеристик волоконного импульсного лазера с просветляющимся поглотителем на основе волокна, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ .

### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Примечание	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Спектрометр	NIRQuest+2.5 или аналог	1
3. Осциллограф	АКИП-4134/1 или аналог	1
4. Фотоприемник	PDA10CF-EC или аналог	1
5. Коаксиальный кабель	BNC-BNC	1
6. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999CHP 3CN01351DL, контроллер MBL1500 или аналоги	1
7. Комплект волоконных решёток Брэгга*	– 1087 нм, коэфф. отр. 100 %; – 1087 нм, коэфф. отр. 30 %	1
8. Волокно, легированное $\text{Yb}^{3+}$ (активное волокно)	Длина 6 м	1
9. Волокно, легированное $\text{Ho}^{3+}$ (просветляющийся поглотитель)	Длина 6 м	1
10. Соединительный оптический кабель одномодовый	Коннектор FC/APC	2

11. Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт, скальватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	1
* Допускается применение комплекта волоконных решёток Брэгга с другой длиной волны отражения, находящейся в диапазоне люминесценции активного волокна.		

### Задания

#### **1. Измерение ватт-амперной характеристики волоконного импульсного лазера с просветляющимся поглотителем**

1.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 4.12.

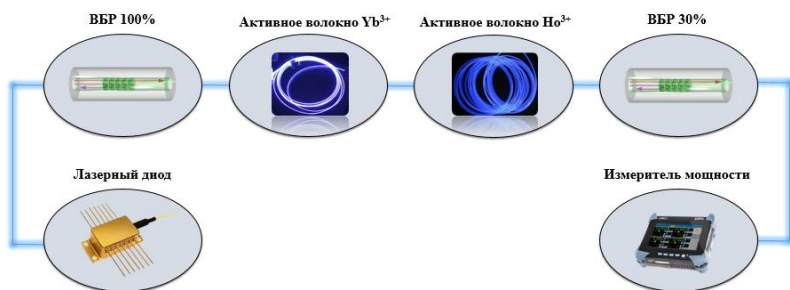


Рис. 4.12. Схема измерения ватт-амперной характеристики лазера

Для этого:

- установить модуль полупроводникового лазерного диода 1999СНР 3СN01351DL в контроллер лазерных диодов согласно инструкции на оборудование (прил. 4);

- соединить волоконно-оптические компоненты;

- соединить измеритель оптической мощности EXFO LTB-1 и выходное волокно лазера одномодовым оптическим кабелем.

1.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода накачки  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и силы тока диода  $I_n = 0,0\text{ мА}$ .

1.3. Включить измеритель оптической мощности согласно прил. 2, выбрав значение спектральной чувствительности фотоприемника, соответствующее диапазону излучения иттербия.

1.4. Повысить значение тока диода накачки на 20 мА. Зафиксировать значения тока и оптической мощности в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерения ватт-амперной характеристики волоконно-оптического импульсного лазера с пассивным затвором

Номер измерения	Ток диода накачки $I_n$ , мА	Напряжение $U_n$ , В	Электрическая мощность $P_n$ , мВт	Оптическая мощность лазера $P_l$ , мВт	КПД $\eta$ , %
1	20				
2	40				
...	...				
$N$	500				

1.5. Повторять п. 1.4. до достижения тока диода накачки 500 мА.

1.6. Отключить подачу тока лазерного диода накачки.

## **2. Измерение оптического спектра излучения лазера**

2.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 4.13.

Для этого:

– заменить измеритель мощности в схеме ватт-амперной характеристики на оптический спектрометр.

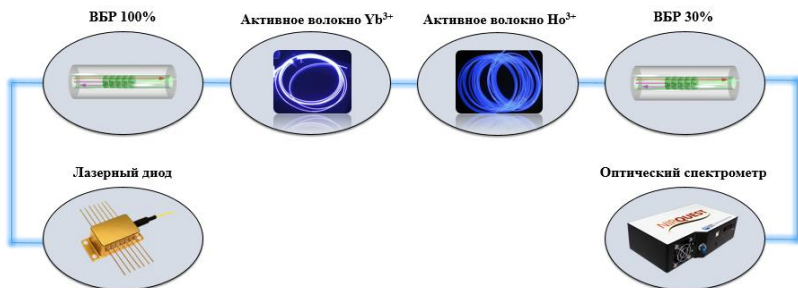


Рис. 4.13. Схема измерения спектра излучения лазера

2.2. Включить и настроить оптический спектрометр согласно инструкции в прил. 17. Основные настройки приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные настройки спектрометра

Integration Time	200	Время интеграции, мс
Scans to Average	5	Сканирований для усреднения
Boxcar width	3	Сглаживание

2.3. Установить такое значение тока лазерного диода накачки, чтобы оптическая мощность не превышала 10 мВт.

2.4. Сохранить спектр излучения согласно инструкции на оптический спектрометр.

### **3. Измерение импульсных характеристик волоконного импульсного лазера**

3.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 4.14.

Для этого:

– заменить измеритель оптической мощности EXFO-LTB-1 на фотоприемник ThorLabs MC1000A, основные характеристики которого приведены в инструкции в прил. 14;

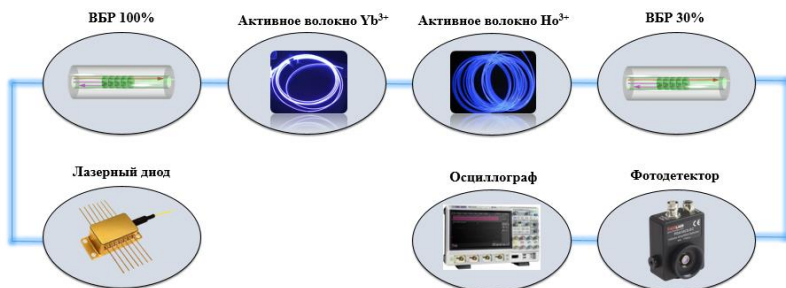


Рис. 4.14. Схема установки измерения импульсных характеристик лазера

– подключить фотоприемник к осциллографу АКИП-4134/1 при помощи коаксиального кабеля, как показано в прил. 14 на рис. П.14.1, б.

3.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и тока диода накачки  $0,0\text{ мА}$ .

3.3. Включить фотоприемник ThorLabs PDA 10CF-EC согласно прил. 14 и осциллограф АКИП-4134/1 согласно прил. 12.

3.4. Повысить значение тока диода накачки на  $50\text{ мА}$ .

3.5. Произвести измерения временных характеристик импульсного лазерного излучения и сохранить осциллограмму согласно инструкции на осциллограф.

3.6. Повторять п.п. 4.3.3.4, 4.3.3.5 до достижения тока диода накачки  $500\text{ мА}$ .

3.7. Выключить оборудование.

3.8. Разобрать установку.

### ***Обработка результатов измерений***

Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATHLAB, Wolfram Mathematica и т.д.), с целью описания и графического представления зависимостей.

1. Обработка результатов измерения ватт-амперной характеристики волоконного импульсного лазера

Используя данные табл. 4.1, полученные с измерителя оптической мощности, построить график зависимости оптической мощности от тока диода накачки и определить порог начала генерации излучения.

2. Обработка результатов измерения спектральных характеристик волоконного импульсного лазера

Используя спектры оптического излучения, построить графики зависимости оптической мощности лазерного излучения  $P_\lambda$  от длины волны  $\lambda$  и определить:

– центральные длины волн двух спектральных компонент  $\lambda_c$  излучения ионов  $\text{Yb}^{+3}$  и  $\text{Ho}^{+3}$  по формуле

$$\lambda_c = \frac{\sum P_i \lambda_i}{\sum P_i}. \quad (4.1)$$

Величины, входящие в формулу, приведены на рис. 4.15.

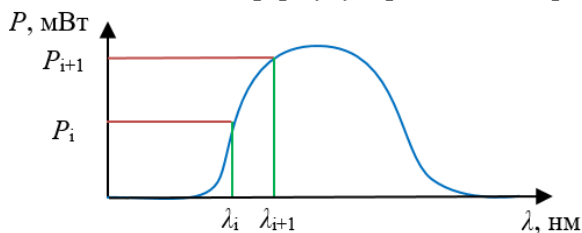


Рис. 4.15. Метод определения центральной длины волны

– ширину двух спектральных компонент  $\Delta\lambda$  излучения ионов  $\text{Yb}^{+3}$  и  $\text{Ho}^{+3}$  по уровню половины мощности по формуле

$$\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}. \quad (4.2)$$

Методика определения величин  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  представлена на рис. 4.16.

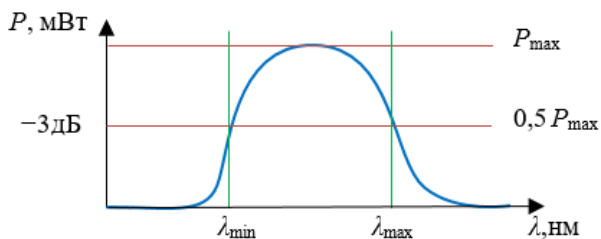


Рис. 4.16. Метод определения ширины спектра по уровню половины мощности

Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Основные характеристики спектра излучения иттербиевого лазера с гольмиевым поглотителем

Спектральная компонента	Центральная длина волны $\lambda_c$ , нм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ , нм
Yb <sup>+3</sup>		
Ho <sup>+3</sup>		

3. Обработка результатов измерения световых импульсов волоконного лазера

Используя данные, полученные с осциллографа на рис. 4.17 и 4.18, построить графики зависимости напряжения с фотодетектора от времени и определить:

- длительность импульсов  $\tau$ ;
- частоту следования импульсов

$$f = \frac{1}{T}; \quad (4.3)$$

- время фронта  $\tau_{\text{фр}}$ ;
- время спада  $\tau_{\text{сп}}$ .

Полученные результаты занести в табл. 4.4.



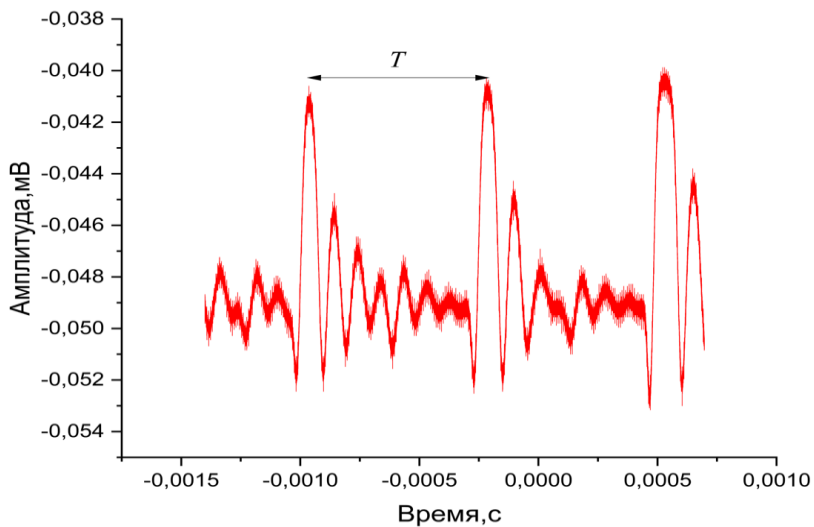


Рис. 4.17. Основные характеристики последовательности импульсов

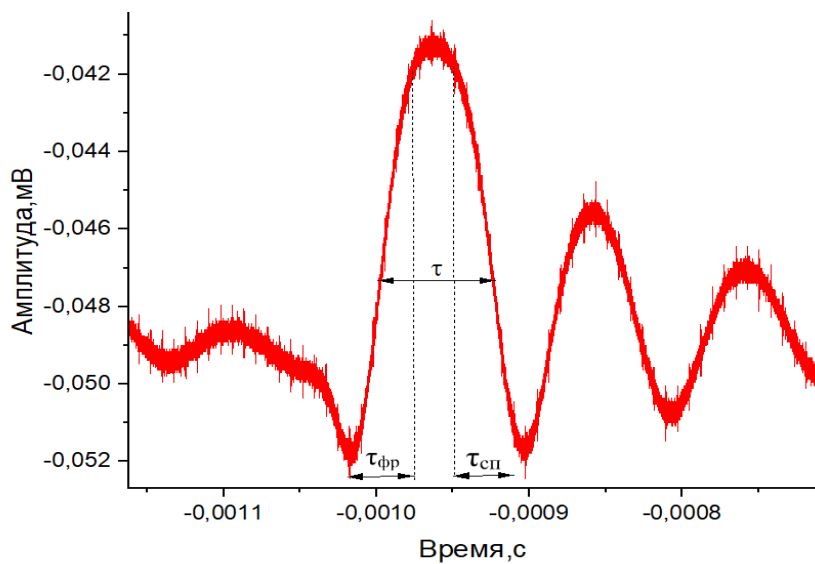


Рис. 4.18. Основные характеристики импульса

Таблица 4.4

Результаты обработки осциллограмм световых импульсов волоконного лазера с пассивным затвором

Номер измерения	Ток $I_n$ , мА	Период следования импульсов $T$ , мкс	Частота следования импульсов $f$ , МГц	Время фронта $\tau_{фр}$ , мкс	Длительность импульса $\tau$ , мкс	Время спада $\tau_{сп}$ , мкс
1	50					
2						
...						
$N$	500					

Исходя из полученных данных, рассчитать скважность  $S$  импульсов для разных значений тока накачки по формуле

$$S = \frac{T}{\tau}, \quad (4.4)$$

где  $T$  – период следования импульсов,  $\tau$  – длительность импульса.

Рассчитать импульсную мощность  $P_{имп}$  волоконного лазера для разных значений тока накачки по формуле

$$P_{имп} = S \cdot P_{л}, \quad (4.5)$$

где  $S$  – скважность,  $P_{л}$  – оптическая мощность из табл. 4.1.

Результаты расчетов занести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Результаты расчетов импульсной оптической мощности волоконного лазера

Номер измерения	Ток $I_n$ , мА	Скважность $S$	Импульсная мощность $P_{имп}$ , мВт
1	50		
2			
...			
$N$	500		

По данным табл. 4.5 построить график зависимости импульсной мощности от тока накачки.

Провести анализ основных характеристик импульсного волоконного лазера с пассивным затвором. Объяснить характер зависимости частоты импульсов от тока диода накачки.

#### 4.4. Контрольные вопросы

1. Преимущества и недостатки стационарного и импульсного режимов излучения лазера.
2. Временные зависимости интенсивности излучения лазера в режимах работы: непрерывном; последовательности повторяющихся импульсов.
3. Схема работы трехуровневого итербиевого лазера.
4. Принцип работы насыщающегося поглотителя.
5. Схема импульсного лазера с насыщающимся поглотителем.
6. Конструкция волоконного импульсного лазера с пассивным затвором.
7. Форма импульса и его основные характеристики.
8. Основной недостаток метода пассивной модуляции добротности.
9. Области применения импульсных лазеров.
10. Объяснить полученные результаты.

#### Список литературы

1. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Харанжевский Е. В., Кривилёв М. Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество: учеб. пособие / под общ. ред. П. К. Галенко. Ижевск: Удмуртский университет, 2011. 187 с.
3. Айрапетян В. С. Физика лазеров [Текст]: учеб. пособие / В. С. Айрапетян, О. К. Ушаков; СГГА. Новосибирск, 2012. 134 с.
4. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков [и др.]. Ульяновск: Изд. центр УлГУ, 2012. 184 с.
5. Квантовая и оптическая электроника: лабораторный практикум. Ч. 2. Оптическая электроника: учеб.-метод. пособие / И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. П. Булатов, Н. А. Мальков,

М. А. Ветошкин, К. А. Овчинников; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2022. 120 с.

6. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов и их применение: учеб. пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 248 с.

7. Nd:YAG лазер с диодной накачкой: учеб.-метод. пособие / А. И. Гарифуллин, А. И. Фишман, А. И. Скворцов, С. С. Харинцев. Казань: Казан. ун-т, 2023. 40 с.

8. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 559 с.

9. Савельев-Трофимов А. Б. Введение в физику лазеров: конспект лекций. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/laser-physics-M.pdf> (дата обращения: 17.12.2024).

10. Фотоника и оптоинформатика: волоконно-оптические квантовые генераторы: учеб.-метод. пособие / Ю. А. Конин, И. Л. Вольхин, М. И. Булатов, Н. А. Мальков, А. С. Луценко, Н. С. Григорьев, А. В. Перминов; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. Пермь, 2024. 123 с.

## **Работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА С АКТИВНЫМ ЗАТВОРОМ**

### **5.1. Физические принципы работы волоконного импульсного лазера с активным затвором**

*Активный оптический затвор* – элемент устройства, обеспечивающий амплитудную модуляцию светового потока и управляемый сигналом с внешнего устройства.

*Амплитудная модуляция* – метод, при котором изменяемым параметром излучения является его амплитуда, реализуемый пропусканием и перекрытием светового потока в течение определённого времени при помощи оптического затвора. При этом лазер изначально работает в непрерывном режиме излучения, а модулируется излучение уже на выходе из резонатора. Следует отметить, что лазеры с активными оптическими затворами позволяют однозначно задавать форму, длительность и частоту следования импульсов.

Наибольшее распространение получили механические, акустооптические и электрооптические модуляторы.

В рамках данной работы будут независимо реализованы две схемы с электромеханическим и акустооптическим модуляторами для вырезания импульсов определенной формы, длительности и частоты.

#### **5.1.1. Электрооптический модулятор**

Принцип работы электрооптического модулятора основан на линейном электрооптическом эффекте (эффекте Поккельса). Эффектом Поккельса называют изменение показателя преломления в одноосных двулучепреломляющих кристаллах под действием электрического поля. В главном сечении этих кристаллов могут распространяться две волны с различной групповой скоростью: быстрая – обыкновенная (поляризация перпендикулярна главному сечению) и медленная – необыкновенная (поляризация совпадает с главным сечением) волны. При прохождении через такую среду две волны приобретают разность фаз. Конструктивно электрооптический модулятор выполняют из поляризатора и анализатора, оси которых расположены под углом  $90^\circ$ , и ячейки

Поккельса (рис. 5.1). Ячейка создается напылением электродов на торцы двулучепреломляющего кристалла, перпендикулярные распространению излучения. При наложении электрического поля изменяется показатель преломления только в перпендикулярном направлении:

$$n(E) \sim n_0 + \alpha E, \quad (5.1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления;  $E$  – напряжённость электрического поля;  $\alpha$  – коэффициент Поккельса.

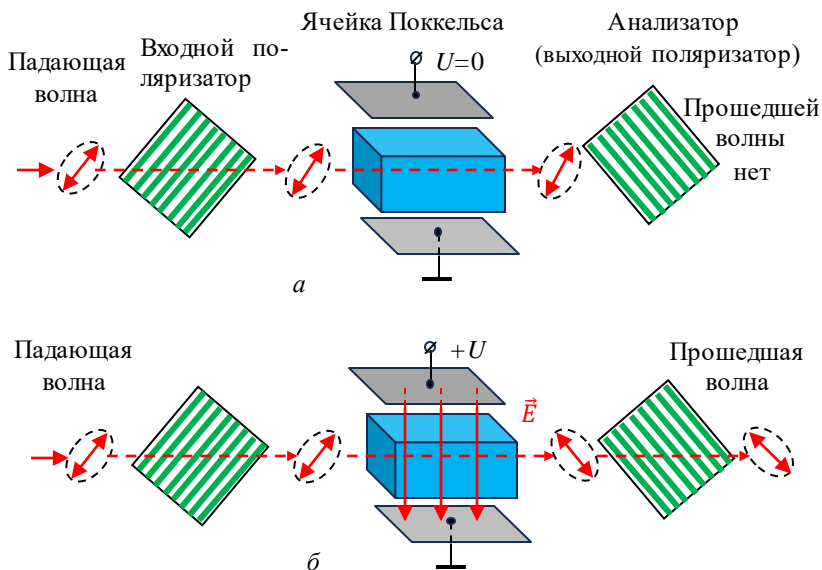


Рис. 5.1. Схема электрооптического амплитудного модулятора

Параметры ячейки Поккельса подбирают так, что при отсутствии электрического поля прошедшие обыкновенная и необыкновенная волны складываются в фазе. Плоскость поляризации волны не изменяется. Она поглощается (или отражается в зависимости от конструкции) выходным поляризатором, и прошедшей волны нет, как показано на рис. 5.1, а. При включении напряжения  $U$  возникает электрическое поле, прошедшие волны складываются со сдвигом фаз, и плоскость поляризации прошедшего

излучения поворачивается. Регулируя фазовый сдвиг управляющим напряжением, можно добиваться пропускания или ослабления прошедшей волны. На рис. 5.1, б представлен случай поворота плоскости поляризации на  $90^\circ$  и прохождения волны через выходной поляризатор.

### 5.1.2. Электромеханический модулятор

Электромеханический модулятор (chopper, прерыватель) – устройство для периодического изменения интенсивности оптического излучения путём периодического перекрывания светового потока. Чаще всего применяют обтюраторные диски со световыми вырезами – щелями различных форм (секторные, прямоугольные и др.) и с оптически непрозрачной поверхностью – пе-



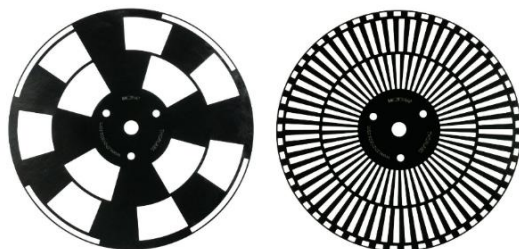
Рис. 5.2. Составные части электромеханического модулятора: *а* – контроллер модулятора, *б* – стойка крепления дисков, *в* – диск обтюлятора

рекрывающими «лопастями».

Электромеханический модулятор (рис. 5.2) состоит из контроллера управления частотой вращения диска, диска обтюлятора, закреплённого на оси двигателя с автоматической регулировкой скорости вращения, стойки с электродвигателем и креплением дисков.

В диске обтюлятора находится один или два ряда световых вырезов для получения одной или двух частот перекрытия при одной скорости вращения диска (так называемые двухчастотные диски) (рис. 5.3). Для обеспечения минимального обратного рассеяния непрозрачные участки диска (лопасти) покрывают свето-

поглощающим слоем чёрного цвета. Электромеханические модуляторы обеспечивают частоту прерываний до 10 кГц. Чтобы прерывание происходило резко, лазерный луч фокусируют в самую широкую часть выреза, много большую диаметра лазерного луча.



*a*

*б*

Рис. 5.3. Внешний вид дисков с внутренним и внешним рядами прорезей для диапазонов частот: *a* – 8÷400 и 14÷700 Гц; *б* – 106÷5300 и 120÷6000 Гц

Достоинством электромеханических модуляторов с дисковым обтюратором является возможность изменения частоты перекрытия излучения, а также простота управления.

Недостатками данного метода являются:

1. Уменьшение средней интенсивности излучения. На рис. 5.4 показано, что лазерный луч, проходя через вырезы диска, вращающегося с частотой  $f_{вр}$ , превращается в последовательность импульсов с периодом следования  $T = 1/nf_{вр}$ , где  $n$  – число щелей на диске (промежутков между лопастями). При равенстве ширины щелей и лопастей на диске коэффициент заполнения

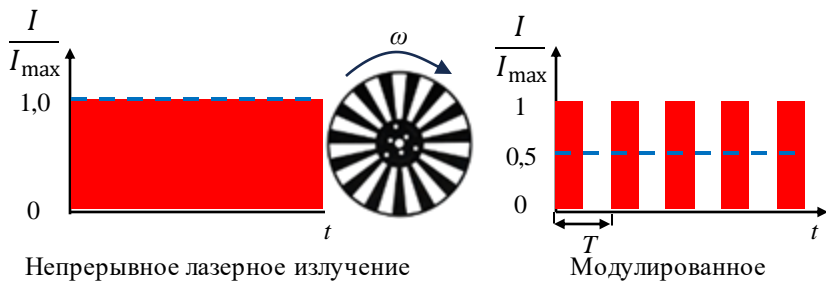


Рис. 5.4. Принцип работы электромеханического модулятора



$D = \frac{\tau_{и}}{T} = \frac{1}{2} (\tau_{и} - \text{длительность импульсов})$  и средняя интенсивность прошедшего излучения уменьшаются в два раза.

2. Возникающая дифракция излучения на краях лопастей обтюлятора.

На рис. 5.5 представлена осциллограмма при модуляции излучения электромеханическим модулятором. Модуляция с частотой 100 Гц формирует близкие к прямоугольным импульсы с длительностью  $\tau_{и} \approx 5$  мс. Во время движения края лопасти обтюлятора через пучок излучения сигнал не мгновенно прерывается. С увеличением частоты вращения обтюлятора длительности фронтов и спадов будут уменьшаться вместе с длительностью импульса.

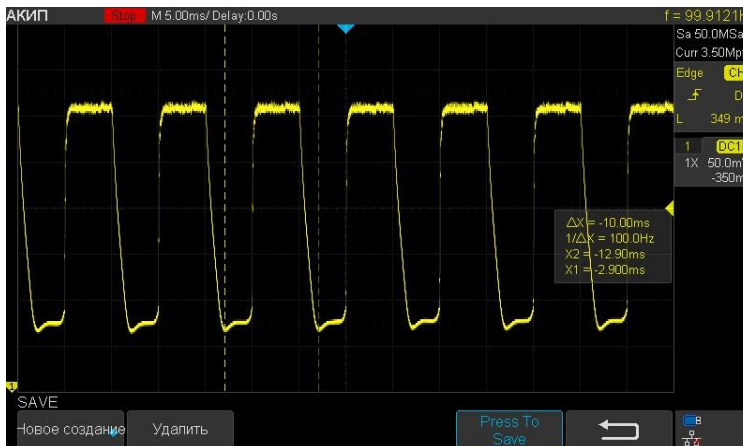


Рис. 5.5. Осциллограмма при частоте модуляции 100 Гц

Электромеханический модулятор позволяет измерить диаметр пучка излучения, проходящего через вращающийся диск, по картинке на экране осциллографа.

