

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 3. ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА

Лабораторный практикум



Пермь 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

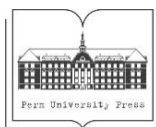
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 3. ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА

Лабораторный практикум

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



Пермь 2023

УДК 537.86: 530.145: 537.312(075.8)

ББК 32.86

К321

Квантовая и оптическая электроника. Часть 3.
К321 Волноводная фотоника. Лабораторный практикум
[Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие /
сост.: И. Л. Вольхин, А. С. Ажеганов, М. И. Булатов,
А. С. Луценко, Н. А. Мальков ; Пермский государ-
ственный национальный исследовательский универси-
тет. – Электронные данные. – Пермь, 2023. – 4,23 Мб ;
150 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Kvantovaya-i-opticheskaya-elektronika-CHast-3-Volnovodnaya-fotonika-Laboratornyj-praktikum.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4058-4

Рассмотрены принципы работы квантовых устройств волноводной фотоники: разветвителей, волоконных брэгговских решеток, оптических изоляторов и циркуляторов. Дано описание макетов, методики выполнения лабораторных работ и обработки полученных результатов.

Предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлениям магистратуры «Радиофизика», «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также для студентов смежных специальностей.

УДК 537.86: 530.145: 537.312(075.8)

ББК 32.86

*Издается по решению ученого совета физического факультета
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 приборостро-
ительная компания» **О. Л. Кель**

© ПГНИУ, 2023

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

ISBN 978-5-7944-4058-4

Луценко А.С., Мальков Н. А., (составление), 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум «Квантовая и оптическая электроника. Часть 3. Волноводная фотоника» содержит описание физических процессов и различных типов конструкции пассивных устройств квантовой волноводной фотоники: разветвителей, волоконных брэгговских решеток, оптических изоляторов и циркуляторов. Приведено подробное описание экспериментальных установок для исследования их основных характеристик, а также методики выполнения лабораторных работ и обработки полученных результатов.

Целью практикума является закрепление знаний, полученных студентами в ходе изучения материалов по курсу «Квантовая и оптическая электроника», приобретение навыков экспериментального исследования и практического использования элементов квантовой волноводной фотоники.

При подготовке к проведению лабораторных работ и защите отчетов следует ознакомиться с рекомендуемой литературой, краткими инструкциями по работе с приборами, приведенными в приложениях, списком вопросов для самоконтроля и требованиями к оформлению отчета. В пособии даны теоретические основы работы приборов квантовой волноводной фотоники, а их основные характеристики приведены в приложениях.

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

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

- 1) краткие теоретические сведения о физических процессах в изучаемых приборах;
- 2) схему экспериментальной установки;
- 3) тип и основные параметры исследованных приборов;
- 4) полученные экспериментальные данные (в виде таблиц и графиков);
- 5) результаты проведенных расчетов, сравнение полученных параметров приборов с их номинальными значениями.

Работа 1. ИЗУЧЕНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

1.1. Классификация пассивных элементов волоконной оптики

Пассивные оптические компоненты включают в себя оптические соединители, розетки, шнуры, распределительные панели, кроссовые шкафы, соединительные муфты, оптические разветвители, аттенюаторы, системы спектрального уплотнения и так далее, т.е. все, что необходимо для обеспечения передачи оптического сигнала по волоконно-оптическому кабелю от передатчика к приёмнику.

По мере роста сложности и увеличения протяженности волоконно-оптической кабельной системы роль пассивных компонентов возрастает. Практически все системы волоконно-оптической связи (ВОЛС), реализуемые для магистральных информационных сетей, локальных вычислительных сетей, а также для сетей кабельного телевидения, охватывают сразу все многообразие пассивных волоконно-оптических компонентов.

Самым важным вопросом передачи информации по ВОЛС является обеспечение надежного соединения оптических волокон. Оптический соединитель – это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных модулей (приёмников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптических кабелей между собой, а также с другими компонентами. Различают неразъёмные и разъёмные соединители. Неразъёмные соединители используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъёмное соединение, является сварка. Разъёмные соединители (широко употребляется термин «коннекторы» – connectors) допускают многократные соединения / разъединения. Промежуточное положение занимают соединения типа механический сплайс.



Рис. 1.1. Классификация пассивных компонентов волоконной оптики

Существует большое количество разнообразных пассивных компонентов волоконной оптики. На рис. 1.1 приведен вариант их классификации, разработанный авторами. Центральное место занимает оптическое волокно, которое присутствует во всех устройствах волоконной оптики. На входе и выходе расположены устройства ввода и вывода оптического излучения, кроме того, между отдельными оптическими волокнами могут быть установлены устройства, изменяющие основные характеристики излучения: мощность, спектр, фазу и поляризацию. Ряд устройств – разветвители, соединители (коннекторы), изоляторы

и циркуляторы – могут быть использованы как при вводе, выводе, так и между оптическими волокнами. Следует отметить, что кроме указанных устройств существуют и другие пассивные компоненты волоконной оптики, а также оптические линзы, призмы, дифракционные решетки и т.д. В волоконно-оптических линиях связи используют активные устройства: квантовые генераторы и усилители мощности, а также различные типы модуляторов, детекторов и т.д.

Распространение излучения в оптических кабелях подробно описано в части 2 (работы 1 и 2) настоящего практикума [2].

1.2. Оптические разветвители

Волоконно-оптические разветвители по ширине полосы пропускания делятся на узкополосные (селективные) и широкополосные (неселективные). По количеству портов: Y-разветвители (три порта), X-разветвители (четыре порта) и более сложные, многопортовые разветвители. По конструкции: торцевые, боковые, Т-образные и звездообразные.

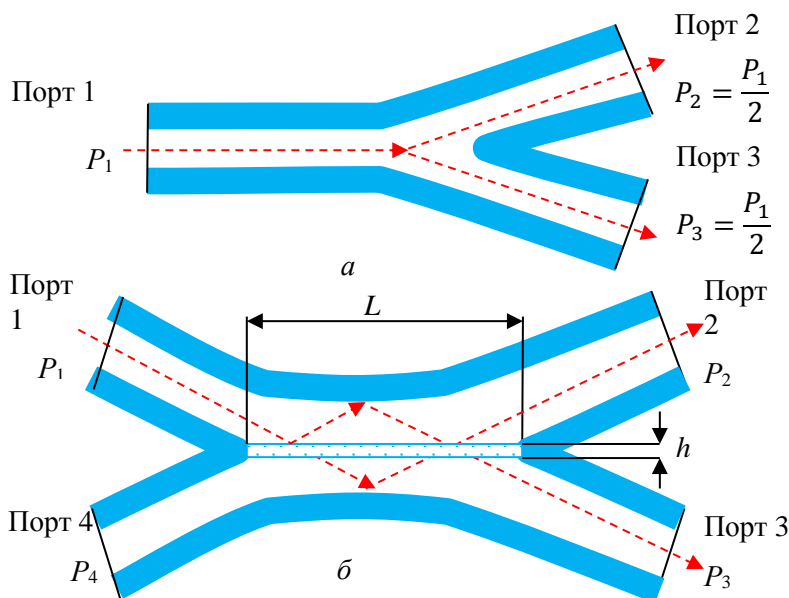


Рис. 1.2. Оптические разветвители: а – Y; б – X

На рис. 1.2, *а* изображена схема симметричного Y-разветвителя. Это простейший ответвитель семейства древовидных. Он имеет один вход – «ствол» и два выхода – «ветви». Его изготавливают путём сплавления трёх отрезков оптического волокна. Оптическая мощность P_1 поступает на порт 1, затем, проходя через разветвитель по сердцевинам оптических волокон, делится пополам и поступает на порты 2 и 3. Представленный тип разветвителя является неселективным. Его условное обозначение на схемах: 1×2. Существуют и более сложные древовидные разветвители с большим числом ветвей: 1×2, 1×3, 1×4, 1×5, 1×6, 1×8, 1×16 и 1×32. Разветвители могут быть симметричными с равномерным распределением входной мощности по каналам и несимметричными, в которых мощность распределяется по ветвям неравномерно.

Схема четырёхпортового X-разветвителя 2×2 (два входа и два выхода) изображена на рис. 1.2, *б*. В нем два оптических волновода с сошлифованными боковыми поверхностями спекаются на расстоянии L . В этой области оптического взаимодействия расстояние между сердцевинами h минимально, и они образуют общий световод. Оптические волны распространяются по нему, многократно отражаясь от границ сердцевина-оболочка. В результате интерференции входная мощность P_1 (поступающая в порт 1) направляется в порты 2 и 3 (P_2 и P_3 соответственно), а в порт 4 она практически не попадает ($P_4 = 0$). Разветвитель является селективным, и на рабочей длине волны λ , подбирая параметры L и h , можно изготовить либо симметричный делитель мощности ($P_2 = P_3$), либо несимметричный ($P_2 \neq P_3$). При этом если в порте 2 мощность может изменяться в пределах от 0 до P_1 , то в порте 3 – наоборот, от P_1 до нуля. В качестве входного можно использовать любой из четырёх портов, при этом выходными портами будут служить два порта на противоположной стороне разветвителя.

Условное графическое изображение X-разветвителя и схема распространения оптического излучения представлены на рис. 1.3, *а*.

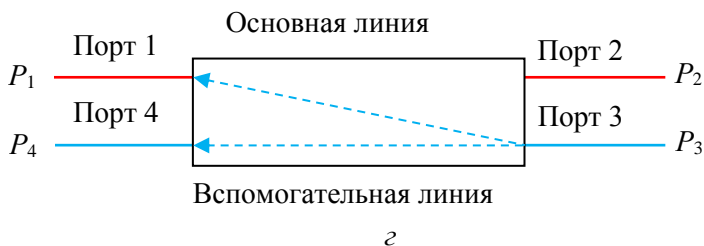
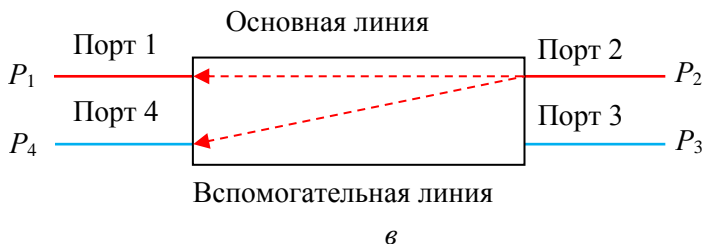
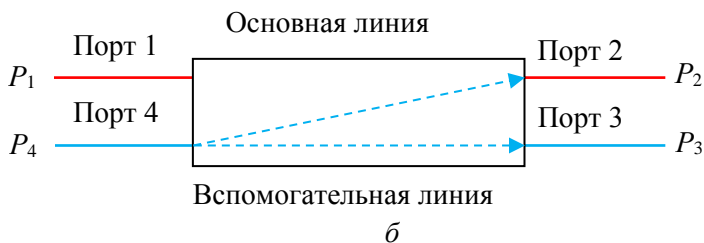
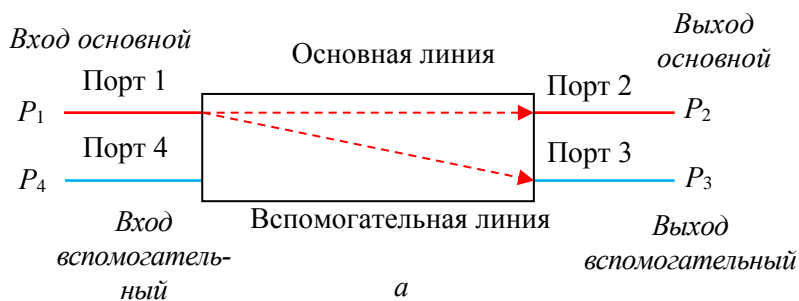


Рис. 1.3. Схема распространения оптического излучения в X-разветвителе. Излучение входит в порт: *a* – 1; *б* – 4; *в* – 2; *г* – 3

Вверху рисунка располагается основная оптическая линия, по которой входной сигнал мощностью P_1 поступает на основной вход (порт 1). Пройдя через разветвитель, часть мощности P_2 достигает выхода основной линии (порт 2), а часть P_3 ответвляется и поступает на выход вспомогательной линии (порт 3). На вспомогательном входе (порт 4) сигнала нет $P_4 = 0$. Сигнал, поступивший на вход вспомогательной линии (порт 4), поступает на выходы вспомогательной и основной линий (порты 3 и 2), как показано на рис. 1.3, б. На вход основной линии (порт 1) сигнал не поступает. Конструкция X-разветвителя является симметричной, распространение сигналов, поступивших на порты 2 и 3, показано на рис. 1.3, в и г соответственно.

Основные характеристики оптических разветвителей рассмотрим на примере рис. 1.3, а:

1. Переходное ослабление

$$C_{12} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \text{ [дБ]}, \quad (1.1)$$

где P_1 – входная мощность на входе основной линии (порт 1); P_2 – мощность на выходе основной линии (порт 2).

В зависимости от величины переходного ослабления разветвители делятся на устройства с сильной ($C = 0 \div 10$ дБ) и слабой ($C > 10$ дБ) связью. Разветвители, имеющие равные мощности ($C_{12} = C_{13} = 3$ дБ) на выходах – основном и вспомогательном (порты 2 и 3), называются трёхдецибелными направленными ответвителями. В англоязычной литературе в формуле (1.1) принято ставить знак минус, что подчеркивает ослабление передаваемого сигнала.

2. Направленность

$$N_{24} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_4} \text{ [дБ]}, \quad (1.2)$$

здесь P_2 – мощность на выходе основной линии (порт 2), а P_4 – на входе вспомогательной (порт 4). Она измеряется при подключении поглощающей нагрузки к неиспользуемому порту 3.

Чем больше направленность разветвителя, тем лучше его качество. Направленность идеального разветвителя равна бесконечности. Направленность может быть нулевой, когда во всех

направлениях (порты 2, 3 и 4) распространяются волны равной амплитуды.

3. Развязка

$$L_{14} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_4} \text{ [дБ]}, \quad (1.3)$$

где P_1 и P_4 – мощности на входах основной и вспомогательной линий (порты 1 и 4) соответственно. Измеряется при подключении поглощающих нагрузок к портам 2 и 3.

4. Баланс выходных плеч

$$B_{23} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_3} \text{ [дБ]}, \quad (1.4)$$

где P_2 и P_3 – мощности на выходах основной и вспомогательной линий (порты 2 и 3) соответственно.

5. Рабочее ослабление (вносимые потери)

$$A_{123} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2 + P_3} \text{ [дБ]}, \quad (1.5)$$

где P_1 – мощность на входе основной линии (порт 1); P_2 и P_3 – мощности на выходах основной и вспомогательной линий (порты 2 и 3) соответственно.

6. Потери на разветвлении – распределение мощности между выходными линиями. Для идеального разветвителя ($1 \times n$) с n выходными линиями, в предположении равномерного распределения мощностей,

$$A_{1n} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \text{ [дБ]}. \quad (1.6)$$

Для идеального разветвителя 1×2 потери на разветвлении $A_{12} = 3$ дБ, а для 1×4 – $A_{14} = 6$ дБ.

7. Рабочий диапазон длин волн – это диапазон длин волн, в пределах которого параметры разветвителя не выходят за пределы допустимых. Разветвители, имеющие большой диапазон длин волн, называются ахроматическими.

1.3. Мультиплексоры и демультиплексоры

Оптический мультиплексор WDM (Wavelength Division Multiplexing – спектральное уплотнение каналов) – пассивное устройство, собирающее в одно оптическое волокно несколько оптических сигналов на разных длинах волн. Его основные области применения: телекоммуникационные оптоволоконные ли-

нии связи, системы видеонаблюдения, системы накачки волоконно-оптических усилителей и лазеров и др. Мультиплексоры бывают активными (требующие для своей работы внешних источников пиния) и пассивными (не требуют внешних источников питания). В настоящей работе будут рассмотрены пассивные мультиплексоры систем оптической накачки WDM. Такие устройства обычно изготавливают методом сплавления оптических волокон между собой (см. рис. 1.2, б) либо на основе X-разветвителей, образованных канальными волноводами фотонной интегральной схемы.

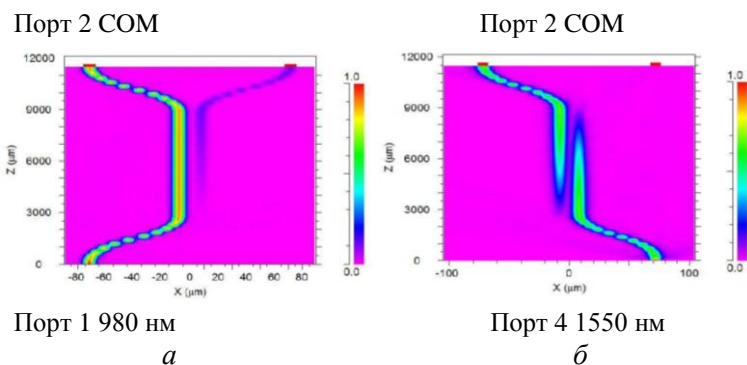


Рис. 1.4. Результаты моделирования распространения в оптическом мультиплексоре излучения на длине волны: а – 980 нм; б – 1550 нм [3]

На рис. 1.4 представлены результаты моделирования работы оптического мультиплексора на основе фотонной интегральной схемы. Длина области оптического взаимодействия L и расстояние между канальными волноводами h подобраны так, что излучение с длиной волны $\lambda = 980$ нм, используемое для накачки эрбиевых оптико-волоконных усилителей и лазеров, проходит по основной линии из входного порта 1 980 нм в выходной порт 2 COM, а с $\lambda = 1550$ нм (рабочая длина волны лазера) – из входного порта 4 1550 нм вспомогательной линии в порт 2 COM. Далее оба излучения распространяются совместно вдоль канального волновода. Аналогично работает оптический мультиплексор на основе X-разветвителя, изготовленный по технологии сплавления оптических волокон. Неиспользуемое оптиче-

ское волокно выходного порта 3 (см. рис. 1.2) обрезается. Внешний вид мультиплексора представлен на рис. 1.5.

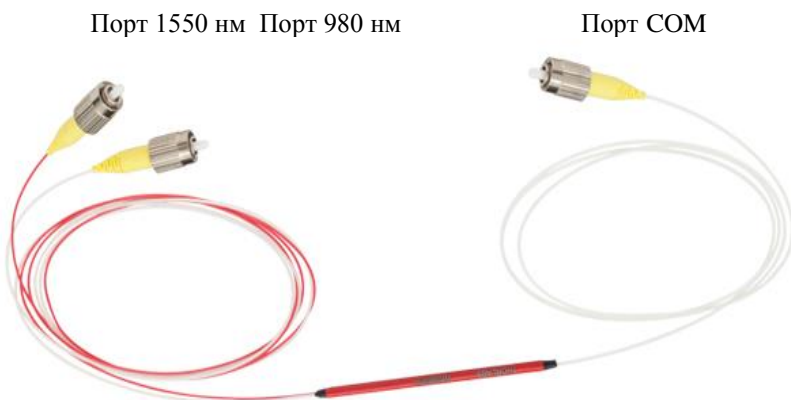


Рис. 1.5. Оптический мультиплексор

Следует отметить, что если подать на общий выход (порт COM) два сигнала с длинами волн 980 и 1550 нм, то при прохождении через устройство они разделятся и на порты 980 и 1550 нм поступят сигналы с длинами волн 980 и 1550 нм соответственно. В этом случае устройство выполняет функции демultipлексора DMux (Demultiplexer – спектральный разделитель каналов). Таким образом, оптические демultipлексоры выполняют функцию, обратную мультиплексорам, и предназначены для разделения сигналов по спектрам. Как и мультиплексоры, демultipлексоры бывают активными и пассивными. Пассивные мультиплексоры WDM и демultipлексоры DMux являются обратимыми устройствами, в которых порты могут использоваться как для ввода, так и для вывода оптического излучения.

1.4. Порядок выполнения работы

Цель работы: исследовать основные характеристики Y-разветвителя и мультиплексора.

Оборудование и принадлежности:

Наименование	Марка	Кол-во
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	EXS210108-01 1550 нм	1
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	IPSDD0906 980 нм	1
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	IPSDD1602 1610 нм	1
Y-разветвитель	Производство ПНППК 50 / 50	1
Мультиплексор WDM	L320461665 980 / 1550 нм	1
Измеритель оптической мощности	EXFO FTB-1750х или аналогичный	1
Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналогичный	1
Контроллер лазера	Maiman Electronics MBL 1500 A	1
Ноутбук с ПО для Maiman MBL 1500 A	—	1

1.4.1. Инструктаж

Перед началом работы ознакомиться с краткими инструкциями по работе с приборами:

1. Контроллер лазера Maiman Electronics MBL 1500 A в прил. 1.
2. Измеритель оптической мощности EXFO FTB-1750х в прил. 2.

3. Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D в прил. 3.
4. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906 в прил. 4.
5. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 в прил. 6.
6. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 в прил. 7.
7. Y-разветвитель производства ПНППК в прил. 8.
8. Мультиплексор WDM в прил. 9.

1.4.2. Исследование Y-разветвителя

1. Настройка широкополосного источника излучения:

1.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (1550 нм) в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1).

1.2. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

1.3. Установить значение силы тока 200,0 мА. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman

2. Настройка измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750х:

2.1. Включить измеритель оптической мощности EXFO FTB-1750х согласно инструкции (см. прил. 2).

2.2. Рабочая длина волны 1550,00 нм при включении устанавливается автоматически, как отмечено в п. 6 прил. 2: при касании клавиши Cancel на рис. П2.6.

3. Проведение измерений на длине волны 1550 нм

Структурная схема установки для исследования основных характеристик Y-разветвителя представлена на рис. 1.7.

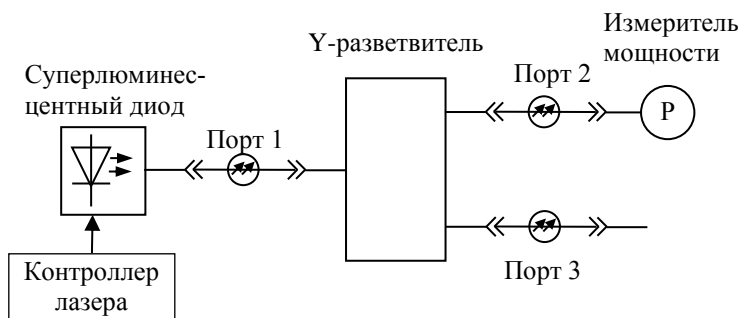


Рис. 1.7. Структурная схема установки для исследования основных характеристик Y-разветвителя

3.1. Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC (рис. 1.8, з) подключить к адаптеру FC (рис. 1.8, в) измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750х.

3.2. Включить источник излучения. Измерить оптическую мощность суперлюминесцентного лазерного диода P_1 . Результаты записать в табл. 1.1.

3.3. Выключить источник излучения. Собрать установку для исследования основных характеристик Y-разветвителя, как показано на рис. 1.7. Для этого:

- Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC (см. рис. 1.8, з) под-

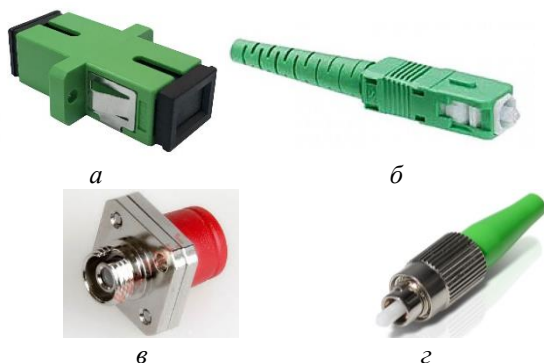


Рис. 1.8. Внешний вид: *а* – адаптера SC; *б* – коннектора SC; *в* – адаптера FC; *г* – коннектора FC

ключить к адаптеру SC (рис. 1.8, *а*) входного порта 1 Y-разветвителя с помощью комбинированного патч-корда FC–SC.

- Оптический комбинированный патч-корд FC–SC выходного порта 2 Y-разветвителя с коннектором FC (см. рис. 1.8, *г*) подключить к адаптеру FC (см. рис. 1.8, *в*) измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750х.

3.4. Включить источник излучения. Измерить оптическую мощность P_2 выходного порта 2. Результаты записать в табл. 1.1.

3.5. Аналогично измерить оптическую мощность P_3 выходного порта 3. Результаты записать в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Результаты измерений оптической мощности портов
Y-разветвителя**

λ , нм	P_1 , мВт	P_2 , мВт	P_3 , мВт	Примечание
1550				
980				
1610				

4. Проведение измерений на длине волны 980 нм:

4.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906 на длину волны 980 нм в контроллер лазера.

4.2. Повторить настройку широкополосного источника излучения по п. 1.

4.3. При настройке измерителя оптической мощности EXFO FTB установить, как указано в п. 5 прил. 2, длину волны 980,00 нм.

4.4. Повторить измерения оптических мощностей P_1 , P_2 и P_3 . Результаты занести в табл. 1.1.

5. Проведение измерений на длине волны 1610 нм

Измерения провести аналогично п. 4 с использованием модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602

6. Обработка результатов измерений Y-разветвителя

Для трёх длин волн 1550, 980 и 1610 нм рассчитать

6.1. Коэффициенты деления:

$$K_2 = \frac{P_2}{P_2 + P_3} 100 \%;$$

$$K_3 = \frac{P_3}{P_2 + P_3} 100 \%.$$

6.2. Погрешность симметричного (50:50 %) делителя мощности:

$$\Delta K_2 = 50 - K_2 \%,$$

$$\Delta K_3 = 50 - K_3 \%.$$

6.3. Рабочее ослабление (вносимые потери):

$$A_{123} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2 + P_3} [\text{дБ}],$$

где: P_1 – мощность на входе (порт 1); P_2 и P_3 – мощности на выходах (порты 2 и 3) соответственно.

Результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исследование Y-разветвителя оптической мощности

λ , нм	K_2 , %	ΔK_2 , %	K_3 , %	ΔK_3 , %	A_{123} , дБ	Примечание
1550						
λ , нм	K_2 , %	ΔK_2 , %	K_3 , %	ΔK_3 , %	A_{123} , дБ	Примечание
980						
1610						

Сравнить полученные результаты с паспортными характеристиками Y-разветвителя.

Сделать вывод о рабочем диапазоне длин волн.

1.4.3. Исследование мультиплексора

Внешний вид корпусированного WDM-мультиплексора с SC-адаптерами и подписанными портами 980, 1550, COM показан на рис. 1.9.

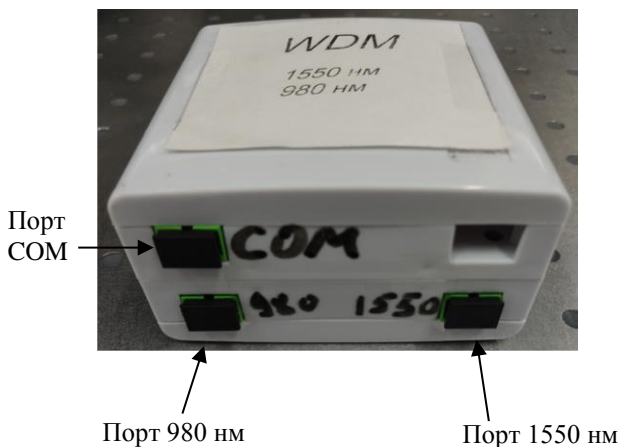


Рис. 1.9. Фотография корпусированного WDM-мультиплексора с SC-адаптерами

Структурная схема установки для исследования основных характеристик мультиплексора приведена на рис. 1.10.

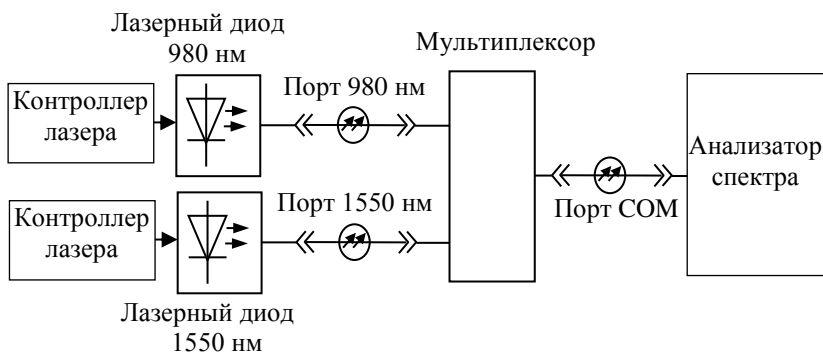


Рис. 1.10. Структурная схема установки для исследования основных характеристик мультиплексора

В связи с использованием только одного контроллера лазера исследование мультиплексора и демультиплексора проводится в два этапа на длинах волн 980 и 1550 нм, при равной оптической мощности 4 мВт. Следует отметить, что это интегральная мощность, измеренная измерителем оптической мощности EXFO-LTB-1. В дальнейшем при измерении спектров будет использован спектроанализатор Yokogawa AQ6370D. На спектрограммах будет показано спектральное распределение указанной мощности. В максимумах спектральных распределений на длинах волн 980 и 1550 нм индицируется плотность оптической мощности на шаге записи данных (0,1 нм), которая, естественно, меньше 4 мВт. Для расчета оптической мощности необходимо взять интеграл под кривой спектрального распределения оптической мощности.