Принимая, что распределение интенсивности по сечению луча гауссово, и зная расстояние  $R$  от центра диска до точки падения луча на диск (рис. 5.6), можно оценочно рассчитать диаметр пучка по формуле

$$D \approx 1,56v\tau, \tag{5.2}$$

где  $v$  – скорость движения края лопасти на расстоянии  $R$  от центра диска,  $v = \omega R = 2\pi fR$ ;  $f$  – частота вращения диска;  $\tau$  – длительность фронта импульса. Коэффициент 1,56 учитывает гауссово распределение интенсивности по сечению пучка излучения лазера.

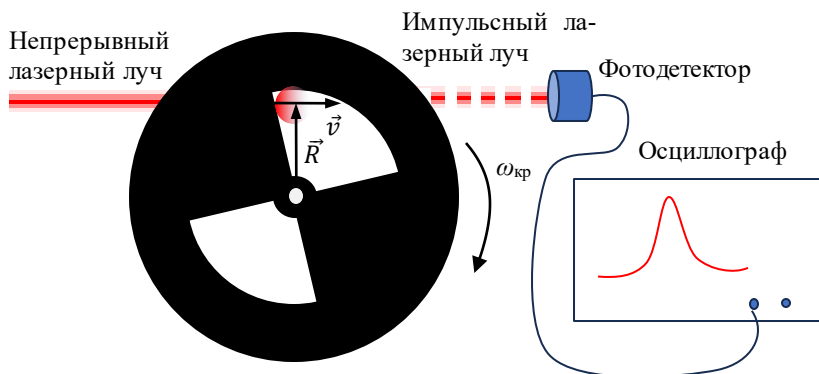


Рис. 5.6. Схема измерения диаметра пучка излучения

### 5.1.3. Акустооптический модулятор

Акустооптический эффект – под этим термином понимают широкий круг эффектов, возникающих при взаимодействии оптических и акустических волн в конденсированной среде. Акустооптические эффекты возникают в результате изменения плотности и, как следствие, показателя преломления среды (явление фотоупругости). Звуковая волна создаёт в среде дифракционную решётку, на которой происходит дифракция оптических волн. На основе этих явлений создают акустооптические приборы: модуляторы, дефлекторы, переключатели, фильтры и другие устройства. Схемы акустооптических дефлекторов и модуляторов, использующих дифракционные эффекты Рамана – Ната в «тонком» и Брэгга в «толстом» слоях прозрачной среды, представлены на рис. 5.7, а и б соответственно.

Акустооптический модулятор (см. рис. 5.7, б) представляет собой толстую пластинку из кварцевого стекла, в которой с помощью пьезоэлектрического преобразователя, подключённого к

ВЧ-генератору, возбуждается ультразвуковая волна. Если на противоположную сторону нанесён поглотитель, то отражения назад не будет, и в стекле возникнет бегущая акустическая волна.

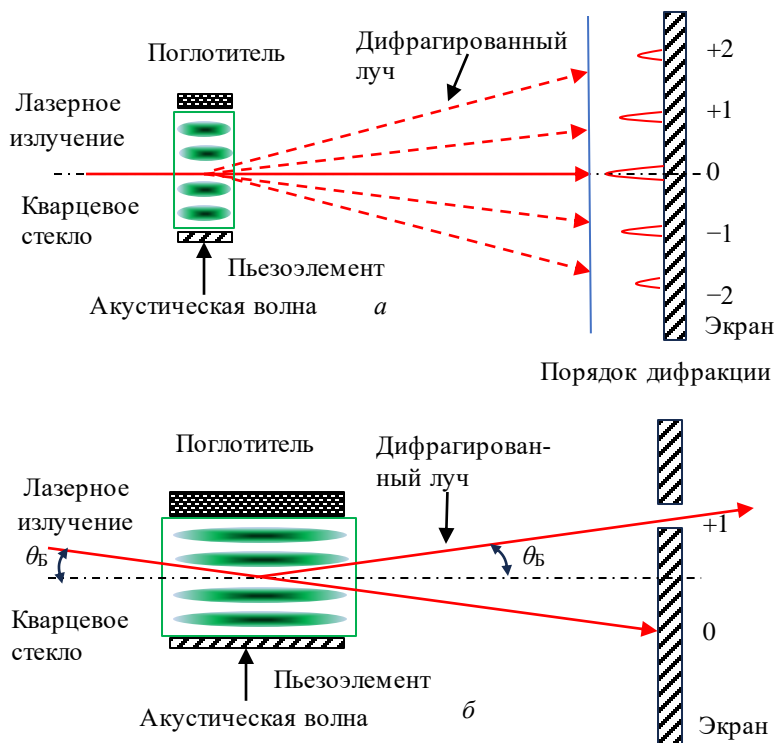


Рис. 5.7. Схема акустооптического: *a* – дефлектора; *б* – модулятора

Продольная акустическая волна представляет собой чередование слоёв сжатия и разряжения, т. е. слоёв повышенной и пониженной плотности. Вследствие *эффекта фотоупругости* эти слои будут иметь различные показатели преломления.

Это периодическое изменение показателя преломления образует фазовую дифракционную решётку, период которой равен длине акустической волны  $\Lambda$ . Она движется в стекле со скоростью звука.

Пусть на стеклянную пластинку падает пучок лазерного излучения под углом скольжения  $\theta$  (см. рис. 5.7, б). Лучи, отражённые под углом  $\theta$  от «штрихов» дифракционной решётки, интерферируют (рис. 5.8). Интерференционный максимум будет в случае, если разность хода лучей, отражённых от соседних «штрихов», равна целому числу длин волн  $\lambda$  (рис. 5.8). При этом угол отражения  $\theta_B$  удовлетворяет условию

$$\sin\theta_B = \frac{n\lambda}{2\Lambda}, \quad (5.3)$$

где  $\Lambda$  – расстояние между штрихами решётки,  $\Lambda = v/f$ ;  $v$  – скорость звука в кварцевом стекле ( $\sim 1000$  м/с);  $f$  – частота ультразвука. Условие (5.3) носит название *условия (закона) Брэгга – Вульфа*.

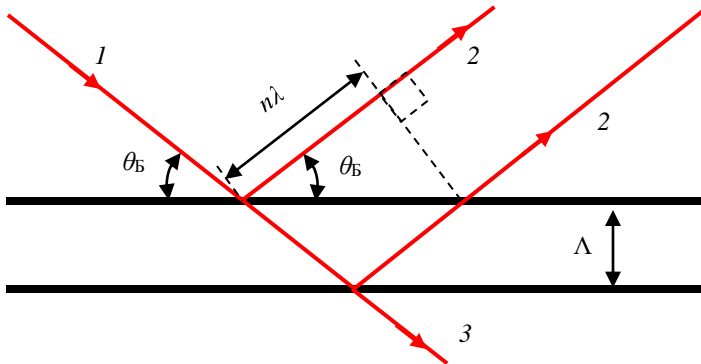


Рис. 5.8. Дифракция Брэгга – Вульфа: 1 – падающий, 2 – дифрагированный, 3 – прошедший лучи;  $\theta$  – угол скольжения падающего луча;  $n\lambda$  – разность хода лучей, отражённых от соседних штрихов дифракционной решётки;  $\Lambda$  – расстояние между штрихами решётки

Дифрагированное излучение распространяется в конечном угловом интервале  $\theta_B \pm \Delta\theta$ . Ширина интервала определяется числом штрихов в той части решётки, на которую падает световой поток. Причём дифракционный максимум более интенсивен, если расстояние между штрихами  $\Lambda$  сравнимо с длиной волны  $\Lambda \geq \lambda$ . Следовательно, нужна возможно большая частота  $f$  ультразвуковой волны.

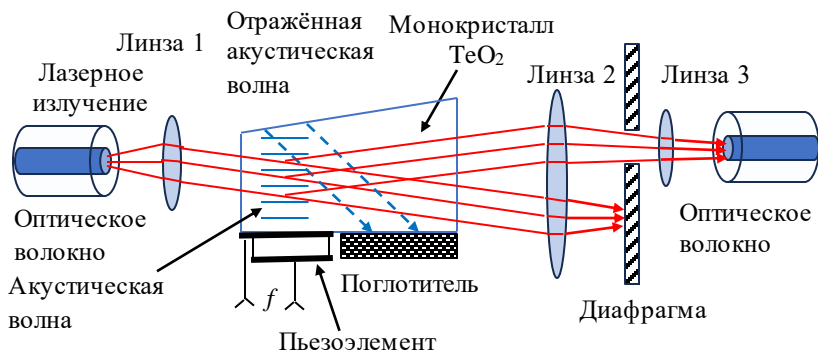


Рис. 5.9. Схема акустооптического модулятора

В настоящей работе используется акустооптический модулятор «Фотон 3201», основные характеристики которого приведены в прил. 18. Оптическая схема модулятора представлена на рис. 5.9. Основной частью модулятора является монокристалл парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ). К нижней грани кристалла приваривается пьезоэлектрический излучатель на основе кристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) с двумя электродами, на которые подаётся гармонический высокочастотный сигнал частотой  $f$ . Бегущая акустическая волна отражается от верхней скошенной грани монокристалла и поглощается поглотителем, расположенным на нижней грани справа от излучателя.

Лазерное излучение вводится в модулятор по оптическому волокну через линзу 1 входного коллиматора. В нём расходящийся луч преобразуется в широкий плоскопараллельный пучок, проходящий через область распространения акустической волны. В области акустооптического взаимодействия лазерный луч падает на области сжатия-разрежения под углом Брэгга. При отсутствии акустического сигнала пучок излучения проходит через монокристалл и с помощью линзы 2 фокусируется на поверхности поглощающей диафрагмы. При включении радиочастотного генератора дифрагированный пучок излучения фокусируется линзой 2 на отверстии в диафрагме, собирается коллимирующей

линзой 3 и выходит из модулятора через правое по рисунку оптическое волокно.

Для акустооптического модулятора характерна спектральная селективность пропускаемого излучения. Через отверстие диафрагмы (см. рис. 5.8) пройдут только те лучи, длина волны которых удовлетворяет условию Брэгга (5.3).

Дифракция света происходит на движущейся со скоростью звука решётке, и вследствие эффекта Доплера частота рассеянного света смещается на частоту ультразвука. Величиной этого смещения, ввиду его малости, в большинстве случаев пренебрегают.

Спектральный диапазон, используемый в волоконной оптике, накладывает требования к частоте ультразвука – она должна быть большой (порядка 100 МГц), чтобы угол дифракции был больше угла расходимости лазерного излучения.

Для осуществления модуляции лазерного луча необходимо периодически включать / выключать (модулировать) управляющий сигнал, однако на это затрачивается время, определяемое временем прохождения звуковой волны через стеклянную пластинку.

#### ***5.1.4. Активная амплитудная модуляция***

Амплитудная модуляция позволяет получать из генерируемого непрерывного излучения лазера импульсы со строго заданной формой и частотой, однако конструктивное исполнение применяемых модуляторов ограничивает частотную область.

Недостатком данного метода также является уменьшенная оптическая мощность на выходе из модулятора в сравнении с исходной генерацией лазера.

#### ***5.1.5. Основные характеристики импульсного лазера с активным затвором***

В работе будут исследованы характерные *динамические* характеристики импульсного режима генерации лазера с активным затвором.

*Динамическими* (импульсными) характеристиками являются импульсная мощность, энергия, длительность, период и

скважность импульса. Динамические характеристики зависят от режима работы активного затвора, управляемого внешним сигналом.

*Статической* характеристикой является оптический спектр генерации лазера. Он определяется волоконными решётками Брэгга со стабильным во времени измерением резонансом.

## 5.2. Порядок выполнения работы

*Цель работы:* исследование основных характеристик волоконного импульсного лазера с активными затворами на основе акустооптического и электромеханического модуляторов амплитуды.

### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Примечание	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Осциллограф	АКИП-4134/1 или аналог	1
3. Фотоприёмник	PDA10CF-EC или аналог	1
4. Коаксиальный кабель	BNC-BNC	2
5. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999CHP 3CN01351DL, контроллер MBL1500 или аналоги	1
6. Комплект волоконных решёток Брэгга*	– 1087 нм, коэффициент отражения 100 %; – 1087 нм, коэффициент отражения 30 %	1
7. Волокно, легированное Yb <sup>3+</sup> (активное волокно)	Длина 6 м	1
8. Генератор сигналов	АКИП-3420/2 или аналог	1
9. Акустооптический модулятор	Фотон-3201П или аналог	1
10. Электромеханический модулятор с контроллером управления	Optical chopper MC1000A или аналог	1
11. Соединительный оптический кабель одномодовый	Коннектор FC/APC	2
12. Визуализатор ИК-излучения	Длина волны 1064 нм	1
13. Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт,	1

Наименование	Примечание	Кол-во
	скальватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	
*Допускается применение комплекта волоконных решёток Брэгга с другой длиной волны отражения, находящейся в диапазоне люминесценции активного волокна.		

## *Задания*

### *1. Измерение импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с электромеханическим модулятором*

1.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 5.10.

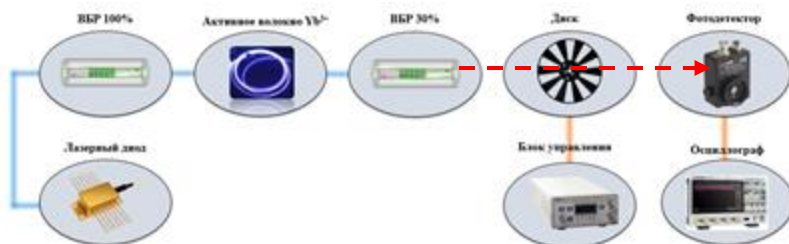


Рис. 5.10. Схема измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с электромеханическим модулятором

Для этого:

- установить полупроводниковый лазерный диод в контроллер лазерных диодов согласно инструкциям на оборудование (прил. 1, 4);
- соединить волоконно-оптические компоненты согласно схеме на рис. 5.10;
- установить диск obtюратора на стойку крепления дисков, как показано в прил. 13 на рис. П13.1, б, и подключить её к блоку управления электромеханического модулятора (рис. П13.1, а);
- установить на платформу фотоприёмник ThorLabs PDA 10CF-ES (прил. 14, рис. П14.1, а), подключив его к осциллографу АК ИП-4134/1 при помощи коаксиального кабеля, как показано в прил. 14 на рис. П14.1, б.



1.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и тока  $I_d = 0,0\text{ A}$ .

1.3. Включить фотоприёмник и осциллограф.

1.4. Включить блок управления электромеханического модулятора (драйвер чоппера) ThorLabs MC1000A (прил. 13) и установить частоту модуляции  $100\text{ Гц}$ . Диск перекрытия начнёт вращаться.

1.5. Установить такое значение тока лазерного диода накачки  $I_d$ , чтобы на осциллографе отчётливо наблюдался импульсный электрический сигнал.

1.6. Произвести измерения временных характеристик импульсов лазерного излучения и сохранить осциллограмму согласно инструкции на осциллограф.

1.7. Повысить значение частоты модуляции на  $100\text{ Гц}$ .

1.8. Произвести измерения временных характеристик импульсов лазерного излучения и сохранить осциллограмму согласно инструкции на осциллограф.

1.19. Повторять п.п. 1.7 и 1.8 до достижения частоты модуляции  $1000\text{ Гц}$ .

1.10. Выключить блок управления электромеханического модулятора (драйвер чоппера).

1.11. Определить расстояние от центра диска обтюлятора до точки падения луча на диск, используя визуализатор инфракрасного диапазона.

1.12. Отключить подачу тока лазерного диода накачки.

1.13. Убрать оптический коллиматор с волоконного вывода и электромеханический модулятор.

## ***2. Измерение импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с акустооптическим модулятором***

2.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 5.11.

Для этого:

– соединить волоконный лазер и акустооптический модулятор оптическим кабелем одномодовым;

– соединить акустооптический модулятор и фотодетектор оптическим кабелем одномодовым;

– соединить акустооптический модулятор и генератор сигналов АКИП-3420 коаксиальным кабелем.

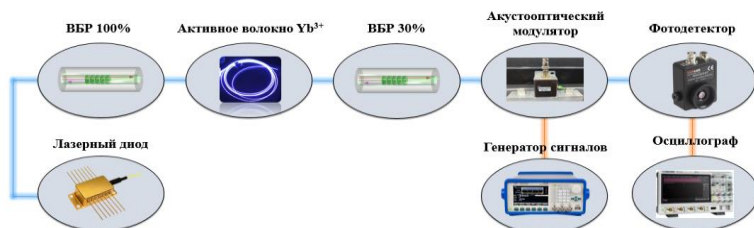


Рис. 5.11. Схема измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с акустооптическим модулятором

2.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода 25 °С и тока накачки 0,0 А.

2.3. Включить генератор сигналов (прил. 11). Установить на генераторе сигналов параметры, соответствующие рабочим для акустооптического модулятора: амплитуда высокочастотного управляющего сигнала от 0 до 5 В (по заданию преподавателя), частота  $f = 74,5$  МГц.

2.4. Выбрать одну из предлагаемых форм сигнала: меандр, синус или пила (по заданию преподавателя).

2.5. Установить частоту модуляции  $f_m$  управляющего сигнала 1,0 кГц.

2.6. Установить такое значение тока лазерного диода накачки, чтобы на осциллографе отчетливо наблюдался импульсный электрический сигнал.

2.7. Произвести измерения временных характеристик импульсного лазерного излучения и сохранить осциллограмму согласно инструкции на оборудование.

2.8. Установить ещё пять различных частот модуляции в диапазоне от 1 до 100 кГц, при этом фиксируя временные характеристики импульсов лазерного излучения и сохраняя осциллограммы.

2.9. Отключить подачу тока лазерного диода накачки.

2.10. Выключить оборудование и разобрать установку.

### **Обработка результатов измерений**

Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т. д.), с целью описания и графического представления зависимостей.

1. Обработка результатов измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с электромеханическим модулятором.

Используя данные, полученные с осциллографа (рис. 5.12), построить графики зависимости напряжения с фотодетектора от времени и определить, как показано на рис. 5.13:

1.1. Период импульсов  $T$ .

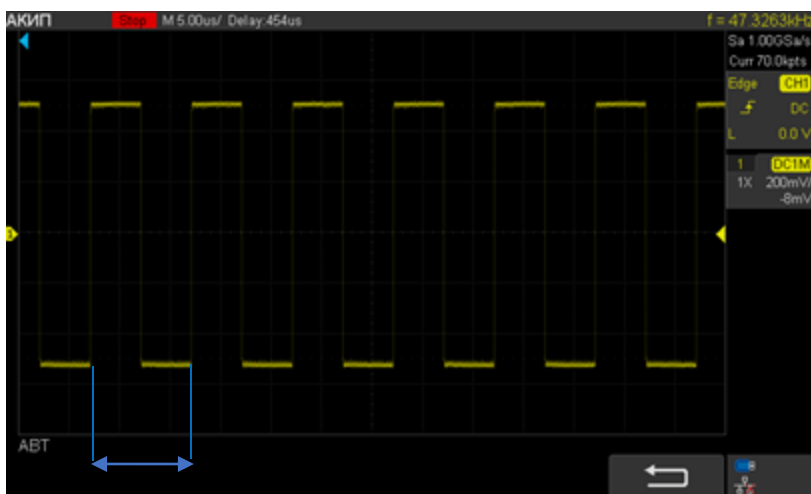
1.2. Частоту следования импульсов  $f = \frac{1}{T}$ .

1.3. Время нарастания фронта  $\tau_{\text{фр}}$ .

1.4. Длительность импульсов  $\tau_{\text{и}}$ .

1.5. Время спада  $\tau_{\text{сп}}$ .

Данные занести в табл. 5.1.



$T$

Рис. 5.12. Осциллограмма импульсов излучения лазера с электромеханическим модулятором

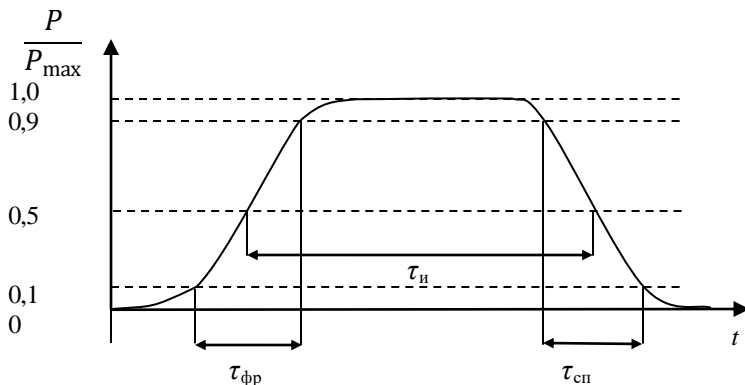


Рис. 5.13. Основные характеристики импульса

Таблица 5.1

Результаты измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с электромеханическим модулятором

№ п/п	Частота модуляции (заданная) $f_m$ , Гц	Частота следования импульсов (измеренная) $f_s$ , Гц	Период импульсов $T$ , мкс	Время фронта $\tau_{\text{фр}}$ , мкс	Длительность импульса $\tau$ , мкс	Время спада $\tau_{\text{сп}}$ , мкс	Форма импульса (меандр, трапеция, гаусс)
1							
2							
...							
$N$							

2. Расчет диаметра пучка лазерного излучения при помощи электромеханического модулятора.

Используя измеренное расстояние  $R$  от центра диска до точки падения луча на диск обтюратора и данные, полученные с осциллографа, определить диаметр лазерного пучка при различных частотах вращения  $f_{\text{вр}}$  диска по формуле

$$D \approx 1,56(2\pi f_{\text{вр}} R) \tau_{\text{фр}}, \quad (5.4)$$

$$f_{\text{вр}} = f_m/n,$$

где  $f_{вр}$  – частота вращения диска, об./с;  $f_m$  – частота модуляции лазерного луча, Гц;  $n$  – число лопастей у диска обтюратора;  $R$  – расстояние от центра диска до точки падения луча на диск, м;  $\tau_{фр}$  – длительность фронта импульса в секундах, с. Коэффициент 1,56 учитывает гауссово распределение интенсивности по сечению лазерного пучка.

Длительность фронта  $\tau_{фр}$  (время нарастания сигнала) можно измерить с помощью осциллографа АК ИП-3420 одним из двух способов:

1. Автоматические измерения. На приборной панели нажать кнопку «Измерение», затем «Тип» и выбрать: Period (период импульсов), Freq (частота), Rise Time (время нарастания импульса), Width (длительность импульса), Fall Time (время спада импульса). Данные будут отображаться в нижней части экрана, как показано на рис. 5.14. Стрелка указывает окно, в котором индицируется время нарастания сигнала.

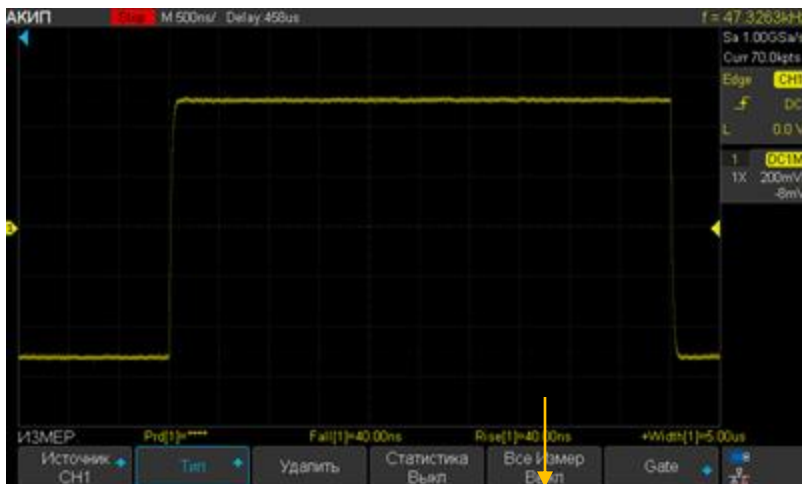


Рис. 5.14. Осциллограмма переднего фронта импульса в режиме автоматических измерений

2. Курсорные измерения. С помощью временной развертки и смещения по оси ХУ отмасштабировать одиночный импульс, как показано на рис. 5.15. На приборной панели нажать кнопку «Курсоры». С помощью кнопки «Установка» переместить левый курсор на начало возрастания, а правый – на конец, как показано на рис. 5.15 (однократное нажатие на кнопку «Установка» меняет устанавливаемый курсор). Стрелка указывает окно, в котором индицируется время нарастания сигнала.



Рис. 5.15. Осциллограмма переднего фронта импульса в режиме курсорных измерений  
Данные занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расчет диаметра пучка лазерного излучения при помощи электромеханического модулятора

Номер измерения	Частота вращения диска модулятора $f_{вр}$ , об./с	Длительность фронта импульса $\tau$ , мкс	Диаметр пучка лазерного излучения $D$ , м
1			
2			
...			
$N$			

По результатам табл. 5.2 рассчитать погрешности измерений диаметра пучка лазерного излучения.

3. Обработка результатов измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера с акустооптическим модулятором.

Используя данные, полученные с осциллографа, построить графики зависимости напряжения с фотодетектора от времени и определить:

3.1. Период импульсов  $T$ .

3.2. Частоту следования импульсов

$$f = \frac{1}{T}$$

3.3. Время нарастания фронта  $\tau_{\text{фр}}$ .

3.4. Длительность импульсов  $\tau$ .

3.5. Время спада  $\tau_{\text{сп}}$ .

Данные занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты измерения импульсных характеристик волоконного импульсного лазера акустооптическим модулятором

Номер измерения	Частота модуляции (заданная) $f_m$ , Гц	Период $T$ , мкс	Частота модуляции (измеренная) $f$ , Гц	Время фронта $\tau_{\text{фр}}$ , мкс	Длительность импульса $\tau$ , мкс	Время спада $\tau_{\text{сп}}$ , мкс	Форма импульса (меандр, синус, пила)
1							
2							
...							
$N$							

### 5.3. Контрольные вопросы

1. Классификация модуляторов лазерного излучения.
2. Принцип работы акустооптического модулятора.
3. Дифракция Брэгга – Вульва.
4. Принцип работы электромеханического модулятора.
5. Схема волоконного импульсного лазера с активным затвором.

6. Схема измерения динамических характеристик волоконного импульсного лазера с акустооптическим модулятором.
7. Основные характеристики импульсного лазера с активным затвором.
8. Форма импульса и его основные характеристики.
9. Области применения импульсных лазеров.
10. Объяснить полученные результаты.

### **Список литературы**

1. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Харанжевский Е. В., Кривилёв М. Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество: учеб. пособие / под общ. ред. П. К. Галенко. Ижевск: Удмурт. ун-т, 2011. 187 с.
3. Айрапетян В. С., Ушаков О. К. Физика лазеров [Текст]: учеб. пособие / СГГА. Новосибирск, 2012. 134 с.
4. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков [и др.]. Ульяновск: Изд. центр УлГУ, 2012. 184 с.
5. Квантовая и оптическая электроника: лабораторный практикум. Ч. 2. Оптическая электроника: учеб.-метод. пособие / И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. И. Булатов, Н. А. Мальков, М. А. Ветошкин, К. А. Овчинников; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2022. 120 с.
6. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 559 с.
7. Фотоника и оптоинформатика: волоконно-оптические квантовые генераторы: учеб.-метод. пособие / Ю. А. Конин, И. Л. Вольхин, М. И. Булатов, Н. А. Мальков, А. С. Луценко, Н. С. Григорьев, А. В. Перминов; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. Пермь, 2024. 123 с.



## Работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

### 6.1. Физические принципы работы волоконного лазера ультракоротких импульсов

*Люминесценция* – нетепловое свечение вещества, атомы которого приведены в возбужденное состояние.

*Спонтанное излучение* – самопроизвольное излучение фотона атомом или молекулой при переходе на более низкий энергетический уровень. Поскольку спонтанные переходы являются случайными, возникшее излучение является некогерентным, имеет случайные направления поляризации и распространения.

*Вынужденное (индуцированное) излучение* – принудительное излучение фотонов атомом или молекулой под действием внешнего облучения. Вынужденное излучение полностью повторяет характеристики исходного.

*Суперлюминесценция* – люминесценция веществ с инверсной заселённостью энергетических уровней, вызванная усилением спонтанного излучения за счёт вынужденного испускания. Это явление наблюдается в суперлюминесцентных диодах, волоконно-оптических усилителях и лазерах. Излучение когерентное и направленное.

*Волноводная мода* – электромагнитная волна определённой частоты и поляризации, распространяющаяся в оптическом волноводе (оптоволокне).

*Одномодовое волокно* – волокно, вдоль которого распространяются электромагнитные волны, длина которых удовлетворяет условию

$$\lambda > \frac{2\pi a \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{2,45}, \quad (6.1)$$

где  $a$  – диаметр сердцевины волокна;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно.

Распределение интенсивности волны в поперечном сечении сердцевины одномодового волокна имеет колоколообразный вид

с максимумом в центре. В одномодовом волокне может одновременно распространяться несколько *продольных мод*, длины волн которых удовлетворяют этому условию.

*Кольцевой резонатор* – резонатор, в котором излучение, пройдя через всю систему, замыкается на себя.

*Синхронизация мод* – метод генерации большого числа продольных мод с определённым фазовым соотношением. Метод синхронизации мод позволяет генерировать импульсы короче времени обхода резонатора.

*Ультракороткие импульсы* – импульсы, длительность которых составляет менее 100 пс.

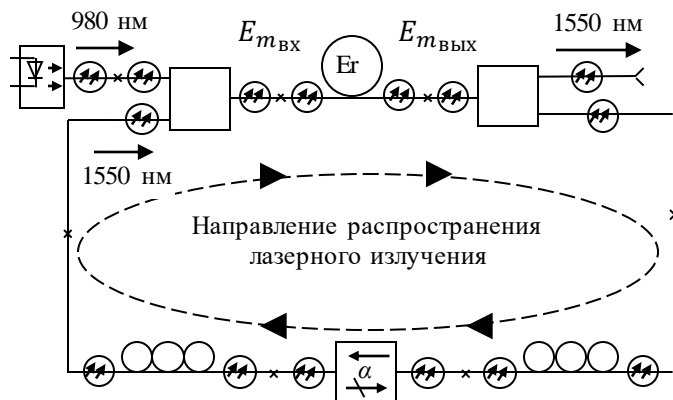
### **6.1.1. Кольцевой волоконный лазер**

Кольцевые волоконные лазеры являются разновидностью оптических квантовых генераторов (ОКГ) и имеют свои особенности работы. В классических полупроводниковых, твердотельных и газовых лазерах активная среда размещается внутри оптического резонатора. Оптическая волна многократно проходит между зеркалами резонатора, полностью отражаясь от глухого и частично выходя через полупрозрачное. В кольцевых лазерах зеркальный резонатор отсутствует, и оптическая волна движется по замкнутому оптоволоконному контуру.

В одномодовом активном оптическом волокне с учетом круговой симметрии его сердцевинны могут распространяться две ортогонально ориентированные плоскополяризованные волны и в двух противоположных направлениях – всего четыре моды. Из них необходимо оставить только одну, на которой будет происходить работа лазера. Для этого в оптический тракт устанавливаются два устройства: оптический изолятор, пропускающий излучение в одном направлении и поглощающий в противоположном, а также контроллер поляризации, выделяющий волны с одним направлением поляризации.

Оптическая схема кольцевого волоконного лазера приведена на рис. 6.1. Активной средой является катушка одномодового оптического волокна, германо-силикатная сердцевина которого легирована ионами эрбия  $\text{Er}^{3+}$ . Накачка происходит излучением полупроводникового лазерного диода на длине волны 976 нм. Из-

лучение накачки вводится в оптический контур с помощью спектрального уплотнителя в направлении распространения генерируемой кольцевым лазером оптической волны, как показано на рис. 6.1.



Условные графические обозначения:



Рис. 6.1. Оптическая схема волоконного кольцевого лазера

Поглощение излучения накачки происходит в катушке активного волокна, перевода ионы эрбия из основного состояния  ${}^4I_{15/2}$  в возбуждённое  ${}^4I_{11/2}$  (рис. 6.2). Уровень  ${}^4I_{11/2}$  короткоживущий, и ионы путем безызлучательной рекомбинации переходят

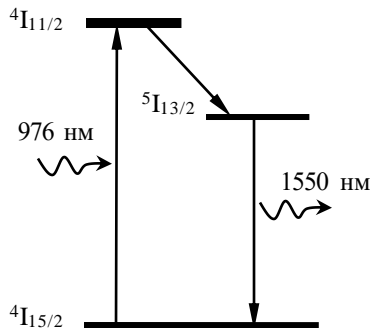


Рис. 6.2. Схема энергетических уровней иона  $\text{Er}^{3+}$

на метастабильный (с большим временем жизни) уровень  ${}^5\text{I}_{13/2}$ . Заселённость метастабильного уровня возрастает, а основного — убывает, и при достаточно большой мощности излучения накачки возникает их инверсная заселённость.

При спонтанных переходах ионов эрбия на нижний энергетический уровень излучаются фотоны с длинами волн в полосе люминесценции эрбия. Проходя по активному оптическому волокну, они вызывают индуцированное излучение ионов эрбия. В результате возникает излучение, распространяющееся по оптическому контуру лазера (см. рис. 6.1) по часовой и против часовой стрелки. Излучение, направленное против часовой стрелки, пройдя через спектральный уплотнитель и левый по схеме контроллер поляризации, поглощается в оптическом изоляторе. Излучение, движущееся по часовой стрелке, в волоконно-оптическом разветвителе делится на две части. Меньшая часть излучения поступает на выход, большая часть проходит через правый по схеме контроллер поляризации, оптический изолятор, левый контроллер поляризации, спектральный уплотнитель и поступает на вход катушки активного оптического волокна.

Прошедшая по полному кругу волна длиной  $\lambda_m$  накапливает набег фазы  $\varphi_m$ . При многократном прохождении по волоконному контуру будут усиливаться лишь те волны, для которых набег фазы при каждом обходе контура будет кратен величине  $2\pi$ . Иными словами, на оптической длине  $L_k$  обхода оптоволоконного контура должно укладываться целое число длин волн

$$L_k = nl_k = \lambda_m N, \quad (6.2)$$

где  $l_k$  – геометрическая длина волоконного кольца.

В результате генерация лазера получается в виде спектра (рис. 6.3, *a*), состоящего из узких линий в пределах полосы люминесценции эрбия (многомодовый режим генерации). Продольные моды кольцевого лазера эквидистантны (в первом приближении), т. е. частотный интервал  $\Delta f$  между соседними модами постоянен.

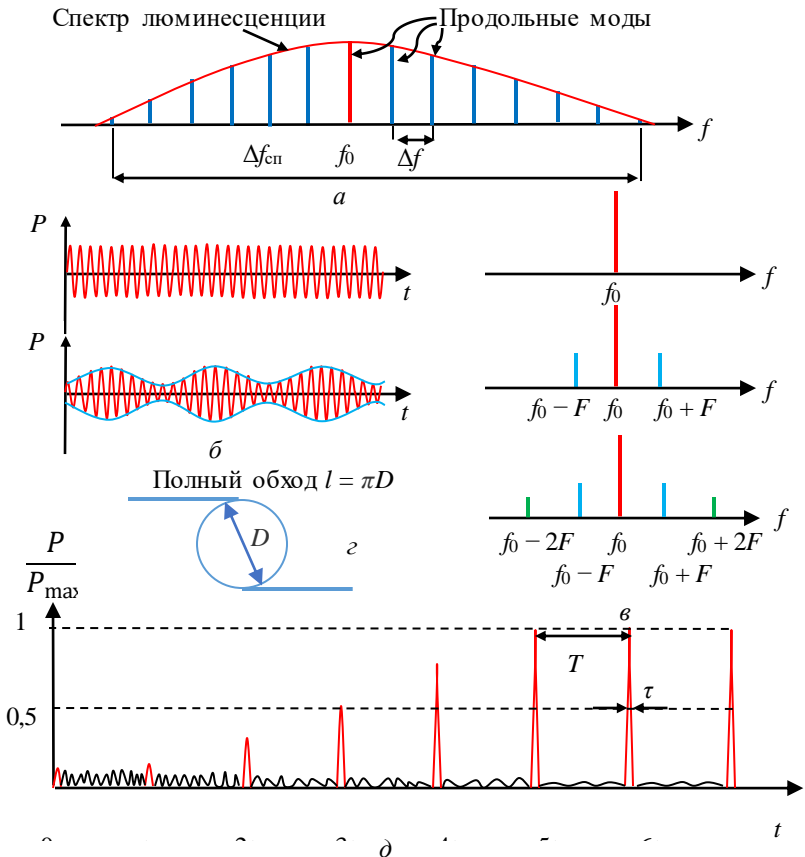


Рис. 6.3. Активная синхронизация мод в импульсном лазере: *a* – спектр излучения; *б* – модуляция; *в* – спектр модулированного сигнала; *z* – резонатор; *д* – временная диаграмма синхронизации мод

Для нахождения межмодового интервала  $\Delta f$  запишем условие (6.2) для двух соседних мод  $\lambda_m = c/f_m$  и  $\lambda_{m+1} = c/(f_m + \Delta f)$ :

$$L_K = n l_K = \frac{c}{f_m} N,$$

$$L_K = n l_K = \frac{c}{(f_m + \Delta f)} (N + 1).$$

Отсюда величина межмодового интервала

$$\Delta f = \frac{c}{L_K} = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{L_K}{c}, \quad (6.3)$$

где  $T$  – время полного обхода волоконного контура.

Лазер генерирует множество продольных мод, попадающих в полосу усиления активной среды. Чем шире полоса усиления, тем больше мод генерируется. Фазы волн этих мод имеют хаотическое распределение, поскольку их генерация начинается со спонтанного излучения. Результатом интерференции волн мод со случайными фазами будет беспорядочный набор флуктуаций интенсивности (рис. 6.4).

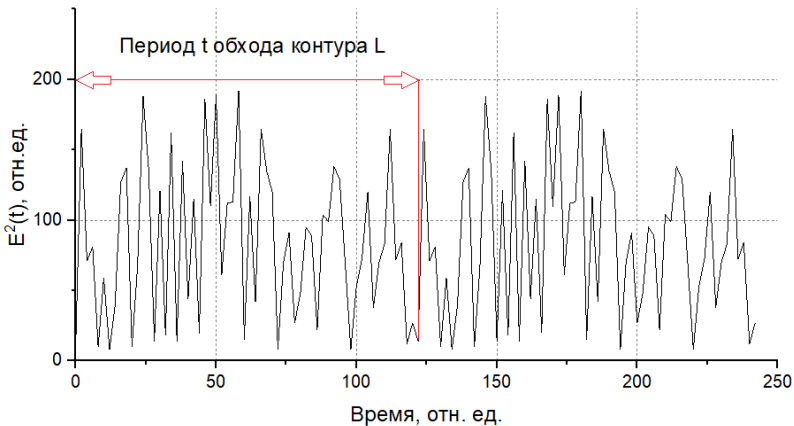


Рис. 6.4. Пример временной зависимости квадрата амплитуды полного электрического поля с несинхронизированными по фазе модами

В комплексном виде для  $m$ -ной моды соотношение амплитуд волн на входе  $E_{m_{\text{ВХ}}}$  и выходе  $E_{m_{\text{ВЫХ}}}$  катушки эрбиевого волокна

$$E_{m_{\text{ВЫХ}}} = e^{(-\alpha_m l_k + \gamma_m l_b)} E_{m_{\text{ВХ}}}, \quad (6.4)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент затухания волны при обходе по кольцевому контуру длиной  $l_k$ , а  $\gamma_m$  – коэффициент усиления волны в активном волокне длиной  $l_b$ .

Предположим, что в лазере каким-либо образом созданы условия, когда фазы различных мод связаны определённым соотношением. Такие лазеры называются *лазерами с синхронизацией мод*, а процессы, с помощью которых удаётся связать фазы различных мод, – синхронизацией мод.

### 6.1.2. Методы синхронизации мод

Для создания ультракоротких импульсов используется метод синхронизации мод (mode-lock). Данный метод заключается в генерации большого числа продольных мод с определённым фазовым соотношением. Возникающая между модами интерференция приводит к тому, что временная зависимость интенсивности излучения принимает вид периодической последовательности импульсов (рис. 6.3, *д*), длительность которых обратно пропорциональна ширине спектра, охватывающего эти моды.

Количество сгенерированных мод определяется величиной межмодового интервала  $\Delta f$  и шириной спектра люминесценции  $\Delta f_{\text{сп}}$  (рис. 6.3, *а*).

Синхронизацию мод можно разделить на два типа: активную и пассивную.

**Активная синхронизация мод** реализуется путём добавления в резонатор лазера какого-либо синхронизирующего элемента, который управляется или модулируется внешним источником, например амплитудного модулятора.

В оптических модуляторах обычно используется электрооптический эффект. На модулятор подаётся синусоидальное напряжение от высокочастотного генератора, приводящее к синусоидальному изменению амплитуды световой волны в резонаторе (рис. 6.3, *б*). Частоту модуляции  $F$  устанавливают равной разности частот  $\Delta f$  (см. формулу (6.3)) между соседними модами.

Процесс синхронизации мод рассмотрим в следующей последовательности. Сначала рассмотрим модуляцию излучения моды наибольшей интенсивности, частота которой  $f_0$  близка к максимуму спектра люминесценции (см. рис. 6.3, а). В результате модуляции этой моды возникают боковые составляющие с частотами  $(f_0 \pm F)$ , совпадающие с частотами соседних мод  $(f_0 \pm \Delta f)$ . В моменты времени, когда амплитуда модулированной моды  $f_0$  достигает максимума, фазы волн боковых составляющих совпадают с фазой центральной моды (так как в момент синфазности волн результат их интерференции имеет максимальную величину).

Излучение этих боковых мод будет также модулировано по амплитуде с образованием следующих мод с частотами  $(f_0 \pm 2\Delta f)$  и совпадающими фазами. Продолжим этот процесс, пока все моды резонатора, попадающие в полосу люминесценции (или усиления), не будут взаимно связанными по фазе, т. е. *синхронизированными*.

Спектр излучения лазера (см. рис. 6.3, а) совпадает со спектром периодической последовательности коротких импульсов (рис. 6.5). Действительно, лазер работает в непрерывном режиме и генерирует многомодовое излучение с согласованными фазами. В результате интерференции волн этих мод на выходе лазера образуется периодическая последовательность импульсов интенсивности излучения (см. рис. 6.3, д).

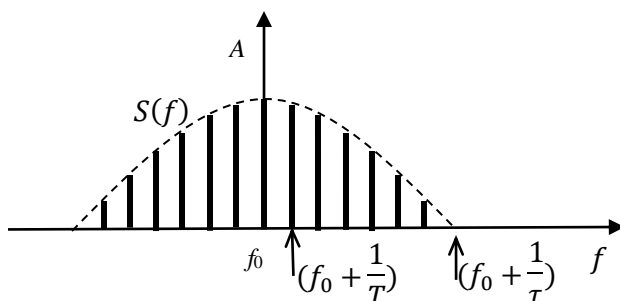


Рис. 6.5. Спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов с частотой заполнения  $f_0$ :  $T$  – период следования импульсов,  $\tau$  – длительность импульса,  $S(f)$  – огибающая спектра



Период следования импульсов  $T$  определяется межмодовым интервалом  $\Delta f$  или временем полного обхода кольцевого резонатора:

$$T = \frac{1}{\Delta f} = \frac{L}{c}, \quad (6.5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $L$  – оптическая длина резонатора,  $L = nl$ , здесь  $n$  – показатель преломления активной среды,  $l$  – геометрическая длина волоконного контура.

Длительность импульса  $\tau$  на уровне половинной мощности в первом приближении определяется шириной спектра люминесценции  $\Delta f_{\text{сп}}$ :

$$\tau \approx \frac{1}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{1}{\Delta f(N - 1)}, \quad (6.6)$$

где  $N$  – число продольных мод в спектре люминесценции;  $\Delta f$  – межмодовая частота.

Метод активной синхронизации мод предполагает, что все моды оптического резонатора эквидистантны. Но в волоконных лазерах оптоволокно обладает дисперсией, т. е. зависимостью показателя преломления  $n$  от длины волны (частоты) моды. Межмодовый интервал изменяется по мере удаления от центральной моды, и боковые составляющие модулированных мод ( $f_m \pm F$ ) перестают совпадать с модами резонатора.

В результате:

- ширина спектра синхронизированных мод будет уже спектра люминесценции;

- не удастся получить импульсы длительностью менее 100 пс;

- в промежутках между импульсами излучение не падает до нуля вследствие интерференции несинхронизированных мод.

Если соседние моды в спектре излучения лазера расположены неэквидистантно, то используют метод пассивной синхронизации мод.

**Пассивная синхронизация мод** осуществляется без внешнего управления, за счёт нелинейных оптических эффектов.

Для генерации ультракоротких импульсов в волоконных лазерах часто используют пассивную синхронизацию мод, которая реализуется с помощью трёх основных методов: нелинейных кольцевых зеркал, насыщающихся поглотителей и нелинейного

вращения плоскости поляризации, основанного на нелинейном эффекте Керра в оптических волокнах.

Сложение большого числа синхронизированных мод в широкой полосе люминесценции активного вещества позволяет получать импульсы длительностью менее 1 пс и большой пиковой мощности.

### ***6.1.3. Устройство кольцевого лазера с пассивной синхронизацией мод***

Для реализации пассивной синхронизации мод в резонатор лазера между двумя контроллерами поляризации помещён поляризационный изолятор. Он обеспечивает однонаправленный режим генерации и выполняет роль поляризационного дискриминатора.

Распределение интенсивности неравномерно по длительности импульса, поэтому при распространении излучения по волокну состояние поляризации оказывается также неоднородным по длительности импульса (из-за того, что нелинейный сдвиг фазы зависит от интенсивности излучения). Контроллер поляризации, расположенный перед изолятором, настраивается таким образом, чтобы поляризация центральной части импульса была линейной и соответствовала максимуму пропускания поляризационного изолятора. Таким образом, центральная часть импульса пройдет через поляризационный изолятор без потерь, а крылья импульса с меньшей интенсивностью и поляризацией, отличной от поляризации центральной части, будут ослаблены. Второй контроллер поляризации преобразует линейную поляризацию в эллиптическую, что необходимо для дальнейших нелинейных преобразований излучения и увеличения эффективности усиления в эрбиевом волокне. В итоге с каждым проходом через контроллер поляризации импульс становится более коротким. Если изначально излучение носило флуктуационный характер, то благодаря данному механизму через определённое время будет сформирован одиночный на периоде резонатора импульс, спектр которого представляет собой набор согласованных по фазе мод.

Данный метод пассивной синхронизации мод чувствителен к изменению поляризации излучения, которая может меняться под воздействием внешних факторов (температура, акустические

и вибрационные возмущения), поэтому для стабильной генерации импульсов лазер должен быть термо- и виброизолирован.

#### **6.1.4. Кольцевой лазер ультракоротких импульсов**

Кольцевой лазер, реализуемый в данной работе, является полностью волоконной схемой, состоящей из волноводного канала накачки, замкнутого однонаправленного оптического контура и области связи (волоконно-оптического разветвителя).

Основными элементами кольцевого лазера являются:

- диод накачки (прил. 4);
- спектральный уплотнитель (прил. 10);
- активное волокно;
- оптический разветвитель (прил. 9);
- контроллер поляризации;
- волоконно-оптический изолятор (прил. 16).

## **6.2. Порядок выполнения работы**

*Цель работы:* исследование основных характеристик волоконного импульсного лазера ультракоротких импульсов.

### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Примечание	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналог	1
3. Осциллограф	АКИП-4134/1 или аналог	1
4. Фотоприёмник	ThorLabs PDA10CF-EC или аналог	1
5. Коаксиальный кабель	BNC-BNC	1
6. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999CHP 3CN01351DL, контроллер MBL1500 или аналоги	1
7. Спектральный объединитель (уплотнитель)	L320461665 или аналог	1
8. Волокно, легированное Er <sup>3+</sup> (активное волокно)	Длина 6 м	1

Наименование	Примечание	Кол-во
9. Разветвитель	–	
10. Контроллер поляризации	PFC020 или аналог	2
11. Оптический изолятор	ISO-D-P-1550 или аналог	1
12. Соединительный оптический кабель одномодовый	Коннектор FC/APC	2
13. Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт, скальватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	1

### Задания

#### 1. Измерение спектральной характеристики волоконного лазера ультракоротких импульсов

1.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 6.6.

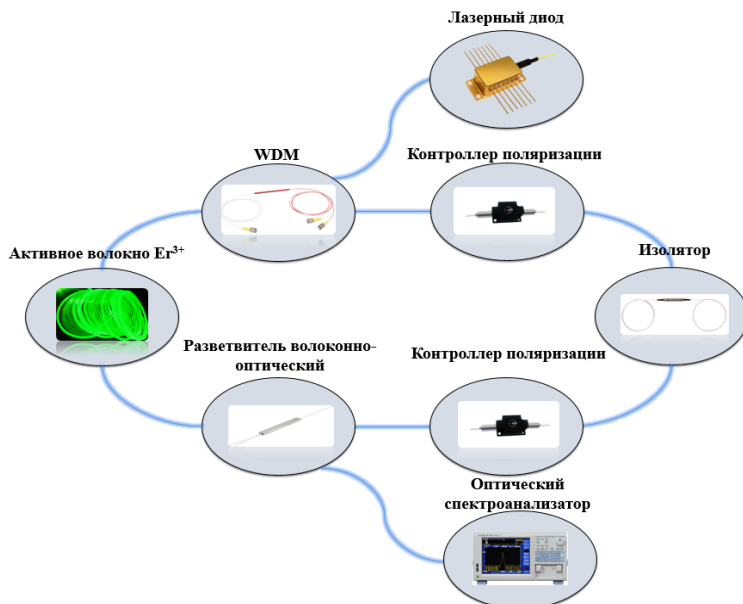


Рис. 6.6. Схема измерения спектральной характеристики лазера

Для этого:

– установить модуль полупроводникового лазерного диода 1999СНР 3СN01351DL в контроллер лазерных диодов согласно инструкции на оборудование, приведённой в прил. 4;

– соединить волоконно-оптические компоненты;

– установить оптическое волокно в контроллеры поляризации и закрепить прижимными устройствами, как показано в прил. 15 на рис. П15.1;

– соединить оптический спектроанализатор Yokogawa AQ637D и выходной конец разветвителя оптическим кабелем одномодовым.

1.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода 25 °С и тока диода 0,0 А.

1.3. Включить оптический спектроанализатор Yokogawa AQ637D согласно инструкции в прил. 3. Установить основные настройки согласно табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные настройки спектроанализатора Yokogawa AQ637

Настройка	Значение	Единица измерения
START WL	1500	Начальная длина волны, нм
STOP WL	1600	Конечная длина волны, нм
RESLN	0.5	Разрешение измерений
AVG	1	Время усреднения, с
SMPL	2001	Количество выбранных точек для измерений
HIGH 1	–	Чувствительность измерения

1.4. Установить значение тока лазерного диода накачки 100 мА.