Исследование мультиплексора

Для этого произвести настройку и провести измерения:

1. Настройка широкополосного источника излучения 980 нм:

1.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906 (980 нм) в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1).

1.2. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

1.3. Установить значение силы тока 280,0 мА, которое соответствует выходной оптической мощности 4 мВт. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 1.6.

2. Настройка анализатора спектра Yokogawa AQ6370D:

2.1. Включить анализатор спектра Yokogawa AQ6370D согласно прил. 3.

2.2. Установить настройки анализатора оптического спектра согласно табл. 1.3.

Таблица 1.3

Настройки анализатора спектра Yokogawa AQ6370D

RESOLUTION	0,5	Разрешение дифракционных решеток
START WL	900	Начальная длина волны
STOP WL	1700	Конечная длина волны
SMPLINTVL	0,1	Шаг записи данных
SENS/MODE	HIGH 2	Режим чувствительности измерения

3. Проведение измерений на длине волны 980 нм:

3.1. Оптический кабель с коннектором FC (см. рис. 1.8, *г*) источника излучения на длине волны 980 нм (суперлюминесцентного диода IPSDD0906) подключить к адаптеру FC (см. рис. 1.8, *в*) анализатора спектра Yokogawa AQ6370D.

3.2. Нажатием кнопки «Laser» на передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 (см. рис. 1.6) включить источник излучения. Записать спектр излучения на трассу А, как указано в прил. 2, в пунктах «Переключение между трассами» и

«Запись данных». Сохранить спектрограмму, как указано в пункте «Сохранение данных». Вид сохраненной спектрограммы представлен на рис. 1.11.

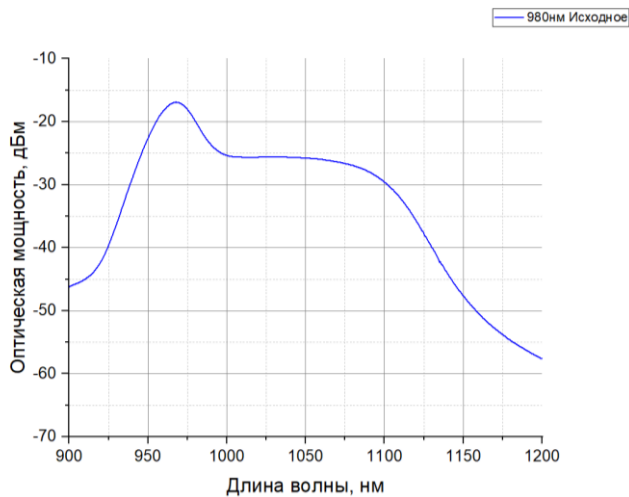


Рис. 1.11. Спектр излучения суперлюминесцентного диода IPSDD0906

3.3. Методом курсорных измерений или в файле данных формата .csv найти выходную оптическую мощность P_1 , дБм, и записать в табл. 1.4. Поиск оптической мощности, соответствующей определенной длине волны, осуществить согласно п. 10 прил. 3.

Таблица 1.4

Исследование основных характеристик мультиплексора на длине волны 980 нм

Мощность на входе основной линии «Порт 980 нм» P_1 , дБм	Мощность на выходе основной линии «Порт СОМ» P_3 , дБм	Мощность на входе вспомогательной линии «Порт 1550 нм» P_2 , дБм	Затухание в основной линии P_1-P_3 , дБ	Затухание во вспомогательной линии P_1-P_2 , дБ

3.4. Выключить источник излучения. Подключить источник излучения к входу основной линии «Порт 980 нм» с помощью FC-адаптера и комбинированного патч-корда SC–FC. Анализатор спектра подключить к выходу основной линии «Порт СОМ». Включить источник излучения. Снять спектрограмму, записать на трассу В. Измерить мощность P_3 , результат записать в табл. 1.4.

3.5. Выключить источник излучения. Подключить анализатор спектра к входу вспомогательной линии «Порт 1550 нм». Включить источник излучения. Снять спектрограмму, записать на трассу С. Измерить мощность P_2 , результат записать в табл. 1.4.

4. Настройка широкополосного источника излучения 1550 нм:

4.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (1550 нм) в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1).

4.2. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

4.3. Установить значение силы тока 280,0 мА, которое соответствует выходной оптической мощности 4 мВт. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 1.6.

5. Проведение измерений на длине волны 1550 нм:

5.1. Оптический кабель с коннектором FC (см. рис. 1.8, г) источника излучения на длине волны 1550 нм (суперлюминесцентного диода EXS210108-01) подключить к адаптеру FC (см. рис. 1.8, в) анализатора спектра Yokogawa AQ6370D.

5.2. Нажатием кнопки «Laser» на передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 (см. рис. 1.6) включить источник излучения. Записать спектр излучения на трассу D.

5.3. Методом курсорных измерений или в файле данных формата .csv найти выходную оптическую мощность P_2 , дБм, и записать в табл. 1.5.

Таблица 1.5

**Исследование основных характеристик мультиплексора
на длине волны 1550 нм**

Мощность на входе вспомога- тельной ли- нии «Порт 1550 нм» P_2 , дБм	Мощность на выходе основной линии «Порт COM» P_3 , дБм	Мощность на входе основной линии «Порт 980 нм» P_1 , дБм	Затухание во вспомога- тельной линии P_2-P_3 , дБ	Затухание в основной линии P_2-P_1 , дБ

5.4. Выключить источник излучения. Подключить источник излучения к входу вспомогательной линии «Порт 1550 нм» с помощью FC-адаптера и комбинированного патч-корда SC–FC. Анализатор спектра подключить к выходу основной линии «Порт COM». Включить источник излучения. Снять спектрограмму, записать на трассу Е. Измерить мощность P_3 , результат записать в табл. 1.5.

5.5. Выключить источник излучения. Подключить анализатор спектра к входу основной линии «Порт 980 нм». Включить источник излучения. Снять спектрограмму, записать на трассу F. Измерить мощность P_1 , результат записать в табл. 1.5.

5.6. Выключить источник излучения.

5.7. В результате измерений на длинах волн 980 и 1550 нм получится семейство спектрограмм, аналогичное представленному на рис. 1.12. Сохранить спектрограммы на флеш-накопитель в формате .csv, как указано в прил. 3, в пункте «Сохранение данных».

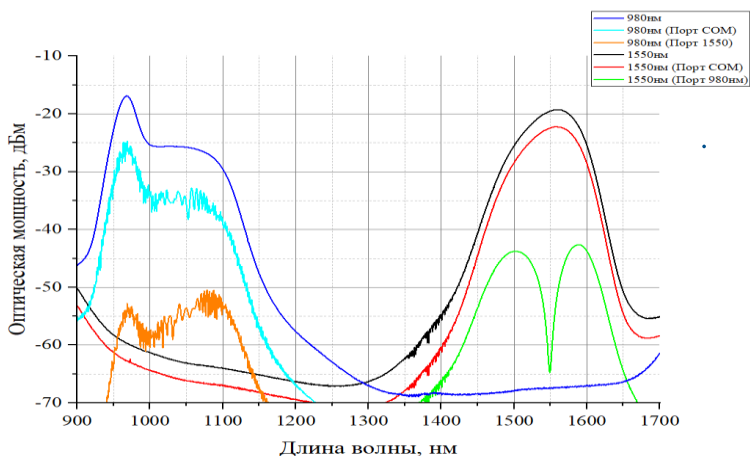


Рис. 1.12. Семейство спектрограмм для излучения 980 нм, измеренного на: выходе суперлюминесцентного диода IPSSD0906 (синяя линия), порте COM при прохождении через основную линию (голубая линия), порте 1550 нм при прохождении на вход вспомогательной линии (оранжевая линия);

Семейство спектрограмм: для излучения 1550 нм, измеренного на: выходе суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (чёрная линия), порте COM при прохождении на выход основной линии (красная линия), порте 980 нм при прохождении на вход основной линии (зелёная линия)

6. Обработка результатов измерений мультиплексора:

6.1. Построить графики спектрограмм в линейном и логарифмическом масштабах. Провести анализ графиков.

6.2. Рассчитать:

На длине волны 980 нм:

- затухание в основной линии $P_1 - P_3$, дБ;
- затухание во вспомогательной линии $P_1 - P_2$, дБ.

Результаты занести в табл. 1.4.

На длине волны 1550 нм:

- затухание во вспомогательной линии $P_2 - P_3$, дБ;
- затухание в основной линии $P_2 - P_1$, дБ.

Результаты занести в табл. 1.5.

Сравнить полученные результаты со справочными данными.

1.4.4. Исследование демультиплексора

Как было написано в подразд. 1.3, мультиплексоры и демультиплексоры являются обратимыми устройствами. Если на порт СОМ подать сигнал, в спектре которого имеются длины волн 980 и 1550 нм, то при прохождении сигналы разделятся и на порт 980 нм и порт 1550 нм поступят сигналы соответствующих длин волн.

По дополнительному заданию преподавателя студентам самостоятельно провести исследование демультиплексора. Эксперименты проводить с последовательным использованием модулей суперлюминесцентных диодов IPSDD0906 с длиной волны излучения 980 нм и EXS210108-01 – с 1550 нм.

1.5. Контрольные вопросы

1. Классификация пассивных компонентов волоконной оптики.
2. Классификация разветвителей: по полосе пропускания – селективные и неселективные; по количеству входных и выходных портов; по конструкции.
3. Конструкция и принцип действия Y-разветвителя
4. Конструкция и принцип действия X-разветвителя.
5. Распространение света в X-разветвителе.
6. Основные характеристики X-разветвителя.
7. Области применения разветвителей.
8. Мультиплексоры и демультиплексоры. Области применения.
9. Конструкция оптоволоконного мультиплексора.
10. Основные характеристики мультиплексора.
11. Объяснить экспериментально полученные результаты.

Список литературы

1. Вольхин И. Л., Ажеганов А. С. Квантовая и оптическая электроника. Ч. 1. Квантовая электроника: лаб. практикум / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2021. 103 с.
2. Квантовая и оптическая электроника: лаб. практикум. Ч. 2. Оптическая электроника / 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.
3. Modeling of 980 / 1550 nm PLC WDM directional coupler / Alvin W. P. Law, 'W. Y. Chong, F. R. M. Adikan, 'H. Ahmad // Proceedings of IEEE 2008 6th National Conference on Telecommunication Technologies and IEEE 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics, 26–27 August 2008. Putrajaya, Malaysia, 2008. 978-1-4244-2215-9/08/\$25.00 ©2008 IEEE.

Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА И У-ЦИРКУЛЯТОРА

2.1. Краткая историческая справка

Известно, что если через вещество, помещённое в постоянное магнитное поле, пропустить в направлении поля поляризованную световую волну, то плоскость её поляризации повернется на некоторый угол, зависящий от напряжённости магнитного поля [2, 3]. Это – одно из магнитооптических явлений, которое впервые наблюдалось Фарадеем и носит его имя. Среды, в которых происходит это явление, называют гиротропными. Было установлено, что явление Фарадея наиболее сильно выражено в ферромагнитных материалах.

Появление ферритов, слабо поглощающих сантиметровые волны, оказало решающее влияние на дальнейшее развитие исследований в этой области. В конце 1940-х гг. был обнаружен эффект вращения плоскости поляризации в круглом волноводе с продольно намагниченным ферритовым стержнем [4].

Среди различных практических приложений наиболее важным является создание волноводных элементов, которые не удовлетворяют принципу взаимности, т.е. ведут себя по-разному для волн, распространяющихся через них в противоположных направлениях. На этом принципе основана работа оптических изоляторов и циркуляторов [5].

2.2. Поляризация света

2.2.1. Световая волна

Под термином «свет» понимают электромагнитное излучение в ультрафиолетовой (0,01–0,4 мкм), видимой (0,4–0,8 мкм) и инфракрасной (0,8–340 мкм) областях спектра.

Электромагнитная волна является волной *поперечной* (transversed 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. 2.1). Направление волнового вектора \vec{k} определяет направление распространения волны.

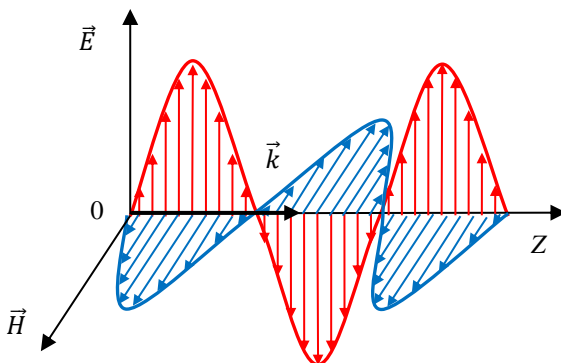


Рис. 2.1. Структура плоской электромагнитной волны

Уравнение плоской волны, распространяющейся в направлении оси z :

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kz)},$$

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

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

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

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

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

Монохроматическим называют свет с одной определенной длиной волны.

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

2.2.2. Поляризация излучения

Термин «*поляризация*» (от лат. *polus*) ввел в 1704–1706 г.г. И. Ньютон. За направление поляризации принято считать направление вектора \vec{E} электрического поля волны.

Плоскостью поляризации называют плоскость, в которой лежат векторы \vec{E} и \vec{k} (рис. 2.2).

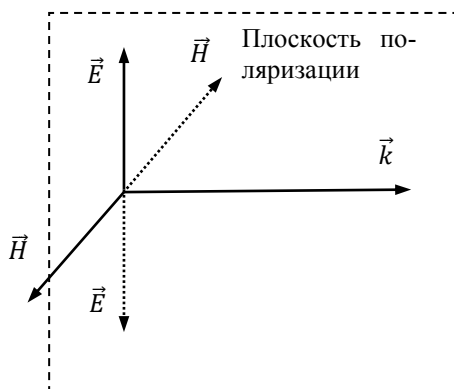


Рис. 2.2. Плоскость поляризации электромагнитной волны

В *плоскополяризованной волне* (линейно-поляризованной волне) вектор \vec{E} совершает линейные колебания, оставаясь в плоскости поляризации.

В волне с *круговой поляризацией* вектор \vec{E} совершает вращение в плоскости, перпендикулярной направлению распространения (рис. 2.3). За один период электромагнитной волны вектор \vec{E} делает один оборот.

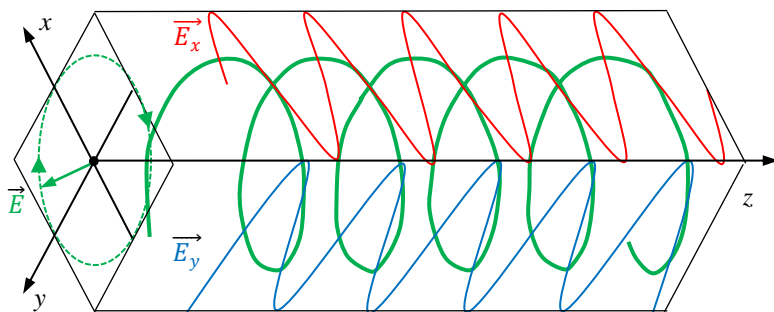


Рис. 2.3. Волна с круговой поляризацией

Различают:

- Правополяризованную волну – направление вектора \vec{k} определяет направление вращения векторов \vec{E} и \vec{H} по правилу правого винта (правилу буравчика). Векторы \vec{E} и \vec{H} вращаются по часовой стрелке, если смотреть вдоль вектора \vec{k} , как показано на рис. 2.4.

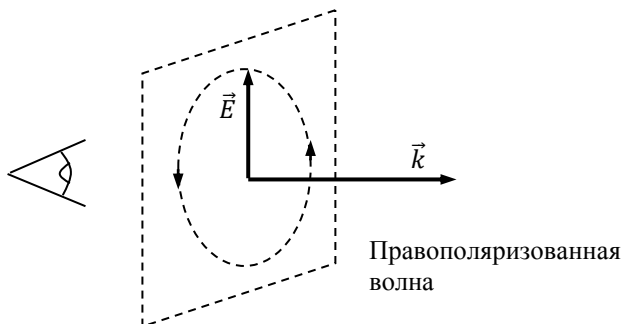


Рис. 2.4. Волна с правой круговой поляризацией

- Левополяризованную волну – векторы \vec{E} и \vec{H} вращаются против часовой стрелки, если смотреть вдоль вектора \vec{k} .

Это условие принято в радиофизике. В литературе по оптике принято противоположное условие: направление поляризации определяют по направлению вращения вектора \vec{E} , если волна идет к глазу наблюдателя.

Линейно-поляризованная волна может быть представлена как суперпозиция (наложение) двух плоскополяризованных волн с ортогональными плоскостями поляризации (рис. 2.5, в).

Линейно-поляризованная волна может быть представлена как суперпозиция левополяризованной и правополяризованной волн (рис. 2.5, а). (При сложении двух вращающихся векторов результирующий вектор будет совершать линейные колебания.) Верно и обратное: волну с круговой поляризацией можно рассматривать как сумму двух линейно-поляризованных волн одинаковых частоты и амплитуды, отличающихся по фазе на $\pi/2$ и ортогональными плоскостями поляризации (рис. 2.5, б).

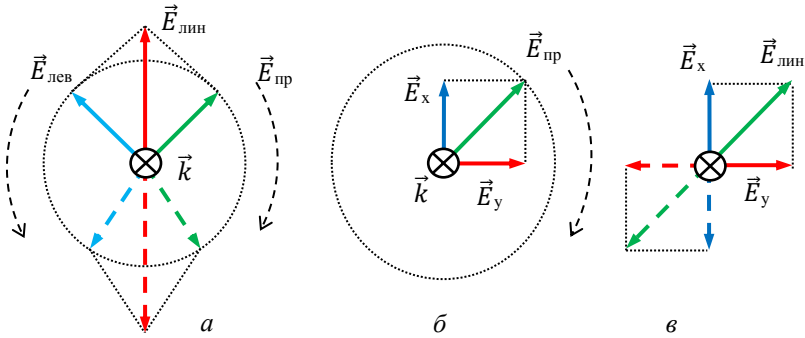


Рис. 2.5. Представление: *а* – линейно-поляризованной волны как суперпозиции левополяризованной и правополяризованной волн; *б* – волны с круговой поляризацией как суперпозиции двух линейно-поляризованных волн; *в* – линейно-поляризованной волны как суперпозиции двух плоскополяризованных волн с ортогональными плоскостями поляризации

2.2.2.1. Поляризация фотона

Энергия световых волн излучается и поглощается определенными порциями (квантами). Эту порцию (квант) излучения называют *фотоном*.

Фотон обладает энергией $E_{\text{ф}} = hc/\lambda$, импульсом $p_{\text{ф}} = h/\lambda$ и собственным моментом импульса (спином) $\vec{s}_{\text{ф}}$. Спиновое квантовое число фотона $s_{\text{ф}} = 1$.

Фотон не имеет массы покоя и существует только в состоянии движения со скоростью c . Для фотона есть только одно избранное направление – направление движения. Возможно две проекции спина на направление движения (на ось z) – по движению $s_z = \hbar$ и против направления движения $s_z = -\hbar$. Состояние $s_z = 0$ не реализуется. Постоянная Планка $\hbar = h/2\pi$, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Наличие момента импульса у фотона свидетельствует о том, что фотон представляет собой электромагнитную волну, поляризованную по кругу (рис. 2.6):

- правой поляризации соответствует спин, направленный в сторону распространения фотона;

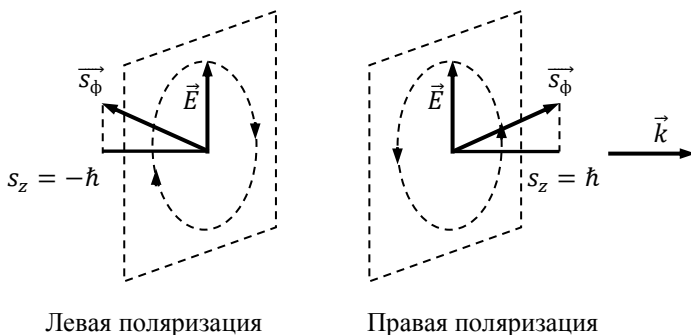


Рис. 2.6. Поляризация фотона

- левой поляризации соответствует спин, направленный в противоположную сторону.

Состояния фотона с проекцией спина $+\hbar$ или $-\hbar$ следует рассматривать как собственные состояния. Состояния фотона с любой поляризацией могут быть получены путём суперпозиции этих состояний.

2.3. Магнитооптические явления

2.3.1. Эффект Зеемана. Классическая модель Г. А. Лоренца

В 1896 г. Зееман обнаружил, что спектральные линии излучения атомов расщепляются, если источник света поместить в магнитное поле. При наблюдении излучения атомов кадмия вдоль направления магнитного поля одиночная (синглетная) голубая спектральная линия с частотой ω_0 расщепляется на две компоненты $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$ и $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$ с круговой поляризацией (простой эффект Зеемана) (рис. 2.7).

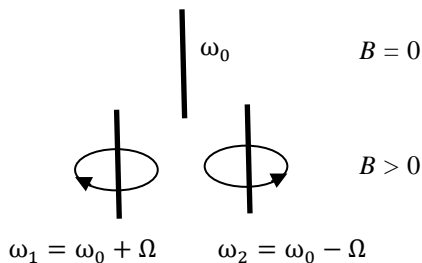


Рис. 2.7. Простой эффект Зеемана

Если вектор индукции магнитного поля направлен от наблюдателя, то компонента с большей частотой ω_1 поляризована по правому, а с меньшей частотой ω_2 – по левому кругу.

При изменении направления распространения света на противоположное (вектор индукции магнитного поля направлен от наблюдателя, а свет распространяется к наблюдателю), направление поляризации не меняется.

Электронная теория Лоренца дала объяснение наблюдаемому явлению. Излучение создается круговыми вращениями электрона в атоме. Частота излучаемого света совпадает с частотой вращения электрона. Излучение максимально в направлении, перпендикулярном к ускорению электрона. В отсутствие магнитного поля все направления равновероятны и излучение не поляризовано.

Центростремительная сила, действующая на вращающийся электрон в отсутствие магнитного поля равна $m\omega_0^2 r$. В магнитном поле к ней добавляется сила Лоренца (рис. 2.8)

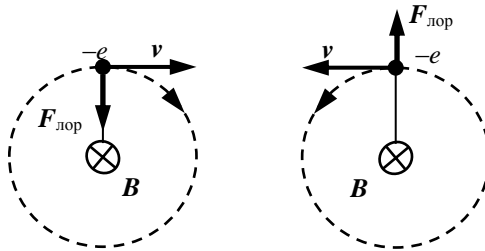


Рис. 2.8. Действие силы Лоренца на электрон, вращающийся по круговой орбите в атоме

$$F_{\text{лор}} = \pm evB = \pm e\omega rB = \pm 2m\Omega\omega r,$$

где ω – частота вращения электрона в атоме при наличии магнитного поля; $\Omega = eB/2m$ – ларморовская частота.

Выбор знака зависит от направления вращения. Новая центростремительная сила $m\omega^2 r$ становится равной

$$m\omega^2 r = m\omega_0^2 r \pm F_{\text{лор}} = m(\omega_0^2 \pm 2\Omega\omega)r.$$

Приходим к уравнению

$$\omega^2 = \omega_0^2 \pm 2\Omega\omega,$$

из которого для положительных корней находим

$$\begin{aligned}\omega &= \mp\Omega \pm \sqrt{\Omega^2 + \omega_0^2} \approx \omega_0 \pm \Omega, \\ \omega_1 &= \omega_0 + \Omega, \\ \omega_2 &= \omega_0 - \Omega.\end{aligned}$$

Эффект Зеемана. Квантовая модель

Эффект Зеемана – расщепление уровней энергии атомов и линий атомных спектров в магнитном поле.

Простому эффекту Зеемана можно дать следующее упрощенное объяснение. Уровни энергии E_n валентного электрона в атоме определяются главным квантовым числом $n = 1, 2, 3 \dots$. При переходе электрона с уровня E_n на уровень E_{n-1} излучается квант света (фотон) с энергией

$$\hbar\omega_0 = E_n - E_{n-1}.$$

Допустим теперь, что атом помещён в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} . При помещении в магнитное поле атом приобретает дополнительную (зеемановскую) энергию

$$E_n + E_{\text{зееман}};$$

$$E_{\text{зееман}} = -(\vec{\mu}_L \cdot \vec{B}) = \mp\mu_{LB}B = \mu_B B m_L,$$

где $\vec{\mu}_L$ – магнитный момент атома, равный орбитальному магнитному моменту валентного электрона; $\mu_{LB} = \mu_B m_L$ – проекция магнитного момента на направление магнитного поля; m_L – орбитальное магнитное квантовое число, $m_L = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$; μ_B – магнетон Бора,

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e},$$

e – заряд, m_e – масса электрона.

Уровень энергии E_n атома расщепляется на равноотстоящие подуровни с квантовыми числами m_L (рис. 2.9).

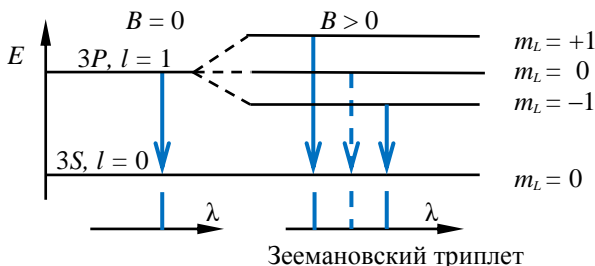


Рис. 2.9. Атом с одним валентным электроном.
При переходе с $\Delta m_L = 0$ излучается фотон в направлении,
перпендикулярном к направлению магнитного поля

Энергия излученных фотонов

$$\begin{aligned}\hbar\omega_1 &= (E_n + \mu_B B m_L) - (E_{n-1} + \mu_B B (m_L - 1)) \\ &= (E_n - E_{n-1}) + \mu_B B;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hbar\omega_2 &= (E_n + \mu_B B m_L) - (E_{n-1} + \mu_B B (m_L + 1)) \\ &= (E_n - E_{n-1}) - \mu_B B;\end{aligned}$$

$$\hbar\omega_1 = \hbar\omega_0 + \mu_B B = \hbar\omega_0 + \hbar\Omega_L;$$

$$\hbar\omega_2 = \hbar\omega_0 - \mu_B B = \hbar\omega_0 - \hbar\Omega_L.$$

Величину $\Omega = \frac{eB}{2m_e}$ называют частотой Лармора.

С магнитным моментом атома $\vec{\mu}_L$ связан его момент импульса \vec{L} ,

$$|\vec{L}|^2 = \hbar^2 l(l+1), \quad \text{где } l = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

проекция которого на направление магнитного поля

$$L_B = \hbar m_L, \quad \text{где } m_L = -l; -l+1; \dots +l.$$

При излучении фотона изменяются на ± 1 орбитальное l и магнитное m_L квантовые числа.

При излучении фотона с большей частотой ω_1 момент импульса атома $L_z = \hbar m_L$ уменьшается на величину \hbar . По закону сохранения момента импульса, эту величину момента импульса ($s_\phi = \hbar$) уносит фотон с правой поляризацией, спин которого направлен по направлению магнитного поля.

Соответственно, при излучении фотона с меньшей частотой ω_2 момент импульса атома $L_z = \hbar m_L$ увеличивается на \hbar . По закону сохранения момента импульса, величину момента им-

пульса ($s_z = -\hbar$) уносит фотон с левой поляризацией, спин которого направлен против направления магнитного поля.

Таким образом, при наблюдении излучения атомов вдоль направления магнитного поля спектральная линия с частотой ω_0 расщепляется на две компоненты: $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$ с правой и $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$ с левой поляризацией.

2.3.2. Поворот плоскости поляризации в магнитном поле.

Эффект Фарадея

Магнитооптический эффект Фарадея – при распространении линейно-поляризованного света через вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света. Эффект Зеемана и явление дисперсии дают объяснение эффекту Фарадея.

Наблюдения вдоль направления магнитного поля показывают, что двум зеемановским линиям излучения соответствуют и две линии поглощения (обратный эффект Зеемана). Следовательно, в веществе, помещенном в магнитное поле, смещаются собственные частоты атомов. При этом собственные частоты атомов, соответствующие правой и левой поляризации света, смещаются в разные стороны.

Пусть через вещество в направлении магнитного поля проходит линейно-поляризованный свет с частотой ω , отличной от собственных частот атомов.

Линейно-поляризованное излучение может быть представлено как суперпозиция (наложение) право- и левополяризованных волн.

На рис. 2.10 кривая дисперсии Л показывает ход показателя преломления в магнитном поле для луча с левой поляризацией, а кривая П – для луча с правой поляризацией.