1.5. Поворотом ложементов контроллеров поляризации (прил. 15, рис. П15.1) добиться появления спектра излучения, характерного для люминесценции  $\text{Er}^{3+}$ .

1.6. Сохранить спектр излучения согласно прил. 3, раздел «Запись данных» и рис. ПЗ.5.

1.7. Выключить оборудование.

## **2. Измерение импульсных характеристик волоконного лазера ультракоротких импульсов**

2.1. Собрать установку согласно схеме, представленной на рис. 6.7.

Для этого:

– заменить оптический спектроанализатор Yokogawa AQ637D на фотоприёмник ThorLabs PDA 10CF-EC;

– подключить фотоприёмник к осциллографу АКИП-4134/1 при помощи коаксиального кабеля, как показано в прил. 14 на рис. П14.1, б.

2.2. Включить контроллер лазерных диодов. Установить значения температуры стабилизации лазерного диода  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и тока диода  $I_n = 0,0\text{ A}$ .

2.3. Включить фотоприёмник и осциллограф.

2.4. Повысить значение тока лазерного диода накачки на 50 мА.

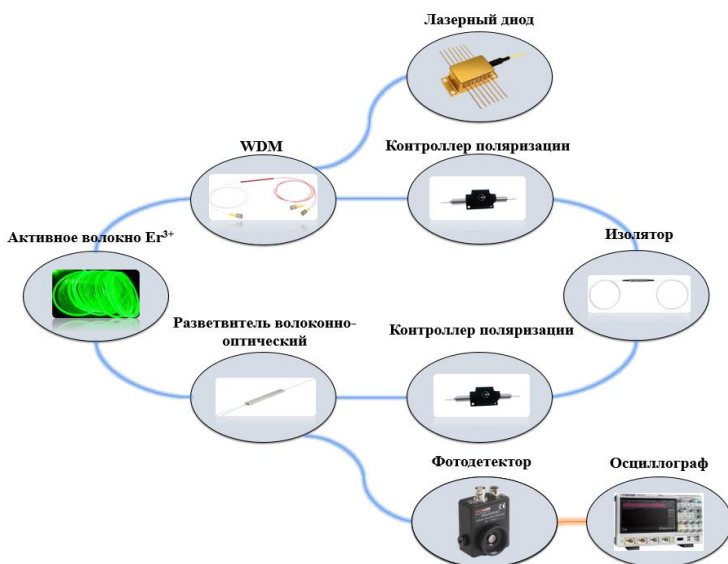


Рис. 6.7. Схема измерения импульсных характеристик лазера

2.5. Произвести измерения временных характеристик импульсного лазерного излучения и сохранить осциллограмму согласно инструкции на осциллограф.

2.6. Повторять п.п. 2.4, 2.5 до достижения тока диода накачки 300 мА.

2.7. Выключить оборудование.

2.8. Разобрать установку.

### **Обработка результатов измерений**

Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т. д.), с целью описания и графического представления зависимостей.

1. Обработка результатов измерения спектральной характеристики волоконного лазера ультракоротких импульсов.

Используя данные, полученные с оптического спектроанализатора, построить графики зависимости оптической мощности лазера от длины волны и определить:

1.1. Центральную длину волны  $\lambda_c$  лазера по формуле

$$\lambda_c = \frac{\sum P_i * \lambda_i}{\sum P_i}. \quad (6.7)$$

Величины, входящие в формулу (6.7), приведены на рис. 6.8.

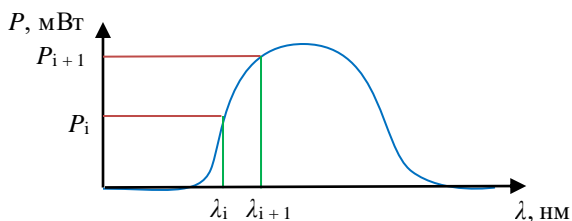


Рис. 6.8. Метод определения центральной длины волны

1.2. Ширину спектра  $\Delta\lambda_{\text{сп}}$  по уровню половины мощности по формуле

$$\Delta\lambda_{\text{сп}} = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}. \quad (6.8)$$

Методика определения величин  $\lambda_{\text{max}}$  и  $\lambda_{\text{min}}$  представлена на рис. 6.9.

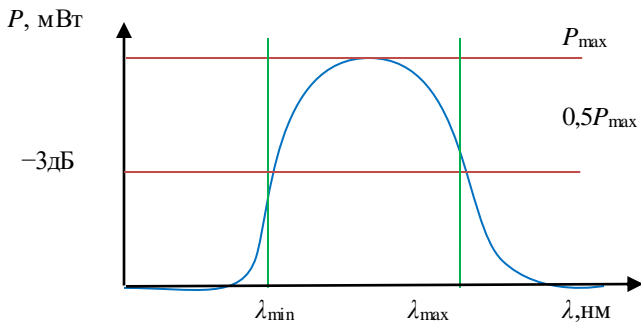


Рис. 6.9. Метод определения ширины спектра по уровню половины мощности

Данные занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты измерения спектральной характеристики волоконного лазера ультракоротких импульсов

Источник излучения	Центральная длина волны $\lambda_c$ , нм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda_{\text{сп}}$ , нм
Волоконный лазер ультракоротких импульсов		

2. Обработка результатов измерения импульсных характеристик волоконного лазера ультракоротких импульсов.

Используя данные, полученные с осциллографа, построить графики зависимости напряжения, снимаемого с фотодетектора, от времени и определить:

- 2.1. Период следования импульсов.
- 2.2. Частоту следования импульсов.
- 2.3. Длительность импульсов.

Данные занести в табл. 6.3



Таблица 6.3

Результаты измерения импульсных характеристик  
волоконного лазера ультракоротких импульсов

Но- мер опыта	Ток диода накачк и $I_n$ , мА	Период следо- вания импуль- сов $T$ , мкс	Частота сле- дования им- пульсов $f$ , Гц	Длительность импульса $\tau$ , мкс
1	0			
2	50			
...				
$N$				

Согласно формуле (6.6) длительность импульса  $\tau$  на уровне половинной мощности в первом приближении определяется шириной спектра люминесценции  $\Delta f_{\text{сп}}$ :

$$\tau \approx \frac{1}{\Delta f_{\text{сп}}} = c \frac{\Delta \lambda_{\text{сп}}}{\lambda_c^2}.$$

Используя полученные значения ширины спектра излучения и длительности импульсов, проверить выполнение соотношения между ними.

### 6.3. Контрольные вопросы

1. Теоретические основы работы генераторов: баланс амплитуд, баланс фаз, мягкий и жёсткий режимы возбуждения.
2. Основные элементы конструкции лазера: активная среда, резонатор, система накачки.
3. Основные конструкции оптических резонаторов: открытые и кольцевые. Преимущества и недостатки конструкций.
4. Принципиальная схема кольцевого волоконного лазера ультракоротких импульсов.
5. Для чего в схеме кольцевого волоконного лазера нужен контроллер поляризации?
6. Синхронизация мод.
7. Механизмы пассивной синхронизации мод.
8. Механизмы активной синхронизации мод.
9. Области применения импульсных лазеров.
10. Объяснить полученные результаты.

## Список литературы

1. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Ткаченко С. И., Калинин Ю. Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Квантовые излучатели: учеб.-метод. пособие / МФТИ. М., 2014. 44 с.
3. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков [и др.]. Ульяновск: Изд. центр УлГУ, 2012. 184 с.
4. Таусенев А. В., Крюков П. Г. Непрерывный фемтосекундный лазер на Ег-волокне с диодной накачкой посредством рамановского конвертера // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 2. С. 106–110.
5. Самосинхронизация мод в эрбиевых волоконных лазерах с насыщающимися поглотителями в виде полимерных плёнок, содержащих синтезированные методом дугового разряда одностенные углеродные нанотрубки / А. В. Таусенев, Е. Д. Образцова, А. С. Лобач, А. И. Чернов, В. И. Конов, А. В. Комященко, П. Г. Крюков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 3. С. 205–208.
6. Direct continuous-wave measurement of  $n_2$  in various types of telecommunication fiber at  $1.55 \mu\text{m}$  / A. Boskovic, S. V. Chernikov, J. R. Taylor, L. Gruner-Nielsen and O. A. Levring // Optics Letters. 1996. Vol. 21, no. 24. P. 1966–1968.
7. Bulushev A. G., Dianov E. M., Okhotnikov O. G. Self-starting mode-locked laser with a nonlinear ring resonator // Optics Letters. 1991. Vol. 16, no. 2. P. 88–90.
8. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов и их применение: учеб. пособие. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2012. 248 с.
9. Фотоника и оптоинформатика: волоконно-оптические квантовые генераторы: учеб.-метод. пособие / Ю. А. Конин, И. Л. Вольхин, М. И. Булатов, Н. А. Мальков, А. С. Луценко, Н. С. Григорьев, А. В. Перминов; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. Пермь, 2024. 123 с.

## **Работа 7. СБОРКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Волоконно-оптические усилители на основе легированных эрбием оптических волокон (Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA) применяются для повышения мощности оптического сигнала.

Волоконно-оптические усилители могут выполнять следующие функции:

- усилителя мощности (бустера) для дополнительного усиления сигнала источника излучения на основе лазерного или суперлюминесцентного диода;
- линейного усилителя для восстановления уровня оптического сигнала в волоконно-оптических линиях передачи;
- предварительного усилителя на входе фотоприёмного устройства.

Преимущества эрбиевых усилителей заключаются в следующем:

- непосредственно усиливают проходящий оптический сигнал без преобразования в электрический сигнал;
- диапазон длин волн усиливаемых сигналов находится в области минимальных оптических потерь в кварцевом волокне (рис. 7.1);
- обеспечивают возможность одновременного усиления сигналов с различными длинами волн;
- усиление оптических сигналов не зависит от метода их модуляции;
- достигается низкий уровень шумов и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи.

Основная область применения волоконно-оптических усилителей – компенсация затухания сигнала в оптическом кабеле волоконно-оптической линии связи. Линии длиной в сотни километров разделяют на участки (в несколько десятков километров), между которыми встраиваются волоконно-оптические усилители. Они, не изменяя формы сигнала, повышают его мощность. В одной волоконно-оптической линии связи может быть встроено несколько усилителей.

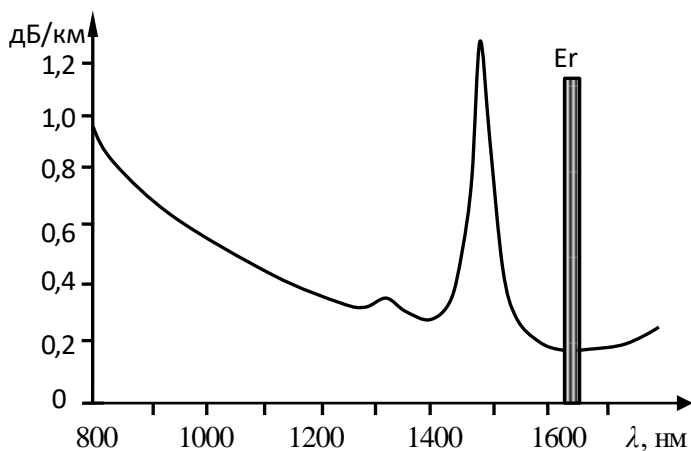


Рис. 7.1. Оптические потери кварцевого волокна и диапазон работы эрбиевого усилителя

### 7.1. Основные характеристики активного оптического волокна, легированного ионами эрбия

Основным элементом (*активной зоной*) волоконно-оптических усилителей является участок оптоволокна из кварцевого стекла ( $\text{Si}^{4+}\text{O}_2^{2-}$ ), легированного ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ). Длина активного волокна составляет обычно  $5\div 8$  м. Эрбиевое волокно, как и обычное одномодовое оптическое волокно, имеет сердцевину диаметром  $3\div 6$  мкм, легированную германием или другим веществом, увеличивающим показатель преломления, и оболочку из чистого кварца диаметром 125 мкм. Центральная часть сердцевины диаметром примерно 2 мкм дополнительно легирована ионами эрбия. Концентрация ионов эрбия составляет  $10^{17}\div 10^{19}$  см $^{-3}$  (менее 0,1 %). Защитное покрытие волокна диаметром 250 мкм имеет большой коэффициент преломления и эффективно выводит из оболочки постороннее излучение.

Спектр поглощения легированного эрбием оптического волокна представлен на рис. 7.2. На рисунке видны две области поглощения: узкий пик на длине волны 980 нм и более широкая область 1480÷1550 нм, на которой выделяется острый пик 1530 нм, соответствующий поглощению на длине волны люминесценции эрбия.

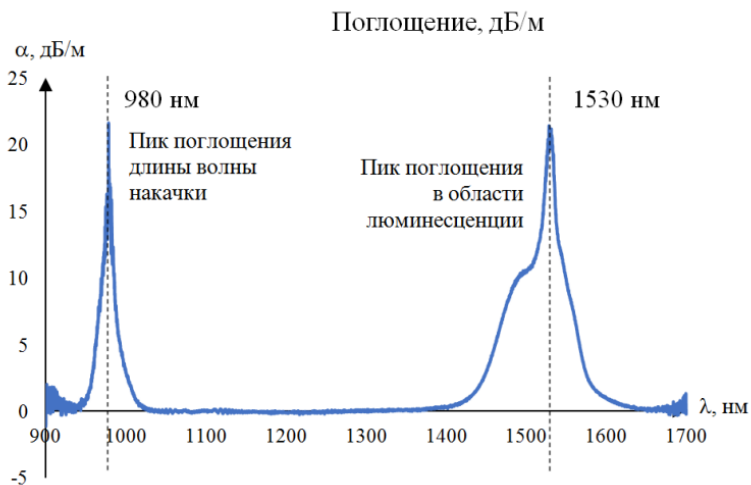


Рис. 7.2. Спектр поглощения оптического волокна, легированного ионами эрбия

В эрбиевом волокне сигналы с длиной волны около 1550 нм могут усиливаться за счёт использования энергии излучения *оптической накачки*, переводящей внешние (оптические) электроны ионов эрбия в возбуждённое состояние. Длина волны оптической накачки 980 или 1480 нм, что соответствует полосам поглощения ионов эрбия, как показано на рис. 7.2.

## 7.2. Принцип работы волоконно-оптических эрбиевых усилителей

Принцип работы усилителей основан на явлении усиления света при вынужденном (стимулированном) излучении ионов эрбия, находящихся в возбуждённом состоянии (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – LASER). Это то же самое явление, которое обеспечивает возникновение генерации в лазерах.

На рис. 7.3 приведена диаграмма энергетических уровней иона  $\text{Er}^{3+}$ , где  ${}^4\text{I}_{15/2}$  – основное состояние иона,  ${}^4\text{I}_{13/2}$  – метастабильное состояние и  ${}^4\text{I}_{11/2}$  – возбуждённое состояние с малым временем жизни. В результате взаимодействия ионов эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ) с электрическим полем соседних с ним ионов в кварцевом стекле каждый из уровней расщеплён на ряд подуровней, образующих энергетические зоны (эффект Штарка).

Число ионов в единице объёма, находящихся на некотором уровне энергии, называется заселённостью этого уровня. В отсутствие накачки заселённость  $N_1$  основного уровня энергии  ${}^4\text{I}_{15/2}$  максимальна, а заселённости  $N_2$  и  $N_3$  уровней энергии метастабильного  ${}^4\text{I}_{13/2}$  и короткоживущего  ${}^4\text{I}_{11/2}$  пренебрежимо малы, поскольку они отстоят от основного уровня на расстояниях, значительно больших, чем средняя энергия кванта теплового движения  $kT$ .

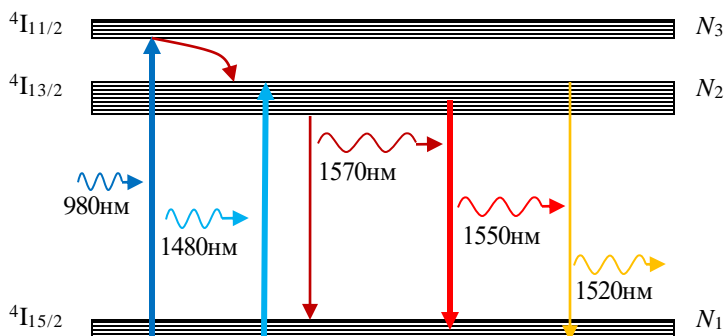


Рис. 7.3. Схема энергетических переходов ионов эрбия

При интенсивном облучении волокна мощным лазером накачки с длиной волны  $\lambda_{13} = 980$  нм большое количество ионов эрбия переходит из основного состояния в возбуждённое короткоживущее состояние с временем жизни  $\tau_3 \approx 1$  мкс. С него ионы переходят на метастабильный уровень энергии с большим временем жизни  $\tau_2 \approx 10$  мс. Переход сопровождается испусканием *фононов* (квантов энергии тепловых колебаний атомов). При соответствующей мощности накачки число ионов  $N_2$ , находящихся на уровне  ${}^4I_{13/2}$ , может превышать число ионов  $N_1$  на уровне  ${}^4I_{15/2}$ . Таким образом, в системе ионов эрбия происходит накопление энергии за счёт поглощения квантов излучения накачки.

Состояние среды, при котором заселённость более высокого уровня энергии превышает заселённость нижележащего уровня, получило название *состояния с инверсией заселённости*. В ряде схем усилителей состояние с инверсией заселённости уровней достигается при облучении волокна светом лазера с длиной волны 1480 нм.

Процессы, происходящие в активной области оптического волокна с инверсной заселённостью энергетических уровней, представлены на рис. 7.4. Электрон может самопроизвольно перейти с уровня  ${}^4I_{13/2}$  в более низкое энергетическое состояние, на уровень  ${}^4I_{15/2}$ , испустив при этом квант света (см. рис. 7.4, *з*). Спонтанные переходы являются случайными и не зависят от внешнего электромагнитного поля. Излучённые фотоны имеют случайные частоту, фазу, поляризацию и направление распространения. Спектр люминесценции находится в пределах от 1520 до 1570 нм с максимумом на длине волны 1550 нм.

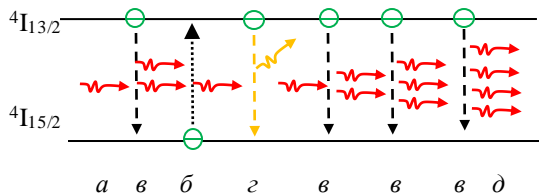


Рис. 7.4. Процессы в активной области оптического волокна: *а* – входное излучение; *б* – поглощение; *в* – стимулированное излучение; *з* – спонтанное излучение; *д* – усиленная волна

Другим оптическим процессом является поглощение кванта света, сопровождающееся переходом электрона с уровня  ${}^4I_{15/2}$  на уровень  ${}^4I_{13/2}$  (см. рис. 7.4, б).

На рис. 7.4, а изображён слабый входной сигнал с энергией фотонов, совпадающей с энергией перехода электрона из метастабильного состояния в основное:

$$\frac{hc}{\lambda} = W_2 - W_1,$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – энергии уровней  ${}^4I_{15/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$ , а длина волны усиленного излучения  $\lambda \approx 1550$  нм.

При прохождении по волокну фотоны входного сигнала взаимодействуют с ионами эрбия и вынуждают их совершать переходы с метастабильного уровня  $W_2$  на основной уровень  $W_1$  с испусканием фотонов, когерентных с фотонами входного сигнала. Таким образом, в каждом элементарном акте вынужденного излучения возникают два фотона с идентичными свойствами: частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения, как показано на рис. 7.4, в. Поскольку все вновь рождённые фотоны когерентны, их совокупность представляет собой электромагнитную волну, отличающуюся от электромагнитной волны входного сигнала только большей интенсивностью. При этом ионы эрбия, отдав запасённую энергию в ходе вынужденного излучения, возвращаются в основное, невозбуждённое состояние.

Однако не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии  $W_2$  и обеспечивают усиление сигнала. Часть ионов находится на уровне  $W_1$ . Эти ионы, взаимодействуя с фотонами, энергия которых совпадает с энергией перехода ( $\lambda \approx 1550$  нм), эффективно их поглощают, переходя на уровень  $W_2$ , как показано на рис. 7.4, б. При этом спектр поглощения практически совпадает со спектром усиления.

Для изменения мощности сигнала  $dP$  при прохождении сигналом участка волокна длиной  $dx$  можно написать

$$dP = [N_2 \sigma_{12}(\lambda) - N_1 \sigma_{21}(\lambda)] P dx, \quad (7.1)$$

где  $P$  – мощность излучения сигнала;  $\sigma_{12}(\lambda)$  и  $\sigma_{21}(\lambda)$  – сечения поглощения и вынужденного излучения на длине волны сигнала;  $N_1$  и  $N_2$  – показатели заселённости основного и метастабильного уровней.



Для двухуровневой схемы ( $W_1$  и  $W_2$ ) справедливо соотношение, связывающее сечение вынужденного излучения с сечением поглощения света:

$$g_2 \sigma_{21}(\lambda) = g_1 \sigma_{12}(\lambda), \quad (7.2)$$

где  $g_1$  и  $g_2$  – показатели кратности вырождения основного и возбуждённого состояний. Для иона  $\text{Er}^{3+}$  отношение  $g_1/g_2 \approx 1$ . Если число ионов, находящихся на уровне  $W_2$ , меньше числа ионов, находящихся на основном уровне  $W_1$  ( $N_2 < N_1$ ), будет наблюдаться поглощение светового сигнала:

$$dP < 0.$$

Именно поэтому необходимым условием усиления света является создание инверсии заселённости ( $N_2 > N_1$ ) между двумя рабочими уровнями энергии  $W_2$  и  $W_1$ . Для создания инверсии заселённости нужно перевести больше половины ионов эрбия на метастабильный уровень  $W_2$ .

Мощность накачки  $P_{\text{нак}}$  эрбиевого усилителя, при которой показатели заселённости уровней  $W_1$  и  $W_2$  равны, называется *пороговой мощностью*. Поглощение прекращается, и сигнал проходит по волокну, не изменяясь по величине ( $dP = 0$ ).

При мощности накачки больше пороговой первое слагаемое в формуле (7.1) превышает второе, и всё выражение становится положительным ( $dP > 0$ ). Сигнал при прохождении волокна усиливается. Проинтегрировав формулу (7.1), получим мощность сигнала после прохождения отрезка эрбиевого волокна длиной  $x$ :

$$P(x) = P(0) \exp\{[N_2 \sigma_{12}(\lambda) - N_1 \sigma_{21}(\lambda)]x\}. \quad (7.3)$$

Здесь  $P(0)$  – мощность сигнала на входе усилителя. Отношение мощностей сигнала на выходе и входе усилителя определяет его коэффициент усиления мощности:

$$K_P = \frac{P(x)}{P(0)}. \quad (7.4)$$

Зависимость коэффициента усиления усилителя от мощности источника накачки  $P_{\text{нак}}$  показана на рис. 7.5.

Выражение (7.3) получено в предположении, что заселённости уровней одинаковы по всей длине волокна. Однако мощность излучения накачки уменьшается вдоль волокна, и, как следствие, снижается заселённость метастабильного состояния  $N_2$ .

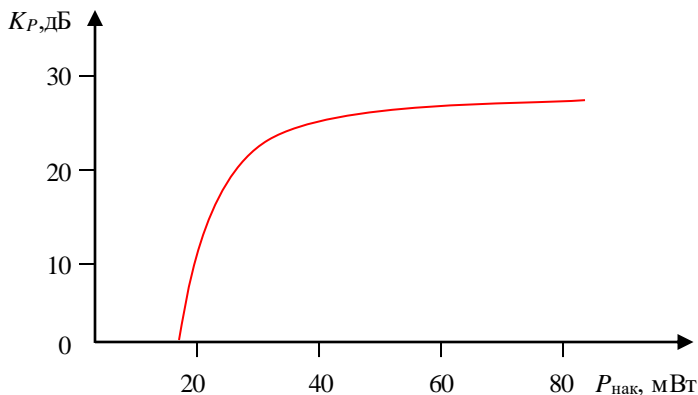


Рис. 7.5. Зависимость коэффициента усиления усилителя от мощности источника накачки ( $P_{\text{нак}}$ )

Сечение поглощения  $\sigma_{12}$  и связанное с ним (см. формулу (7.2)) сечение вынужденного излучения  $\sigma_{21}$  можно найти экспериментально, если измерить коэффициент поглощения света в отсутствие накачки. В этом случае заселённость основного уровня практически равна полной концентрации ионов эрбия:  $N_1 \approx N$ , а  $N_2 \approx 0$ .

Проинтегрировав формулу (7.1), получим

$$P(x) = P(0)\exp[-N_1 \sigma_{21}(\lambda)x] = P(0)\exp[-\alpha x], \quad (7.5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения, измерение которого позволяет определить сечение поглощения  $\sigma_{12}$ ,  $\alpha = N\sigma_{12}$ .

Часть возбуждённых ионов эрбия переходит с метастабильного уровня в основное состояние спонтанно (см. рис. 7.4, з), излучая фотоны с длиной волны около 1550 нм:

$$hc/\lambda = W_2 - W_1.$$

При этом энергия фотонов, начальные фазы волновых пакетов, поляризация и направления их распространения случайны. Излучение носит шумовой (некогерентный) характер. Усиленное спонтанное излучение является основным источником шумов усилителя.

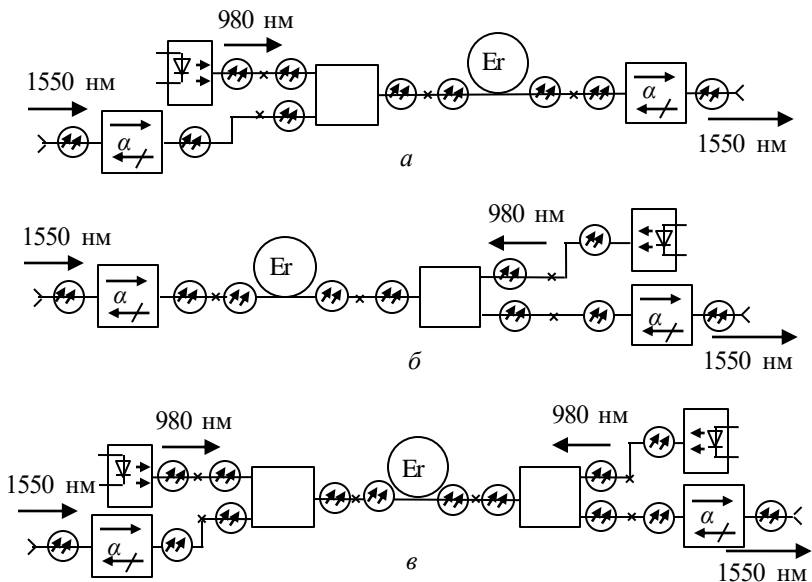
Среднее время жизни метастабильного состояния  $W_2$  (время релаксации для спонтанного излучения) составляет около 10 мс.

Средним временем жизни называют время, в течение которого первоначальная заселённость уровня уменьшается в  $e \approx 2,72$  раз.

### 7.3. Оптические схемы волоконно-оптических усилителей

Поток излучения накачки вводится в волокно с помощью *направленного ответвителя-мультиплексора*. В качестве источников накачки используются многомодовые полупроводниковые лазерные диоды с мощностью излучения от 100 до 250 мВт и более.

На входе и выходе оптического усилителя устанавливают *оптические изоляторы* – устройства, пропускающие световые сигналы только в одном направлении. Они предотвращают проникновение в усилитель паразитных сигналов, отражённых от неоднородностей линии связи. Отражённые сигналы являются помехами (шумами), ухудшающими работу усилителя. На рис. 7.6, *а* изображена схема усилителя с *попутной накачкой*. Существуют также схемы со встречной накачкой (рис. 7.6, *б*), при которой оптический сигнал и излучение накачки проходят по волокну в противоположных направлениях, и накачкой в двух направлениях (рис. 7.6, *в*).



Условные графические обозначения:

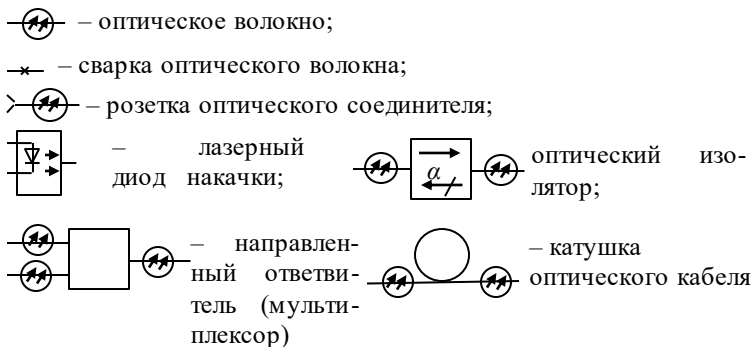


Рис. 7.6. Оптические схемы волоконно-оптических усилителей (ВОУ) с накачкой в направлении: *а* – попутном; *б* – встречном; *в* – обоих

#### 7.4. Основные характеристики эрбиевого усилителя

Диапазон длин волн усиливаемых оптических сигналов 1,53÷1,58 мкм. Ширина спектра усиливаемых сигналов равна

ширине спектра излучения ионов эрбия и определяется шириной энергетических зон ионов (схему энергетических переходов эрбия см. на рис. 7.3). Наиболее широкий спектр излучения, до 50 нм, имеют ионы эрбия в кварцевом стекле, легированном алюминием (рис. 7.7).

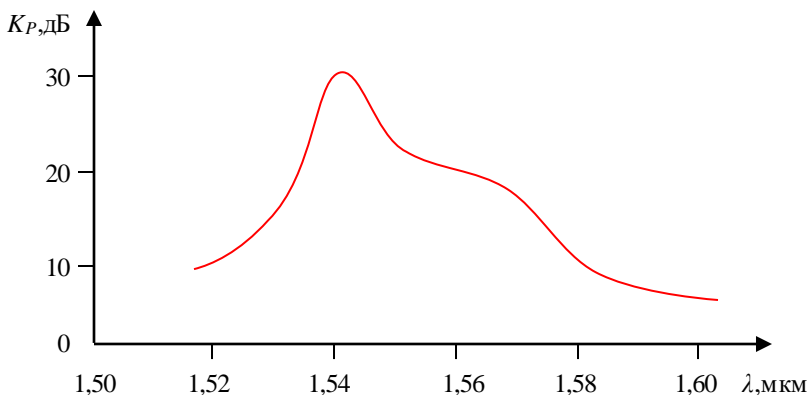


Рис. 7.7. Спектр усиления эрбиевого усилителя

*Коэффициент усиления* определяется как отношение мощности сигнала на выходе усилителя  $P_{\text{вых}}$  к мощности входящего сигнала  $P_{\text{вх}}$  (измеряется в децибелах), дБ:

$$K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (7.6)$$

Если уровни мощности входного и выходного сигналов выражены в логарифмических единицах (дБм), то коэффициент усиления равен разности уровней мощности выходного и входного сигналов:

$$K_p [\text{дБ}] = P_{\text{вых}} [\text{дБм}] - P_{\text{вх}} [\text{дБм}]. \quad (7.7)$$

*Уровнем мощности*, дБм, называется величина, показывающая, на сколько децибелов мощность сигнала  $P$  больше (или меньше) 1 мВт, дБм:

$$P = 10 \lg \frac{P, \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}}, \text{ дБм}. \quad (7.8)$$

Например, запись  $P = 30$  дБм означает, что уровень мощности составляет +30 дБ относительно 1 мВт, т. е.

$$P = 10^{\left(\frac{30}{10}\right)} \cdot 1 \text{ мВт} = 1 \text{ Вт}.$$

Типичное значение коэффициента усиления эрбиевого усилителя составляет 20÷30 дБ для слабых сигналов. Для слабых сигналов коэффициент усиления приблизительно постоянен и мощность на выходе усилителя изменяется пропорционально входной (рис. 7.8, область А).

Высокий уровень входного сигнала вызывает интенсивное вынужденное излучение, при котором существенно уменьшается заселённость метастабильного уровня  $W_2$  и тем самым понижается коэффициент усиления (рис. 7.8, область В).

*Мощность насыщения*  $P_{\text{вых.макс}}$  определяет максимальную мощность сигнала, которая может быть получена на выходе усилителя (см. рис. 7.8, область В). Этот параметр зависит от схемы построения ВОУ (см. рис. 7.6) и мощности лазера накачки. У мощных эрбиевых усилителей  $P_{\text{вых.макс}}$  может превосходить 36 дБм (4 Вт).

*Неравномерность коэффициента усиления* определяется как разность между максимальным и минимальным значениями коэффициента усиления в пределах рабочего спектрального диапазона. Как видно из рис. 7.7, изменение коэффициента усиления слабого сигнала в пределах полосы 1,53÷1,58 мкм может превышать 10 дБ. Обычно усилители мощности работают в режиме насыщения по отношению к сигналу на выходе. При этом выравниваются уровни сигналов с различными длинами волн.

В случае усиления слабых сигналов необходимо провести *сглаживание спектральной характеристики*. Для этого в оптическую цепь усилителя вводят спектрально-селективные поглощающие фильтры. Основным видом фильтра является фотоиндуцированная длиннопериодная брэгговская решётка, полученная путем пространственно-периодического облучения сердцевины оптоволокна ультрафиолетовым излучением через его поверхность. Спектр и интенсивность поглощения задаются периодом решётки и временем облучения. Применение сглаживающих фильтров, изготовленных по этой технологии, позволяет уменьшить неравномерность коэффициента усиления до десятых долей децибела в пределах рабочего диапазона.

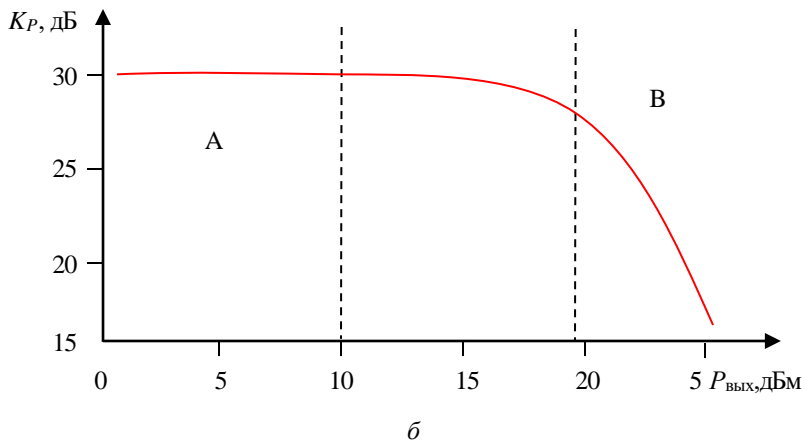
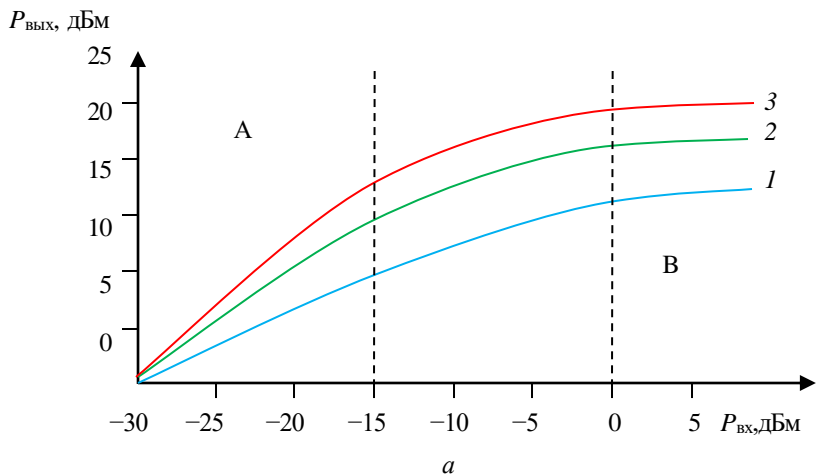


Рис. 7.8. Характеристики волоконно-оптических усилителей:  
*a* – амплитудная (кривая 1 – накачка в попутном направлении; кривая 2 – во встречном направлении; кривая 3 – в двух направлениях, при одинаковой мощности источников накачки);  
*б* – коэффициента усиления от выходной мощности  
 (А – область работы линейного усилителя; В – усилителя мощности)

Энергетическая эффективность определяется отношением приращения мощности сигнала к величине мощности накачки:

$$P_{\text{эфф}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{Н}}}. \quad (7.9)$$

Отношение числа фотонов сигнала  $N_c$ , появившихся в процессе усиления сигнала, к числу поглощённых фотонов накачки  $N_n$  называется *квантовой эффективностью* накачки:

$$Q_{\text{эф}} = N_c / N_n. \quad (7.10)$$

Накачка на длине волны 980 нм позволяет получить энергетическую эффективность 55 % при квантовой эффективности 86 %. Шум усилителя – некогерентное излучение, возникающее в эрбиевом волокне. Ионы эрбия могут самопроизвольно (спонтанно) переходить из метастабильного состояния в основное с испусканием фотона:

$$hc/\lambda = W_2 - W_1.$$

Спонтанное излучение усиливается так же, как полезный сигнал, распространяющийся по усилителю. Ввиду этого, даже если нет входного сигнала, на выходе усилителя всегда имеется усиленное спонтанное излучение (Amplified Spontaneous Emission – ASE). Ширина спектра шума на выходе усилителя (рис. 7.9) приблизительно такая же, как и ширина полосы усиливаемых сигналов (см. рис. 7.7).

Оценим величину мощности шумов на выходе усилителя. Мощность спонтанного излучения ионов эрбия в метастабильном состоянии пропорциональна средней энергии кванта и полосе частот излучения:

$$P_{\text{СП}} \sim h\nu\Delta\nu,$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Вт·с<sup>2</sup>;  $\nu$  – средняя частота,  $\nu \approx 2 \cdot 10^{14}$  Гц;  $\Delta\nu$  – ширина спектральной полосы усиливаемых сигналов, соответствующая диапазону длин волн 1530÷1560 нм,  $\Delta\nu \approx 0,04 \cdot 10^{14}$  Гц.

Мощность усиленного спонтанного излучения на выходе усилителя

$$P_{\text{ШВЫХ}} \approx P_{\text{СП}} \cdot K_P,$$

где  $K$  – коэффициент усиления усилителя,  $K_P \approx 10^3$  (30 дБ).

$$P_{\text{Ш Вых}} \approx h \cdot \Delta\nu \cdot K_P \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ мВт},$$

$$P_{\text{Ш Вых}} \approx 10\lg(0,5 \cdot 10^{-3}) = -33 \text{ дБм}.$$



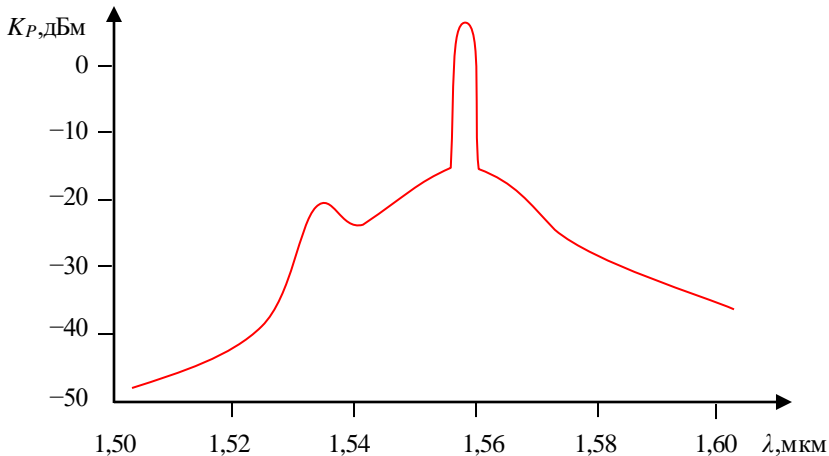


Рис. 7.9. Спектры полезного сигнала и шумов на выходе усилителя

*Шум-фактор (коэффициент шума) NF* (noise figure) характеризует ухудшение отношения сигнал / шум после прохождения сигнала через оптический усилитель и определяется как отношение сигнал / шум на входе ( $P_{\text{вх}}/P_{\text{ш вх}}$ ) к отношению сигнал / шум на выходе ( $P_{\text{вых}}/P_{\text{ш вых}}$ ):

$$NF = \frac{P_{\text{вх}}/P_{\text{ш вх}}}{P_{\text{вых}}/P_{\text{ш вых}}}. \quad (7.11)$$

Мощность шума на выходе состоит из суммы мощности усиленного спонтанного излучения и усиленной мощности шума во входном сигнале:

$$P_{\text{ш вых}} = P_{\text{сп}}K_P + P_{\text{ш вх}}K_P.$$

$$NF = \frac{P_{\text{вх}}/P_{\text{ш вх}}}{P_{\text{вх}}K_P/(P_{\text{сп}}K_P + P_{\text{ш вх}}K_P)}.$$

Часто значение шум-фактора указывается в децибелах, дБ:

$$NF = 10 \lg \left( 1 + \frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{ш вх}}} \right). \quad (7.12)$$

Шум-фактор идеального усилителя, в котором отсутствует спонтанное излучение, равен 1 (0 дБ). На практике типичные значения шум-фактора эрбиевых усилителей составляют 5÷6 дБ.

## 7.5. Суперлюминесцентный волоконный источник

Суперлюминесцентный волоконный источник (СВИ), второе название – усилитель спонтанной эмиссии. В основе его работы лежит явление индуцированного излучения. Возникшая в результате спонтанного перехода затравочная волна (рис. 7.10, *а*) поляризованная в направлении поляризации оптического волокна и распространяющаяся вдоль него, может инициировать процесс вынужденного перехода второго электрона (рис. 7.10, *б*). Испускаемый фотон идентичен инициирующему фотону (они имеют одинаковые частоту, фазу, поляризацию и направление распространения).

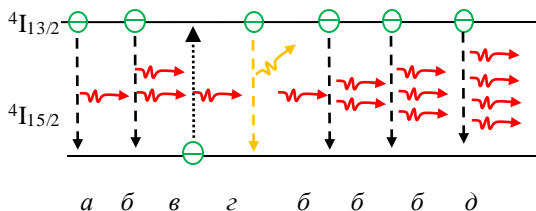


Рис. 7.10. Процессы в активной области оптического волокна: *а* – затравочная волна; *б* – стимулированное излучение; *в* – поглощение; *г* – спонтанное излучение; *д* – усиленная волна

При распространении световой волны вдоль активной среды интенсивность индуцированного излучения экспоненциально возрастает:

$$I = I_0 \exp(\alpha x). \quad (7.13)$$

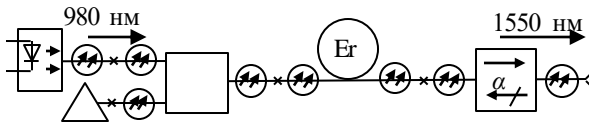
Коэффициент  $\alpha$  называют коэффициентом усиления активной среды.

В реальной активной среде происходит также обратный процесс – снижение интенсивности излучения в результате поглощения (см. рис. 7.10, *б*), а также при рассеянии на неоднородностях или примесях, которые преобразуют энергию излучения в тепло. Эти потери учитывают в коэффициенте  $\beta$ . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде определяется как

$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x]. \quad (7.14)$$

Если  $\alpha > \beta$ , то интенсивность световой волны растёт при прохождении через активную область и на выходе появляется усиленная волна (рис. 7.10, д).

Ширина спектра излучения квантового генератора на уровне половинной мощности  $\Delta\lambda$  определяет монохроматичность его излучения, в том числе время  $\tau_{\text{ког}} = \lambda^2 / (c\Delta\lambda)$  и длину продольной когерентности  $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$ . Длина продольной когерентности – это максимальная разность хода интерферирующих лучей, при которой ещё наблюдается их интерференция. Таким образом, чем уже спектр излучения, тем больше время и длина когерентности.



Условные графические обозначения:

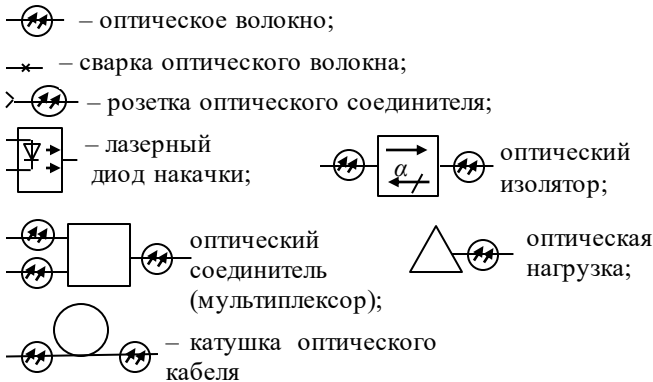


Рис. 7.11. Оптическая схема усилителя спонтанной эмиссии (суперлюминесцентного волоконного источника)

Для СВИ  $\Delta\lambda$  составляет порядка 10 нм на  $\lambda = 1530$  нм и  $I_{\text{кот}} \approx 0,24$  мВт, что позволяет исключить нежелательную интерференцию оптических волн, уменьшавшую точность определения координат волоконно-оптическими гироскопами.

Схема оптической части СВИ приведена на рис. 7.11. Излучение лазерного диода накачки с длиной волны 980 нм поступает на вход оптического соединителя, который является спектральным мультиплексором длин волн 980 и 1550 нм. С его выхода по сердцевине оптического волокна происходит торцевая накачка активной области катушки эрбиевого волокна, которая является усилителем. Затравочная волна, возникшая в результате спонтанного перехода после включения СВИ усиливается и через оптический изолятор поступает на оптический выход (розетку оптического соединителя). Оптический изолятор пропускает волну в прямом направлении и ослабляет отражённые волны, нарушающие работу генератора. В квантовом генераторе на основе СВИ затравочная волна усиливается и проходит через активную область эрбиевого волокна только один раз. Затем происходит усиление другой затравочной волны, которая отличается от первой своей поляризацией и в пределах спектра излучения – длиной волны. Таким образом, выходное оптическое излучение является деполаризованным и более широкополосным по сравнению с лазерным. К нижнему по рис. 7.11 входу мультиплексора подключается оптическая нагрузка. В зависимости от решаемых задач это может быть либо поглощающая нагрузка (аттенюатор или оптический вентиль), либо зеркало.

Типичная нормированная спектральная характеристика СВИ показана на рис. 7.12. Форма спектральной характеристики обычно близка к форме гауссовой кривой. Максимальная мощность СВИ на основе оптического волокна, легированного эрбием, достигается на длине волны  $\lambda_{\text{пик}} = 1530$  нм или вблизи неё. Ширина спектра оптического излучения  $\Delta\lambda \sim 10$  нм. Вблизи максимума мощность излучения с течением времени изменяется незначительно за счёт шумов спонтанных переходов.

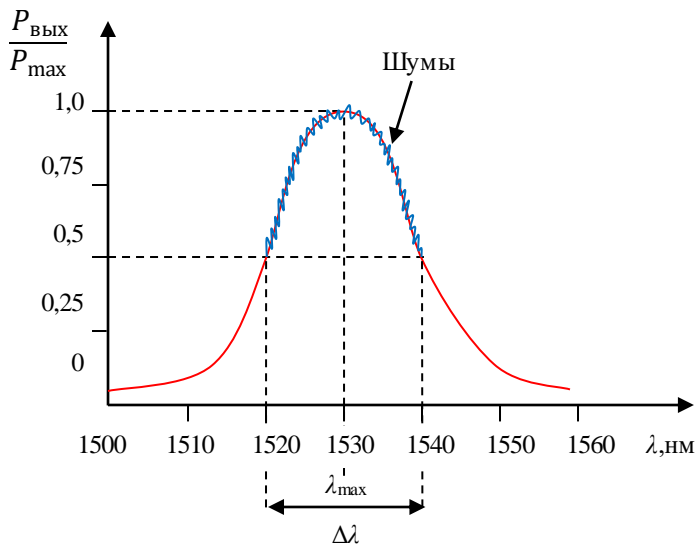


Рис. 7.12. Нормированная спектральная характеристика усилителя спонтанной эмиссии

## 7.6. Порядок выполнения работы

*Цель работы:* изучить основные оптические характеристики суперлюминесцентного волоконного источника и оптического усилителя.

### *Оборудование и принадлежности*

Наименование	Марка	Кол-во
1. Измеритель оптической мощности	EXFO LTB-1 или аналог	1
2. Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналог	1
3. Источник излучения 976 нм	Лазерный диод 1999СНР 3СN0135 1DL или аналог	1
4. Y-разветвитель	Y-разветвитель производства ПНППК	1

Наименование	Марка	Кол-во
5. Мультиплексор WDM	Мультиплексор WDM 980/1550 нм	1
6. Источник слабого сигнала 1550 нм	ТОПАЗ-3100	1
7. Активное оптическое волокно Er <sup>3+</sup>	Длина волокна: 2, 4, 6, 8 м	4
8. Драйвер лазерного диода	Maiman MBL1500	1

### Задания

#### 1. Исследование спектральных характеристик СВИ

1.1. Достать из упаковки модуль полупроводникового лазерного диода накачки 1999СНР 3СN01351DL.

1.2. Установить модуль полупроводникового диода накачки 1999СНР 3СN01351DL в контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500.

**Внимание! Установку производить с заземляющим браслетом.**

1.3. Собрать согласно рис. 7.13 схему СВИ с длиной оптического волокна 2 м.

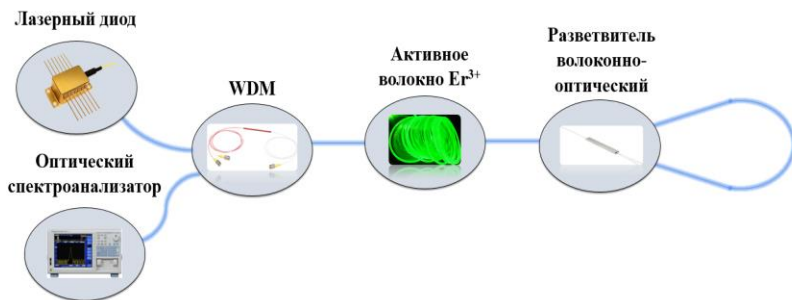


Рис. 7.13. Схема сборки СВЛ

1.4. Произвести настройку анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D согласно прил. 3. Значения настроек приведены в табл. 7.1.

Таблица.7.1

## Настройки анализатора оптического спектра

Настройка	Значение	Единица измерения
RESOLUTION	0,5	Разрешение дифракционных решеток
START WL	1450	Начальная длина волны, нм
STOP WL	1600	Конечная длина волны, нм
SAMPLING INTERVAL	0,1	Шаг записи данных, нм
SENS/MODE	HIGH 2	Режим чувствительности измерения
LEVEL	LINEIR	Режим отображения в линейной шкале мощности

1.5. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (прил. 1). Внешний вид передней панели контролера лазера в режиме генерации представлен на рис. 7.14.



Рис. 7.14. Внешний вид передней панели контролера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

1.6. Установить значение тока накачки 50,0 мА. Снять спектрограмму согласно прил. 3.

1.7. Повысить значение тока до 100,0 мА. Снять спектрограмму согласно прил. 3.

1.8. Повторить п. 1.7 для значений тока накачки 150 и 200 мА.

1.9. Повторить п.п. 1.6, 1.7, 1.8 для значений длины активного оптического волокна 4, 6 и 8 м.

1.10. Построить график зависимости мощности оптического излучения от длины волны для СВИ с длиной активного оптического волокна 2 м для всех значений тока накачки (рис. 7.15).