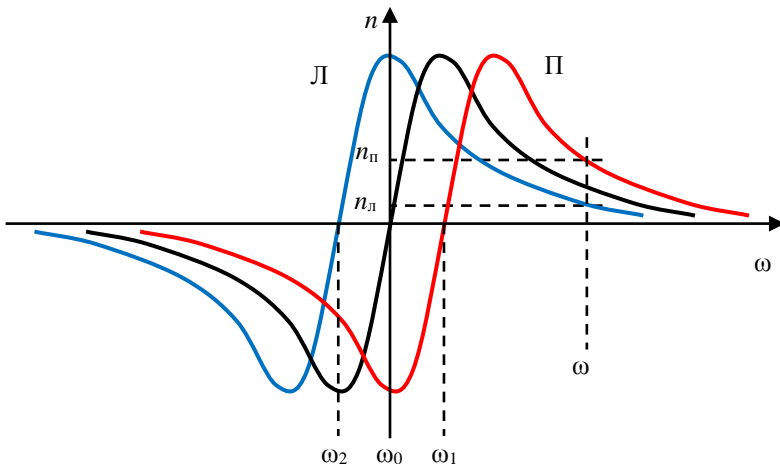


Рис. 2.10. Кривые дисперсии в отсутствие магнитного поля (чёрная линия) и в магнитном поле: синяя кривая Л – для луча с левой поляризацией, красная кривая П – для луча с правой поляризацией

Величина показателя преломления вещества зависит от близости частоты волны к собственным частотам вещества (явление дисперсии). В магнитном поле показатели преломления для право- и левополяризованного света становятся различными (n_π и n_λ).

Вследствие этого при прохождении через вещество вдоль направления магнитного поля линейно-поляризованного излучения его лево- и правополяризованные составляющие распространяются с разными фазовыми скоростями – $v_\pi = c/n_\pi$, $v_\lambda = c/n_\lambda$ и приобретают оптическую разность хода, пропорциональную толщине слоя вещества:

$$\Delta = (n_\pi - n_\lambda)d.$$

При выходе из вещества лево- и правополяризованные компоненты снова образуют плоскополяризованную волну. Плоскость поляризации линейно-поляризованного монохроматического света с длиной волны λ , прошедшего в веществе путь d , поворачивается на угол

$$\theta = \frac{\pi d(n_\pi - n_\lambda)}{\lambda}.$$

В области не очень сильных магнитных полей разность $(n_p - n_d)$ линейно зависит от величины индукции магнитного поля и угол фарадеевского вращения описывается соотношением

$$\theta = VBd,$$

где V – постоянная Верде, коэффициент пропорциональности, который зависит от свойств вещества, длины волны излучения и температуры.

2.4. Явление двулучепреломления

2.4.1. Преломление световых лучей в анизотропном кристалле

В устройствах волоконной оптики используют кристаллы *ниобата лития* (LiNbO_3) – бесцветные кристаллы тригональной кристаллографической системы. Их кристаллическая решётка имеет одну ось симметрии третьего порядка ($L3$).

Направление (ось z), совпадающее с кристаллографической осью $L3$, называется *оптической осью кристалла*. *Главным сечением кристалла* называется плоскость, в которой лежат оптическая ось кристалла и волновой вектор \vec{k} светового луча, проходящего через кристалл (рис. 2.11).

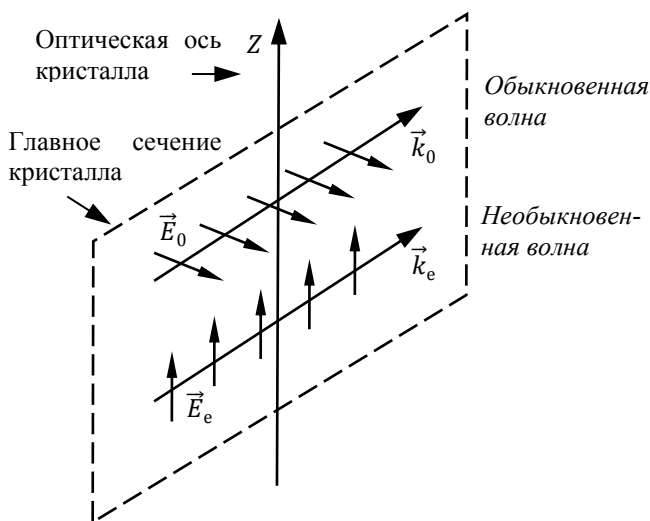


Рис. 2.11. Главное сечение кристалла и направления поляризации обыкновенной и необыкновенной волн

Одноосные кристаллы являются *оптически анизотропными*, т.е. показатель преломления и фазовая скорость световой волны зависят от направления её распространения и от ориентации плоскости поляризации. Диэлектрическая проницаемость ϵ и показатель преломления ($n = \sqrt{\epsilon}$) в направлении оптической оси и в направлениях, перпендикулярных к ней, имеют различные значения. Следовательно, электромагнитным волнам с различными направлениями колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E} соответствуют разные значения фазовой скорости $v = c/n$ и показателя преломления. Это явление носит название «двойное лучепреломление».

Колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E}_0 в «обыкновенной» волне совершаются в направлении, перпендикулярном главному сечению кристалла для этой волны (см. рис. 2.11). В «необыкновенной» волне колебания вектора напряжённости \vec{E}_e совершаются в плоскости, совпадающей с главным сечением для данной волны (см. рис. 2.11). Для С-диапазона длин волн ($\lambda = 1530 \div 1565$ нм), преимущественно используемого в волоконно-оптических системах, «обыкновенный» n_o и «необыкновенный» n_e показатели преломления для ниобата лития имеют величины $n_o = 2,225$ и $n_e = 2,135$.

Из кристаллов вырезают пластинки, поверхность которых параллельна оптической оси кристалла.

Пусть на поверхность кристалла падает плоскополяризованный луч света (рис. 2.12):

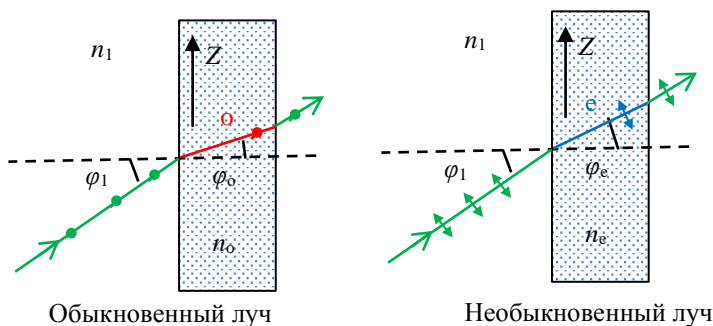


Рис. 2.12. Преломление плоскополяризованных лучей в анизотропном кристалле

- Если плоскость поляризации луча перпендикулярна плоскости главного сечения кристалла, в кристалле образуется обыкновенный луч, для которого показатель преломления n_o

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_o \sin \varphi_o,$$

где φ_1 – угол падения; φ_o – угол преломления обыкновенного луча;

- Если плоскость поляризации луча параллельна плоскости главного сечения кристалла, в кристалле образуется необыкновенный луч, для которого показатель преломления n_e

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_e \sin \varphi_e,$$

где φ_1 – угол падения; φ_e – угол преломления необыкновенного луча.

Если на поверхность кристалла падает волна с круговой поляризацией, то её следует рассматривать как суперпозицию двух волн с взаимно ортогональными плоскостями поляризации (обыкновенной и необыкновенной). В результате преломления возникают два расходящихся луча, поскольку $n_o > n_e$ (рис. 2.13).

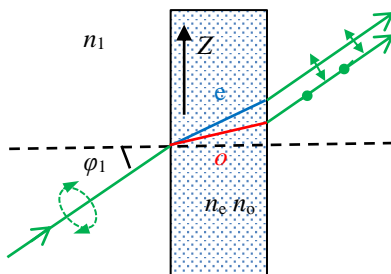


Рис. 2.13. Преломление луча с круговой поляризацией в анизотропном кристалле

2.4.2. Поворот плоскости поляризации плоскополяризованной волны при прохождении через полуволновую фазовую пластину

Полуволновая фазовая пластинка вырезается из двулучепреломляющего кристалла: ниобата лития, кварца, фторида

магния или сапфира, так, чтобы оптическая ось кристалла была параллельна её граням.

Рассмотрим прохождение через пластинку плоскополяризованного света (рис. 2.14).

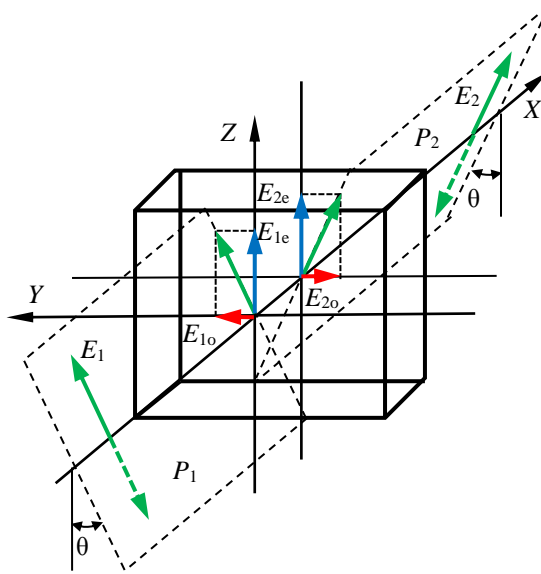


Рис. 2.14. Поворот плоскости поляризации света при прохождении через полуволновую пластинку

Пусть луч света падает нормально к поверхности пластинки. Плоскость поляризации света составляет с оптической осью кристалла Z угол θ .

Разложим подающую волну E_1 на две составляющие: обыкновенную E_{1o} с плоскостью поляризации, перпендикулярной оптической оси Z , и необыкновенную E_{1e} , поляризованную вдоль оптической оси.

Через пластинку в одном направлении X распространяются две волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях. Скорость распространения обыкновенной волны $v_o = c/n_o$, необыкновенной – $v_e = c/n_e$. В кристалле ниобата лития $n_o > n_e$ и $v_o < v_e$. Если толщина пластинки равна d , то оптиче-

ская разность хода этих волн после выхода из пластинки $\Delta = (n_o - n_e)d$, а разность их фаз

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)d.$$

Толщина полуволновой пластинки выбирается такой, чтобы разность хода обыкновенной и необыкновенной волн была $\Delta = \lambda/2$, а разность их фаз $\delta = \pi$.

На рис. 2.14 показано изменение фазы обыкновенной волны E_{2o} на угол π . Выходящая волна E_2 останется линейно-поляризованной, но её плоскость поляризации P_2 повернется на угол 2θ по отношению к плоскости поляризации P_1 падающей волны.

Полуволновые пластинки используют в оптических приборах для поворота плоскости поляризации излучения на заданный угол. Например, если угол между оптической осью пластинки и плоскостью поляризации падающего луча составлял 45° , то плоскость поляризации луча при прохождении пластинки повернется на угол 90° . Если повернуть пластинку так, что угол между плоскостью поляризации падающего луча и оптической осью пластинки составляет $12,5^\circ$, или $\pi/8$, то при прохождении пластинки плоскость поляризации луча повернется на 45° , или $\pi/4$.

2.5. Оптические изоляторы

2.5.1. Поляризационно-зависимые узкополосные неперестраиваемые волоконные оптические изоляторы

Устройство, которое пропускает оптическое излучение в одном направлении и не пропускает его в обратном, носит название *оптический изолятор*. Изоляторы используются для защиты источников излучения от обратных отражений и внешних сигналов.

Классификация волоконных оптических изоляторов (fiber-optic isolator) представлена на рис. 2.15. Они конструктивно делятся на два класса: поляризационно-зависимые (polarization sensitive) и поляризационно-независимые (polarization insensitive). Изоляторы могут быть узкополосными и широкополосными. В свою очередь, узкополосные бывают неперестраиваемые и перестраиваемые по длине волны излучения. В оптическом диапазоне к узкополосным изоляторам относят устройства с шириной полосы пропускания на уровне половинной мощности до 10 нм, а к широкополосным – с большей полосой пропускания.

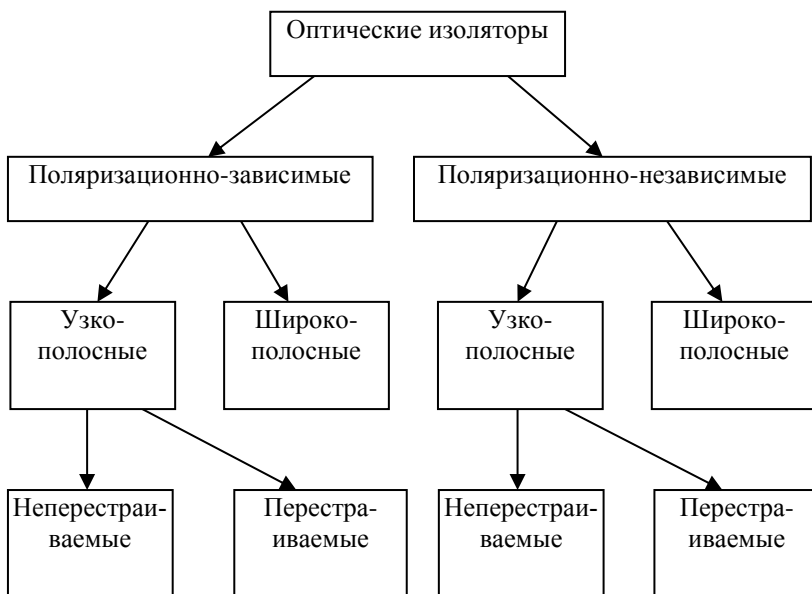


Рис. 2.15. Классификация оптических изоляторов

Конструкция и принцип действия поляризационно-зависимого узкополосного неперестраиваемого оптического изолятора показаны на рис. 2.16. Оптический изолятор состоит из двух поляризаторов и ячейки Фарадея. Ввод и вывод излучения происходит через оптические волокна и коллиматоры (для упрощения рисунка не показаны).

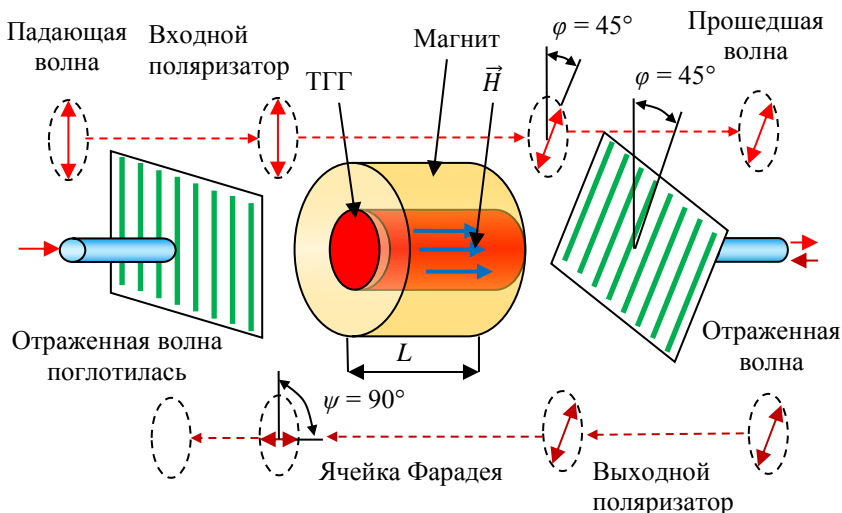


Рис. 2.16. Конструкция поляризационно-зависимого узкополосного неперестраиваемого оптического изолятора

Поляризатор (поляроид) представляет собой тонкую полимерную пленку, чаще всего поливинилена с молекулами, вытянутыми вдоль одного направления. Луч света, поляризованный вдоль его оптической оси, проходит без ослабления, поляризованный перпендикулярно – практически полностью поглощается. Ячейка Фарадея представляет собой цилиндр, вырезанный из кристалла тербий-галлиевого граната $Tb_3Ga_5O_{12}$ (ТГГ), который имеет высокие значения постоянной Верде в инфракрасном диапазоне. Для создания однородного продольного магнитного поля используется неодимовый магнит $Nd_2Fe_{14}B$ (неодим–железо–бор). В настоящее время это наиболее сильные постоян-

ные магниты, создающие высокие значения магнитной индукции. Сочетание этих двух материалов позволяет создавать компактные ячейки Фарадея волоконно-оптических изоляторов.

Падающая волна с вертикальной плоскостью поляризации (изображена в верхней части рис. 2.16) проходит входной поляризатор и поступает в ячейку Фарадея.

При проходе через ячейку Фарадея плоскость поляризации излучения поворачивается на угол

$$\varphi = VBL, \quad (2.1)$$

где V – постоянная Верде (характеристика гиротропной среды), град/Тл·м²; B – индукция магнитного поля в ТГГ; L – длина ячейки Фарадея (цилиндра ТГГ).

Постоянная Верде зависит от вида гиротропной среды, длины волны излучения, величины магнитного поля и температуры.

Зависимость $\varphi = \varphi(B_{\text{внешн}})$ представлена на рис. 2.17. ТГГ является магнитожёстким материалом с большой площадью под кривой гистерезиса. При отсутствии внешнего магнитного поля ($B_{\text{внешн}} = 0$) внутренняя намагниченность среды сдвигает угол поляризации на величину φ_0 . Чем больше остаточная намагниченность, тем больше угол φ_0 . Использование ТГГ позволяет уменьшить длину ячейки Фарадея для поворота плоскости поляризации оптического излучения инфракрасного диапазона, по сравнению с другими гиротропными средами, такими как иттрий-железный гранат ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), имеющими меньшую остаточную намагниченность.

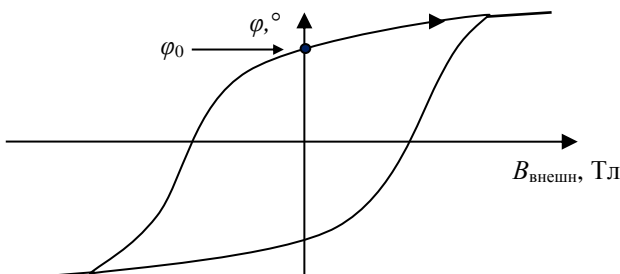


Рис. 2.17. Вращение плоскости поляризации на угол φ_0 за счёт внутренней намагниченности гиротропной среды M в отсутствие внешнего магнитного поля $B_{\text{внешн}}$

В неперестраиваемых узкополосных поляризационно-зависимых оптических изоляторах параметры ячейки Фарадея подбирают так, что на рабочей длине волны угол поворота плоскости поляризации излучения φ на ее выходе составляет 45° .

На задней поверхности ячейки Фарадея приклеен второй поляризатор. Его направление поляризации повернуто на угол $\varphi = 45^\circ$ относительно первого поляризатора, как показано на рис. 2.16. Пройшедшая волна с минимальными ослаблениями (рис. 2.18, пункты «Вносимые потери (типичное значение и максимальное значение, дБ)») поступает в оптическое волокно, в котором снова трансформируется в плоскополяризованную гибридную TE_{11} -волну.

Отраженная волна (изображена внизу рис. 2.16) проходит через выходной поляризатор и ячейку Фарадея, в которой вторично поворачивается на угол 45° . Суммарный угол поворота $\psi = 90^\circ$, и отражённая волна поглощается входным поляризатором. Таким образом, достигается высокая степень изоляции (см. рис. 2.18, пункт «Максимальная изоляция, дБ»). Её типовые значения составляют 40–50 и до 60 дБ в самых совершенных конструкциях. Следует обратить внимание на то, что в характеристиках изоляторов знак минус перед величиной затухания опускается.

Внешний вид и основные технические характеристики оптического изолятора приведены на рис. 2.18.



Рис. 2.18. Технические характеристики оптического изолятора

2.5.2. Поляризационно-зависимые узкополосные перестраиваемые оптические изоляторы

В поляризационно-зависимом узкополосном оптическом изоляторе при изменении длины волны излучения изменяется постоянная Верде. Это приводит к изменению угла поворота плоскости поляризации до $45^\circ + \Delta\varphi$ и увеличению поляризационных потерь. Для их компенсации можно дополнительно (к уже имеющемуся сдвигу на 45°) повернуть поляризатор на угол $\Delta\varphi$ и установить его в положение максимального пропускания. При этом поляризационные потери уменьшатся и интенсивность прошедшего излучения восстановится до прежних значений. Однако плоскость поляризации отражённой волны при прохождении через ячейку Фарадея еще раз повернется на угол $45^\circ + \Delta\varphi$ и войдет во входной поляризатор под углом $90^\circ + 2\Delta\varphi$, при этом отражённая волна поглотится не полностью, а частично вернется во входное оптическое волокно. В результате изоляция уменьшится и устройство будет хуже выполнять свои функции.

Из формулы (2.1) видно, что возможна перестройка ячейки Фарадея по длине волны путём изменения намагниченности гиротропной среды.

Можно вместо одного магнита использовать два и раздвигать их вдоль оси ТГГ. При этом изменится его «эффективная» длина и угол поворота $\varphi = 45^\circ$ останется прежним при изменении длины волны оптического излучения.

Можно вместо постоянного магнита использовать электромагнит. Такая конструкция имеет большие габариты и требует использования внешнего регулируемого источника тока для питания катушки электромагнита. Указанные способы используются крайне редко, обычно для специальных исследовательских целей.

2.5.3. Поляризационно-независимые оптические изоляторы

Конструкция поляризационно-независимого широкополосного оптического изолятора представлена на рис. 2.19. Внутри металлического корпуса расположены два волоконных коллиматора (на входе и на выходе), два клинообразных (для уменьшения обратного отражения) двулучепреломляющих кристалла ниобата лития LiNbO_3 , ячейка Фарадея, образованная цилиндрическим неодимовым магнитом $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и кристаллом тербий-галлиевого граната $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. Ввод и вывод оптического излучения происходит через оптическое волокно.

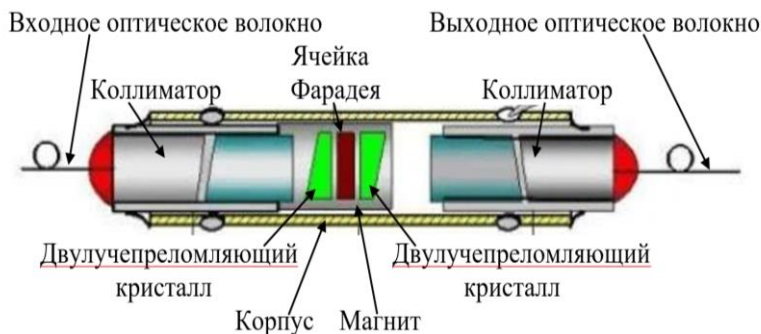


Рис. 2.19. Конструкция поляризационно-независимого широкополосного оптического изолятора

Коллиматор (fiber collimator) – оптическое устройство для получения параллельных пучков лучей света, содержит одну или несколько линз. На срезе оптоволокна из его сердцевины выходит излучение с волновым фронтом, близким к сферическому, как от источника света, размеры которого сравнимы с длиной волны. Задача коллиматора – сделать этот поток параллельным с плоским волновым фронтом.

Схема прохождения оптического излучения в прямом направлении показана на рис. 2.20, а.

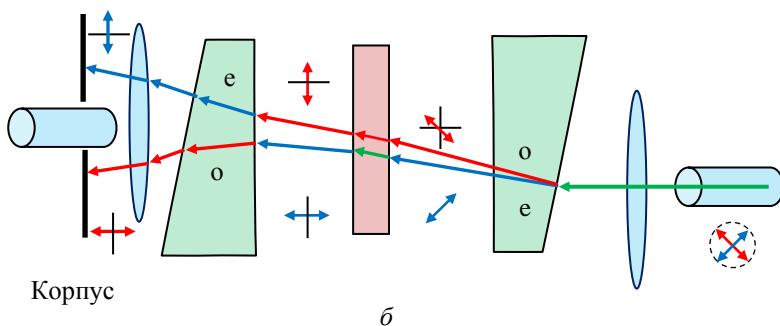
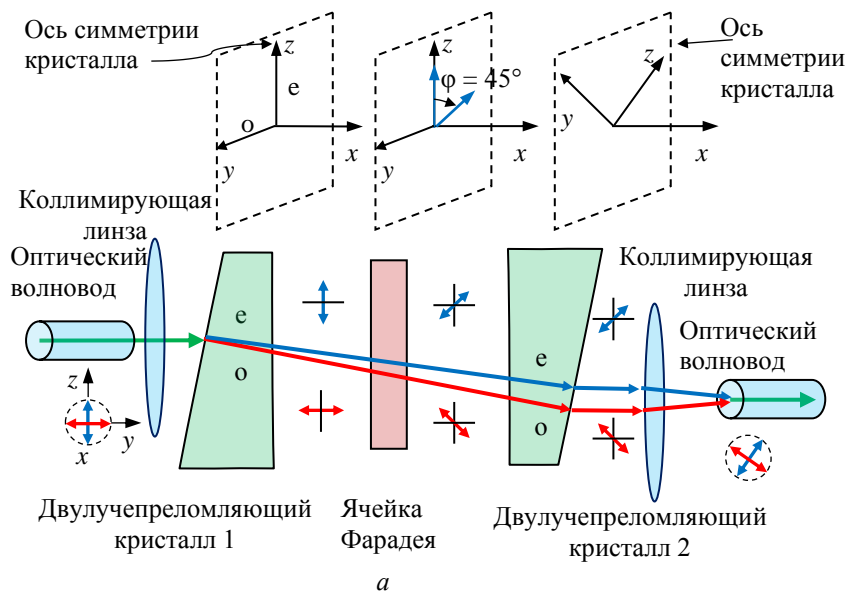


Рис. 2.20. Схема распространения волны o – обыкновенной и e – необыкновенной в оптическом изоляторе в направлении: a – прямом; $б$ – обратном

Излучение с круговой поляризацией из волоконно-оптического волновода преобразуется коллиматором в параллельный поток лучей и направляется на скошенную поверхность двулучепреломляющего кристалла 1. Его оптическая ось Z (ось симметрии кристаллической решётки третьего порядка) на ри-

сунке направлена вертикально. Проходя через кристалл, падающий луч разделяется на два луча: вертикально поляризованный «необыкновенный» (е) и горизонтально поляризованный «обыкновенный» (о), поскольку показатель преломления кристалла для обыкновенного луча n_o больше, чем для необыкновенного n_e . Пройдя через ячейку Фарадея, плоскости поляризации лучей поворачиваются на угол 45° . Ориентация оптической оси второго двулучепреломляющего кристалла 2 изменена на такой же угол в 45° относительно первого. После преломления получается два параллельных плоскополяризованных луча, которые собираются вторым коллиматором и вводятся в сердцевину выходного оптоволокну. Распространяющееся в нём излучение восстанавливает круговую поляризацию.

Обратный ход отражённых лучей изображен на рис. 2.20, б. Излучение с круговой поляризацией из волоконно-оптического волновода через выходной коллиматор поступает на скошенную поверхность двулучепреломляющего кристалла 2. Его оптическая ось повернута на 45° относительно кристалла 1.

В ячейке Фарадея плоскости поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей дополнительно поворачиваются на угол 45° . При этом верхний по рисунку луч становится вертикально, а нижний – горизонтально поляризованным. Во входном двулучепреломляющем кристалле 1 горизонтально поляризованный о-луч отклоняется вниз, а вертикально поляризованный е-луч – вверх. Входная коллимирующая линза дополнительно разводит лучи и направляет их на зачернённый корпус прибора, где они и поглощаются.

2.5.4. Циркуляторы

Термин «циркулятор» образован от латинского слова *circularis* – «ходить по кругу». Он представляет собой недиссипативный, невзаимный многополюсник, в котором передача мощности происходит в одном направлении с входа 1 на вход 2, с входа 2 на вход 3 и т.д. В зависимости от числа входов (портов) различают трёхпортовые (Y), четырёхпортовые (X) и многопортовые циркуляторы. Существуют циркуляторы радиочастотных и оптических диапазонов, поляризационно-зависимые и независимые, узкополосные и широкополосные, рассчитанные на работу с различными уровнями мощности излучения. В настоящей работе будут описаны и исследованы оптические поляризационно-независимые широкополосные Y-циркуляторы малой мощности.

По конструкции и принципу действия Y-циркулятор близок к поляризационно-независимому оптическому изолятору (см. рис. 2.19 и рис. 2.20), дополненному полуволновой пластинкой, светоделительной и отражающей призмами и дополнительным портом с коллиматором. Графическое изображение и внешний вид представлены на рис. 2.21. Свет, входящий в порт TX (транзитный), проходит (по стрелке) в порт COM (общий). Свет, входящий в порт COM, проходит в порт RX (обратный). Конструкция оптических циркуляторов несимметричная, и в них свет на порт RX подавать нельзя.

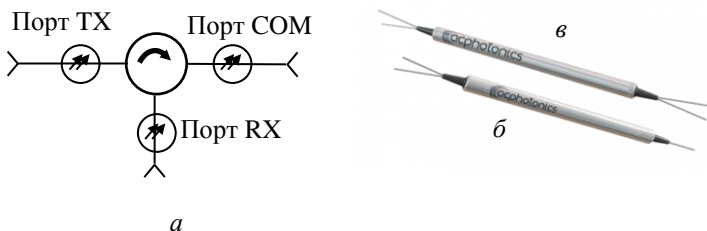


Рис. 2.21. Оптический циркулятор: *а* – графическое обозначение; внешний вид: *б* – трёхпортового; *в* – четырёхпортового

Прохождение света через оптический Y-циркулятор в прямом и обратном направлениях показано на рис. 2.22, *а* и *б* соответственно. Для упрощения рисунка скосы граней двулучепреломляющих кристаллов не показаны, а ход оптических лучей спроецирован на плоскость.