1.11. Повторить п. 1.10 для значений длины активного оптического волокна 4, 6 и 8 м.

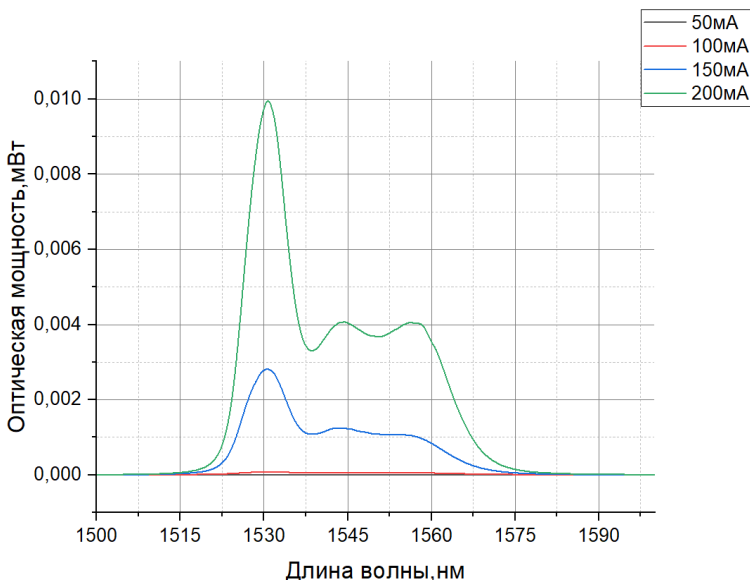


Рис. 7.15. Пример графика зависимости оптической мощности от длины волны при разных значениях тока накачки

1.12. Определить средневзвешенную длину волны спектра люминесценции для СВИ с длиной активного волокна 2 м:

$$\lambda_{\text{срв}} = \frac{\sum \lambda_i P_i}{\sum P_i}. \quad (7.15)$$

1.13. Расчет произвести для всех значений тока накачки.

1.14. Повторить п. 1.12 для активного волокна длиной 4, 6 и 8 м.



1.15. Построить графики зависимости средневзвешенной длины волны от тока накачки для всех длин активного волокна (разместить на одном графике) (рис. 7.16).

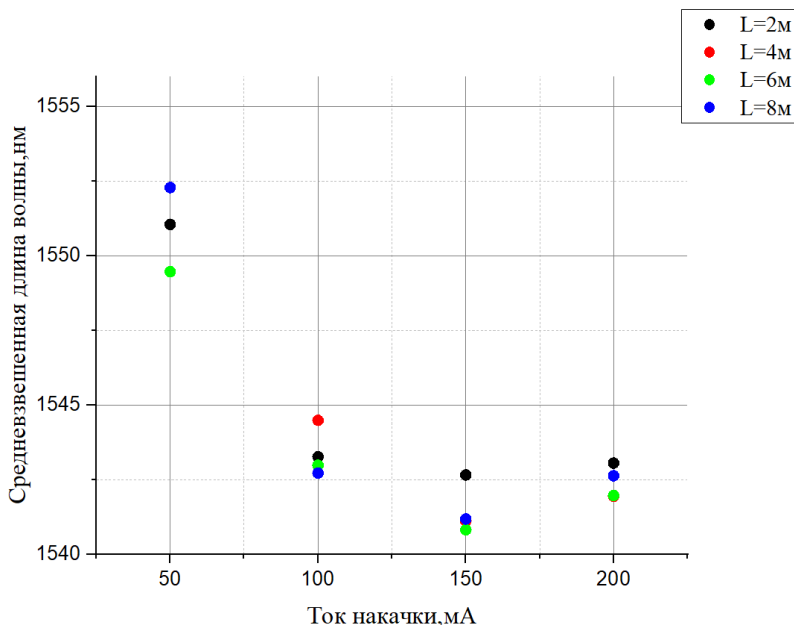


Рис. 7.16. Пример графика зависимости средневзвешенной длины волны от тока накачки

1.16. По формуле произвести нормирование оптической мощности СВИ с длиной оптического волокна 2 м для всех значений тока накачки:

$$P_{\text{норм}} = \frac{P_i - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}. \quad (7.16)$$

1.17. Повторить п. 1.16 для значений длины активного оптического волокна 4, 6 и 8 м.

1.18. Построить графики зависимости нормированной оптической мощности от длины волны. Провести линию, соответствующую половине оптической мощности (рис. 7.17).

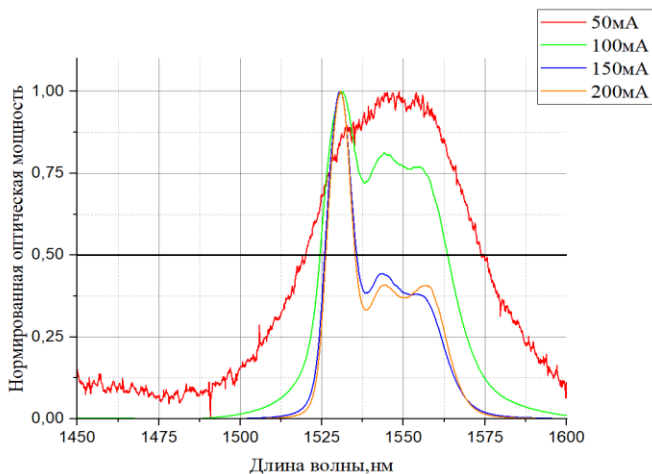


Рис. 7.17. График зависимости нормированной оптической мощности от длины волны

1.19. Найти значения  $\lambda_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{max}}$  в точках пересечения, как показано на рис. 7.18.

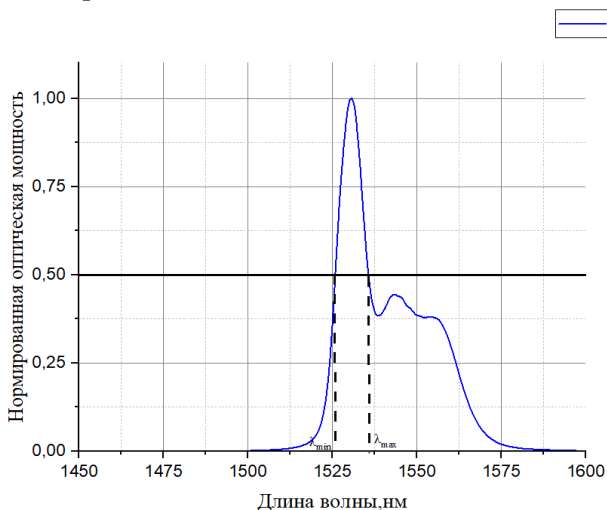


Рис. 7.18. Пример измерения ширины спектра спонтанного излучения

1.20. Рассчитать ширину спектра спонтанного излучения для всех значений тока и длины активного волокна по формуле

$$\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}. \quad (7.17)$$

Занести значения в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Пример заполнения данных

$I$ , мА	$L = 2$ м			$L = 4$ м		
	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм
50						
100						
150						
200						
$I$ , мА	$L = 6$ м			$L = 8$ м		
	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм
50						
100						
150						
200						

1.21. Построить график зависимости ширины спектра спонтанного излучения от тока накачки. Все значения длины активного волокна разместить на одном графике (рис. 7.19).

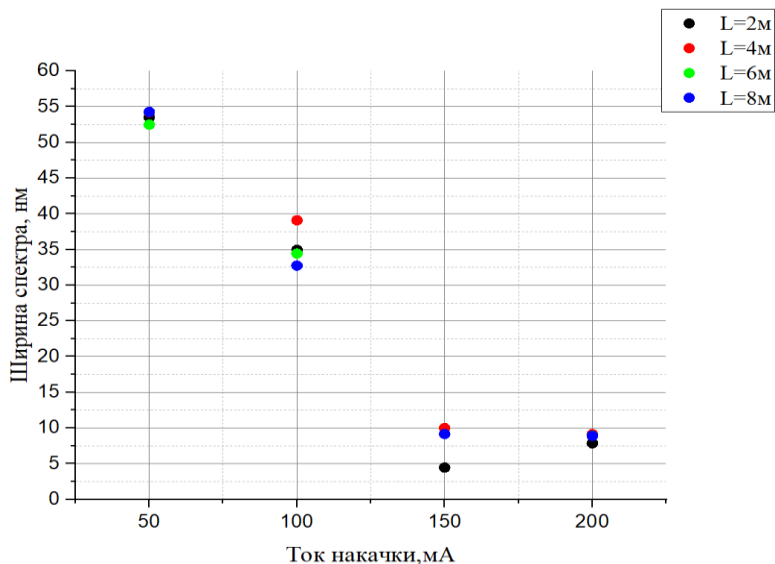


Рис. 7.19. Пример графика зависимости ширины спектра от тока накачки

## 2. Исследование усилителя оптической мощности

2.1. Собрать согласно рис. 7.20 схему усилителя оптической мощности с длиной активного оптического волокна 2 м.

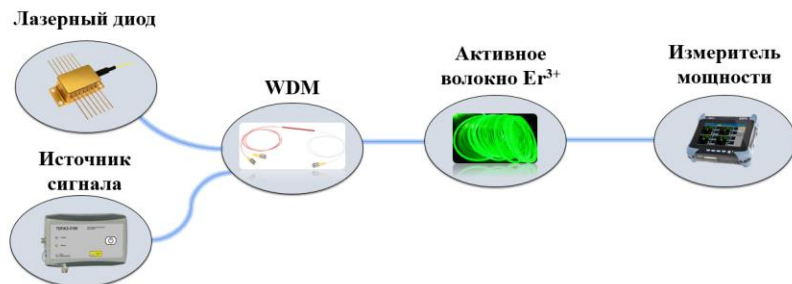


Рис. 7.20. Схема усилителя оптической мощности

2.2. На измерителе оптической мощности EXFO LTB-1 установить значение длины волны «1550,0 nm» согласно прил. 2.

2.3. Включить источник слабого сигнала ТОПАЗ-3100, записать значение оптической мощности  $P_{\text{сл.сигн}}$ , [дБм].

2.4. Не выключая источник слабого сигнала, установить значение тока накачки лазерного диода 10,0 мА. Включить лазерный диод. Записать значение усиленной оптической мощности  $P_{\text{усил}}$ , [дБм] в табл. 7.3.

2.5. Повысить значение тока накачки на 10,0 мА. Записать значение усиленной оптической мощности  $P_{\text{усил}}$ , [дБм].

2.6. Повторять п. 2.5 до достижения значения тока накачки 200 мА.

2.7. Заменить активное оптическое волокно на волокно длиной 4 м. Повторить п.п. 2.3–2.6.

2.8. Повторить п. 2.7 для значений длины активного оптического волокна 6 и 8 м.

2.9. Рассчитать коэффициент усиления для всех значений длины активного оптического волокна и тока накачки по формуле

$$K[\text{дБ}] = P_{\text{усил}}[\text{дБм}] - P_{\text{сл.сигн}}[\text{дБм}]. \quad (7.17)$$

Таблица 7.3

Пример обработки результатов измерения коэффициента усиления

Номер измерения	Ток накачки, мА	Оптическая мощность усиленного сигнала, дБм	Оптическая мощность слабого сигнала, дБм	Коэффициент усиления, дБ
1	10			
...	...	...		
20	200			

2.10. Построить график зависимости коэффициента усиления от тока накачки для всех рассмотренных значений длины активного оптического волокна (рис. 7.21).

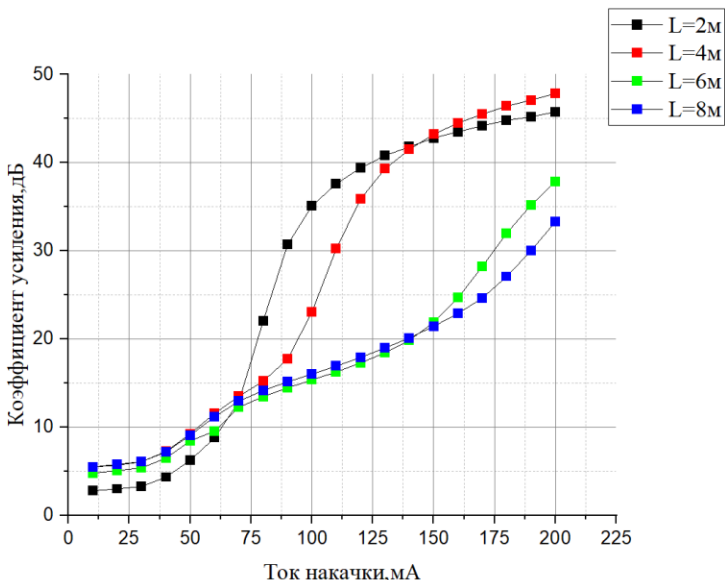


Рис. 7.21. Пример графика зависимости коэффициента усиления от тока накачки для различных значений длины активного оптического волокна

## 7.7. Контрольные вопросы

1. Эрбиевые активные волокна. Схема энергетических переходов. Спектры поглощения и усиления.
2. Принципы построения эрбиевых волоконно-оптических квантовых приборов: генераторов, усилителей и усилителей спонтанной эмиссии.
3. Волоконно-оптические усилители: схема и основные элементы конструкции.
4. Схемы накачки: в попутном направлении, во встречном направлении, в обоих направлениях.
5. Основные характеристики волоконно-оптических усилителей.
6. Области применения волоконно-оптических усилителей.
7. Суперлюминесцентный волоконный источник: схема и основные элементы конструкции.

8. Основные характеристики суперлюминесцентного волоконного источника.
9. Области применения суперлюминесцентного волоконного источника.
10. Объяснить полученные результаты.

### Список литературы

1. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Кондиленко И. И., Коротков П. А., Хижняк А. И. Физика лазеров. Киев: Вища школа, 1984. 232 с.
3. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 559 с.
4. Бруннер В. Справочник по лазерной технике: пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 544 с.
5. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков [и др.]. Ульяновск: Изд. центр УлГУ, 2012. 184 с.
6. Квантовая и оптическая электроника: лабораторный практикум. Ч. 2. Оптическая электроника: учеб.-метод. пособие / И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. П. Булатов, Н. А. Мальков, М. А. Ветошкин, К. А. Овчинников; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2022. 120 с.
7. Active Components Pump Laser Modules 1999CHP. Data Sheet. URL: <http://www.symphotony.com> (accessed 25 May 2024).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Работа с источником излучения

1. Установить суперлюминесцентный диод EXS210108-01 (или другой по выполняемому заданию работы) на верхней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500, как показано на рис. П1.1.



Рис. П1.1. Внешний вид контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500

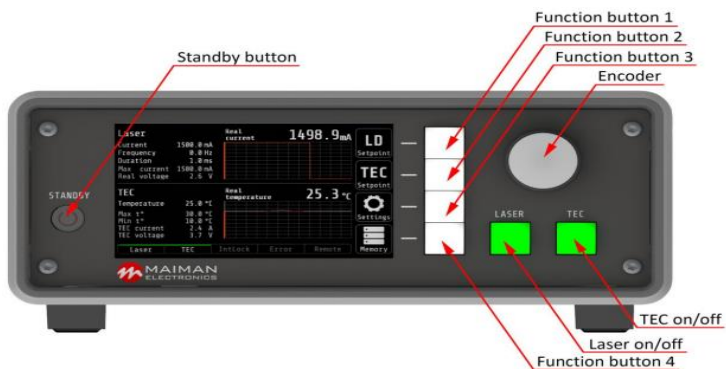
2. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 выключателем «-/o Power», расположенным на задней панели (рис. П1.2).

3. Включить термоэлектрический охладитель контроллера лазера нажатием кнопки «ТЕС on/off» (рис. П1.3). Кнопка выключателя подсветится зелёным светом, как показано на рис. П1.4.





Рис. П1.2. Внешний вид контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 со стороны задней панели



Laser – контроллер тока;  
 Current – сила тока;  
 Frequency – частота;  
 Duration – длительность импульса;  
 Max current – максимальный ток;  
 Real voltage – действующее значение напряжения;

TEC – контроллер температуры;  
 Temperature – температура;  
 Max t° – максимальная температура;  
 Min t° – минимальная температура;  
 TEC current – ток контроллера температуры;  
 TEC voltage – напряжение контроллера температуры

Рис. П1.3. Внешний вид контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 со стороны передней панели


4. Нажать кнопку справа от иконки  «LD Setpoint» (лазерный диод) (см. рис. П1.3). На дисплее появится меню установки тока лазерного диода, как показано на рис. П1.4.



Рис. П1.4. Внешний вид меню установки тока лазерного диода контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500

5. В левом столбце меню «Laser» коснуться клавиши «Current» (установка силы тока), над сенсорной клавиатурой подсветится надпись «Current» (сила тока).

6. Касанием клавиш сенсорной клавиатуры установить требуемое значение силы тока (например, 150 мА), на экране появится значение «150,0 мА». Нажатием кнопки справа от иконки



«Set» (установка) (см. рис. П1.4) применить установленное значение.

7. Нажать кнопку «LASER» (см. рис. П1.4). Кнопка выключателя подсветится зелёным светом, начнётся лазерная генерация, и на выходной разъём суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (или другого по выполняемому заданию работы) поступит оптический сигнал.

8. Для изменения температуры нажать кнопку «TEC Setpoint», коснуться сенсорной панели. На дисплее появится меню установки температуры лазерного диода.

9. Касанием клавиш сенсорной клавиатуры установить требуемое значение температуры (например, 25 °С), на экране появится значение «25 °С». Нажать кнопку справа от иконки



«Set» (установка).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Измеритель оптической мощности EXFO-LTB-1

Прибор EXFO-LTB-1 является настольным измерителем мощности оптического излучения. Он состоит из модуля измерителя оптической мощности FTB-1750 и платформы LTB-1 с сенсорным дисплеем.

Конструкция измерителя оптической мощности FTB-1750 сочетает широкий динамический диапазон **85 дБ и быстрое время стабилизации** измерений (300 мкс), что позволяет одновременно измерять высокие и низкие сигналы на четырёх каналах.

Настольная платформа LTB-1 Lab на базе Windows обеспечивает максимальную эффективность и гибкость благодаря порту дистанционного управления Ethernet и высокопроизводительному процессору. Он поставляется с веб-интерфейсом пользователя и возможностью дистанционного управления через встроенный порт Ethernet и IVI-совместимые драйверы приборов.

Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 представлен на рис. П2.1.



Рис. П2.1. Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1

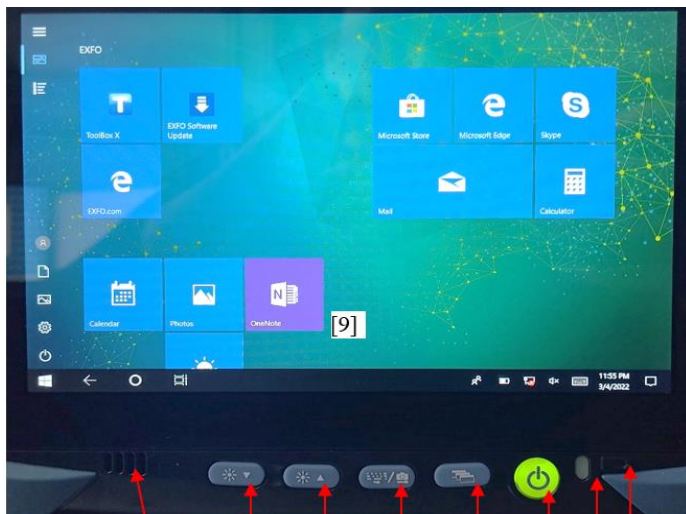
Основные технические характеристики измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 приведены в табл. П2.1.

Таблица П2.1

Технические характеристики измерителя  
оптической мощности FTB-1750

№ п/п	Параметр	FTBx-1750-031-4
1	Количество детекторов	4
2	Тип детектора	InGaAs
3	Диапазон длин волн, нм	От 800 до 1700
4	Динамический диапазон, дБм	от +8 до -85
5	Погрешность	$\pm(5\% + 3 \text{ пВт})$
6	Разрешение по длине волны, нм	0,01
7	Частота выборки, $\text{с}^{-1}$	До 5208

Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 со стороны передней панели с указанием органов управления представленна рис. П2.2, а со стороны верхней панели с указанием входов (портов) подключения внешних устройств приведён на рис. П2.3.



[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8]

[1] – встроенный микрофон;



[2] – клавиша «Яркость». Уменьшает яркость экрана;

[3] – клавиша «Яркость». Увеличивает яркость экрана;

[4] – клавиша «Клавиатура / Фотография экрана»;

[5] – клавиша «Переключение между задачами»;

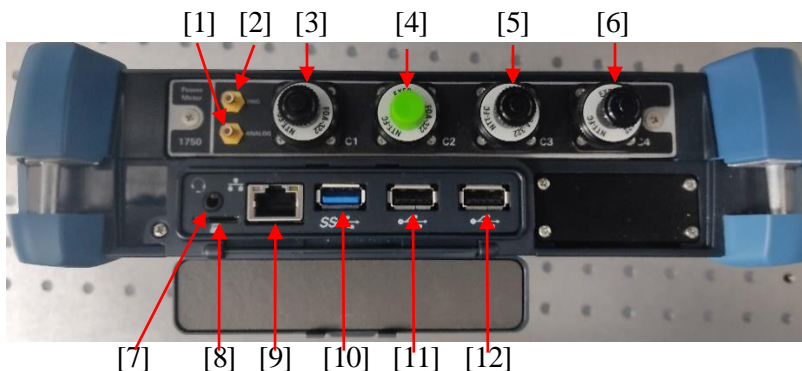
[6] – клавиша «Включено / Выключено»;

[7] – светодиод батареи;

[8] – индикатор уровня заряда батареи;

[9] – сенсорный экран


Рис. П2.2. Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 со стороны передней панели




- [1] – радиочастотный вход (порт Analog);
- [2] – цифровой вход (порт TRIG);
- [3] – оптический вход 1 (C1-порт NTT-FC);
- [4] – оптический вход 2 (C2-порт NTT-FC);
- [5] – оптический вход 3 (C3-порт NTT-FC);
- [6] – оптический вход 4 (C4-порт NTT-FC);
- [7] – разъём динамик / микрофон;
- [8] – разъём карты памяти microSD;
- [9] – сетевой порт RG-45;
- [10] – порт USB 3.0 (скоростной);
- [11] – порт USB 2.0 (общий);
- [12] – порт USB 2.0 (общий)

Рис. П.2.3. Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 со стороны верхней панели

Начало работы с прибором в режиме измерения оптической мощности на 1-м канале:

1. Включить прибор, нажав клавишу  на передней панели (см. [6] на рис. П2.2).

2. После загрузки программного обеспечения на экране появится стартовая страница (рис. П2.4), на ней подсвечена иконка  «One Note» (начало).

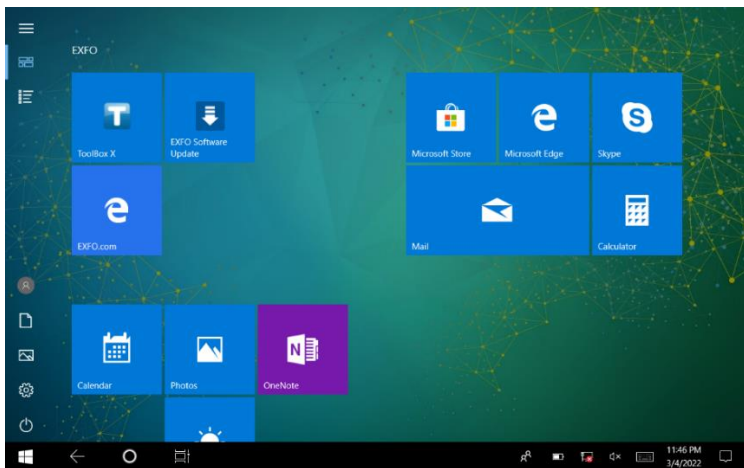


Рис. П2.4. Стартовая страница EXFO-LTV-1

3. Коснуться иконки **T** «ToolBox» (инструменты), появится страница «ToolBox X», как показано на рис. П2.5. Подсвечена клавиша «Modules» (модули). Индикатор «High-Performance Optical Power Meter» «Slot 1» «Ready» (канал 1 готов к измерениям).

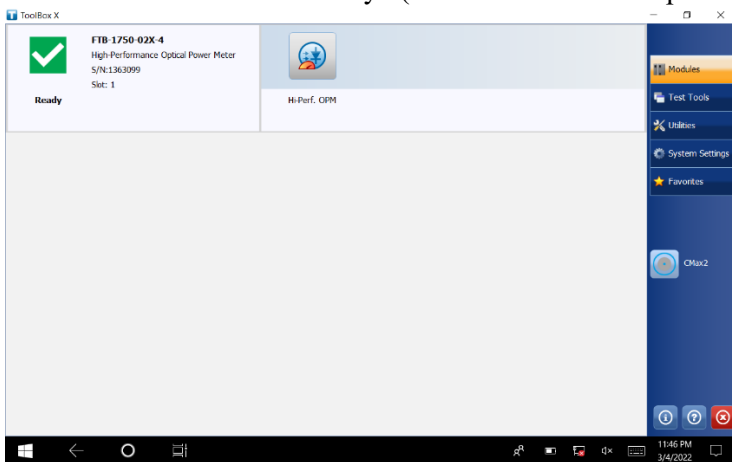


Рис. П2.5. Страница «Инструменты», переход в режим измерения оптической мощности высокого разрешения 1-го канала

4. Коснуться клавиши «Hi-Perf. OPM» (измерение оптической мощности высокого разрешения), появится страничка «[1] – High-Performance Optical Power Meter» (рис. П2.6).

5. Во всплывающем окне «Channel 1 Wavelength» (канал 1 – Длина волны) установить длину волны излучения в пределах от 800 до 1700 нм и коснуться клавиши «ОК».