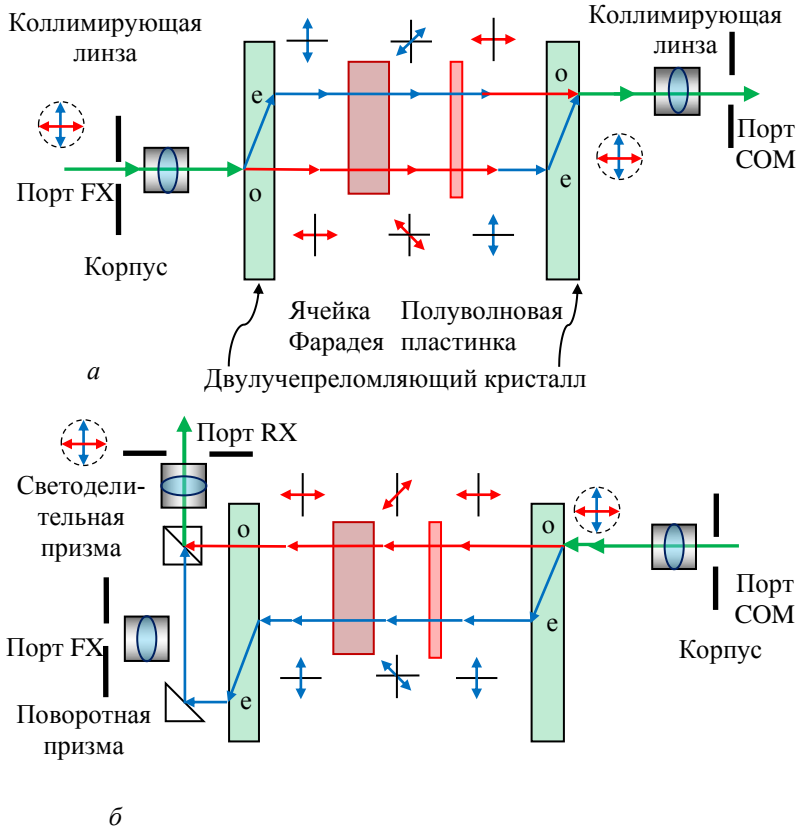


Рис. 2.22. Схема распространения волн *о* – обыкновенной и *е* – необыкновенной в оптическом циркуляторе в направлении: *а* – прямом; *б* – обратном

Прямое прохождение представлено на рис. 2.22, *а*. Как и в оптическом изоляторе, свет с круговой поляризацией из воло-

конно-оптического волновода через входную коллимирующую линзу поступает на скошенную поверхность двулучепреломляющего кристалла 1 (его оптическая ось z направлена вверх) и, проходя через него, разделяется на два луча: вертикально поляризованный необыкновенный (е) и горизонтально поляризованный обыкновенный (о). Пройдя через ячейку Фарадея, их плоскости поляризации поворачиваются на угол 45° . Далее на пути света установлена полуволновая пластинка, которой в оптическом изоляторе не было.

Полуволновая пластинка поворачивает плоскость поляризации верхнего луча на угол $+45^\circ$, и он становится горизонтально поляризованным. Аналогично нижний луч становится вертикально поляризованным. В правом по рисунку двулучепреломляющем кристалле о- и е-лучи объединяются и через коллимирующую линзу поступают на порт СОМ.

Обратный ход лучей показан на рис. 2.22, б. С порта СОМ через коллиматор свет попадает на двулучепреломляющий кристалл, в котором делится на о- и е-лучи. Они проходят полуволновую пластинку справа налево и поворачиваются на угол -45° .

Ячейка Фарадея поворачивает плоскость поляризации на $+45^\circ$ при любом направлении проходящего через неё луча, таким образом, плоскость поляризации лучей восстанавливается. Верхний о-луч проходит через левый по рисунку двулучепреломляющий кристалл, поворачивается светоделительной призмой вверх и через коллимирующую линзу поступает на порт RX. Нижний е-луч дополнительно отклоняется в двулучепреломляющем кристалле вниз, поворачивается поворотной призмой вверх и через коллиматор также направляется в порт RX. Восстановивший круговую поляризацию свет поступает в волоконно-оптический волновод (на рисунке не показан), соединённый с портом RX.

На порт FX за счёт паразитных отражений поступает ослабленный на 40–50 дБ сигнал. В лучших образцах ослабление может достигать 60 дБ. Таким образом, Y-циркулятор обеспечивает эффективную развязку сигналов, поданных на порты FX и СОМ. Следует отметить, что трёхдецибелный направленный ответвитель также может быть использован для развязки,

но уровень ослабления паразитных сигналов у него не превышает 30 дБ.

2.6. Порядок выполнения работы

Цель работы: исследование основных характеристик оптического изолятора и циркулятора на основе эффекта Фарадея.

Оборудование и принадлежности:

Наименование	Марка	Кол-во
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	EXS210108-01 1550 нм	1
Модуль полупроводникового диода накачки	FOL1437R50-317 1480 нм	1
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	IPSDD1602 1610 нм	1
Оптический изолятор	ISO-D-P-1550 1550 нм	1
Оптический Y-циркулятор	GT-CIRC-55 1550 нм	1
Измеритель оптической мощности	EXFO FTB-1750х или аналогичный	1
Контроллер лазера	Maiman Electronics MBL 1500 A	1
Ноутбук с ПО для Maiman MBL 1500 A	—	1

2.6.1. Инструктаж

Перед началом работы ознакомиться с краткими инструкциями по работе с приборами:

1. Контроллер лазера Maiman Electronics MBL 1500 A в прил. 1.

2. Измеритель оптической мощности EXFO FTB-1750x в прил. 2.
3. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 в прил. 6.
4. Модуль полупроводникового диода накачки FOL1437R50-317 1480 нм в прил. 5.
5. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 1610 нм в прил. 7.
6. Оптический изолятор в прил. 9.
7. Оптический Y-циркулятор в прил. 10.

2.6.2. Исследование оптического изолятора

1. Настройка широкополосного источника излучения:

1.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (1550 нм) в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1).

1.2. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

1.3. Установить значение силы тока 200,0 мА. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 2.23.

2. Настройка измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750x:



Рис. 2.23. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

2.1. Включить измеритель оптической мощности EXFO FTB-1750х согласно инструкции (см. прил. 2).

2.2. Рабочая длина волны 1550,00 нм при включении устанавливается автоматически, как отмечено в п. 6 прил. 2: при касании клавиши Cancel на рис. П2.6.

3. *Проведение измерений основных характеристик оптического изолятора на длине волны 1550 нм*

Внешний вид корпусированного оптического изолятора с SC-адаптерами показан на рис. 2.24. Подписи на корпусе соответствуют подписям на рис. 2.25: 1 – порт 1; 2 – порт 2, стрелкой обозначено направление распространения излучения.



Рис. 2.24. Фотография корпусированного оптического изолятора

Структурная схема установки для исследования основных характеристик оптического изолятора представлена на рис. 2.25.

3.1. Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC (рис. 2.26, з) подключить к адаптеру FC (рис. 2.26, в) входного порта измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750х.

3.2. Измерить выходную оптическую мощность суперлюминесцентного диода P_1 . Результаты записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Результаты измерений основных характеристик
оптического изолятора оптической мощности**

λ , нм	P_1 , мВт	P_2 , мВт	P_3 , мВт	Примечание
1550				
1480				
1610				

3.3. Собрать установку для исследования основных характеристик оптического изолятора, как показано на рис. 2.25.

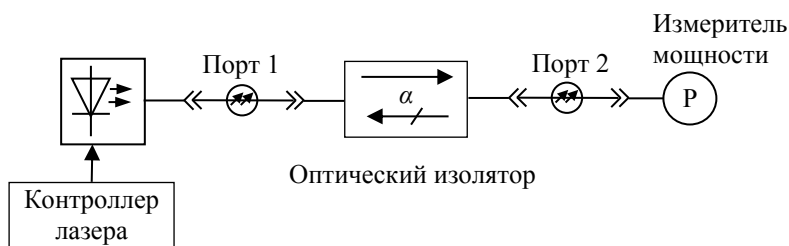


Рис. 2.25. Структурная схема установки для исследования основных характеристик оптического изолятора

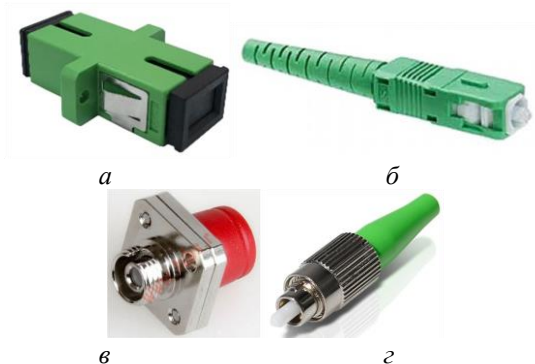


Рис. 2.26. Внешний вид: а – адаптера SC; б – коннектора SC; в – адаптера FC; г – коннектора FC

Для этого:

- Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC (см. рис. 2.26, *з*) подключить к адаптеру SC (см. рис. 2.26, *а*) входного порта 1 оптического изолятора с помощью комбинированного патч-корда FC–SC.

- Оптический кабель выходного порта 2 оптического изолятора с коннектором FC (см. рис. 2.26, *з*) подключить к адаптеру FC (см. рис. 2.26, *в*) входного порта измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750х.

3.4. Измерить оптическую мощность P_2 выходного порта 2. Результаты записать в табл. 2.1.

3.5. Выключить источник излучения. В схеме рис. 2.25 суперлюминесцентный диод подключить к выходу изолятора «Порт 2», а измеритель мощности – к входу «Порт 1».

3.6. Включить источник излучения. Измерить оптическую мощность P_3 порта 1. Результаты записать в табл. 2.1.

4. Проведение измерений на длине волны 1480 нм

Измерения провести аналогично п. 3.

4.1. Установить модуль полупроводникового диода накачки FOL1437R50-317 на длину волны 1480 нм. Силу тока установить равной 80 мА.

4.2. Установить рабочую длину волны измерителя оптической мощности EXFO FTB 1480,00 нм.

5. Проведение измерений на длине волны 1610 нм

Измерения провести аналогично п. 3.

5.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 на длину волны 1610 нм. Силу тока установить равной 200 мА.

5.2. Установить рабочую длину волны измерителя оптической мощности EXFO FTB 1610,00 нм.

6. Обработка результатов измерений оптического изолятора

Для трёх длин волн 1550, 1480 и 1610 нм рассчитать

1. Прямые потери (вносимое затухание):

$$A_{\text{пр}} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.2)$$

где P_1 – мощность на входе (порт 1); P_2 – мощность на выходе (порт 2).

2. Обратные потери (развязка входа и выхода):

$$A_{\text{обр}} = 10 \log_{10} \frac{P_3}{P_1}, \quad (2.3)$$

здесь P_3 – оптическая мощность на входе (порт 1), при подаче оптического излучения на выход (порт 2).

Результаты занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Основные характеристики оптического изолятора

λ , нм	$A_{\text{пр}}$, дБ	$A_{\text{обр}}$, дБ	Примечание
1550			
1480			
1610			

Сравнить полученные результаты с паспортными характеристиками оптического изолятора. Сделать вывод о рабочем диапазоне длин волн.

2.6.3. Исследование оптического Y-циркулятора

Внешний вид корпусированного оптического Y-циркулятора с SC-адаптерами показан на рис. 2.27. Подписи на корпусе соответствуют подписям на рис. 2.26: 1 – порт TX; 2 – порт COM и 3 – порт RX.

Структурная схема установки для исследования основных характеристик оптического изолятора представлена на рис. 2.28.



Рис. 2.27. Фотография корпусированного циркулятора с SC-адаптерами

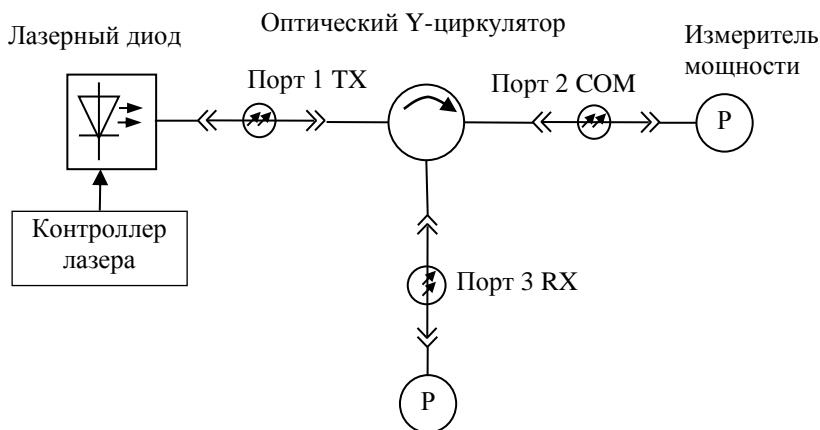


Рис. 2.28. Структурная схема установки для исследования основных характеристик оптического Y-циркулятора

1. Настройка широкополосного источника излучения

Повторить настройку суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (1550 нм) согласно п. 1 подраздела. 2.6.2.

2. Настройка измерителя оптической мощности EXFO FTB-1750x

Повторить настройку измерителя оптической мощности, согласно п. 2 подразд. 2.6.2.

3. Проведение измерений основных характеристик оптического Y-циркулятора на длине волны 1550 нм:

3.1. Подключить суперлюминесцентный диод к входу измерителя мощности. Измерить выходную оптическую мощность P_1 . Результаты записать в табл. 2.3.

3.2. Выключить суперлюминесцентный диод. Собрать установку для измерения основных характеристик оптического Y-циркулятора согласно рис. 2.28. Для этого подключить суперлюминесцентный диод к входу 1 «Порт FX», а вход 2 «Порт СОМ» подключить к измерителю мощности EXFO LTB-1.

3.3. Включить суперлюминесцентный диод. Измерить значение проходящей оптической мощности P_{12} , результаты занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты измерений основных характеристик оптического Y-циркулятора

λ , нм	P_1 , мВт	P_{12} , мВт	P_{13} , мВт	P_{23} , мВт	P_{21} , мВт	P_{31} , мВт	P_{32} , мВт
1550							
1480							
1610							

3.4. Выключить суперлюминесцентный диод. Подключить измеритель мощности EXFO LTB-1 к входу 3 «Порт RX». Включить суперлюминесцентный диод. Измерить значение проходящей оптической мощности P_{13} , результаты занести в табл. 2.3.

3.5. Выключить суперлюминесцентный диод. Подключить суперлюминесцентный диод к входу 2 «Порт СОМ», а вход 3 «Порт RX» подключить к измерителю мощности EXFO LTB-1. Включить суперлюминесцентный диод. Измерить значение про-

ходящей оптической мощности P_{23} , результаты занести в табл. 2.3.

3.6. Выключить суперлюминесцентный диод. Подключить измеритель мощности EXFO LTB-1 к входу 1 «Порт FX». Включить суперлюминесцентный диод. Измерить значение проходящей оптической мощности P_{21} , результаты занести в табл. 2.3.

3.7. Выключить суперлюминесцентный диод. Подключить суперлюминесцентный диод к входу 3 «Порт RX», а вход 1 «Порт FX» подключить к измерителю мощности EXFO LTB-1. Включить суперлюминесцентный диод. Измерить значение проходящей оптической мощности P_{31} , результаты занести в табл. 2.3.

3.8. Подключить измеритель мощности EXFO LTB-1 к входу 2. Измерить значение проходящей оптической мощности P_{32} , результаты занести в табл. 2.3.

4. Проведение измерений на длине волны 1480 нм:

4.1. Установить модуль диода накачки FOL1437R50-317 на длину волны 1480 нм. Силу тока установить равной 80 мА.

4.2. Повторить настройку источника излучения по п. 1.

4.3. Установить рабочую длину волны измерителя оптической мощности EXFO FTB 1480,00 нм.

4.4. Повторить измерение значений оптической мощности на портах FX, COM, RX. Результаты занести в табл. 2.3.

5. Проведение измерений на длине волны 1610 нм:

Измерения провести аналогично п. 4.

5.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 на длину волны 1610 нм.

5.2. Установить рабочую длину волны 1610,00 нм измерителя оптической мощности EXFO FTB.

6. Обработка результатов измерений основных характеристик оптического Y-циркулятора

Для трех длин волн 1550, 1480 и 1610 нм рассчитать:

1. Прямые потери (вносимое затухание):

$$A_{\text{пр12}} = 10 \log_{10} \frac{P_{12}}{P_1}, \quad (2.4)$$

где P_1 – мощность на входе 1 (порт FX); P_{12} – мощность на входе 2 (порт COM).

2. Обратные потери (развязка входа и выхода):

$$A_{обр21} = 10 \log_{10} \frac{P_{21}}{P_1}, \quad (2.5)$$

здесь P_{21} – оптическая мощность на входе 1 (порт FX), при подаче оптического излучения на вход 2 (порт COM).

3. Прямые потери (вносимое затухание):

$$A_{пр23} = 10 \log_{10} \frac{P_{23}}{P_1}, \quad (2.6)$$

где P_1 – мощность на входе 2 (порт COM); P_{23} – мощность на входе 3 (порт RX).

4. Обратные потери (развязка входа и выхода):

$$A_{обр32} = 10 \log_{10} \frac{P_{32}}{P_1}, \quad (2.7)$$

здесь P_{32} – оптическая мощность на входе 2 (порт COM), при подаче оптического излучения на вход 3 (порт RX).

5. Прямые потери (вносимое затухание):

$$A_{пр13} = 10 \log_{10} \frac{P_{13}}{P_1}, \quad (2.8)$$

где P_1 – мощность на входе 1 (порт FX); P_{13} – мощность на входе 3 (порт RX).

6. Обратные потери (развязка входа и выхода):

$$A_{обр31} = 10 \log_{10} \frac{P_{31}}{P_1}, \quad (2.9)$$

здесь P_{31} – оптическая мощность на входе 1 (порт FX), при подаче оптического излучения на вход 3 (порт RX).

Результаты занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Основные характеристики оптического Y-циркулятора

λ , нм	$A_{\text{пр}12}$, дБ	$A_{\text{обр}21}$, дБ	$A_{\text{пр}23}$, дБ	$A_{\text{обр}32}$, дБ	$A_{\text{пр}13}$, дБ	$A_{\text{обр}31}$, дБ
1550						
1480						
1610						

Сравнить полученные результаты с паспортными характеристиками оптического Y-циркулятора. Сделать вывод о рабочем диапазоне длин волн.

2.7. Контрольные вопросы

1. Гиротропные среды.
2. Ядерный магнитный резонанс в ферритах с малыми потерями.
3. Эффект Фарадея. Поворот плоскости поляризации плоскополяризованной волны при прохождении через гиротропную среду.
4. Поворот плоскости поляризации плоскополяризованной волны при прохождении через полуволновую пластинку.
5. Поляризационно-зависимые узкополосные неперестраиваемые оптические изоляторы. Конструкция и принцип действия. Основные характеристики.
6. Поляризационно-зависимые узкополосные перестраиваемые оптические изоляторы. Конструкция и принцип действия. Основные характеристики.
7. Поляризационно-независимые оптические изоляторы. Конструкция и принцип действия. Основные характеристики.
8. Оптические Y-циркуляторы. Конструкция и принцип действия. Основные характеристики.
9. Объяснить полученные результаты.

Список литературы

1. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб.: Лань, 2010. 267 с.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003. 848 с.
3. Ферриты и магнитодиэлектрики / под ред. Н. Д. Горбунова, Г. А. Матвеева. М.: Сов. радио, 1968. 175 с.
4. Эффект Фарадея на сверхвысоких частотах: метод. указ. / сост. А. В. Азанов, И. Л. Вольхин, В. М. Гусаров, Н. Н. Коротаев; Перм. гос. ун-т. Пермь, 1997. 23 с.
5. Юрчук Ю. Оптические изоляторы [Электронный ресурс] // Фотоника. 2016. № 5 (59) С. 34–41. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.59.5.34.41 URL: https://www.photonics.su/files/article_pdf/5/article_5649_488.pdf (дата обращения: 26.08.2023).

Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ

3.1. Распространение света в волоконно-оптических кабелях

Конструкции стандартных оптических волокон, одномодового и многомодового, приведены на рис. 3.1, *а* и *б* соответственно. Волокно состоит из сердцевины, оболочки и защитного покрытия. Материалом оболочки является кварцевое стекло, сердцевины – кварцевое стекло, легированное германием.

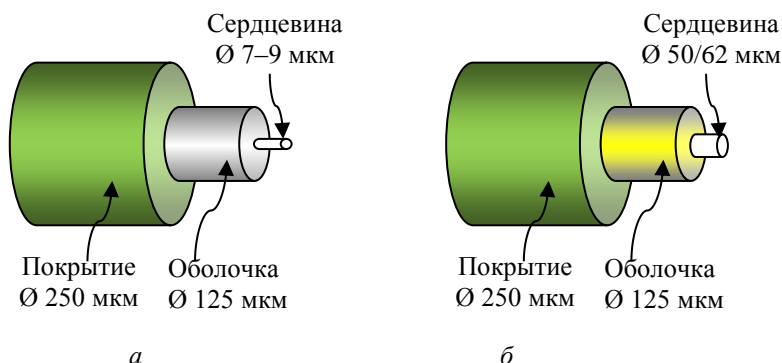


Рис. 3.1. Конструкция оптического волокна:
а – одномодового, *б* – многомодового

Распространение светового излучения в оптических волокнах рассматривается в двух приближениях: геометрической (лучевой) и волновой оптики. Приближение геометрической оптики основано на использовании явления полного внутреннего отражения. При падении оптического луча на границу раздела двух сред (сердцевины волокна и оптической оболочки волокна) с различными показателями преломления происходит его отражение и преломление, как показано на рис. 3.2, *а*.

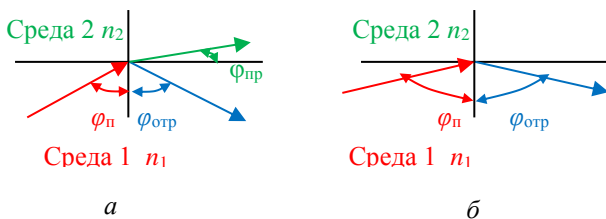


Рис. 3.2. Траектория движения светового луча при $n_1 > n_2$ и угле падения $\varphi_{\text{п}}$:

a – $\varphi_{\text{п}}$ меньше угла Брюстера; $б$ – $\varphi_{\text{п}}$ больше

Угол падения $\varphi_{\text{п}}$ всегда равен углу отражения $\varphi_{\text{отр}}$, а угол преломления $\varphi_{\text{п}}$ связан с углом падения соотношением Декарта – Снеллиуса

$$n_1 \sin \varphi_{\text{п}} = n_2 \sin \varphi_{\text{пр}}, \quad (3.1)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления 1-й и 2-й среды соответственно. На рис. 3.2, $б$ представлено явление полного внутреннего отражения при $n_1 < n_2$ и угле падения $\varphi_{\text{п}}$, большем или равном критическому углу $\varphi_{\text{Бр}}$ (углу Брюстера):

$$\tan \varphi_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.2)$$

В оптическом волокне показатель преломления сердцевины волокна $n_1 \approx 1,47$ больше показателя преломления оболочки $n_2 \approx 1,46$. В этом случае луч распространяется вдоль сердцевины оптического волокна, отражаясь от границы сердцевина–оболочка.

По структуре пучка излучения оптические волокна делятся на одномодовые и многомодовые. Основным типом волн (фундаментальной модой) в одномодовых оптических волокнах является поперечная электрическая волна TE_{11} .

Распределение интенсивности одномодового излучения имеет форму гауссовой кривой, представленной на рис. 3.3. Из рисунка видно, что диаметр светового пятна (модового поля) $D_{\text{п}}$ больше диаметра сердцевины $d_{\text{с}}$.

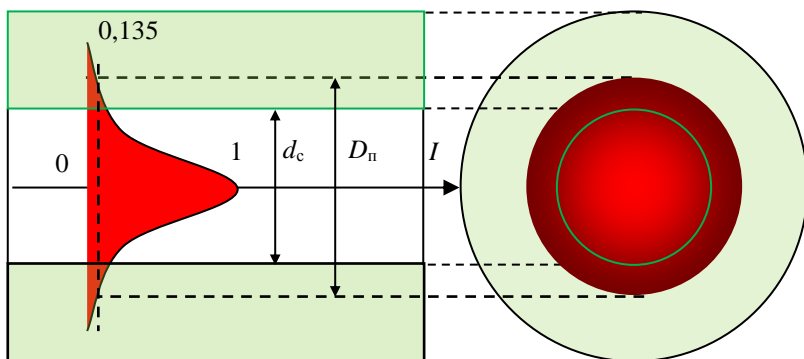


Рис. 3.3. Распределение интенсивности излучения в одномодовом оптическом волокне поперечной электрической волны TE_{11}

В многомодовом режиме распределение получается более сложным и в поперечном сечении имеет вид нескольких пятен или колец, как показано на рис. 3.4 и 3.5.

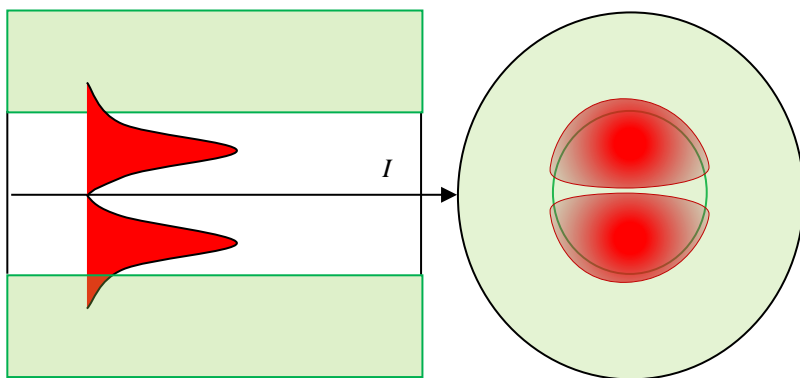


Рис. 3.4. Распределение интенсивности излучения моды высшего порядка в оптическом волокне TE_{12}

На рис. 3.6 представлены диапазоны модовых режимов распространения светового луча. Одномодовый режим распространения светового луча возможен в ограниченном диапазоне длин волн. В области коротких волн он существует до критической длины волны $\lambda_{отс}$ — длины волны отсечки. На

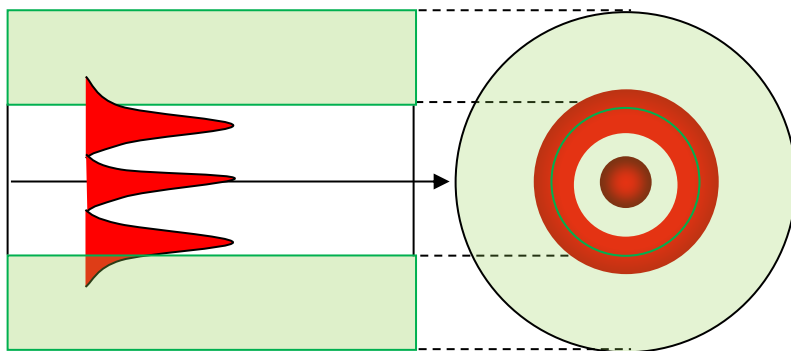


Рис. 3.5. Распределение интенсивности излучения моды высшего порядка в оптическом волокне TE_{21}

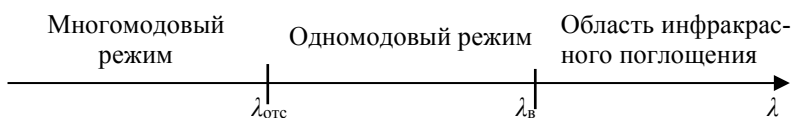


Рис. 3.6. Режимы распространения световых лучей в оптических волокнах

длинах волн меньших, чем длина волны отсечки $\lambda_{\text{отс}}$, возникает многомодовый режим распространения излучения.

В области длинных волн ограничения связаны:

1) с расширением модового пятна и уменьшением светового потока в сердцевине волокна;

2) с потерями энергии на инфракрасное поглощение, при котором энергия фотонов превращается в энергию тепловых колебаний атомов оптического волокна.

При $\lambda > 1,8$ мкм обычное кварцевое оптическое волокно становится практически непрозрачным.

Скорость распространения оптической волны вдоль сердцевины оптического волокна зависит от его эффективного показателя преломления:

$$n_{\text{эф}} = \frac{v}{c}, \quad (3.3)$$

где v – скорость распространения световой волны в волокне; c – скорость света в вакууме. В общем случае $n_{\text{эф}}$ отличается от по-

казателя преломления материала сердцевины n_c , поскольку часть энергии светового потока распространяется по оболочке.