6. При касании клавиши «Cancel» подсвечивается клавиша «Reference Measured», и в окошке «Wavelength» автоматически устанавливается длина волны «1550,00 nm».

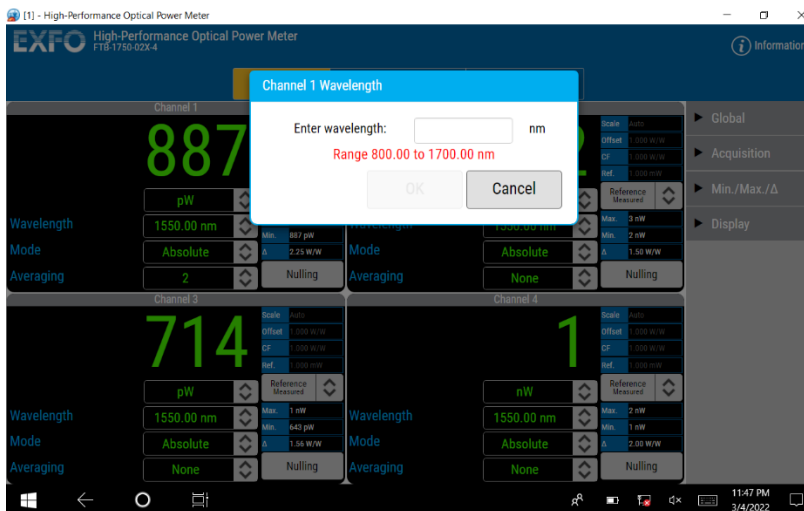


Рис. П2.6. Страница измерения оптической мощности высокого разрешения 1-го канала. Всплывающее окно – установка длины волны вручную

7. При касании клавиши (окошка) «Wavelength» появляется всплывающий список фиксированных длин волн, как показано на рис. П2.7. Можно выбрать необходимую длину волны.

8. Прибор готов к работе в режиме измерения оптической мощности излучения в 1-м канале.



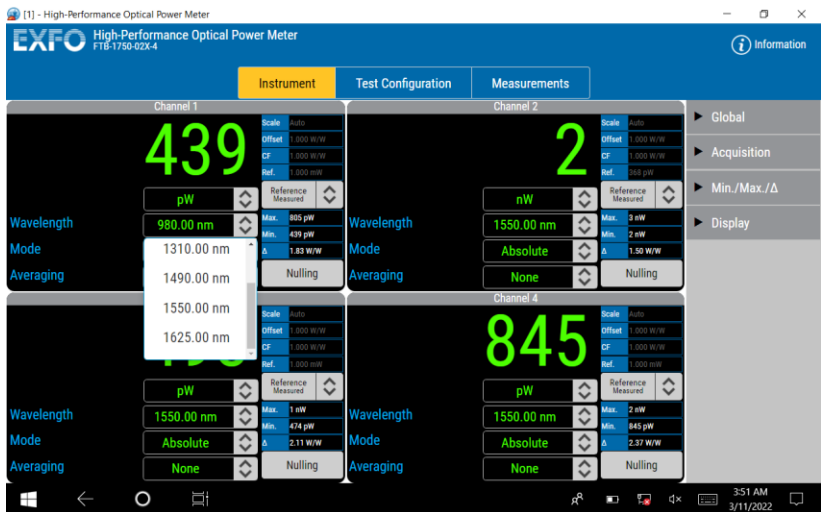


Рис. П2.7. Всплывающее окно выбора длины волны из набора фиксированных длин волн

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Работа со спектроанализатором Yokogawa AQ6370D

Внешний вид спектроанализатора Yokogawa представлен на рис. ПЗ.1. На рисунке красными контурами выделены дисплей и органы управления, обозначенные цифрами:

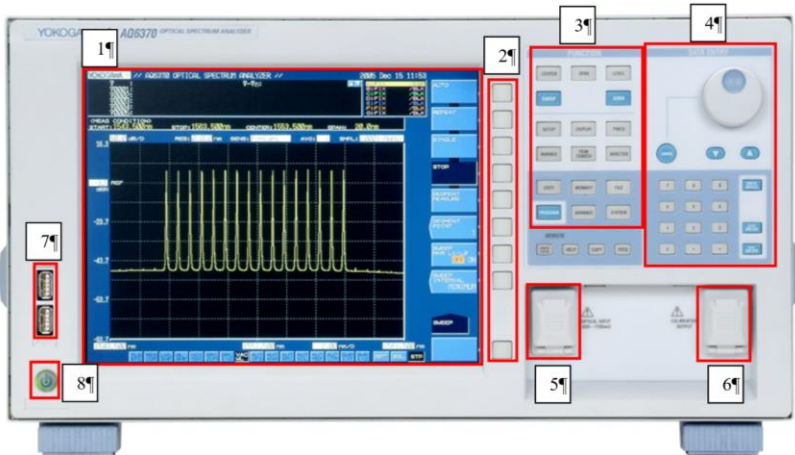


Рис. ПЗ.1. Внешний вид анализатора спектра Yokogawa AQ6370D

- 1 – экран дисплея;
- 2 – кнопки работы со вкладками, слева окна с их названиями;
- 3 – функциональная панель прибора;
- 4 – панель установки значений задаваемых величин, включающая в себя: 12-кнопочный цифровой набор и дублирующий его вращающийся манипулятор с кнопкой включения  $\circ$  и навигатором вниз  $\blacktriangledown$  / вверх  $\blacktriangle$ ;
- 5 – коннектор FC для ввода внешнего оптического излучения;
- 6 – коннектор FC выхода внутреннего источника излучения;
- 7 – USB-разъёмы;
- 8 – кнопка включения / выключения питания.

*Установка рабочего диапазона длин волн:*

1. На функциональной панели прибора (см. (2) на рис. ПЗ.1) нажать кнопку «Span», как показано на рис. ПЗ.2.



Рис. ПЗ.2. Вкладка SPAN

2. Выставить начальную длину волны, нажав вкладку «START WL». На панели установки (4) ввести значение длины волны. Нажать кнопку «Enter».

3. Выставить конечную длину волны, нажав вкладку «STOP WL». Ввести значение длины волны. Нажать кнопку «Enter».

Например, для исследования ВБР следует выставить START WL = 1540 nm, STOP WL = 1550 nm.

*Установка разрешения и количества точек записи:*

1. На панели прибора (см. (3) на рис. ПЗ.1) нажать кнопку «SETUP», как показано на рис. ПЗ.3.

2. Во вкладке «Resolution» выбрать значение 0,5 nm. Данное разрешение подходит для всех лабораторных работ со спектроанализатором.

3. Во вкладке «SENS / MODE» выбрать режим чувствительности согласно заданиям выполняемой лабораторной работы, например HIGH3.



Рис. ПЗ.3. Вкладка «SETUP»

4. Во вкладке «SAMPLING INTERVAL» установить шаг, с которым будет производиться запись данных, набрав нужное значение на панели (3) и кнопку «Enter» (например, 0,01 nm).

*Переключение между трассами:*

1. На панели прибора нажать кнопку «TRACE», как показано на рис. ПЗ.4.

2. Во вкладке «ACTIVE TRACE» выбрать нужную трассу для записи данных (трассы именованы от А до G, всего 8 шт.).

3. Во вкладке «VIEW» можно выводить график на экран прибора, нажав кнопку «DISP», либо скрыть график с прибора, при этом сохранив данные, нажав «BLANK».



Рис. ПЗ.4. Вкладка «TRACE»

4. Потемневшая вкладка «WRITE» обозначает, что на текущую трассу будет производиться запись данных. Вкладка «FIX» фиксирует записанные данные на текущей трассе. Следите за тем, чтобы записывалась только одна трасса. Это можно отследить, посмотрев в верхний правый угол дисплея, где находится список трасс и их статус.

*Запись данных:*

1. Подключить источник излучения или исследуемые компоненты к спектроанализатору.
2. Выбрать трассу для записи, выставить режим записи «WRITE».

3. На панели прибора нажать кнопку «SWEEP», как показано на рис. ПЗ.5. Записать данные, нажав «SINGLE».



Рис. ПЗ.5. Вкладка «SWEEP»

4. Вернуться во вкладку «TRACE» и зафиксировать данные, нажав кнопку «FIX».

*Масштабирование и перемещение графиков:*

1. На панели прибора нажать кнопку «LEVEL», как показано на рис. ПЗ.6.

2. Нажатие кнопки «REF LEVEL» позволяет перемещать графики по вертикальной оси  $Y$  с помощью вращающегося манипулятора.



Рис. ПЗ.6. Вкладка «LEVEL»

3. Нажатие кнопки «LOG SCALE» позволяет произвести масштабирование графика в логарифмическом масштабе (в единицах дБм) с помощью вращающегося манипулятора.

4. Нажатие кнопки «LIN SCALE» переводит логарифмическую шкалу ординат в линейную, позволяет произвести масштабирование графика в линейном масштабе (в единицах Вт) с помощью вращающегося манипулятора.

*Сохранение данных:*

1. Подключить внешний USB-накопитель к порту одного из USB-разъемов (см. (7) на рис. ПЗ.1).



Рис. ПЗ.7. Вкладка «FILE»

2. На панели прибора нажать кнопку «FILE», как показано на рис. ПЗ.7.
3. Во вкладке «ITEM SELECT» выбрать необходимый формат сохранения: «TRACE» – сохраняет только текущую трассу в формате .csv, «ALL TRACE» – сохраняет все записанные трассы в один файл формата .csv, «GRAPHICS» – сохраняет скриншот дисплея в формате .png.
4. После выбора формата нажать кнопку «WRITE», как показано на рис. ПЗ.8.
5. Во вкладке «MEMORY» установить «EXT» для экспорта на USB-накопитель.





10. При экспорте данных в формате .csv файл будет содержать таблицу, в которой каждая записанная трасса имеет столбцы «WL» (длина волны) и «LEVEL» (оптическая мощность с заранее выбранной размерностью). Пример массива данных представлен на рис. ПЗ.9.

[TRACE DATA]			
Tr A(WL)	Tr A(LEVEL)	Tr B(WL)	Tr B(LEVEL)
800.0000	-56.175	800.0000	-210.000
800.4500	-56.201	800.4500	-72.459
800.9000	-56.023	800.9000	-81.667
801.3500	-56.015	801.3500	-210.000
801.8000	-56.117	801.8000	-210.000
802.2500	-56.072	802.2500	-210.000
802.7000	-56.028	802.7000	-210.000
803.1500	-56.055	803.1500	-79.699
803.6000	-56.024	803.6000	-210.000
804.0500	-56.068	804.0500	-74.098
804.5000	-55.857	804.5000	-210.000
804.9500	-56.017	804.9500	-83.667
805.4000	-55.875	805.4000	-78.720

Рис. ПЗ.9. Пример экспортируемого массива данных

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Модуль твердотельного инжекционного лазера 1999СН

Модуль твердотельного инжекционного лазера 1999СНР предназначен для оптической накачки оптоволоконных лазеров на длине волны 980 нм. Выходная оптическая мощность лазера до 750 мВт. Его внешний вид в стандартной укладке показан на рис. П4.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П4.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FC.



Рис. П4.1. Внешний вид модуля твердотельного инжекционного лазера 1999СНР в стандартной укладке

Таблица П4.1

Основные электрооптические характеристики модуля  
твердотельного инжекционного лазера 1999СНР

Лазер накачки				
Параметр	Условия	Мин.	Средн.	Макс.
Пороговый ток $I_{пор}$ , мА		–	60	80
Номинальная выходная мощность $P_{ном}$ , мВт		350	–	–
Прямой ток $I_{пр}$ , мА	$P_{ном} = 350$ мВт	–	605	665
	$P_{ном} = 400$ мВт	–	685	750
	$P_{ном} = 450$ мВт	–	765	835
	$P_{ном} = 480$ мВт	–	815	885
	$P_{ном} = 500$ мВт	–	845	920
	$P_{ном} = 520$ мВт	–	875	960
	$P_{ном} = 550$ мВт	–	925	1005
	$P_{ном} = 600$ мВт	–	1005	1085
	$P_{ном} = 680$ мВт	–	1100	1120
	$P_{ном} = 720$ мВт	–	1110	1130
$P_{ном} = 750$ мВт	–	1140	1150	
Прямое напряжение $U_{пр}$ , В	$P_{ном} = 750$ мВт	–	1,9	2,2
Допустимое отклонение длины волны $\Delta\lambda_p$ , нм	$T = 25$ °С $0,1P_{ном} \div 1,0P_{ном}$	–	–	$\pm 0,5$
Температурный коэффициент изменения длины волны $\Delta\lambda_p / \Delta T$ , нм / °С	$T = -5 \div 75$ °С $0,1P_{ном} \div 1,0P_{ном}$	–	0,01	0,02
Ширина спектра на уровне $-3$ дБ $\Delta\lambda_{0,5}$ , нм	$0,1P_{ном} \div 1,0P_{ном}$	–	0,6	1,0
Мощность в диапазоне $\Delta\lambda_p \pm 1,5$ нм, %	$P_{ном}$	90	–	–
Стабильность оптической мощности $\Delta P$ , %	Размах, 10 Гц $\div$ 50 кГц, 60 с, $P_{ном}$	–	$\leq 1$	2
Потребляемая мощность, Вт	$P_{ном} = 750$ мВт	–	–	7,8

Диод контроля мощности оптического излучения				
Чувствительность $I/P$ , мкА/мВт		0,5	–	10
Темновой ток $I_{\text{тем}}$ , нА	$U = 5 \text{ В}$	–	50	100
Термоэлектрический охладитель				
Охлаждающая способность $\Delta T$ , °С		50	–	–
Напряжение $U_{\text{охл}}$ , В	$T = 75 \text{ °С}$	–	–	3,3
Ток $I_{\text{охл}}$ , А		–	–	1,5
Мощность $P_{\text{охл}}$ , Вт		–	–	4,95
Термистор				
Сопротивление $R$ , кОм	$25 \text{ °С}$	9,5	10	10,5
Температурная постоянная $\beta$ , К		3600	–	4200

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906 предназначен для генерации оптического излучения с широкой спектральной полосой излучения на центральной длине волны 960÷990 нм с низким уровнем шума. Выходная оптическая мощность 5 мВт. Его внешний вид показан на рис. П5.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П5.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.



Рис. П5.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906

Таблица П5.1

Основные электрооптические характеристики модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906

Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Центральная длина волны $\lambda_c$ , нм	960	970	990
Ширина спектра на уровне $-3$ дБ $\Delta\lambda$ ( $-3$ дБ), нм	22	25	–

Выходная мощность в оптическом волокне $P_0$ , мВт	3	5	–
Глубина спектральной модуляции $\Delta$ , дБ	0.1	0,2	–
Рабочий ток $I_p$ , мА	–	200	400

### Максимально допустимые параметры

Параметр	Минимальный	Максимальный
Рабочая температура, °С	–20	+70
Температура хранения, °С	–40	+85
Ток контроллера температуры $I_{охл}$ , А	–	1,5
Напряжение контроллера температуры $U_{охл}$ , В	–	3,6
Максимальный прямой ток диода $I_{пр}$ , мА	–	400
Сопротивление термистора $R$ , кОм	10 (при 25 °С)	
Поддерживаемая температура корпуса СЛД	25 °С	
Тип оптического кабеля	SMF / PMF / MMF	
Оболочка оптического кабеля	Плотная оболочка 250 мкм со свободной трубкой 900 мкм	
Корпус	14-контактный типа бабочка	
Температура припоя	260 °С в течение 10 с	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

### Модуль суперлюминесцентного лазерного диода EXS210007-01

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210007-01 предназначен для применения в области медицины, навигации, оптической сенсорики, метрологии, а также для научных целей. Выходная оптическая мощность до 10 мВт на длине волны 1070 нм. Его внешний вид показан на рис. Пб.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. Пб.1.

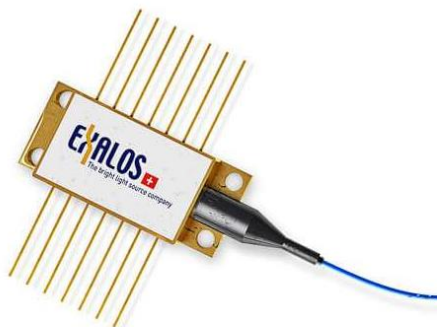


Рис. Пб.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210007-01

Таблица Пб.1

Основные электрооптические характеристики модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210007-01

№ п/п	Параметр	Величина
1	Длина волны	1070 нм
2	Полоса пропускания	80÷90 нм
3	Мощность	10 мВт
4	Профиль пучка	Гауссов
5	Фотодиод мониторинга	Да



## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 предназначен для применения в области медицины, навигации, оптической сенсорики, метрологии, а также для научных целей. Выходная оптическая мощность до 15 мВт на длине волны 1550 нм. Его внешний вид показан на рис. П7.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П7.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.

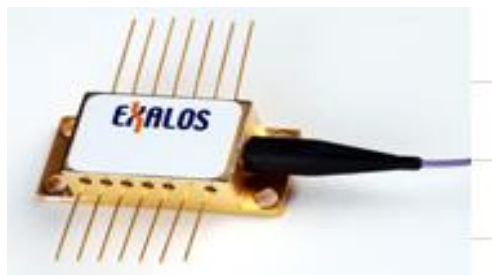


Рис. П7.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01

Таблица П7.1

Основные электрооптические характеристики модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01

№ п/п	Параметр	Величина
1	Длина волны	1550 нм
2	Полоса пропускания	60 нм
3	Мощность	15 мВт
4	Профиль пучка	Гауссов
5	Фотодиод мониторинга	Да

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

### Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 предназначен для генерации оптического излучения с широкой спектральной полосой излучения на центральной длине волны  $1590\div 1630$  нм с низким уровнем шума. Выходная оптическая мощность 5 мВт. Его внешний вид показан на рис. П8.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П8.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором FS.



Рис. П8.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602

Таблица П8.1

Основные электрооптические характеристики модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSSD1602

Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Центральная длина волны $\lambda_c$ , нм	1590	1610	1630
Ширина спектра на уровне $-3$ дБ $\Delta\lambda$ ( $-3$ дБ), нм	60	65	–
Выходная мощность в оптическом волокне $P_0$ , мВт	3	5	–
Глубина спектральной модуляции $\Delta$ , дБ	–	0,15	0,5
Рабочий ток $I_p$ , мА	–	250	300

Максимально допустимые параметры

Параметр	Минимальный	Максимальный
Рабочая температура, °С	–20	+70
Температура хранения, °С	–40	+85
Ток контроллера температуры $I_{охл}$ , А	–	1,5
Напряжение контроллера температуры $U_{охл}$ , В	–	3,6
Максимальный прямой ток диода $I_{пр}$ , мА	–	350
Сопротивление термистора $R$ , кОм	10 (при 25 °С)	
Поддерживаемая температура корпуса СЛД	25 °С	
Тип оптического кабеля	SMF / PMF / MMF	
Оболочка оптического кабеля	Плотная оболочка 250 мкм со свободной трубкой 900 мкм	
Параметр	Минимальный	
Корпус	14-контактный типа бабочка	
Температура свинцового припоя	260 °С в течение 10 с	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

### Y-разветвитель производства ПАО «ПНППК»

Y-разветвитель производства ПАО «ПНППК» предназначен для разделения оптического излучения с широкой спектральной полосой излучения на центральной длине волны  $1590 \div 1630$  нм. Его внешний вид показан на рис. П9.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П9.1.

Выход оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором SC.



Рис. П9.1. Y-разветвитель производства ПАО «ПНППК»

Таблица П9.1

#### Основные характеристики Y-разветвителя производства ПАО «ПНППК»

№ п/п	Параметр	Величина
1	Рабочая длина волны, нм	$1550 \pm 15$
2	Коэффициент деления	50 : 50
3	Погрешность деления	$\pm 2 \%$
4	Максимальные собственные потери, дБ	$\leq 3,5$
5	Рабочий диапазон температур, °С	$-5 \sim (+70)$
6	Температура хранения, °С	$-40 \sim (+85)$

**Мультиплексор WDM**

Мультиплексор WDM 980 / 1550 нм предназначен для объединения мощности накачки и оптического сигнала в активное оптическое волокно, легированное эрбием. Он может быть использован для объединения или разветвления оптических сигналов с целью удвоения пропускной способности оптических волокон, а также для обеспечения двунаправленной связи в одном волокне. Внешний вид мультиплексора WDM приведен на рис. П10.1, а основные характеристики – в табл. П10.1.

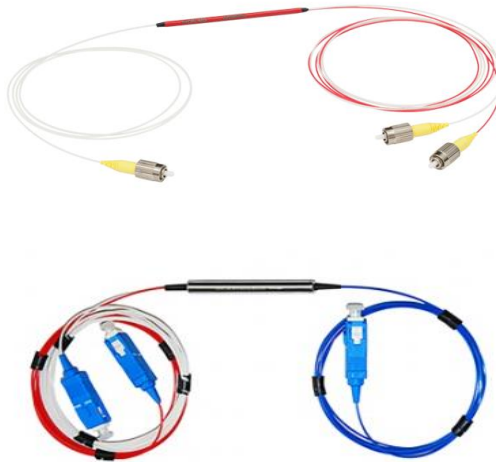


Рис. П10.1. Внешний вид оптического мультиплексора WDM 980 / 1550 нм

Таблица П10.1

Основные характеристики оптического мультиплексора  
WDM 980 / 1550 нм

№ п/п	Параметр	Величина
1	Рабочая длина волны, нм	980 / 1550
2	Ширина пропускаемого спектра, нм	±10 / 20
3	Минимальная изоляция, дБ	≥ 50
4	Собственные потери, дБ	≤ 0,15
5	Обратные потери, дБ	≥ 55
6	Рабочий диапазон температур, °С	-5÷(+70)
7	Температура хранения, °С	-40÷(+85)

## ПРИЛОЖЕНИЕ 11

### Генератор сигналов специальной формы АКПП-3420

Генератор предназначен для генерации различных сигналов по частоте, амплитуде и форме сигнала. Наличие в генераторах АКПП-3420 двух полностью независимых выходных каналов обеспечивает возможность генерации совершенно произвольных сигналов (по частоте, амплитуде и форме). Генераторы имеют переключаемое выходное сопротивление 1 МОм / 50 Ом для возможности согласования при подключении к различным типам трактов.

Основные возможности и функциональность:

- формирование произвольных сигналов (СПФ / Arb): максимальная дискретизация 500 МГц, ЦАП 14 бит;
  - более 150 типов сигналов: стандартная форма (синус, прямоугольник, треугольник, импульс, шум) и функциональные сигналы (145 форм), включая PRBS (Pseudorandom Binary Sequence), Exponential Fall / Rise, Logarithm, Sinc, Gaussian, Cardiac, Tangent, Semi-Circle, Quake;
  - 13 видов модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, ЧМн, ШИМ, квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), СУМ (наложение сигналов Кан1 / Кан2) и др.;
  - режим свипирования (ГКЧ), пакетный режим (Burst) с корректировкой фазы;
  - формирование выходного сигнала с вводом гармоник (№ 1÷50 макс.);
  - встроенный частотомер до 350 МГц;
  - графический ЖК-дисплей с диагональю 11 см;
  - интерфейсы USB (2) и LAN;
  - усилитель мощности×2 (опция 1: до 200 кГц, до 2 Вт / 50 Ом).
- Внешний вид генератора импульсов АКПП-3420/2 представлен на рис. П11.1. Ниже приведены основные органы управления.

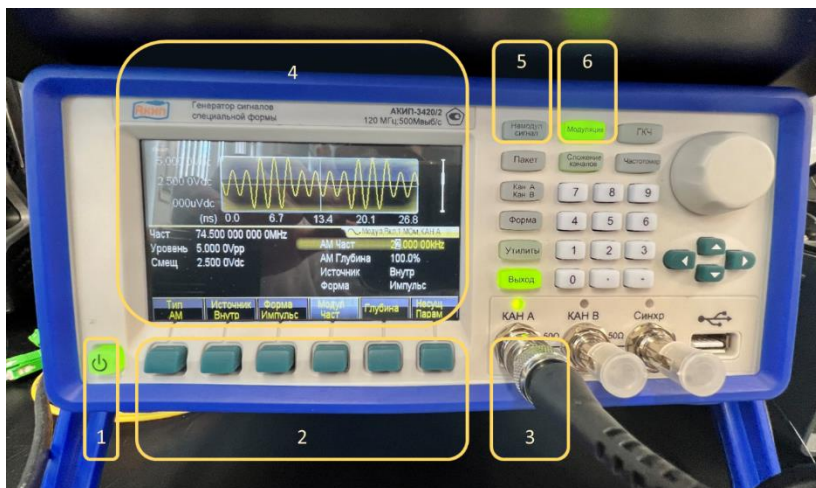


Рис. П11.1. Внешний вид генератора импульсов АКІП-3420/2

Органы управления генератора импульсов АКІП-3420/2:

- 1 – кнопка включения;
- 2 – управляющие клавиши;
- 3 – разъемы BNC для подключения внешних устройств;
- 4 – экран;
- 5 – клавиша запуска / остановки немодулированного сигнала;
- 6 – клавиша запуска / остановки модулированного сигнала.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 12

### Осциллограф АКПП-4134/1

Осциллографы запоминающие цифровые АКПП-4131/1 предназначены для исследования и измерения параметров однократных сигналов и периодических сигналов в полосе частот  $0 \div 200$  МГц. Осциллографы всех серий обеспечивают цифровое запоминание, цифровое измерение в диапазоне амплитуд от 500 мкВ до 400 Впик (вход 1 МОм) и временных интервалов от 1 нс/дел до с/дел, амплитудно-временных параметров входного сигнала с выводом результата измерения на экран (в режиме автоустановки при нажатии клавиши «5» на рис. Рис. П12.1.). Осциллографы обеспечивают возможность подключения к персональному компьютеру через интерфейсы USB (host / device), LAN, опционально для моделей АКПП-4131/1А и АКПП-4131/2А WIFI (через USB WIFI-адаптер).