3.2. Волоконные брэгговские решётки

Волоконная брэгговская решётка (ВБР) представляет собой участок оптического волокна (ОВ), в сердцевине которого создано периодическое изменение показателя преломления (ПП) в продольном направлении (рис. 3.7).

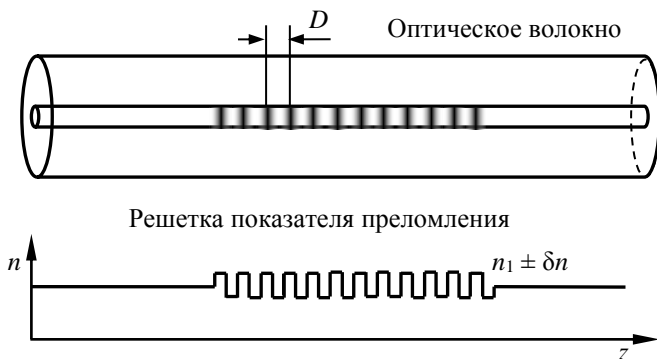


Рис. 3.7. Волоконная решётка Брэгга

Свет, распространяющийся в сердцевине ОВ, отражается от каждой границы изменения ПП (от каждого штриха решётки). Если длина волны удовлетворяет условию Брэгга, то волны, отражённые от штрихов решётки ПП, имеют одинаковую фазу, складываются и образуют результирующую отражённую волну, распространяются по волокну в обратном направлении (рис. 3.8).

Условие брэгговского отражения:

$$\lambda_{\text{Бр}} = 2n_{\text{эф}}\Lambda, \quad (3.4)$$

где $\lambda_{\text{Бр}}$ – длина волны брэгговского резонанса; $n_{\text{эф}}$ – эффективный ПП сердцевины волокна; Λ – период брэгговской решётки.

Если условия Брэгга не выполняются, то волны, отражённые от штрихов решётки, не синфазны и, складываясь, образуют рассеянный свет.

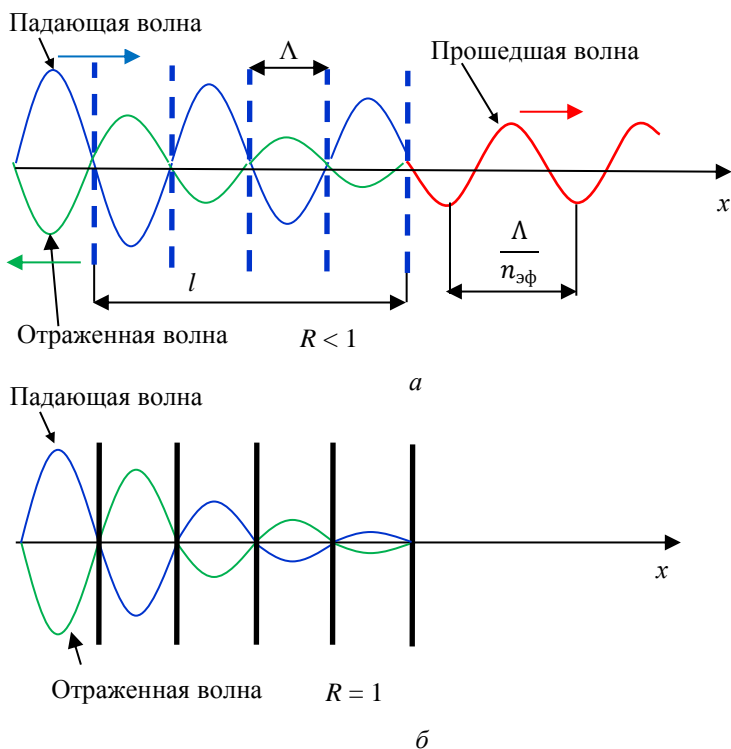


Рис. 3.8. Отражение электромагнитных волн от брэгговской решётки:
 а – слабоотражающая решётка, коэффициент отражения $R < 1$;
 б – сильноотражающая решётка, $R = 1$

Условие брэгговского отражения:

$$\lambda_{\text{бр}} = 2n_{\text{эф}}\Lambda, \quad (3.4)$$

где $\lambda_{\text{бр}}$ – длина волны брэгговского резонанса; $n_{\text{эф}}$ – эффективный ПП сердцевины волокна; Λ – период брэгговской решётки.

Если условия Брэгга не выполняются, то волны, отражённые от штрихов решетки, не синфазны и, складываясь, образуют рассеянный свет.

Спектры сигналов: входящего, прошедшего и отражённого, показаны на рис. 3.9.

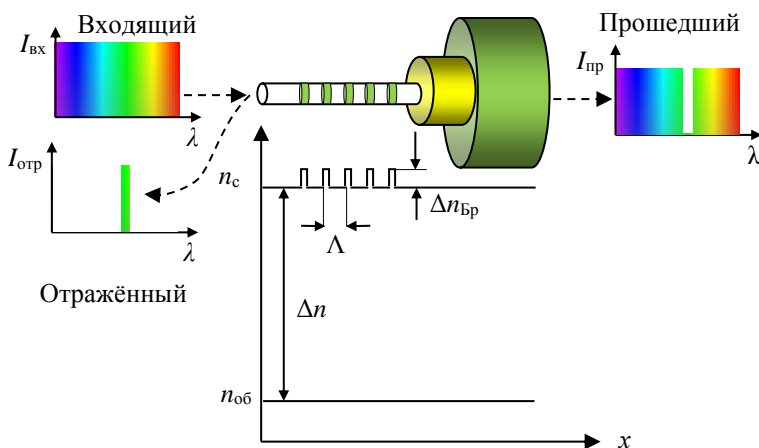


Рис. 3.9. Конструкция брэгговской решётки и спектры сигналов: входящего, прошедшего и отражённого

Предположим, что показатель преломления решётки вдоль оси x изменяется по закону

$$n(x) = n_c + \Delta n_{\text{Бр}} \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (3.5)$$

где n_c – средний показатель преломления; $\Delta n_{\text{Бр}}$ – амплитуда модуляции показателя преломления; Λ – период брэгговской решётки. Тогда спектр отражения брэгговской решётки $R(\lambda, l)$ – как функция от длины волны λ и длины решетки l :

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l). \quad (3.6)$$

Коэффициент связи падающей и отражённой мод

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n_{\text{Бр}} \eta(V)}{\lambda}, \quad (3.7)$$

где $\eta(V)$ – отношение площади гауссова пучка в сердцевине к его общей площади в сечении волокна.

Рассчитанный спектр отражения решётки как функция длины волны показан на рис. 3.10.

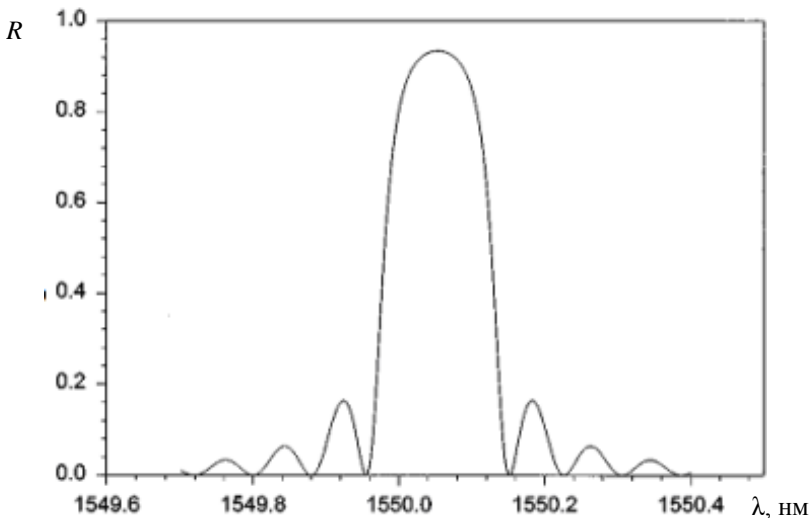


Рис. 3.10. Вид спектра отражения волоконной брэгговской решетки

Ширина спектра отражения на уровне половинной мощности

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{\text{Бр}}}{2n_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}. \quad (3.8)$$

Параметр α изменяется от 1 для сильноотражающих решёток ($R \sim 1$) до 0,5 для слабоотражающих решёток ($R \sim 0,1$).

Количество штрихов решетки рассчитывается по формуле

$$N = \frac{2ln_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{Бр}}}, \quad (3.9)$$

где l – длина брэгговской решётки.

Основными характеристиками волоконной брэгговской решётки являются:

1. Коэффициент отражения R , который увеличивается с увеличением глубины модуляции показателя преломления сердцевины оптического волокна $\Delta n_{\text{Бр}}$ и числа штрихов N .

2. Резонансная длина волны $\lambda_{\text{Бр}}$, которая, согласно выражению (3.4), зависит от эффективного показателя преломления сердцевины световода $n_{\text{эф}}$ и периода брэгговской решётки Λ .

3. Величина амплитуды модуляции показателя преломления сердцевины – $\Delta n_{\text{Бр}}$. Амплитуда модуляции лежит в пределах $\Delta n_{\text{Бр}} \sim 10^{-4} n_c$ – для сильноотражающих и $\Delta n_{\text{Бр}} \sim 10^{-5} n_c$ – для слабоотражающих решёток.

4. Ширина спектра отражения на уровне половинной мощности $\Delta \lambda$.

3.3. Метод записи брэгговской решётки в германо-силикатную сердцевину оптоволокна

Разработано и используется несколько методов создания периодического изменения показателя преломления кварцевого волокна, легированного германием. Все они основаны на изменении ПП под действием ультрафиолетового (УФ) излучения. На рис. 3.11 показана схема записи ВБР пошаговым методом. УФ-свет фокусируется на сердцевине волокна. Свет периодически включается, и освещённая точка перемещается вдоль волокна.

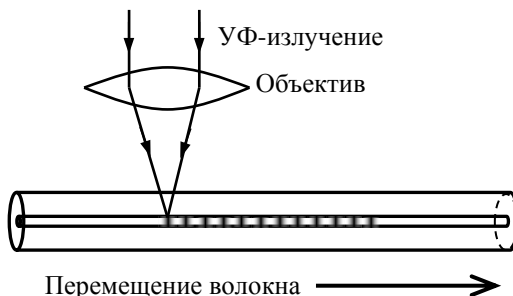


Рис. 3.11. Схема записи волоконной решетки Брэгга пошаговым методом

Поглощение германо-силикатных стекол имеет три максимума в УФ-диапазоне спектра, расположенных вблизи 185, 242 и 325 нм. В результате внутреннего фотоэффекта в стекле возникают положительно заряженные центры и свободные электроны. Свободные электроны диффундируют из области с большей освещённостью в область с меньшей освещённостью и захватываются ловушками электронов – ионами Ge^{+4} . В резуль-

тате часть свободных электронов не возвращается на исходные доноры.

В максимуме облучения образуется избыточный положительный заряд. Избыточный отрицательный заряд создает симметричные максимумы между положительными. В решётке зарядов возникает электрическое поле U , периодически меняющееся вдоль оси световода. В результате электрострикции в области максимального U будет сжатие сердцевины ОВ, тогда как в области $U = 0$, по законам упругости, будет растяжение. Таким образом, решётка зарядов создает упругую периодическую деформацию объёма сердцевины, модуляцию её плотности и показателя преломления (рис. 3.12).

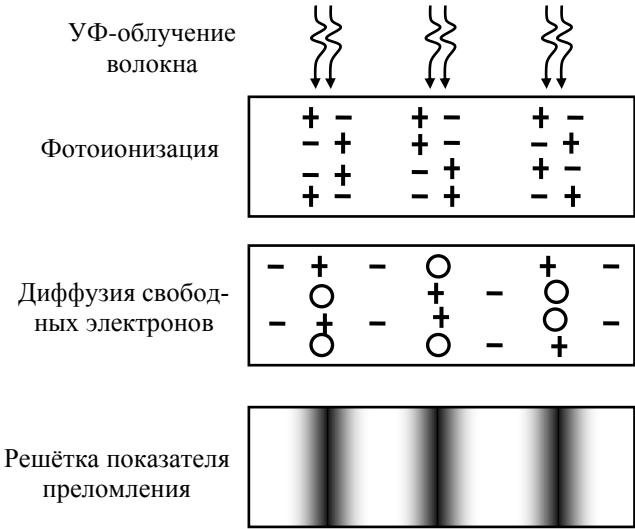


Рис. 3.12. Электрострикционная модель формирования волоконной решётки Брэгга

3.4. Сдвиг длины волны Брэгга при растяжении оптоволокна

Резонансная, или брэгговская длина волны волоконной брэгговской решётки (ВБР)

$$\lambda_{\text{БР}} = 2n_{\text{эф}}\Lambda$$

чувствительна к деформации и температуре. В настоящей лабораторной работе определяется зависимость сдвига резонансной длины волны Брэгга от величины растяжения, которая представляется в виде

$$\Delta\lambda_{\text{БР}} = 2\left(\Lambda\frac{\partial n_{\text{эф}}}{\partial l} + n\frac{\partial\Lambda}{\partial l}\right)\Delta l, \quad (3.10)$$

где Λ – период решетки; $n_{\text{эф}}$ – эффективный показатель преломления; l – длина ВБР; Δl – удлинение ВБР.

Физический смысл данного выражения заключается в изменении периода решётки и показателя преломления, вызванного упругооптическим эффектом. Этот эффект можно описать формулой

$$\Delta\lambda_{\text{БР}} = \lambda_{\text{БР}}(1 - p_e)\varepsilon, \quad (3.11)$$

где $\lambda_{\text{БР}}$ – резонансная длины волны Брэгга; p_e – эффективная упругооптическая постоянная. Относительная деформация $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$. Здесь l – длина ВБР; Δl – удлинение ВБР.

Эффективная упругооптическая постоянная кварцевого волокна определяется формулой

$$p_e = \frac{n_{\text{эф}}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (3.12)$$

где p_{11} и p_{12} – компоненты упругооптического тензора (коэффициенты Поггеля); ν – коэффициент Пуассона (величина, равная отношению относительного продольного растяжения к относительному поперечному сжатию).

Для стандартного одномодового оптического волокна характерны следующие параметры: $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ и $n_{\text{эф}} = 1,482$.

Пределы воздействующих нагрузок ограничиваются размерами и количеством микродефектов внутри или на поверхности силикатного стекла.

Зависимость резонансной длины волны Брэгга от величины растяжения оптоволоконна используется при создании датчиков деформации на основе волоконной брэгговской решётки.

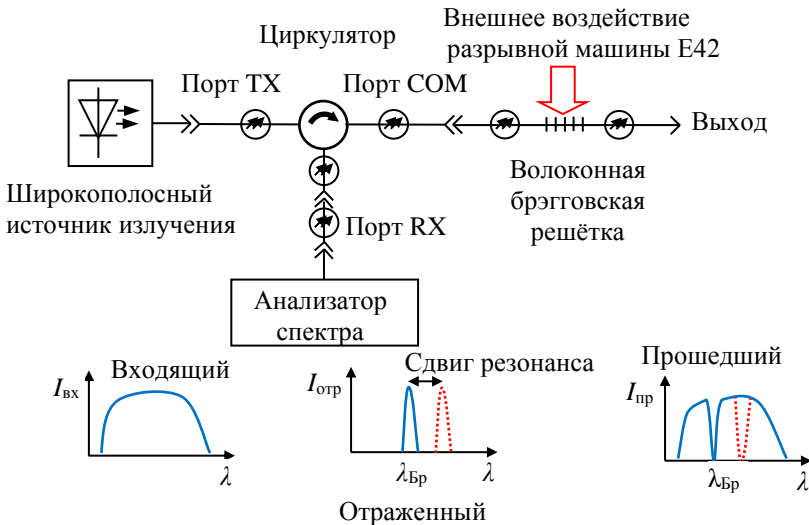


Рис. 3.13. Структурная схема установки для исследования спектра отражения волоконной брэгговской решётки при растяжении

Структурная схема установки для исследования изменений спектра отражения волоконной брэгговской решётки при растяжении приведена на рис. 3.13.

Широкополосный оптический сигнал с выхода источника излучения – суперлюминесцентного диода – проходит через циркулятор с порта TX (вход) на порт COM (общий) и поступает на волоконную брэгговскую решётку. Отраженный узкополосный сигнал с длиной волны $\lambda_{\text{Бр}}$ возвращается на общий порт COM циркулятора. Циркулятор направляет отражённую волну на порт RX (отражённый) и далее на вход анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D. Внешнее воздействие разрывной машины E42 растягивает оптическое волокно и увеличивает расстояние между штрихами брэгговской решётки, что, согласно формуле (3.10), приводит к смещению длины волны резонанса в область более длинных волн. Сдвиг резонансной

длины волны $\Delta\lambda_{\text{Бр}}$ находится по смещению спектров отражения до и после деформационного растяжения.

В спектре прошедшего сигнала на резонансной длине волны наблюдается провал. При растяжении оптического волокна он также сдвигается на величину $\Delta\lambda_{\text{Бр}}$.

3.5. Порядок выполнения работы

Цель работы: исследование деформационных изменений основных характеристик волоконной брэгговской решётки при осевой растягивающей нагрузке.

Оборудование и принадлежности:

Наименование	Марка	Кол-во
Модуль полупроводниково-го суперлюминесцентного диода	EXS210108-01 1550 нм	1
Контроллер лазера	Maiman Electronics MBL 1500 A	1
Ноутбук с ПО для Maiman MBL 1500 A	—	1
Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналогичный	1
Разрывная машина	E42	1
Чувствительный элемент на основе волоконной решётки Брэгга	Производства ПНППК 1550 нм	1
Волоконно-оптический Y-циркулятор	GR-CIRC-55 или аналогичный	1
Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт, скальватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	1

Настройка оборудования:

1. Настройка разрывной машины E42:

1.1. Включить разрывную машину E42, повернув тумблер на её передней части, как показано на рис. 3.14.



Рис. 3.14. Тумблер включено / выключено и кнопка аварийной остановки разрывной машины E42

1.2. Включить персональный компьютер (инженеры сообщают пароль для входа), запустить с рабочего стола программ-



ное обеспечение TW Essential для управления разрывной машиной E42. Включится пульт управления разрывной машиной, как показано на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Пульт управления разрывной машины E42:

1 – кнопка перевода управления на пульт; 2 – колесо плавного перемещения; 3 – кнопки грубого перемещения: ▲ – вверх, ▼ – вниз; 4 – пауза; 5 – старт; 6 – стоп; 7 – возврат в исходное положение

1.3. Нажав кнопку 1 (см. рис. 3.15), перевести управление машиной на пульт. Кнопками грубого перемещения 3 и колесом плавного перемещения 2 установить расстояние между валами разрывной машины 50 см, доведя верхнюю часть траверсы до метки, как показано на рис. 3.16.



Рис. 3.16. Установка расстояния между валами разрывной машины E42

1.4. Оптическое волокно с исследуемой брэгговской решёткой смонтировать между валами разрывной машины так, чтобы чувствительный элемент (ВБР) располагался строго по центру, как показано на рис. 3.17.

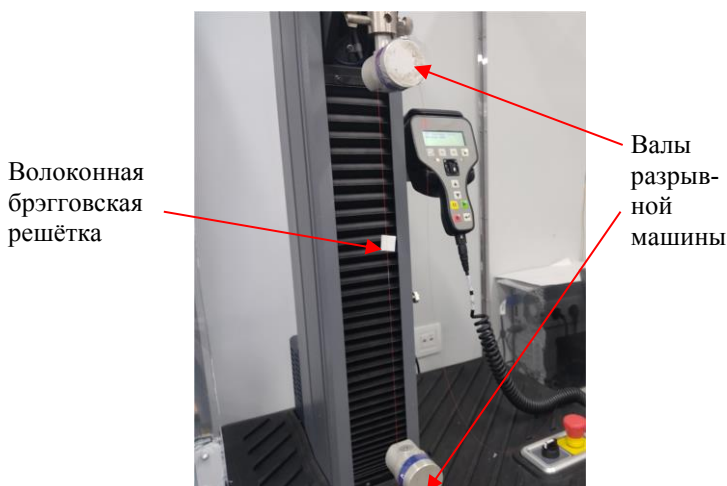


Рис. 3.17. Внешний вид разрывной машины E42 с закрепленной волоконной брэгговской решёткой

Намотку волокна на верхний и нижний валы разрывной машины следует осуществлять спиралевидно для предупреждения микроизгибов, возникающих при их нахлесте, которые приводят к ухудшению качества сигнала. Намотку зафиксировать скотчем на обоих валах.

1.5. В программном обеспечении TW Essential перейти во вкладку «Мои шаблоны» и выбрать испытание «Оптическое волокно» (рис. 3.18).

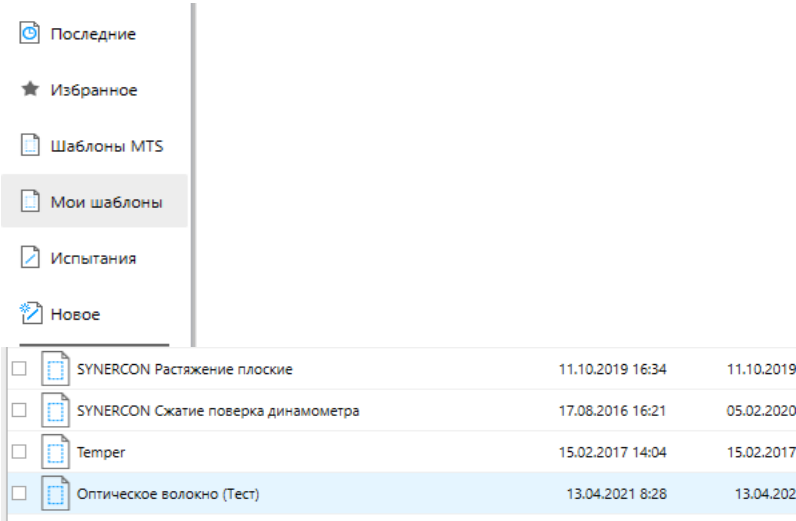


Рис. 3.18. Запуск программы испытания оптического волокна разрывной машины E42

В нижней части интерфейса откроется окно «Нагрузка» (рис. 3.19), в котором отображается величина разрывной нагрузки в ньютонах, а также величины перемещения и времени.



Рис. 3.19. Окна нагрузки, перемещения и времени

В начале исследований необходимо установить нулевую растягивающую нагрузку оптического волокна. Для этого нажать правой кнопкой мыши на окно «Нагрузка» и выбрать «Обнулить сигнал».

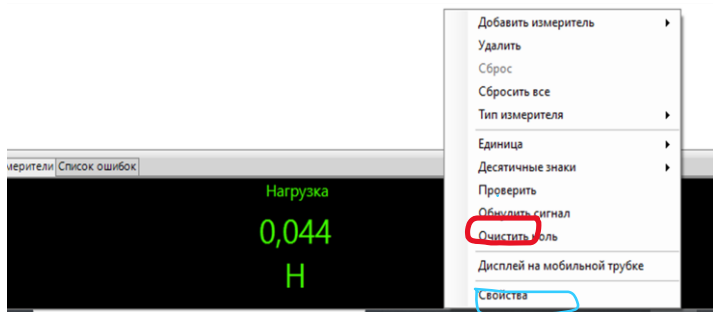


Рис. 3.20. Окно «Нагрузка» оптического волокна разрывной машины E42 после нажатия окна «Обнулить сигнал»

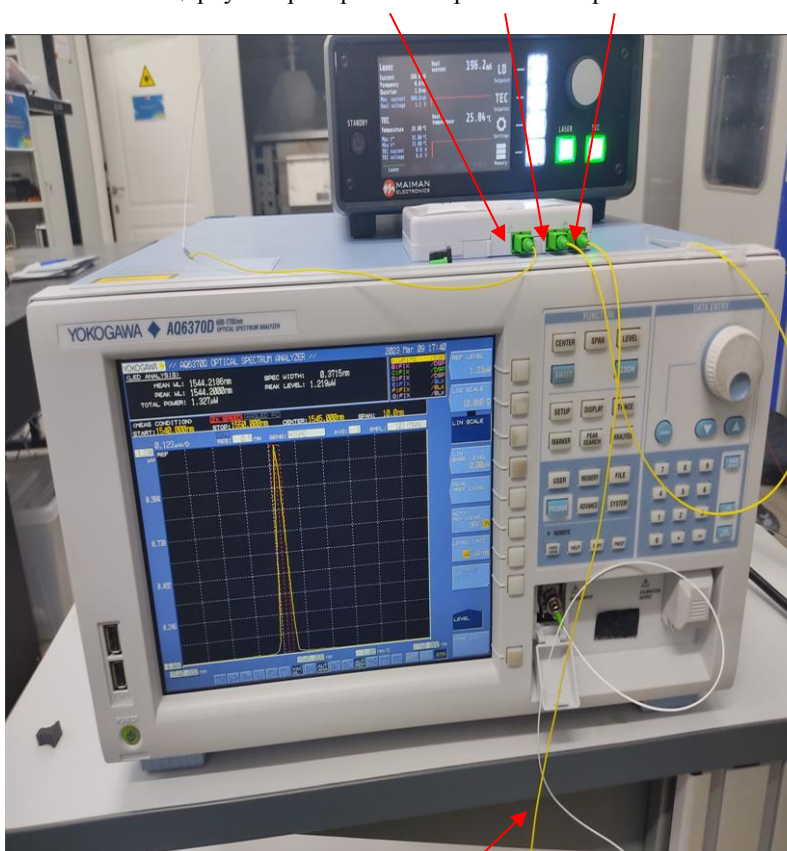
В окне «Нагрузка» (рис. 3.20) появится значение, близкое к нулю. Аналогично повторить с окном «Траверса». Заменить единицы измерения нагрузки и траверсы. Для этого нажать правой кнопкой мыши на нужное окно и выбрать «Единица». Для нагрузки выбрать ньютоны – [Н], для траверсы выбрать микрометры – [мкм].

2. *Собрать установку для измерения основных характеристик волоконной брэгговской решётки при осевом растяжении.*

Структурная схема установки для исследования изменений основных характеристик волоконной брэгговской решётки при осевом растяжении приведена на рис. 3.13, а фотография схемы соединения измерительных приборов – на рис. 3.21. Внешний вид адаптеров и коннекторов соединительных оптических кабелей показан на рис. 3.22.

2.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1). Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC подключить к адаптеру SC входного порта TX Y-циркулятора.

2.2. Оптический кабель (патч-корд) оптического волокна с Y-циркулятор Порт TX Порт COM Порт RX



К волоконно-оптическому датчику деформации,
закрепленному в разрывной машине E42

Рис. 3.21. Фотография схемы соединения измерительных приборов для исследования основных характеристик волоконной брэгговской решётки при осевом растяжении

исследуемой ВБР с коннектором SC подключить к адаптеру SC порта COM (общий: выход входного сигнала, вход отражённого сигнала) Y-циркулятора.

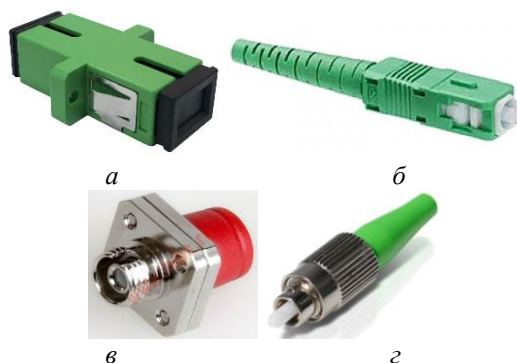


Рис. 3.22. Внешний вид: *а* – адаптера SC; *б* – коннектора SC; *в* – адаптера FC; *г* – коннектора FC

2.3. Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D соединить с портом RX (выход отраженного сигнала) Y-циркулятора оптическим кабелем. Коннектор SC подключить к адаптеру SC порта RX, а коннектор FC – к адаптеру FC на входе анализатора.

3. Настройка широкополосного источника излучения:

3.1. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

3.2. Установить значение силы тока 200,0 мА. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 3.23.



Рис. 3.23. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

4. Настройка анализатора спектра Yokogawa AQ6370D:

4.1. Включить спектроанализатор согласно инструкции, представленной в прил. 2.

4.2. Установить настройки согласно табл. 3.1.

Таблица 3.1

Настройки анализатора спектра

RESOLUTION	0,5	Разрешение дифракционных решёток
START WL	1540	Начальная длина волны
STOP WL	1550	Конечная длина волны
SAMPLING INTERVAL	0,01	Шаг записи данных
SENS/MODE	HIGH 3	Режим чувствительности измерения

5. Порядок проведения измерений:

Внимание! В ходе проведения исследований не превышать растягивающее усилие более 10 Н, что соответствует пределу прочности оптического волокна с записанной ВБР. Без записанной ВБР максимальное растягивающее усилие волокна составляет 50–60 Н.

5.1. Включить суперлюминесцентный диод, нажав кнопку Laser, как показано на рис. 3.23.