Внешний вид осциллографа АКПП-4131/1 представлен на рис. П12.1. Ниже приведены основные органы управления.



Рис. П12.1. Внешний вид передней панели осциллографа АКИП-4134/1

Органы управления осциллографа АКИП-4134/1:

- 1 – кнопка включения осциллографа;
- 2 – разъемы BNC для подключения внешних измерительных устройств или щупов;
- 3 – органы управления вертикальной разверткой сигнала (напряжением), поступающего с разъемов;
- 4 – управление горизонтальной развёрткой сигнала (временем);
- 5 – клавиша запуска / остановки измерения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 13

### Оптический чоппер ThorLabs MC1000A

Оптический чоппер (прерыватель) ThorLabs MC1000A применяется для периодического перекрытия светового потока за счёт вращения диска перекрытия луча в схеме импульсного лазера с активным затвором. Внешний вид контроллера и стойки крепления с лопастями прерывателя приведён на рис. П13.1, *а, б* соответственно. Сменные модули прерывателя светового потока представлены в табл. П13.1.

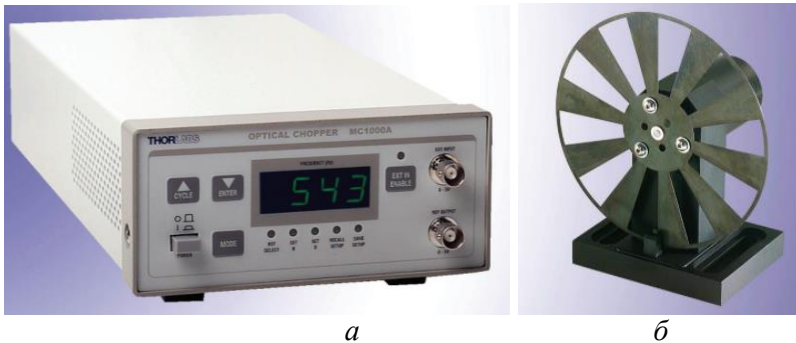


Рис. П13.1. Внешний вид оптического чоппера ThorLabs MC1000A: *а* – контроллер, *б* – стойка крепления с лопастями прерывателя

Таблица П13.1

Сменные модули прерывателя светового потока

Марка	Описание	Частота прерывания $f$
MC1F2	Сменный модуль с двумя лопастями	$1 \div 99$ Гц
MC1F10	Сменный модуль с 10 лопастями	$25$ Гц $\div 1$ кГц
MC1F15	Сменный модуль с 15 лопастями	$38$ Гц $\div 1,5$ кГц
MC1F30	Сменный модуль с 30 лопастями	$75$ Гц $\div 3$ кГц
MC1F60	Сменный модуль с 60 лопастями	$150$ Гц $\div 6$ кГц
MC1F57	Сменный модуль с двумя наборами отверстий (5 внутренних / 7 внешних)	–

Органы управления на передней панели оптического чоппера ThorLabs MC1000A показаны на рис. П13.2. Ниже приведены основные органы управления.

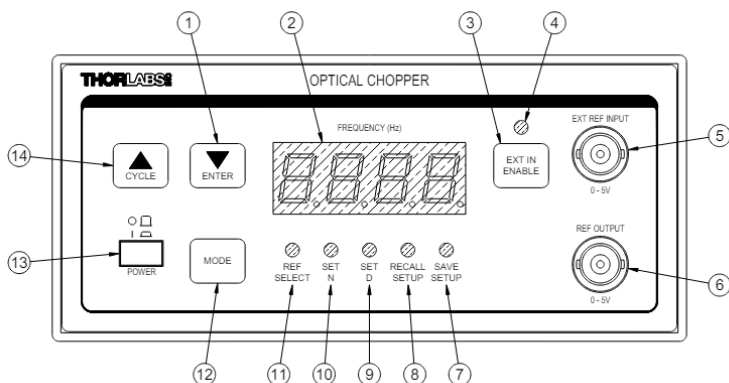


Рис. П13.2. Органы управления на передней панели оптического чоппера ThorLabs MC1000A

1. Клавиша «FREQ DOWN / ENTER» – уменьшение частоты прерывания в режиме заводских настроек. Также используется как клавиша ввода при настройке рабочих различных параметров.

2. Четырёхзначный светодиодный дисплей отображает рабочую частоту.

3. Клавиша «EXT IN ENABLE» – переключение режима внутреннего и внешнего задания.

4. Светодиод EXT IN загорается, когда включён внешний вход.

5. EXT REF IN – к этому входу BNC подключается внешний опорный сигнал (логический уровень TTL / CMOS).

6. REF OUTPUT – опорный выходной сигнал, выбранный в режиме REF SELECT (логический уровень CMOS).

7. SAVE SETUP – сохранение настроек. Когда этот светодиод горит, пользователь может сохранить текущую конфигурацию в одну из пяти настроек. Используйте кнопку «FREQ UP/CYCLE», чтобы выбрать номер настройки, и нажмите «FREQ DOWN / ENTER», чтобы сохранить настройку под этим номером.

8. RECALL SETUP – вызов настроек. В этом режиме пользователь может вызвать одну из пяти пользовательских настроек. Выберите номер настройки с помощью клавиши «FREQ UP / CYCLE» и нажмите «FREQ DOWN / ENTER», чтобы восстановить выбранную конфигурацию.

9. SET D позволяет выбрать субгармонику внешнего опорного входа. Внешняя опорная частота будет разделена на это значение и использована для синхронизации лопасти прерывателя. Субгармонику можно использовать с множителем гармоник  $N$  для создания дробных гармоник (таким образом, частота прерывателя  $f = \text{REF}_{\text{ext}} \times N / D$ ).

10. SET N позволяет выбрать гармонику внешнего опорного входа. Внешняя опорная частота будет умножена на это значение и использована для синхронизации лопастей прерывателя. Умножитель гармоник можно использовать с делителем субгармоник  $D$  для создания дробных гармоник (таким образом, частота прерывателя  $f = \text{REF}_{\text{ext}} \times N / D$ ).

11. REF SELECT – этот светодиод указывает режим сигнала REF OUT. Нажатие клавиши ▲ или ▼ выбирает сигнал REF OUTPUT из нескольких источников в зависимости от режима работы.

12. MODE – переключение режимов ввода: REF SELECT, SET IN, SET D, RECALL и SAVE. Светодиод над легендой указывает текущий активный режим.

13. Кнопка «POWER» – включение прибора.

14. Клавиша «FREQ UP / EYCLE» – увеличение частоты прерывания при работе в режиме внутреннего задания. Она также используется для переключения вариантов ввода для других режимов работы.

**Фотоприёмник ThorLabs PDA 10CF-EC**

Фотоприёмник ThorLabs PDA 10CF-EC представляет собой InGaAs-детектор с усилителем, предназначен для обнаружения световых сигналов в диапазоне длин волн от 700 до 1700 нм. Буферизованный выход обеспечивает сопротивление нагрузки 50 Ом и выходное напряжение до 5 В. Корпус PDA 10CF-EC имеет съёмную резьбовую муфту SM1T1 и стопорное кольцо SM1RR, которые совместимы со всеми аксессуарами с резьбой 1 дюйм. Это позволяет удобно монтировать внешнюю оптику, диафрагмы, а также обеспечивает простой механизм монтажа оптических схем. Внешний вид фотоприёмника ThorLabs PDA 10CF-EC и подключение его к осциллографу АКИП-4134/1 представлены на рис. П14.1, *а* и *б* соответственно.

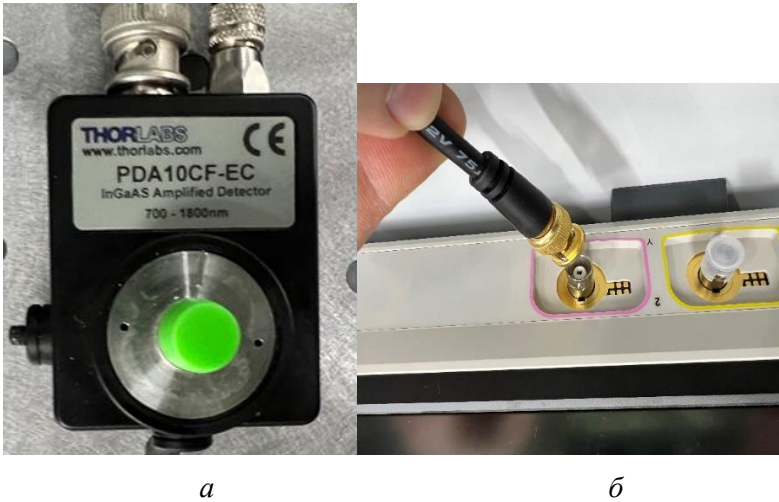


Рис. П14.1. Внешний вид фотоприёмника ThorLabs PDA 10CF-EC (*а*) и подключение его к осциллографу АКИП-4134/1 (*б*)

Основные технические характеристики фотоприёмника ThorLabs PDA 10CF-EC приведены в табл. П14.1.

Таблица П14.1

Основные технические характеристики фотоприёмника  
ThorLabs PDA 10CF-EC

Название	Условное обозначение	Характеристика
Детектор	–	InGaAs PIN
Активная площадь	–	Диаметр 0,5 мм; площадь 0,2 мм <sup>2</sup>
Диапазон длин волн	$\lambda$	800÷1700 нм
Длина волны максимальной чувствительности	$\lambda_{\max}$	1590 нм
Полоса пропускания	–	150 МГц
Чувствительность на длине волны $\lambda_{\max}$	$\frac{W}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$1,2 \times 10^{-11}$
Шум (среднеквадратичное значение)	–	1,4 мВ
Максимальный выходной ток	$I_{\text{out}}$	100 мА
Темновое смещение	–	±20 мВ
Сопротивление нагрузки	–	От 50 Ом до высокоомного
Трансимпедансное усиление	–	$5 \times 10^3$ В/А (высокоомное); $1 \times 10^4$ В/А (50 Ом)
Выходное напряжение	$V_{\text{out}}$	0÷5 В (50 Ом); 0÷10 В (высокоомное)

### Контроллер поляризации

Контроллер поляризации предназначен для изменения плоскости поляризации излучения в оптическом волокне. Принцип его работы основан на том, что в оптическом волокне круглого сечения плоскость поляризации не является жёстко зафиксированной. Прикладывая внешнее воздействие и скручивая оптическое волокно, можно изменять ориентацию плоскости поляризации.

Конструкция контроллера поляризации приведена на рис. П15.1. Она состоит из неподвижных прижимных колодок и поворотного ложемент. Оптическое волокно укладывается в паз ложемента. Поворачивая ложемент, можно изменять ориентацию плоскости поляризации оптического излучения в сердцевине волокна.

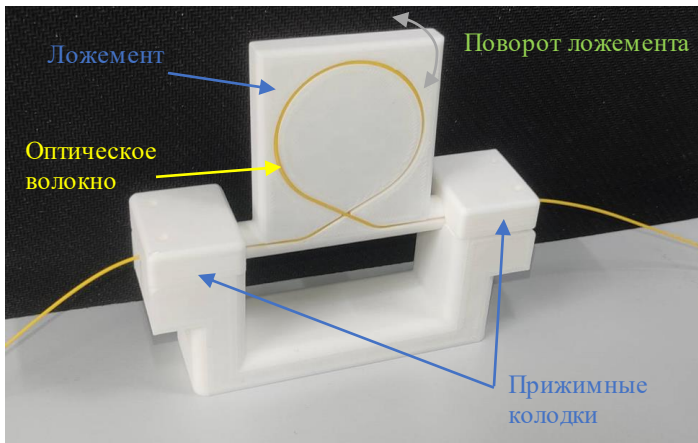


Рис. П15.1. Внешний вид контроллера поляризации излучения в оптическом волокне

Конструкция контроллера поляризации изготовлена в научно-образовательном центре ПАО «ПНППК».



## ПРИЛОЖЕНИЕ 16

### Оптический изолятор стандарта Telcordia

Оптический изолятор предназначен для оптической развязки лазеров, суперлюминесцентных диодов и волоконно-оптических усилителей от отражённого излучения. Может быть использован в качестве элемента развязки в оптических трактах. Нечувствительный к поляризации изолятор разработан и изготовлен в соответствии со стандартом Telcordia. Уникальный процесс производства и оптическая конструкция без эпоксидной смолы расширяют возможности устройства для работы с излучением высокой мощности. Его внешний вид показан на рис. П16.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П16.1.



Рис. П16.1. Внешний вид оптического изолятора стандарта Telcordia

Таблица П16.1

Основные характеристики оптического изолятора стандарта Telcordia

№ п/п	Параметр	Величина
1	Рабочая длина волны, нм	$1550 \pm 15$
2	Минимальная изоляция, дБ	$\geq 50$
3	Собственные потери, дБ	$\leq 0,4$
4	Максимальные собственные потери, дБ	$\leq 0,6$
5	Обратные потери (вход / выход), дБ	$\geq 60 / 55$
6	Максимальная изолируемая мощность, мВт	500
7	Рабочий диапазон температур, °С	$-5 \sim (+70)$
8	Температура хранения, °С	$-40 \sim (+85)$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 17

### Спектрометр NIRQuest

Спектрометр предназначен для измерения спектральных характеристик и количественной обработки с целью последующего анализа за счёт применения аналитических методов. Его внешний вид представлен на рис. П17.1, основные характеристики приведены в табл. П17.1.



Рис. П17.1. Внешний вид спектрометра NIRQuest2.5+

Таблица П17.1

Основные характеристики оптического изолятора стандарта Telcordia

№ п/п	Параметр	Величина
1	Диапазон длин волн, нм	900÷1700
2	Оптическое разрешение, нм	3,13
3	Входная щель, мкм	25
4	Отношение сигнал / шум	До 15 000
5	Время интегрирования, мс	1÷200
6	Входной волоконный коннектор	SMA 905
7	Детектор	InGaAs
8	Термическое охлаждение до, °С	-20
9	Размеры, мм	182×110×47
10	Вес, кг	1,18

Питание оборудования осуществляется за счёт подключения блока питания 5 В, при этом данные, содержащие спектральные характеристики, передаются через USB-кабель на компьютер с фирменным программным обеспечением.

Основные настройки для работы устанавливаются в программном обеспечении OceanView, окно представлено на рис. П17.2.

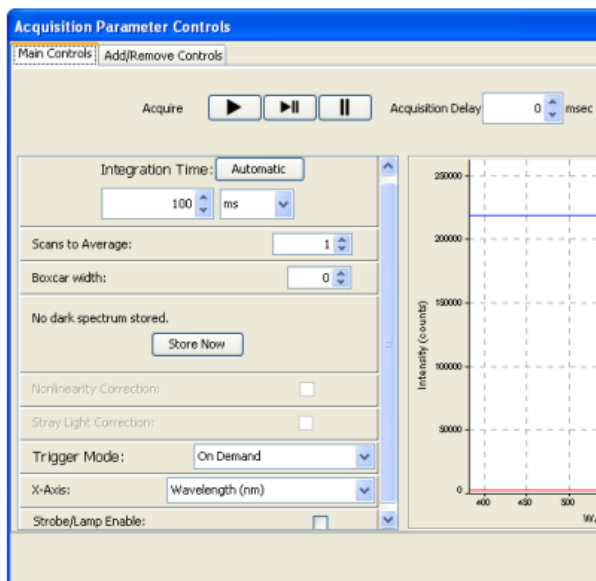


Рис. П17.2. Программное обеспечение спектрометра NIRQuest2.5+

При отсутствии излучения, попадающего на спектрометр, в активном окне графика должна отображаться динамическая трассировка. При попадании света в спектрометр кривая на графике должна увеличиваться с увеличением интенсивности освещения.

Для измерения спектральных характеристик одномодового источника излучения необходимо использовать оптический кабель с соответствующими коннекторами.

**Акустооптический модулятор «Фотон 3201»**

Акустооптический модулятор добротности «Фотон 3201» предназначен для модуляции лазерного излучения. Он изготовлен на основе монокристалла парателлурита  $\text{TeO}_2$ . Его основные параметры:

Тип дифракции – анизотропная.

Длина волны излучения –  $1064 \pm 40$  нм.

Рабочая полоса частот –  $80 \pm 20$  МГц.

Время переключения – 300 нс.

Поляризация светового пучка – произвольная.

Эффективность дифракции в 1-й порядок – более 90 %.

Активная апертура – 2 мм.

Мощность управляющего высокочастотного сигнала – 1,5 Вт.

Коэффициент стоячей волны в полосе рабочих частот – менее двух относительных единиц.

Внешний вид акустооптического модулятора добротности «Фотон 3201» с драйвером приведён на рис. П18.1.



Рис. П18.1. Внешний вид акустооптического модулятора добротности «Фотон 3201» с драйвером

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maimanelectronics.com/product-page/benchtop-laser-diode-tec-controller-mbl1500a> (дата обращения: 29.08.2023).
2. Измеритель оптической мощности FTBx-1750. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exforus.ru/products/index.php?id=168>(дата обращения: 29.08.2023).
3. User's Manual. AQ6370D Optical Spectrum Analyzer. URL: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/6058/files/IMAQ6370D-01EN.pdf> (accessed 30 August 2023).
4. Active Components Pump Laser Modules 1999CHP. Data Sheet. URL: [www.symphotony.com](http://www.symphotony.com) (accessed 25 May 2024).
5. Product Specification, Revision 1.52 Super-Luminescent Light Emitting Diode Device IPSDD0906 (980nm). URL: <http://www.inphenix.com/pro/Superluminescent%20Diodes%20Device/IPSDD0906.pdf> (accessed 29 August 2023).
6. Суперлюминесцентный лазерный диод EXS210007-01 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gophotonics.com/products/superluminescent-diodes/exalos/59-473-exs210007-01> (дата обращения: 24.06.2024)
7. SLED MODULES Products&Specification. URL: <https://www.exalos.com/sled-modules/> (accessed 29 August 2023).
8. Product Specification, Revision 1.52 Super-Luminescent Light Emitting Diode Device IPSDD1602 (1610nm). URL: <http://www.inphenix.com/pro/Superluminescent%20Diodes%20Device/IPSDD1602.pdf> (accessed 29 August 2023).
9. Стандартный разветвитель 1310 / 1550 нм [Электронный ресурс]. URL: <https://lenlasers.ru/product/malogabaritnyj-standartnyj-razvetvitel-ssc/> (дата обращения: 29.08.2023).

10. Изолятор 1310 / 1480 / 1550 нм, 300–500 мВт [Электронный ресурс]. URL: <https://lenlasers.ru/product/nechuvstvitelnyj-k-polyarizatsii-izolyator-1310-1550-2000-nm/> (дата обращения: 29.08.2023).

11. Циркулятор GateRay GR-CIRC-55 на 1550 нм [Электронный ресурс]. URL: [https://fibertool.ru/catalog/pasive/uplotnenie\\_cwdm\\_dwdm\\_i\\_dr/tsirkulyatory/gr\\_circ\\_55/](https://fibertool.ru/catalog/pasive/uplotnenie_cwdm_dwdm_i_dr/tsirkulyatory/gr_circ_55/) (дата обращения: 29.08.2023).

12. Сплавной WDM 980 / 1550 нм серии WD9850 [Электронный ресурс]. URL: <https://lenlasers.ru/product/splavnoj-wdm-980-1550-nm-serii-wd9850/> (дата обращения: 29.08.2023).

13. Описание типа средства измерения. Генераторы сигналов специальной формы серии АКИП-3420 [Электронный ресурс]. URL:

<https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1716636732&tld=ru&lang=ru&name=AKIP-3420-3-opisanie-tipa.pdf&text=акип-3420&url=https%3A%2F%2Fkiptm.ru%2Fimages%2FProduction%2FAKIP%2Fgenerators%2FAKIP-3420-3-opisanie-tipa.pdf&lr=50&mime=pdf&lon=ru&sign=5dd83b4f110cf046b310392c48792e6c&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1716636732%26tld%3Dru%26lang%3Dru%26name%3DAKIP-3420-3-opisanie-tipa.pdf%26text%3D%25D0%25B0%25D0%25BA%25D0%25B8%25D0%25BF-3420%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fkiptm.ru%2Fimages%2FProduction%2FAKIP%2Fgenerators%2FAKIP-3420-3-opisanie-tipa.pdf%26lr%3D50%26mime%3Dpdf%26lon%3Dru%26sign%3D5dd83b4f110cf046b310392c48792e6c%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения: 25.05.2024).

14. Генератор АКИП-3420/3 [Электронный ресурс]. URL: <https://etk-komplekt.ru/akip-34203-akip-generatory-signalov-specialnoj-formy-akip?yclid=4168601066179657727> (дата обращения: 25.05.2024).

15. ThorLabs MC1000A Optical Chopper. Operation Manual. URL: <https://manualios.com/manual/2101035/thorlabs-mc1000a-operating-manual-22/> (accessed 25 May 2024).

16. ThorLabs PDA10CF(-EC) InGaAs Amplified Detector User Guide. URL: <https://www.thorlabs.com/drawings/64d61e7afa96e21b-E6F2B481-0555-6F23-276A9164CCD4A33A/PDA10CF-EC-Manual.pdf> (accessed 25 May 2024).

17. NIRQuest+1.7 Спектрометры серии NIRQuest+ [Электронный ресурс]. URL: <https://lenlasers.ru/product/spektrometry-serii-nirquest/sku/105066/> (дата обращения: 21.10.2024).

18. Акустооптический модулятор добротности лазера (ключ) на основе монокристалла парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ) [Электронный ресурс]. URL: <http://aod.msk.ru/rus/filter15.shtml> (дата обращения: 20.10.2024).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
Работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА.....	4
1.1. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов.....	4
1.2. Основные характеристики лазерного излучения.....	10
1.3. Порядок выполнения работы.....	18
1.4. Контрольные вопросы.....	25
Список литературы.....	26
Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДИОДА.....	27
2.1. Физические принципы работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов.....	27
2.2. Конструкция и принцип работы суперлюминесцентного диода.....	30
2.3. Основные характеристики суперлюминесцентных диодов.....	31
2.4. Основные характеристики модулей полупроводниковых суперлюминесцентных диодов, исследуемых в работе.....	33
2.5. Порядок выполнения работы.....	34
2.6. Контрольные вопросы.....	43
Список литературы.....	43
Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	45
3.1. Основные элементы лазера.....	46
3.2. Устройство волоконного иттербиевого лазера.....	47
3.3. Физические основы работы иттербиевого волоконного лазера непрерывного излучения.....	49
3.4. Основные характеристики лазерного излучения.....	55
3.5. Порядок выполнения работы.....	57
3.6. Контрольные вопросы.....	66
Список литературы.....	66
Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА С ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ.....	68
4.1. Физические принципы работы волоконного импульсного лазера.....	68
4.2. Основные характеристики импульсного лазера с просветляющимся поглотителем.....	81
4.3. Порядок выполнения работы.....	81
4.4. Контрольные вопросы.....	90
Список литературы.....	90



Работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА С АКТИВНЫМ ЗАТВОРОМ.....	92
5.1. Физические принципы работы волоконного импульсного лазера с активным затвором.....	92
5.2. Порядок выполнения работы.....	102
5.3. Контрольные вопросы.....	110
Список литературы.....	111
Работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ.....	112
6.1. Физические принципы работы волоконного лазера ультракоротких импульсов.....	112
6.2. Порядок выполнения работы.....	122
6.3. Контрольные вопросы.....	128
Список литературы.....	129
Работа 7. СБОРКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	130
7.1. Основные характеристики активного оптического волокна, легированного ионами эрбия.....	131
7.2. Принцип работы волоконно-оптических эрбиевых усилителей.....	133
7.3. Оптические схемы волоконно-оптических усилителей.....	138
7.4. Основные характеристики эрбиевого усилителя.....	139
7.5. Суперлюминесцентный волоконный источник.....	145
7.6. Порядок выполнения работы.....	148
Y-разветвитель производства ПНППК.....	148
7.7. Контрольные вопросы.....	157
Список литературы.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Работа с источником излучения.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Измеритель оптической мощности EXFO-LTB-1.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Работа со спектроанализатором Yokogawa AQ6370D.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Модуль твердотельного инжекционного лазера 1999CH.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSSD0906.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Модуль суперлюминесцентного лазерного диода EXS210007-01.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSSD1602.....	185

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Y-разветвитель производства ПАО «ПНППК».....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Мультиплексор WDM.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Генератор сигналов специальной формы АКИП-3420.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Осциллограф АКИП-4134/1.....	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Оптический чоппер ThorLabs MC1000A.....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Фотоприёмник ThorLabs PDA 10CF-EC.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Контроллер поляризации.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ 16. Оптический изолятор стандарта Telcordia.....	200
ПРИЛОЖЕНИЕ 17. Спектрометр NIRQuest.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ 18. Акустооптический модулятор «Фотон 3201».....	203
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	204

*Учебное издание*

**Вольхин** Игорь Львович  
**Ажеганов** Александр Сергеевич  
**Булатов** Максим Игоревич  
**Конин** Юрий Александрович  
**Луценко** Андрей Сергеевич  
**Мальков** Никита Андреевич

**Физические основы лазерной техники:  
лабораторный практикум**

Учебно-методическое пособие

Редактор *А. С. Серебренников*  
Корректор *С. А. Вороненко*  
Компьютерная верстка: *И. Л. Вольхин*

---

Объем данных 6,48 Мб  
Подписано к использованию 26.12.2024

---

Размещено в открытом доступе  
на сайте [www.psu.ru](http://www.psu.ru)  
в разделе НАУКА / Электронные публикации  
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности  
Пермского государственного  
национального исследовательского университета  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15