5.2. Проверить растягивающую нагрузку оптического волокна разрывной машины E42 в окне «Нагрузка» компьютера, как показано на рис. 3.20. Нагрузку $F = 0$ Н необходимо установить с точностью до первого знака после запятой. Следует немного нагрузить оптическое волокно до $F = 0,04 \div 0,05$ Н, иначе оно может провиснуть, что приведет к появлению погрешностей измерения.

5.3. Записать исходный спектр волоконной брэгговской решётки на трассу А анализатора оптического спектра согласно инструкции в прил. 1.

5.4. **Зафиксировать трассу** после окончания записи, нажав кнопку FIX в разделе TRACE.

На экране анализатора спектра появится крайний левый спектр. Пример обработанного графика – на рис. 3.24 и легенда «— $\Delta l = 0$ мкм, $\lambda_1 = [1545,15]$ нм».

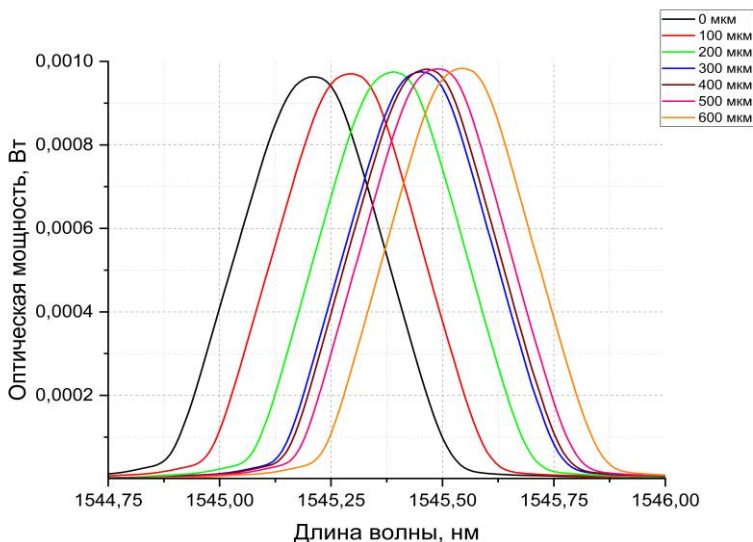


Рис. 3.24. Трассы спектров волоконной брэгговской решётки, полученные при разных осевых растягивающих нагрузках

5.5. Занести в табл. 3.2 данные о нагрузке, перемещении и центральной длине волны.

5.6. Колесом плавного перемещения 2 на пульте управления разрывной машиной (см. рис. 3.16) переместить верхний вал вверх на 100 мкм. Повторить запись спектра по п.п. 5.3 и 5.4. Данные о нагрузке и перемещении занести в табл. 3.2.

5.7. Увеличивая относительное растяжение с шагом 100 мкм до достижения относительного удлинения 600 мкм, последовательно записывать полученные спектры отражения.

Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D позволяет последовательно записать до семи спектров. По достижении последней трассы G необходимо экспортировать данные

с анализатора оптического спектра на флеш-накопитель в формате .csv.

Таблица 3.2

Результаты исследований изменения основных характеристик волоконной брэгговской решётки при растяжении

Номер измерения	Нагрузка (растягивающая сила) F , Н	Перемещение траверсы (растяжение) ΔL , мкм	Центральная длина волны λ_{Br1} , нм
1	0	0	
2		100	
...			
N	...	1000	

Затем очистить оперативную память анализатора, нажав кнопку TRACE → MORE → TRACE CLEAR → ALL TRACE и продолжить запись оставшихся четырёх спектров при относительном удлинении 700, 800, 900 и 1000 мкм. После окончания измерений вновь экспортировать данные с анализатора оптического спектра на флеш-накопитель в формате .csv.

Обработка результатов измерений

1. Обработка спектров

Обработать сохраненные спектры каждого измерения для получения центральной длины волны отражения ВБР тремя способами, приведенными ниже, и сравнить полученные результаты.

1.1. Поиск экстремума методом курсорных измерений. Это наиболее простой способ, позволяющий определить максимум резонансной кривой.

Для острой симметричной резонансной кривой, показанной на рис. 3.25, *a* синим цветом, на экране измерительного прибора, включенного в режиме курсорных измерений, горизонтальный

курсор (красная линия) устанавливается в положение максимальной мощности P_{\max} , затем вертикальный курсор (зелёная прямая) наводится на пересечение горизонтального курсора с максимумом кривой и по горизонтальной оси считывается величина резонансной (центральной) длины волны λ_0 .

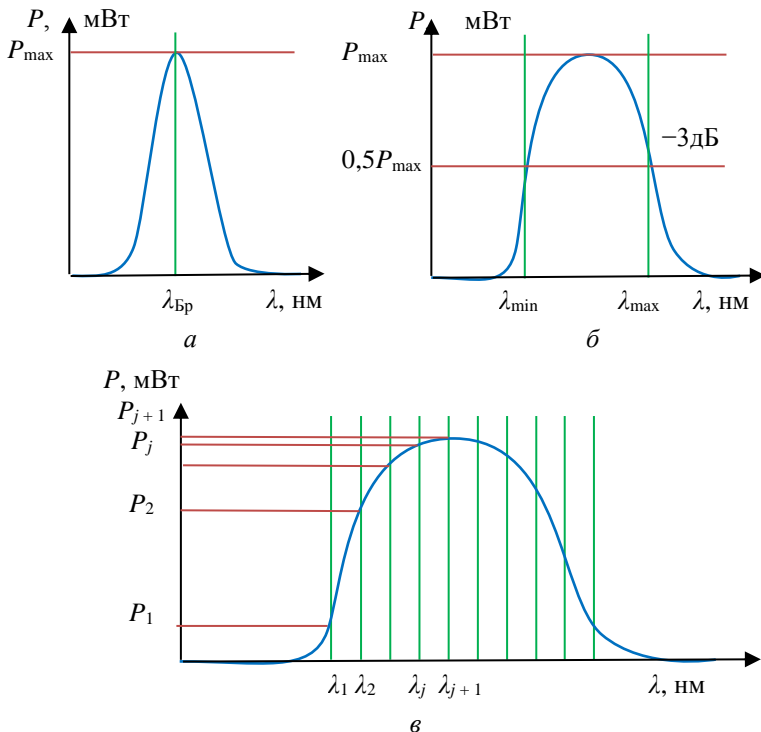


Рис. 3.25. Методы нахождения резонансной длины волны: курсорные измерения по максимальной мощности – *a*; по уровню половинной мощности – *б*, по средневзвешенному значению – *в*

1.2. При растянутом резонансе, изображенном на рис. 3.25, *б*, используют метод «вилки». При этом один верхний горизонтальный курсор совмещается с максимумом P_{\max} резонансной кривой, а нижний опускается на уровень половинной мощности $0,5 P_{\max}$ (при использовании логарифмического масштаба ему

соответствует уровень -3дБ). Вертикальные курсоры устанавливают на пересечении нижнего горизонтального курсора с резонансной кривой и считывают значения λ_{\min} и λ_{\max} . Центральную длину волны находят по формуле

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}. \quad (3.13)$$

Следует отметить, что описанные выше методы можно использовать при графическом анализе кривых, изображённых на масштабированном листе бумаги.

1.3. Расчётный метод нахождения центральной длины волны. Этот метод целесообразно использовать при записи кривой в цифровом виде. При этом, как показано на рис. 3.25, в, запись спектра происходит путём измерения мощности P при изменении длины волны λ через равные промежутки. Полученный массив данных записывается на внешний носитель информации, затем происходит его математическая обработка на компьютере в программе Excel, MatLab или аналогичной. Расчёт центральной длины волны производится по программе обработки массива данных:

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{\sum_{j=1}^N (\lambda_j P_j)}{\sum_{j=1}^N P_j}, \quad (3.14)$$

где N – число измерений.

2. Расчет сдвига центральной длины волны при деформации:

2.1. По заданию преподавателя для каждой растягивающей силы F рассчитать центральную длину волны $\lambda_{\text{Бр}}$ одним (или несколькими) из трех способов по п.п. 1.1, 1.2 и 1.3, результаты занести в табл. 3.3.

2.2. По заданию преподавателя построить график зависимости центральной длины волны отражения ВБР от деформации $\lambda_{\text{Бр}} = \lambda_{\text{Бр}}(\Delta L)$, как показано на рис. 3.26, по экспериментально полученным данным в табл. 3.2 или расчетным в табл. 3.3, используя линейную аппроксимацию полученных точек.

Таблица 3.3

**Результаты расчета центральной длины волны
волоконной брэгговской решётки при растяжении**

Номер измерения	Перемещение траверсы (удлинение волокна) ΔL , мкм	Центральная длина волны отражения $\lambda_{Br}(\Delta L)$, нм, рассчитанная по:		
		максимальной мощности	уровню половинной мощности	средневзвешенному значению
1	0			
2	100			
...				
N	...			

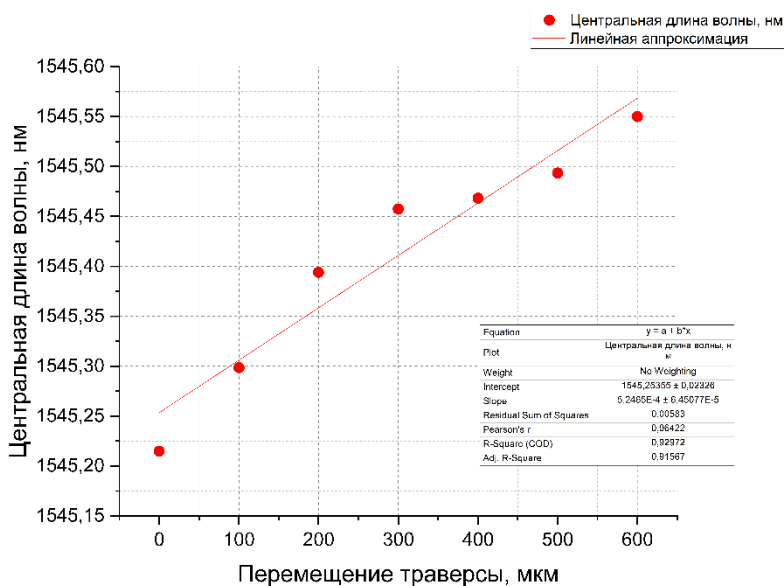


Рис. 3.26. График зависимости смещения центральной длины волны от перемещения траверсы

2.3. Для каждого измерения $i = 1 \div N$ рассчитать относительную деформацию оптического волокна и, соответственно, волоконной брэгговской решётки:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L}, \quad (3.15)$$

где ΔL_i – удлинение волокна из табл. 3.3, а L – длина волокна между валами разрывной машины, установленная в начале экспериментов, $L = 50$ см. Результаты занести в табл. 3.4.

2.4. Для каждой относительной деформации ε_i рассчитать абсолютный $\Delta \lambda_{\text{Бр}i}$ и относительный $\delta \lambda_{\text{Бр}i}$ сдвиг центральной длины волны:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{\text{Бр}i} &= \lambda_{\text{Бр}}(\varepsilon_i) - \lambda_{\text{Бр}1} \\ \delta \lambda_{\text{Бр}i} &= \frac{\Delta \lambda_{\text{Бр}i}}{\lambda_{\text{Бр}1}}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где $\lambda_{\text{Бр}1}$ – центральная длина волны отражения без деформации $\varepsilon_{i=1} = 0$ (первое измерение). По заданию преподавателя центральная длина волны $\lambda_{\text{Бр}}(\varepsilon_i)$ выбирается либо из данных, полученных экспериментально (см. табл. 3.2), либо рассчитывается одним из трех способов (см. табл. 3.3).

Результаты занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты исследований изменения основных характеристик волоконной брэгговской решётки при растяжении

Номер измерения	Перемещение траверсы (удлинение волокна) ΔL , мкм	Относительная деформация ε_i , мкм/м	Сдвиг центральной длины волны отражения $\Delta \lambda_{\text{Бр}i}$, нм	Относительный сдвиг центральной длины волны отражения $\delta \lambda_{\text{Бр}i}$
1	0			
2	100			
...				
N

2.5. Построить график зависимости относительного сдвига центральной длины волны отражения ВБР от величины относительной деформации оптического волокна $\delta\lambda_{\text{Бр}} = \delta\lambda_{\text{Бр}}(\varepsilon_i)$, как показано на рис. 3.27 (см. табл. 3.4).

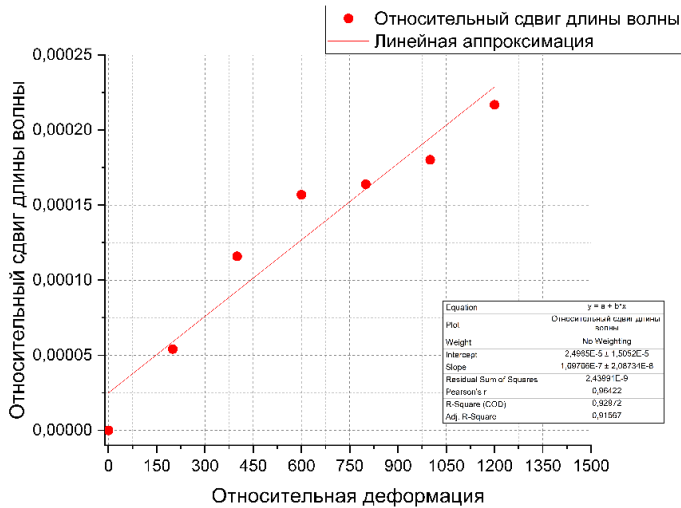


Рис. 3.27. График зависимости относительного сдвига длины волны Брэгга от относительной деформации (мкм/м) оптического волокна

2.6. По формуле (3.11) рассчитать эффективную упругооптическую постоянную p_e кварцевого стекла исследованного оптоволокна. По формуле (3.12) рассчитать величину p_e кварцевого стекла с использованием табличных значений. Сравнить полученные значения p_e .

2.7. Одной из основных характеристик датчиков продольной деформации (тензодатчиков), изготовленных на основе волоконной брэгговской решётки, является коэффициент тензочувствительности K_p . Эта величина характеризует сдвиг центральной длины волны отражения $\Delta\lambda_{\text{Бр}}$ при её деформации ΔL (см. формулу (3.13)). Зачастую данный размерный параметр используется в паспортных данных датчиков на ВБР и упоминается в научных публикациях.

$$K_p = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \lambda_{\text{Бр}}}{\Delta L}. \quad (3.17)$$

Помимо размерного параметра используется безразмерный, который, в свою очередь, характеризуется относительным сдвигом центральной длины волны $\delta \lambda_{\text{Бр}}$ делённым на относительную деформацию ε_i (рис. 3.27):

$$K_p = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta \lambda_{\text{Бр}}(\varepsilon_{\text{max}})}{\varepsilon_{\text{max}}}. \quad (3.18)$$

2.8. Рассчитать по формулам (3.17) и (3.18) значения K_p для исследованного отрезка оптоволокна с брэгговской решёткой в качестве датчика продольной деформации

3.6. Контрольные вопросы

1. Конструкция волоконной брэгговской решётки.
2. Основные характеристики волоконных брэгговских решёток.
3. Методы записи волоконных брэгговских решёток.
4. Принцип работы селективных фильтров на основе волоконных брэгговских решёток.
5. Области применения волоконных брэгговских решёток.
6. Изменение основных характеристик волоконных брэгговских решёток при внешних деформационных и температурных воздействиях.
7. Структурная схема установки для исследования спектра отражения волоконной брэгговской решётки при растяжении.
8. Методика проведения экспериментов.
9. Методы нахождения резонансной длины волны.
10. Объяснить полученные результаты.

Список литературы

1. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки / Ун-т ИТМО. СПб., 2015. 65 с.

2. Квантовая и оптическая электроника. Ч. 2. Оптическая электроника: лаб. практикум / 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.

3. Молодцов В. В., Фукин И. И. Высокоточные оптоволоконные датчики [Электронный ресурс] / Моск. физ.-техн. ин-т. М., 2019. 37 с. URL: https://mipt.ru/upload/medialibrary/cbf/molodtsov_fokin_fiber_optical_detectors.pdf#:~:text=Длина%20волны%20отсечки%20-%20минимальная,форму%2C%20являющуюся%20суперпозицией%20различных%20мод (дата обращения: 30.08.2023).

4. Применение волоконных брэгговских решеток для определения деформации авиационных и строительных конструкций из полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс] / В. В. Махсидов, Л. А. Кашарина, А. А. Евдокимов, А. Е. Раскутин // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4, № 4. С. 258–271. URL <http://applied.photonics.pstu.ru/res/fs/4391file.pdf> (дата обращения: 30.08.2023).

5. Удда Э. Волоконно-оптические датчики, вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.

Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ

Подробное описание конструкции, принципа работы и основных спектральных характеристик волоконных брэгговских решёток приведено в теоретической части лаб. работы 3. Ниже приводятся краткие сведения, необходимые для выполнения данной лабораторной работы.

4.1. Краткие теоретические сведения

Резонансная, или брэгговская длина волны волоконной брэгговской решётки (ВБР)

$$\lambda_{\text{БР}} = 2n\Lambda$$

чувствительна к деформации и температуре. В настоящей лабораторной работе определяется температурная зависимость сдвига резонансной длины волны

$$\Delta\lambda_{\text{БР}} = 2 \left(n \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (4.1)$$

где Λ – период решетки; n – показатель преломления материала сердцевины оптоволокна; T – температура ВБР.

Физический смысл данного выражения заключается в наличии двух механизмов сдвига резонансной длины волны: температурного изменения периода решётки и показателя преломления.

Показатель преломления стандартного одномодового оптического волокна $n = 1,482$.

Термооптический коэффициент изменения показателя преломления

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 10 \cdot 10^{-6}, \frac{1}{K}.$$

Период ВБР с резонансной длиной волны $\lambda_{\text{БР}} = 1540$ нм

$$\Lambda = 530 \text{ нм}.$$

Коэффициент теплового линейного расширения кварцевого стекла

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} = 0,50 \cdot 10^{-6}, \frac{1}{K}.$$

Таким образом, основной вклад в сдвиг резонансной длины волны отражения вносит термооптический эффект, вклад температурного расширения оказывается на порядок меньше.

Пределы воздействующих (рабочих) температур для чувствительного элемента, как и волокна в целом, определяются типом внешнего покрытия, которое обеспечивает защиту от проникновения молекул воды в силикатное оптическое волокно и механических воздействий. Например, для акрилатного покрытия диапазон рабочих температур от -60 до $+85$ °С, а для полиамидного покрытия – от -70 до $+350$ °С.

Структурная схема установки для исследования температурных изменений основных характеристик волоконной брэгговской решётки приведена на рис. 4.1.

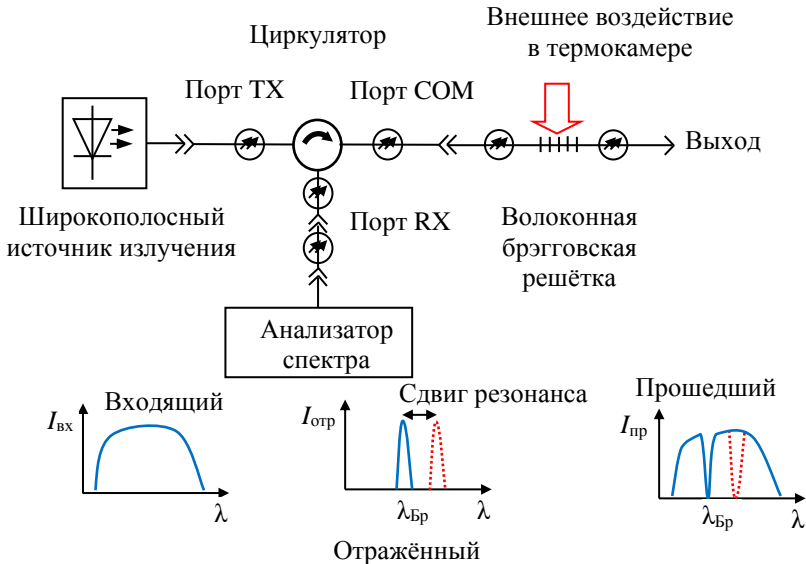


Рис. 4.1. Структурная схема установки для исследования датчика температуры на основе волоконной брэгговской решётки

Широкополосный оптический сигнал с выхода источника излучения – суперлюминесцентного диода – проходит через циркулятор с порта TX (вход) на порт СОМ (общий) и поступает на волоконную брэгговскую решётку. Отраженный узкополосный сигнал с длиной волны $\lambda_{бр}$ возвращается на общий порт СОМ циркулятора. Циркулятор направляет отражённую волну на порт RX (отражённый) и далее на вход анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D. Внешнее воздействие – увеличение температуры растягивает оптическое волокно и увеличивает расстояние между штрихами брэгговской решётки, что, согласно формуле (4.1), приводит к смещению длины волны резонанса в область более длинных волн. Сдвиг резонансной длины волны $\Delta\lambda_{бр}$ находится по смещению спектров отражения до и после температурного воздействия. Аналогичный сдвиг наблюдается и в спектре прошедшего сигнала.

4.2. Порядок выполнения работы

Цель работы: исследование температурных изменений основных характеристик волоконной брэгговской решётки.

Оборудование и принадлежности:

Наименование	Марка	Кол-во
Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода	EXS210108-01 1550 нм	1
Контроллер лазера	Maiman Electronics MBL 1500 А	1
Ноутбук с ПО для Maiman MBL 1500 А	–	1
Анализатор оптического спектра	Yokogawa AQ6370D или аналогичный	–
Термокамера	ШС-80-01 или аналогичная	1
Волоконная брэгговская решётка	Производство ПНППК 1550 нм	1
Оптический Y-циркулятор	GR-CIRC-55	1
Комплект для сварочных работ	Стриппер, безворсовые салфетки, изопропиловый спирт, скалыватель, сварочный аппарат, комплект для защиты сварки	1

Настройка оборудования:

1. Настройка термокамеры ШС-80-01

Внешний вид термокамеры ШС-80-01 и пульта управления с указанием органов управления показан на рис. 4.2, *а* и *б* соответственно.



а

б

Рис. 4.2. Термокамера ШС-80-01: *а* – внешний вид;
б – пульт управления. Кнопки управления термокамерой ШС-80-01:
1 – установки температуры; 2 – повышения температуры (▲);
3 – понижения температуры (▼)

1.1. Тумблер включения расположен на левой боковой стенке термокамеры ШС-80-01 (см. рис. 4.3, *а*). Для включения термокамеры поднять сдвоенный тумблер, переведя его из положения «о» (выключено) в положение «i» (включены спирали нагревателя). На дисплее появится текущее значение температуры в градусах Цельсия, как показано на рис. 4.2, *б*. Убедиться, что температура внутри камеры равна комнатной.

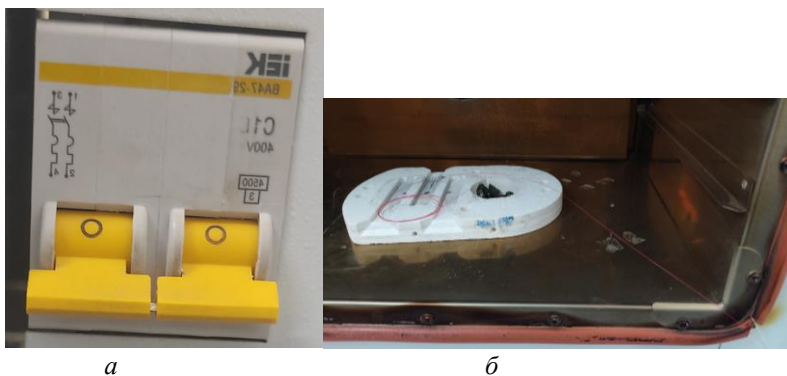


Рис. 4.3. Фотографии: *а* – тумблеров включения термокамеры ШС-80-01; *б* – разрешения волоконной брэгговской решётки

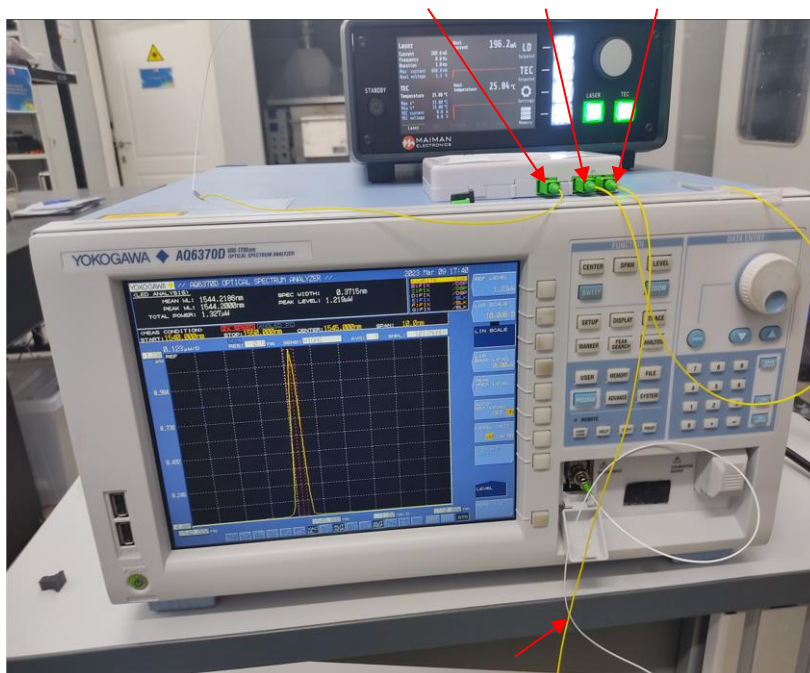
1.2. Ручкой открывания двери открыть термокамеру. Оптическое волокно с исследуемой брэгговской решеткой поместить внутрь термокамеры на асбестовую подложку (рис. 4.3, б) Размещенное волокно не должно иметь перегибов для сохранения качества оптического сигнала. Вывести волокно из камеры, как показано на рис. 4.3, б.

2. Собрать схему измерений основных характеристик датчика температуры на основе волоконной брэгговской решётки

Структурная схема установки для исследования датчика температуры на основе волоконной брэгговской решётки приведена на рис. 4.1, а фотография соединения измерительных приборов – на рис. 4.4. Внешний вид адаптеров и коннекторов соединительных оптических кабелей показан на рис. 4.5.

2.1. Установить модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01 в контроллер лазера согласно инструкции (см. прил. 1). Оптический кабель (патч-корд) выхода излучения суперлюминесцентного диода с коннектором FC подключить к адаптеру SC входного порта TX Y-циркулятора.

Y-циркулятор Порт TX Порт COM Порт RX



Е42 к ВБР, помещенной в термокамеру

Рис. 4.4. Фотография соединения измерительных приборов для исследования температурных изменений основных характеристик волоконной брэгговской решётки

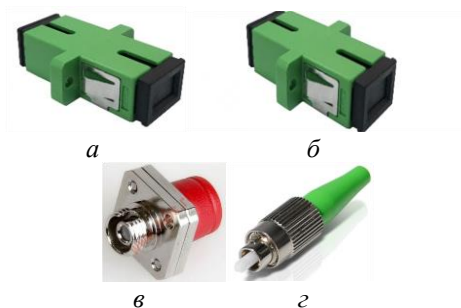


Рис. 4.5. Внешний вид: *а* – адаптера SC; *б* – коннектора SC; *в* – адаптера FC; *г* – коннектора FC

2.2. Оптический кабель (патч-корд) оптического волокна с ВБР коннектором SC подключить к адаптеру SC порта COM (общий: выход входного сигнала, вход отражённого сигнала) Y-циркулятора.

2.3. Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D соединить с портом RX (выход отражённого сигнала) Y-циркулятора оптическим кабелем. Коннектор SC подключить к адаптеру SC портом RX, а коннектор FC – к адаптеру FC на входе анализатора.

3. Настройка широкополосного источника излучения:

3.1. Включить контроллер лазера Maiman Electronics MBL1500 согласно инструкции (см. прил. 1).

3.2. Установить значение силы тока 200,0 мА. Внешний вид передней панели контроллера лазера в режиме генерации оптического излучения представлен на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Внешний вид передней панели контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 в режиме генерации оптического излучения

4. Настройка анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D:

4.1. Включить анализатор спектра согласно инструкции, представленной в прил. 2.

4.2. Установить настройки согласно табл. 4.1.

Таблица 4.1

Настройки анализатора спектра

RESOLUTION	0,5	Разрешение дифракционных решеток
START WL	1540	Начальная длина волны
STOP WL	1550	Конечная длина волны
SAMPLING INTERVAL	0,01	Шаг записи данных
SENS/MODE	HIGH 3	Режим чувствительности измерения

5. Порядок проведения измерений

При проведении температурных испытаний дверь термокамеры должна быть закрыта!

Внимание! В ходе проведения исследований не превышать температуру 85 °С, что соответствует верху температурного диапазона работы волоконной брэгговской решётки. При более высокой температуре разрушится её акрилатное покрытие. Рекомендованный большинством производителей диапазон эксплуатационных температур оптического волокна – от –30 до +65 °С.

5.1. Включить суперлюминесцентный диод, нажав кнопку Laser, как показано на рис. 4.6.

5.2. Кнопками понижения и повышения температуры ▼, ▲ пульта управления термокамерой (на рис. 4.2, б обозначена цифрой 3) установить температуру 25 °С. Подождать 10 минут для установления температурного равновесия.

5.3. Записать исходный спектр волоконной брэгговской решётки на трассу А анализатора оптического спектра согласно инструкции в прил. 1.

5.4. **Зафиксировать трассу** после окончания записи, нажав кнопку FIX в подразделе TRACE.

На экране анализатора спектра появится крайний левый спектр (рис. 4.7).

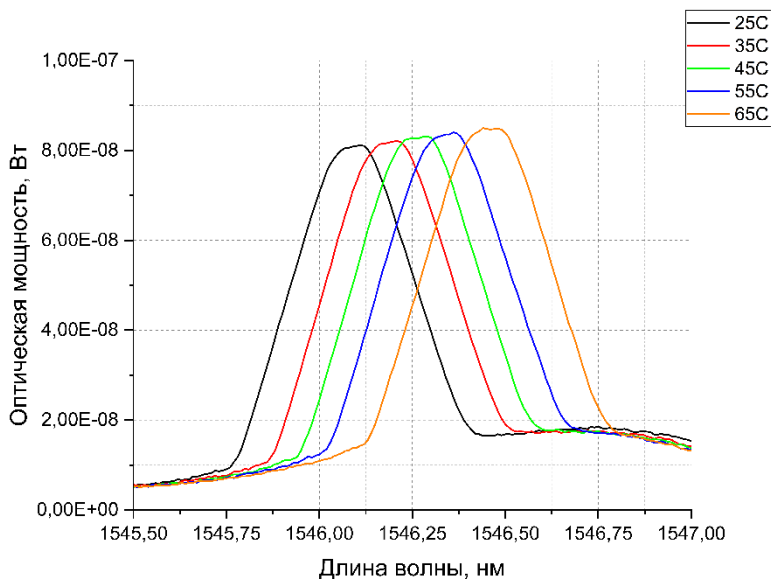


Рис. 4.7. Трассы спектров волоконной брэгговской решётки, полученные при разных температурах

5.5. Занести в табл. 4.2 данные о температуре и центральной длине волны, найденной методом курсорных измерений (рис. 4.8, а).

5.6. Кнопкой повышения температуры ▲ пульта управления термокамерой (на рис. 4.2, б обозначена цифрой 2) установить температуру 35 °С. Подождать 10 минут для установления температурного равновесия. Повторить запись спектра по п.п. 5.3 и 5.4. Данные о температуре и центральной длине волны занести в табл. 4.2.

5.7. Увеличивая температуру с шагом 10 °С до 65 °С, последовательно записывать полученные спектры отражения.

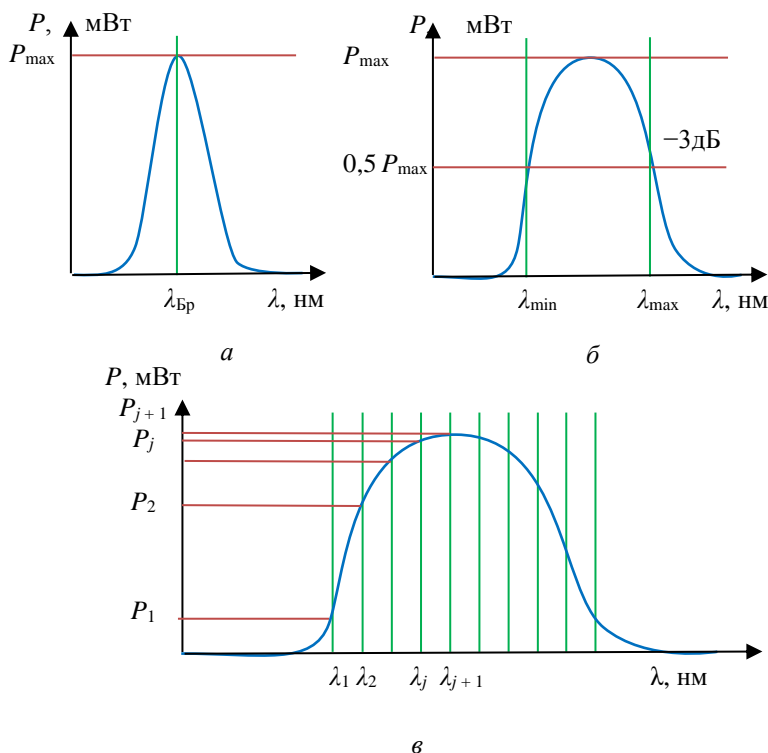


Рис. 4.8. Методы нахождения резонансной длины волны: курсорные измерения по максимальной мощности – *a*; по уровню половинной мощности – *б*; по средневзвешенному значению – *в*

Таблица 4.2

Результаты исследований изменения резонансной длины волны волоконной брэгговской решётки при нагреве в термокамере ШС-80-01

Номер измерения	Температура, T_i , °C	Центральная длина волны $\lambda_{\text{Бр}i}$, нм
1	25	
2		
...		
N	...	

Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D позволяет последовательно записать до семи спектров. По достижении последней трассы G необходимо экспортировать данные с анализатора оптического спектра на флеш-накопитель в формате .csv.

Если по заданию преподавателя температурный интервал и шаг измерений были изменены и количество спектров больше семи, то очистить оперативную память анализатора, нажав кнопку TRACE → MORE → TRACE CLEAR → ALL TRACE, и продолжить запись оставшихся спектров. После окончания измерений вновь экспортировать данные с анализатора оптического спектра на флеш-накопитель в формате .csv.

Обработка результатов измерений

1. Обработка спектров

Обработать сохраненные спектры каждого измерения для получения центральной длины волны отражения ВБР тремя способами, приведенными ниже, и сравнить полученные результаты.

1.1. Поиск экстремума методом курсорных измерений. Это наиболее простой способ, позволяющий определить максимум резонансной кривой.

Для острой симметричной резонансной кривой (см. рис. 4.8, а) на экране измерительного прибора, включенного в режиме курсорных измерений, горизонтальный курсор (красная линия) устанавливается в положение максимальной мощности P_{\max} , затем вертикальный курсор (зелёная прямая) наводится на пересечение горизонтального курсора с максимумом кривой и по горизонтальной оси считывается величина резонансной (центральной) длины волны $\lambda_{\text{БР}}$.

1.2. При растянутом резонансе, изображенном на рис. 4.8, б, используют метод «вилки». При этом верхний горизонтальный курсор совмещается с максимумом P_{\max} резонансной кривой, а нижний опускается на уровень половинной мощности $0,5P_{\max}$ (при использовании логарифмического масштаба ему соответствует уровень -3 дБ). Вертикальные курсоры устанавливают на пересечении нижнего горизонтального курсора с резонансной кривой и считывают значения λ_{\min} и λ_{\max} . Центральную длину волны находят по формуле

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{2}. \quad (4.3)$$

Следует отметить, что описанные выше методы можно использовать при графическом анализе кривых, изображённых на масштабированном листе бумаги.

1.3. Расчётный метод нахождения центральной длины волны. Этот метод целесообразно использовать при записи кривой в цифровом виде. При этом, как показано на рис. 4.8, *в*, запись спектра происходит путем измерения мощности P при изменении длины волны λ через равные промежутки. Полученный массив данных записывается на внешний носитель информации, затем происходит его математическая обработка на компьютере в программе Excel, MatLab или аналогичной. Расчет центральной длины волны производится по программе обработки массива данных

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{\sum_{j=1}^N (\lambda_j P_j)}{\sum_{j=1}^N P_j}, \quad (4.4)$$

где N – число точек, выбранных на резонансной кривой.

2. *Расчёт сдвига центральной длины волны при нагреве ВБР:*

2.1. *По заданию преподавателя* для каждой температуры T рассчитать центральную длину волны одним (или несколькими) из трёх способов по п.п. 1.1, 1.2 и 1.3. Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Результаты расчета центральной длины волны
волоконной брэгговской решётки при нагреве**

Номер измерения	Температура T , °C	Центральная длина волны отражения $\lambda_{\text{Бр}i}$, нм, рассчитанная по:		
		максимальной мощности	уровню половинной мощности	средневзвешенному значению
1	25			
2	35			
...				
N	...			

2.2. По заданию преподавателя построить график зависимости центральной длины волны отражения ВБР от температуры $\lambda_{\text{БР}} = \lambda_{\text{БР}}(T)$ по экспериментально полученным данным (см. табл. 4.2) или расчётным данным (см. табл. 4.3), используя линейную аппроксимацию полученных точек, как показано на рис. 4.9.

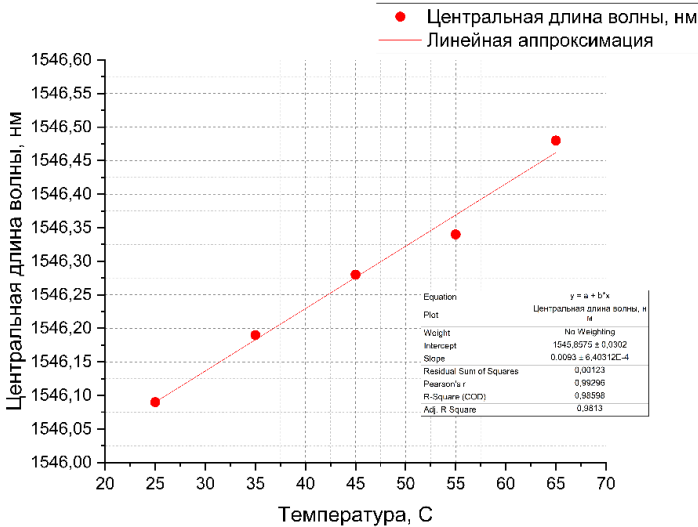


Рис. 4.9. График зависимости смещения центральной волны от температуры

2.3. Для каждого измерения $i = 1 \div N$ рассчитать относительное изменение температуры волоконной брэгговской решётки

$$\delta T_i = \frac{T_i - T_1}{(T_i + T_1)/2 + 273}, \quad (4.5)$$

где T_i – значения температуры из табл. 4.3, а $T_1 = 25$ °C (или другая по заданию преподавателя) – температура, установленная в начале экспериментов. Результаты занести в табл. 4.4.

2.4. Для каждого относительного изменения температуры δT_i рассчитать относительный сдвиг центральной длины волны

$$\delta \lambda_{\text{БР}i} = \frac{\Delta \lambda_{\text{БР}i}}{\lambda_{\text{БР}1}}, \quad (4.6)$$

где $\lambda_{\text{БР}1}$ – центральная длина волны отражения в первом измерении $T_1 = 25$ °C, а $\Delta \lambda_{\text{БР}i} = \lambda_{\text{БР}}(T_i) - \lambda_{\text{БР}1}$. По заданию преподавателя

центральная длина волны выбирается либо из данных, полученных экспериментально (см. табл. 4.2), либо рассчитывается одним из трёх способов после экспериментальной обработки (см. табл. 4.3).

Результаты занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты исследований изменения основных характеристик волоконной брэгговской решётки при нагреве

Номер измерения	Температура T_i , °C	Относительное изменение температуры δT_i	Относительный сдвиг центральной длины волны отражения $\delta\lambda_{\text{Бр}i}$
1	25		
2	35		
...			
N	...		

2.5. Построить график зависимости относительного сдвига центральной длины волны отражения ВБР от относительного изменения температуры $\delta\lambda_{\text{Бр}} = \delta\lambda_{\text{Бр}}(\delta T)$, как показано на рис. 4.10 (см. табл. 4.4).

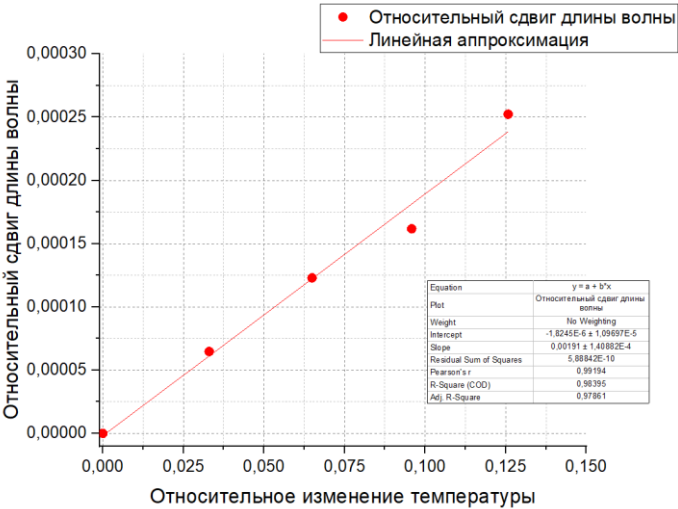


Рис. 4.10. График зависимости относительного сдвига длины волны от относительного изменения температуры

2.6. Одной из основных характеристик датчиков температуры, изготовленных на основе волоконной брэгговской решётки, является коэффициент температурной чувствительности. Эта величина характеризует сдвиг центральной длины волны отражения $\lambda_{\text{Бр}}$ при изменении температуры T (см. формулу (4.7)). Зачастую данный размерный параметр используется в паспортных данных датчиков на ВБР и упоминается в научных публикациях.

$$K_T = \text{tg}\alpha = \frac{\Delta\lambda_{\text{Бр}}}{\Delta T}. \quad (4.7)$$

Помимо размерного параметра используется безразмерный, который, в свою очередь, характеризуется относительным сдвигом центральной длины волны $\delta\lambda_{\text{Бр}}$ на относительное изменение температуры δT :

$$K_T = \text{tg}\alpha = \frac{\delta\lambda_{\text{Бр}}}{\delta T}. \quad (4.8)$$

2.7. По формуле (4.1) рассчитайте ожидаемую величину сдвига брэгговской длины волны $\Delta\lambda_{\text{Бр}} = \lambda_{\text{Бр}}(T_{\text{max}}) - \lambda_{\text{Бр}}(T_{\text{min}})$ при изменении температуры $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$, используя табличные значения параметров, входящих в формулу (4.1). Сравните полученную величину с величиной $\Delta\lambda_{\text{Бр}}$, полученной экспериментально.

2.8. По формуле (4.1) рассчитайте величину периода ВБР Λ , подставив в нее экспериментальные значения $\Delta\lambda_{\text{Бр}} = \lambda_{\text{Бр}}(T_{\text{max}}) - \lambda_{\text{Бр}}(T_{\text{min}})$, $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$, а также табличные значения коэффициентов. Сравните полученную величину с величиной $\Lambda = 530$ нм. Получено ли соответствие? Если нет, то почему?

4.3. Контрольные вопросы

1. Конструкция волоконной брэгговской решётки.
2. Основные характеристики волоконных брэгговских решёток.
3. Методы записи волоконных брэгговских решёток.
4. Принцип работы селективных фильтров на основе волоконных брэгговских решёток.
5. Области применения волоконных брэгговских решёток.

6. Изменение основных характеристик волоконных брэгговских решёток при внешних деформационных и температурных воздействиях.

7. Датчики температуры на основе волоконных брэгговских решёток.

8. Структурная схема установки для исследования спектра отражения волоконной брэгговской решётки при нагреве.

9. Методика проведения экспериментов.

10. Методы нахождения резонансной длины волны.

11. Объяснить полученные результаты.

Список литературы

1. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки / Ун-т ИТМО. СПб., 2015. 65 с.

2. Квантовая и оптическая электроника: Ч. 2. Оптическая электроника: лаб. практикум / 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.

3. Молодцов В. В., Фукин И. И. Высокоточные оптоволоконные датчики [Электронный ресурс] / Моск. физ.-техн. ин-т. М., 2019. 37 с. URL: https://mipt.ru/upload/medialibrary/cbf/molodtsov_fokin_fiber_optical_detectors.pdf#:~:text=Длина%20волны%20отсечки%20-%20минимальная,форму%2C%20являющуюся%20суперпозицией%20различных%20мод (дата обращения: 30.03.2023).

4. Оптическое кварцевое стекло [Электронный ресурс]: справочник. URL: <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/special-materials/119-opticheskoe-kvartsevoe-steklo> (дата обращения: 04.09.2023).

5. Удда Э. Волоконно-оптические датчики, вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.

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 Power «-/o», расположенным на задней панели (рис. П1.2)

3. Включить термоэлектрический охладитель контроллера лазера нажатием кнопки «**TEC on/off**» (рис. П1.3). Кнопка выключателя подсветится зелёным светом.

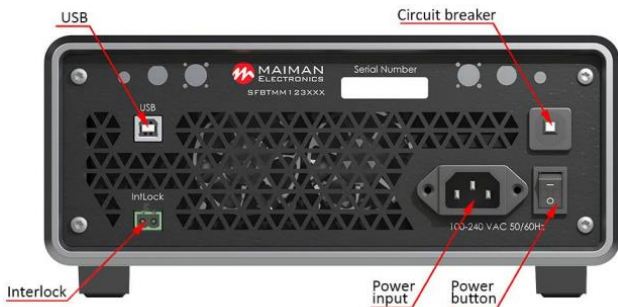


Рис. П1.2. Внешний вид контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 со стороны задней панели

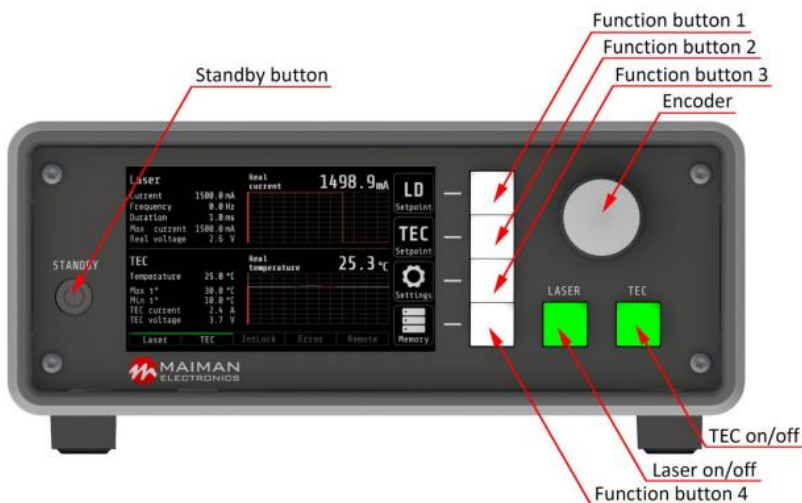



Рис. П1.3. Внешний вид контроллера лазера Maiman Electronics MBL1500 со стороны передней панели:

Laser – контроллер тока;	TEC – контроллер температуры;
Current – сила тока;	Temperature – температура;
Frequency – частота;	Max t° – максимальная температура;
Duration – длительность импульса;	Min t° – минимальная температура;
Max current – максимальный ток;	TEC current – ток контроллера температуры;
Real voltage – действующее значение напряжения;	TEC voltage – напряжение контроллера температуры

4. Нажать кнопку справа от иконки  (**LD Setpoint** – лазерный диод, установка) на рис. П1.3. На дисплее появится меню установки тока лазерного диода, как показано на рис. П1.4.

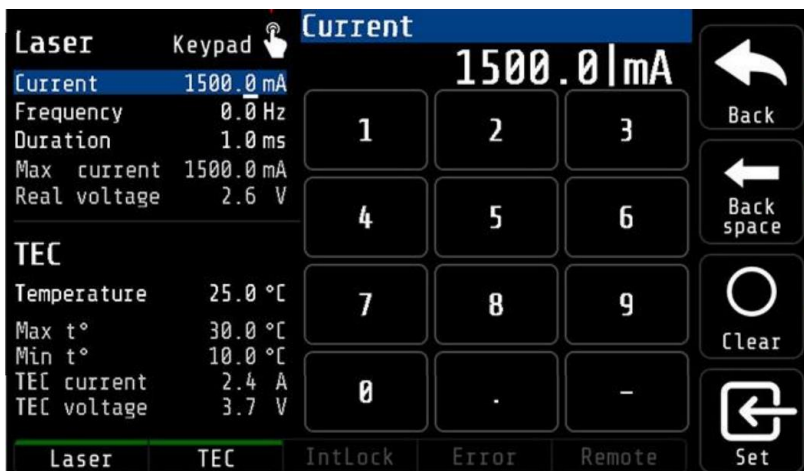



Рис. П1.4. Панель управления Maiman Electronics MBL1500 при настройке значения тока накачки

5. В левом столбце меню **Laser** коснуться **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) на рис. П1.4 применить установленное значение.

7. Нажать кнопку «**LASER**» (см. рис. П1.3). Кнопка выключателя подсветится зеленым светом и на выходной разъем суперлюминесцентного диода EXS210108-01 (или другого по выполняемому заданию работы) поступит оптический сигнал.

Измеритель оптической мощности EXFO-LTB-1

Прибор LTB-1 компании EXFO является портативным 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 четырех 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

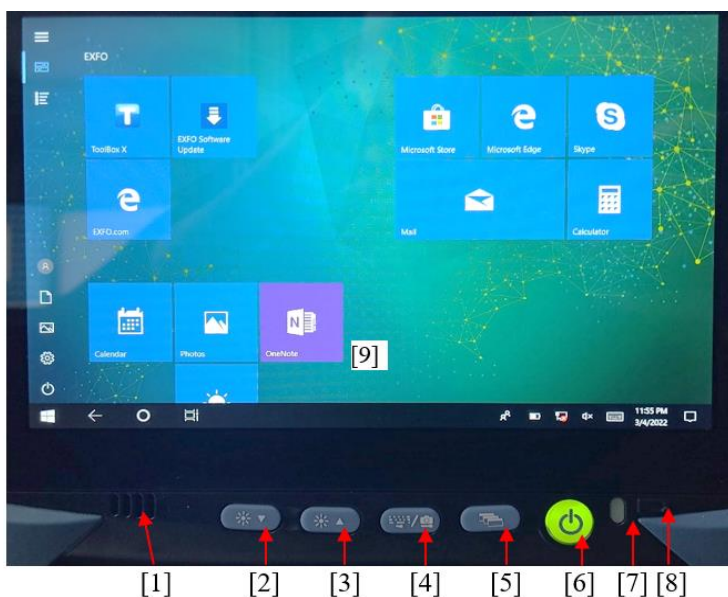
Основные технические характеристики измерителя оптической мощности FTB-1750 приведены в табл. П2.1.

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, с ⁻¹	До 5208

Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB со стороны передней панели с указанием органов управления представлен на рис. П2.2, а со стороны верхней панели с указанием входов (портов) подключения внешних устройств приведен на рис. П2.3.



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;

Рис. П2.2. Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 со стороны передней панели

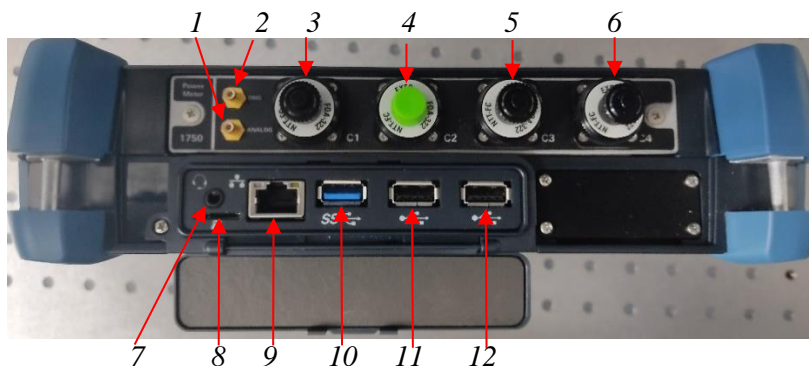



Рис. П2.3. Внешний вид измерителя оптической мощности EXFO-LTB-1 со стороны верхней панели:

- 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 – разъем «Динамик / Микрофон»; 8 – разъем карты памяти микро-SD;
- 9 – сетевой порт RG-45; 10 – порт USB 3.0 (скоростной);
- 11 – порт USB 2.0 (общий); 12 – порт USB 2.0 (общий)

Начало работы с прибором в режиме измерения оптической мощности на 1-м канале:

1. Включить прибор, нажав клавишу  на передней панели (см. цифру 6 на рис. П2.2).

2. После загрузки программного обеспечения на экране появляется стартовая страница (рис. П2.4).

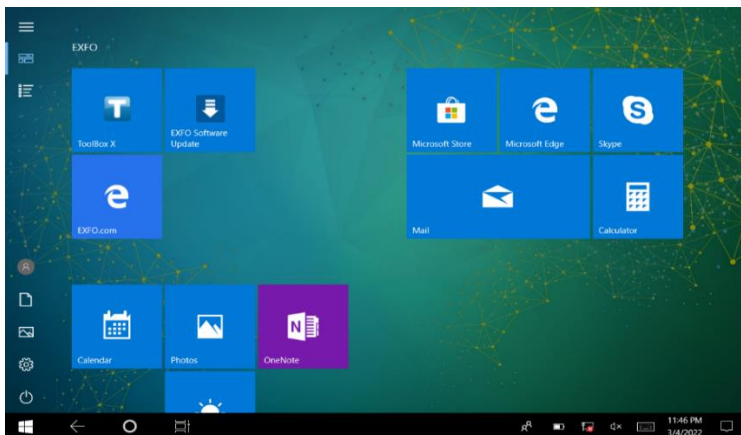



Рис. П2.4. Стартовая страница EXFO LTB-1

3. Коснуться иконки  (ToolBox X – 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).

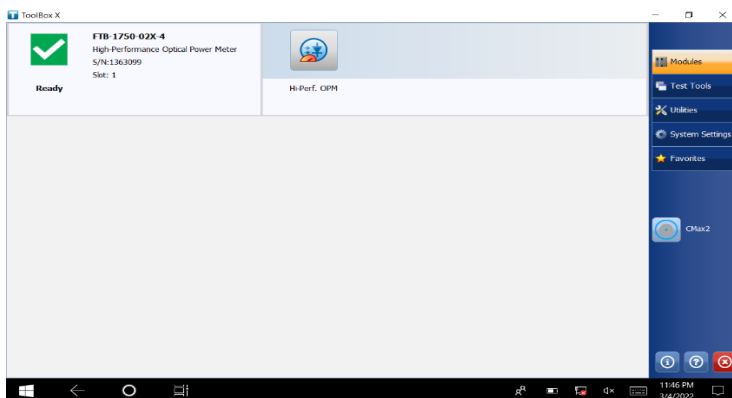


Рис. П2.5. Страница ToolBox, переход в режим измерения оптической мощности высокого разрешения 1-го канала

4. Коснуться иконки Hi-Perf. OPM (измерение оптической мощности высокого разрешения), появится страничка High Performance Optical Power Meter (рис. П2.6).

5. В открывшемся окне Instrument отображается: единицы измерения оптической мощности (Вт или дБм), длина волны излучения (Wavelength), абсолютный или относительный режим измерения (Mode) и усреднение (Averaging).

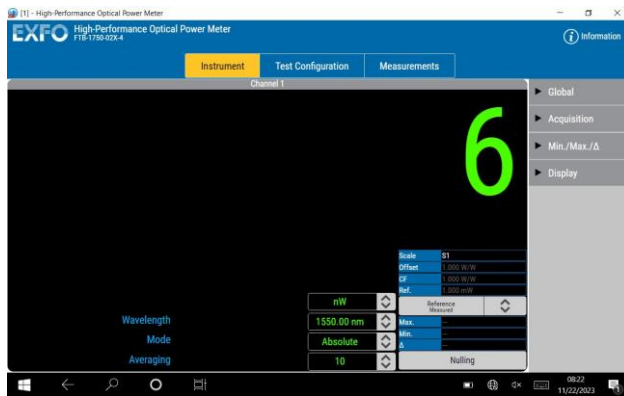



Рис. П2.6. Окно измерения оптической мощности Instrument

6. Для смены единиц измерения оптической мощности коснуться  возле единиц измерения (рис. П2.7).

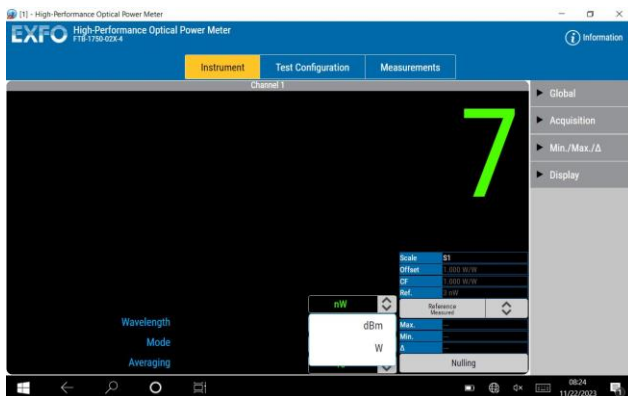



Рис. П2.7. Окно измерения оптической мощности Instrument. Выбор единиц измерения

7. Для смены длины волны коснуться  в строке Wavelength, появится список длин волн как показано на рис. П2.8.

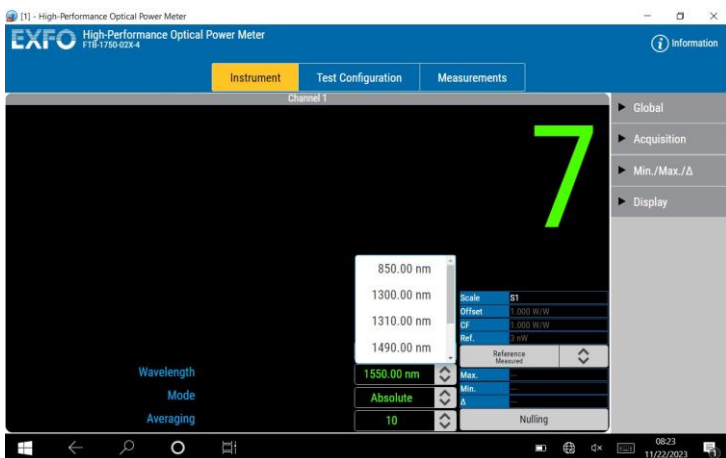


Рис. П2.8. Окно измерения оптической мощности Instrument.
Установка длины волны из готового списка

8. Для ручного ввода длины волны коснуться значения длины волны в строке Wavelength. В открывшемся окне ввести необходимое значение длины волны и нажать ОК (рис. П2.9).

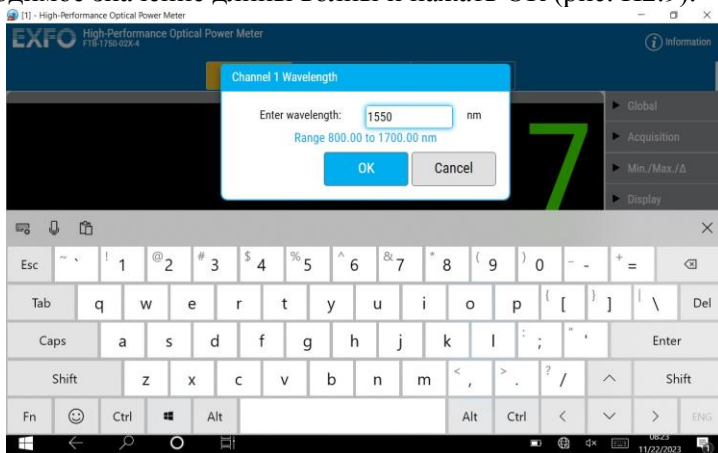



Рис. П2.9. Окно измерения оптической мощности Instrument.
Ручной ввод длины волны

9. Для установки усреднения нажать  в строке Averaging. В открывшемся окне установить необходимое число усреднений (рис. П2.10).

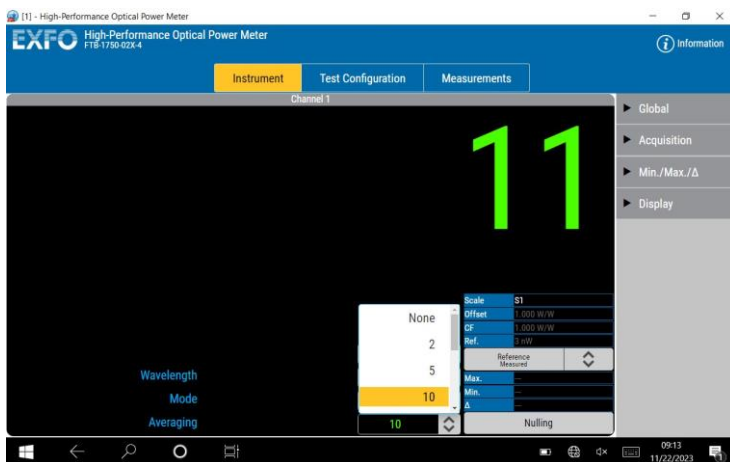


Рис. П2.10. Окно измерения оптической мощности Instrument.
Установка усреднения

Работа с анализатором оптических спектров Yokogawa AQ6370D

Внешний вид спектроанализатора Yokogawa представлен на рис. ПЗ.1. На рисунке красным контуром обведены дисплей и органы управления, обозначенные цифрами.

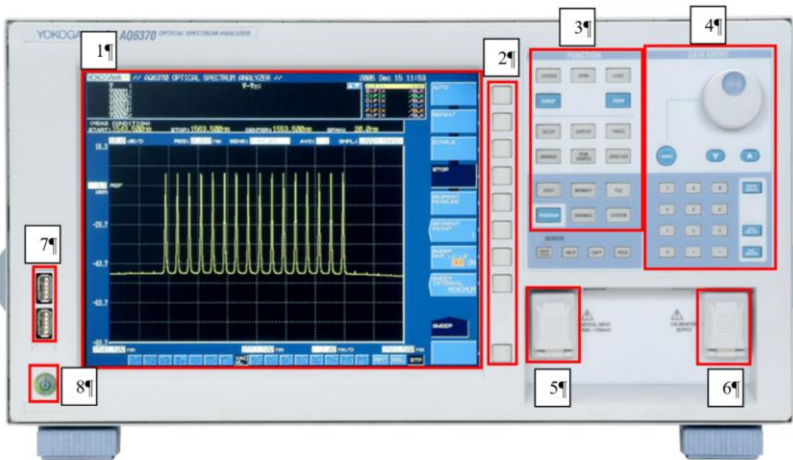


Рис. ПЗ.1. Внешний вид анализатора спектра Yokogawa AQ6370D:
 1 – экран дисплея; 2 – кнопки работы со вкладками, слева – окна с их названиями; 3 – функциональная панель прибора; 4 – панель установки значений задаваемых величин, включающая в себя: 12-кнопочный цифровой набор и дублирующий его вращающийся 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-разъемы; 8 – кнопка включения / выключения питания

Установка рабочего диапазона длин волн:

1. На функциональной панели **3** (см. цифру 3 на рис. П2.1) нажать кнопку «**SPAN**».

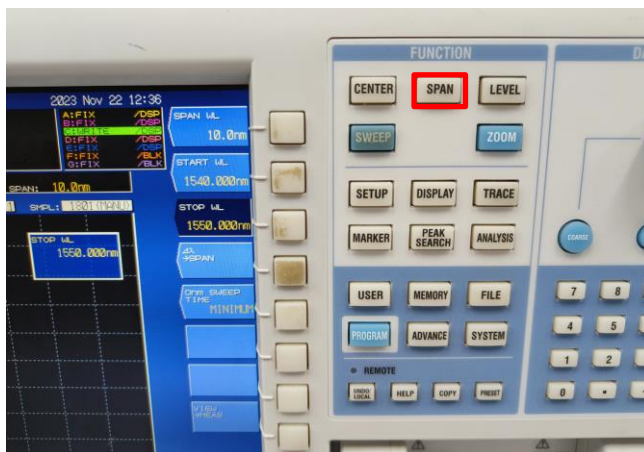


Рис. П3.2. Вкладка SPAN

2. Выставить начальную длину волны, нажав кнопку у вкладки **START WL** (см. рис. П3.2). На панели установки **4** ввести значение длины волны. Нажать кнопку «**nm/ENTER**».
3. Выставить конечную длину волны, нажав кнопку у вкладки **STOP WL**. На панели установки **4** ввести значение длины волны. Нажать кнопку «**nm/ENTER**».

Например, для исследования ББР следует выставить **START WL = 1540 нм**, **STOP WL = 1550 нм**.

Установка разрешения и количества точек записи:

1. На функциональной панели **3** (см. рис. П3.1) нажать кнопку «**SETUP**».
2. Во вкладке **RESOLUTION** (см. рис. П3.3) выбрать значение 0,5 нм. Данное разрешение подходит для всех лабораторных работ со спектроанализатором.

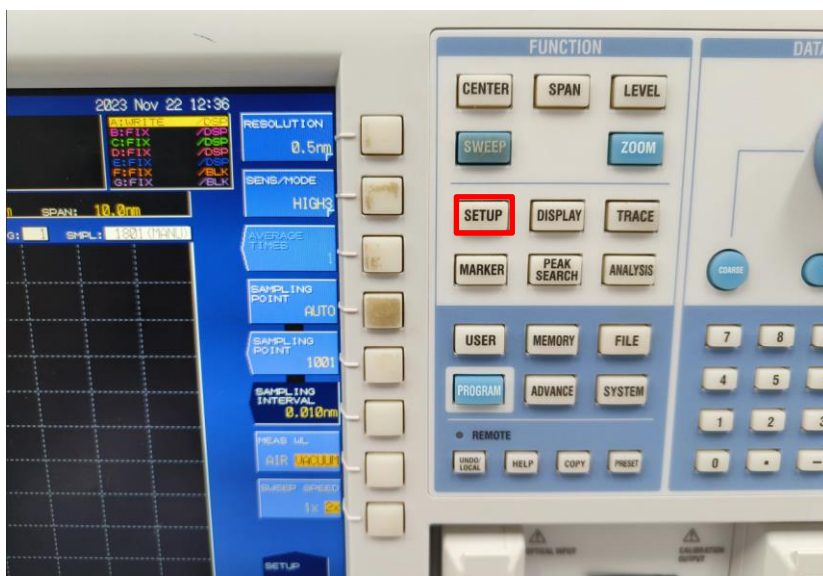


Рис. ПЗ.3. Вкладка SETUP

3. Во вкладке **SENS/MODE** выбрать режим чувствительности согласно заданиям выполняемой лабораторной работы, например **HIGH3**.

4. Во вкладке **SAMPLING INTERVAL** установить шаг, с которым будет производиться запись данных, набрав нужное значение на панели установки **4**, и нажать кнопку «**nm/ENTER**». Например, 0,01 нм.

Переключение между трассами:

1. На функциональной панели **3** (см. рис. ПЗ.1) нажать кнопку «**TRACE**».

2. Во вкладке «**ACTIVE TRACE**» (рис. ПЗ.4) выбрать нужную трассу для записи данных (трассы именованы от А до G, всего 8 шт.).

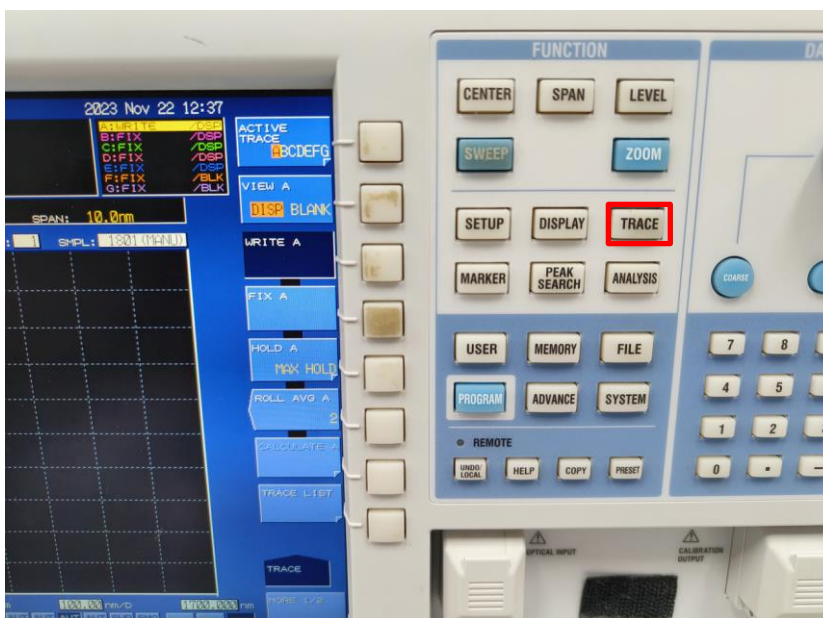


Рис. ПЗ.4. Вкладка TRACE

3. Во вкладке **VIEW** можно выводить график на экран прибора, нажав **DISP**, либо скрыть график с прибора, при этом сохранив данные, при нажатии **BLANK**.

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.

3. На функциональной панели **3** (см. рис. ПЗ.1) нажать кнопку «**SWEEP**». Записать данные, нажав кнопку **SINGLE** (см. рис. ПЗ.5).

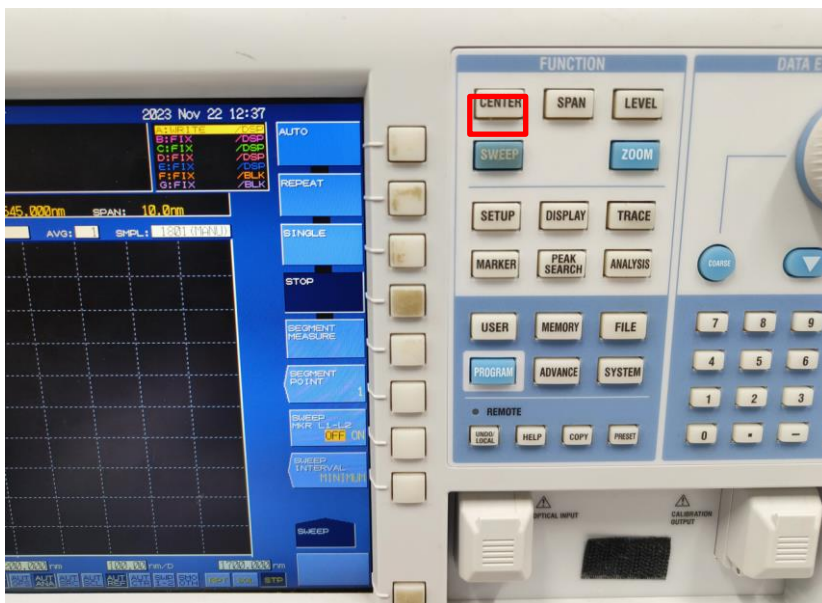


Рис. ПЗ.5. Вкладка SWEEP

4. Вернуться во вкладку **TRACE**, нажав кнопку «**TRACE**» на функциональной панели **3** и зафиксировать данные, нажав кнопку у вкладки **FIX**.

Масштабирование и перемещение графиков:

1. На функциональной панели **3** нажать кнопку «**LEVEL**».
2. Нажатие кнопки у вкладки **REF LEVEL** (см. рис. ПЗ.6) позволяет перемещать графики по вертикальной оси Y с помощью вращающегося манипулятора.

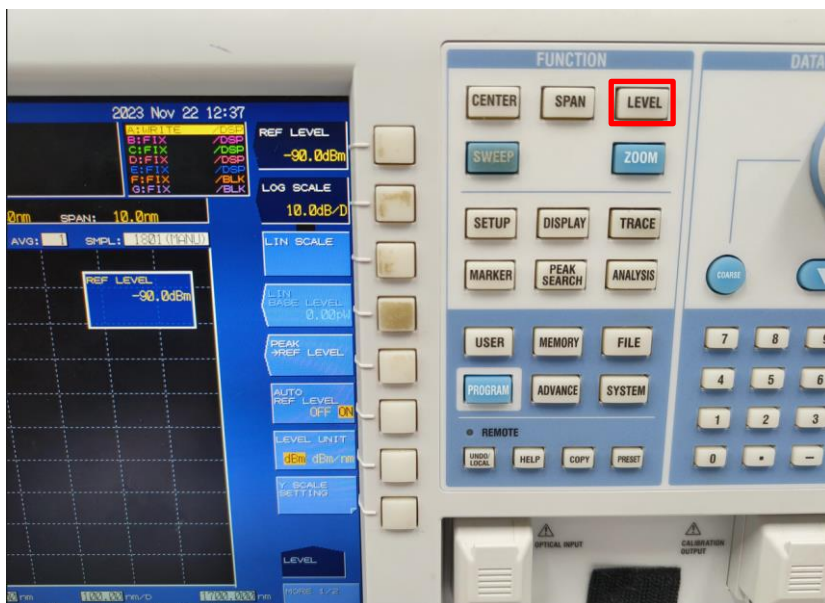


Рис. П3.6. Вкладка LEVEL

3. Нажатие кнопки у вкладки **LOG SCALE** позволяет произвести масштабирование графика в логарифмическом масштабе (в единицах дБм) с помощью вращающегося манипулятора.

4. Нажатие кнопки у вкладки **LIN SCALE** переводит логарифмическую шкалу ординат в линейную, что позволяет произвести масштабирование графика в линейном масштабе (в единицах Вт) с помощью вращающегося манипулятора.

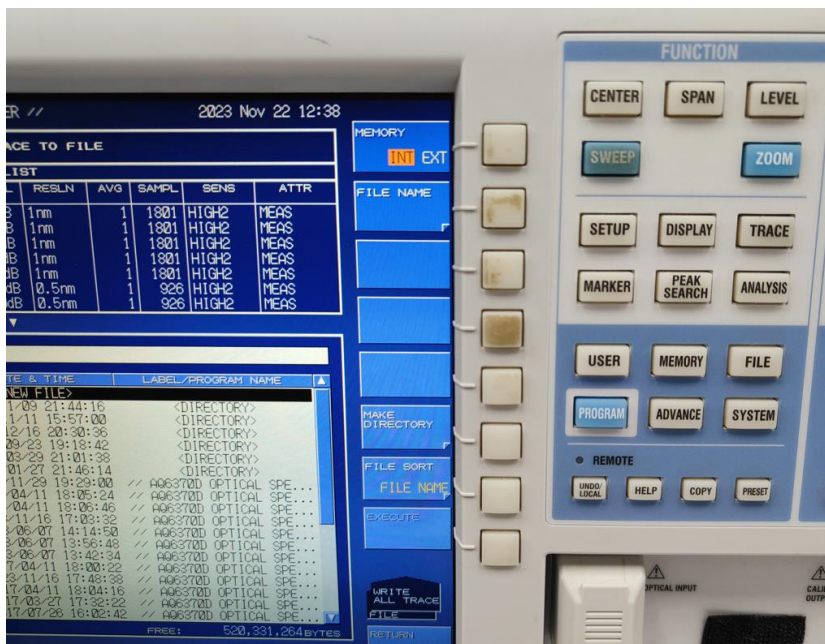


Рис. П3.8. Вкладка WRITE

6. С помощью вкладки **FILE NAME** можно дать удобное обозначение файлу. Для этого с помощью вращающегося манипулятора необходимо выделить нужную букву или цифру и нажать кнопку «ENTER». После переименования нажать кнопку «DONE».

7. Для сохранения данных нажать кнопку у вкладки **EXECUTE**.

8. Вернуться на вкладку **FILE**, нажав кнопку «FILE» на функциональной панели.

9. Нажать кнопку у вкладки **REMOVE USB STORGE** (см. рис.П3.7). Дождаться, когда надпись станет серой. Данные на внешний носитель записаны, извлеките его из USB-разъёма.

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

**Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода
IPSDD0906**

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602 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. П4.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П4.1 и П4.2.

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

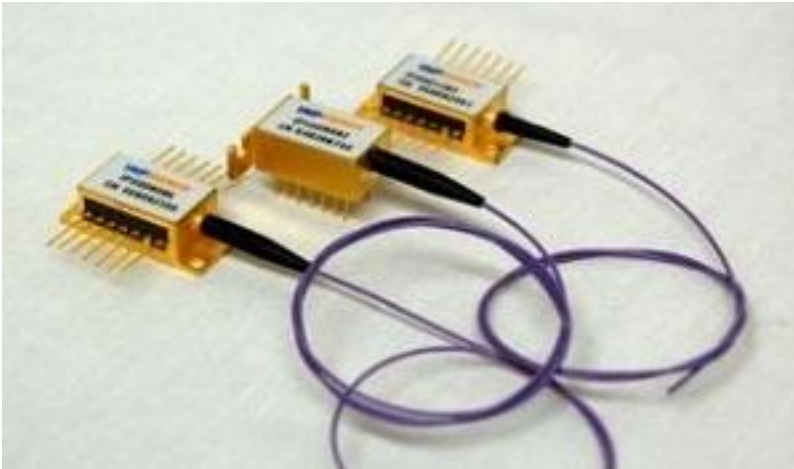


Рис. П4.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602

Таблица П4.1

**Основные электрооптические характеристики модуля
полупроводникового суперлюминесцентного диода
IPSDD0906**

Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Центральная длина волны λ_c , нм	960	970	990
Ширина спек- тра на уровне -3 дБ $\Delta\lambda(-3$ дБ), нм	22	25	—
Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Выходная мощность в оп- тическом во- локне P_0 , мВт	3	5	—
Глубина спек- тральной моду- ляции Δ , дБ	0,1	0,2	—
Рабочий ток I_p , мА	—	200	400

Таблица П4.2

Максимально допустимые параметры

Параметр	Минимальный	Максимальный
Рабочая температура, °C	–20	+70
Температура хранения, °C	–40	+85
Ток контроллера температуры $I_{\text{охл}}$, А	–	1,5
Напряжение контроллера температуры $U_{\text{охл}}$, В	–	3,6
Максимальный прямой ток диода $I_{\text{пр}}$, мА	–	400
Сопротивление термистора R , кОм	10 (при 25 °C)	
Поддерживаемая температура корпуса СЛД	25 °C	
Тип оптического кабеля	SMF / PMF / MMF	
Оболочка оптического кабеля	Плотная оболочка 250 мкм со свободной трубкой 900 мкм	
Корпус	14-контактный типа бабочка	
Температура свинцового припоя	260 °C в течение 10 секунд	

Модуль полупроводникового диода накачки FOL1437R50

Модуль полупроводникового диода накачки FOL1437R50 предназначен для накачки активных оптических волокон легированными ионами эрбия с центральной длиной волны 1480 нм и низким уровнем шума. Выходная оптическая мощность – до 500 мВт. Его внешний вид показан на рис. П5.1, основные электрооптические характеристики приведены в табл. П5.1 и П5.2.

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

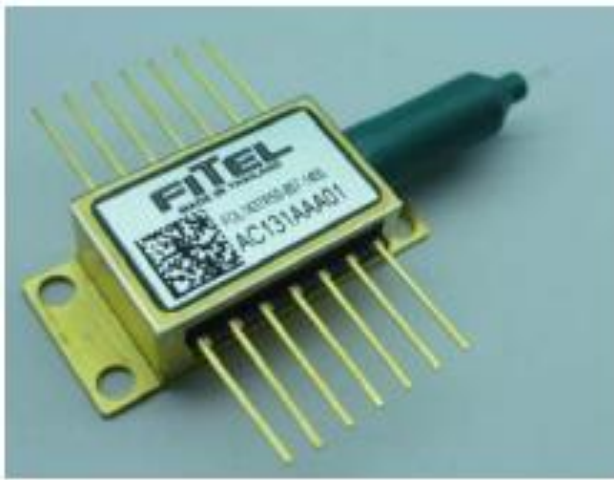


Рис. П5.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода FOL1437R50

Таблица П5.1

**Основные электрооптические характеристики модуля
полупроводникового суперлюминесцентного диода
FOL1437R50**

Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Центральная длина волны λ_c , нм	—	1467,5	—
Ширина спектра на уровне -3 дБ $\Delta\lambda(-3 \text{ дБ})$, нм	—	3,4	—
Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Выходная мощность в оптическом волокне P_0 , мВт	—	—	500

Таблица П5.2

Максимально допустимые параметры

Параметр	Минимальный	Максимальный
Рабочая температура, °С	-20	+70
Температура хранения, °С	-40	+85
Ток контроллера температуры $I_{охл}$, А	—	3,0
Напряжение контроллера температуры $U_{охл}$, В	—	3,5
Максимальный прямой ток диода $I_{пр}$, мА	—	400
Параметр	Минимальный	
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 свинцового припоя	260 °С в течение 10 секунд	

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01

Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода накачки 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. П6.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П6.1.

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



Рис. П6.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01

Таблица П6.1

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

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 на рис. П7.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П7.1 и П7.2.

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

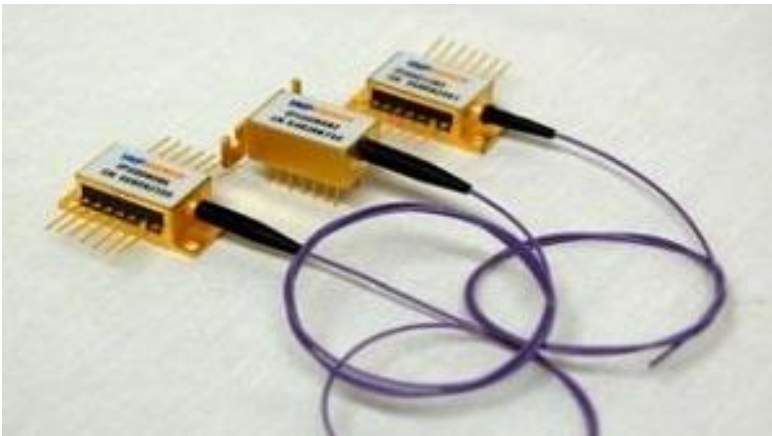


Рис. П7.1. Внешний вид модуля полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602

Таблица П7.1

**Основные электрооптические характеристики модуля
полупроводникового суперлюминесцентного диода
IPSDD1602**

Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Центральная длина волны λ_c , нм	1590	1610	1630
Ширина спек- тра на уровне -3 дБ $\Delta\lambda$ (-3 дБ), нм	60	65	—
Параметр	Минимальный	Средний	Максимальный
Выходная мощность в оптическом волокне P_0 , мВт	3	5	—
Глубина спек- тральной мо- дуляции Δ , дБ	—	0,15	0,5
Рабочий ток I_p , мА	—	250	300

Таблица П7.2

Максимально допустимые параметры

Параметр	Минималь- ный	Максимальный
Рабочая температура, °C	–20	+70
Температура хранения, °C	–40	+85
Ток контроллера температуры $I_{\text{охл}}$, А	–	1,5
Напряжение контроллера температуры $U_{\text{охл}}$, В	–	3,6
Максимальный прямой ток диода $I_{\text{пр}}$, мА	–	350
Сопротивление термистора R , кОм	10 (при 25 °C)	
Поддерживаемая температура корпуса СЛД	25 °C	
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 °C в течение 10 секунд	

Y-разветвитель производства ПНППК

Y-разветвитель производства ПНППК предназначен для разделения оптического излучения с широкой спектральной полосой излучения на центральной длине волны 1590–1630 нм. 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 SC.



Рис. П8.1. Y-разветвитель производства ПНППК

Таблица П8.1

Основные характеристики Y-разветвителя производства ПНППК

№ п/п	Параметр	Величина
1	Рабочая длина волны, нм	1550 ± 15
2	Коэффициент деления	50:50
3	Погрешность деления	$\pm 2 \%$
4	Максимальные собственные потери, дБ	$\leq 3,5$
5	Рабочий диапазон температур, °C	$-5 \sim +70$
6	Температура хранения, °C	$-40 \sim +85$

Оптический изолятор стандарта Telcordia

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. П9.1, а основные электрооптические характеристики приведены в табл. П9.1.



Рис. П9.1. Внешний вид оптического изолятора стандарта Telcordia

Таблица П9.1
Основные характеристики оптического изолятора стандарта Telcordia

№ п/п	Параметр	Величина
1	Рабочая длина волны, нм	1550 ± 15
2	Минимальная изоляция, дБ	≥ 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, °C	$-5 \sim +70$
8	Температура хранения, °C	$-40 \sim +85$

Оптический циркулятор GR-CIRC-55

Оптический Y-циркулятор предназначен для работы на длине волны 1550 нм при мощности оптического излучения до 300 мВт. Оптический Y-циркулятор представляет собой трех-портовое устройство с изолированными однонаправленными портами, обладающее возможностью разделения встречных лучей света и распределения их по соответствующим портам. Его внешний вид показан на рис. П10.1, а основные характеристики приведены в табл. П10.1.

Ввод и вывод оптического излучения – через приваренное к модулю одномодовое оптическое волокно с коннектором SC.

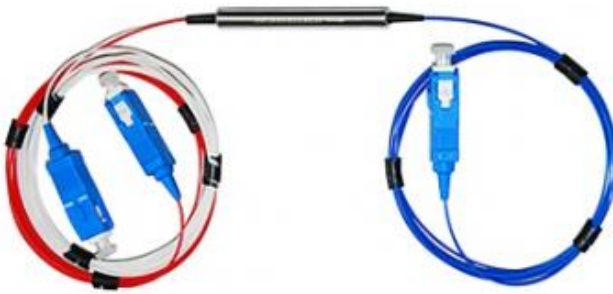


Рис. П10.1. Внешний вид оптического Y-циркулятора GR-CIRC-55

Таблица П10.1

**Основные характеристики оптического Y-циркулятора
GR-CIRC-55**

Параметр	Величина
Рабочая длина волны, нм	1550 ± 30
Тип волокна	SM
Коннекторы	SC / APC
Диаметр покрытия, мм	0,9
Параметр	Величина
Длина волокна, м	1,5
Максимальное вносимое затухание (между 1-м и 2-м портами), дБ	≤ 1,10
Максимальное вносимое затухание (между 2-м и 3-м портами), дБ	≤ 1,10
Поляризационные потери (между 1-м и 2-м портами), дБ	≤ 0,10
Поляризационные потери (между 2-м и 3-м портами), дБ	≤ 0,10
Минимальная изоляция между каналами, дБ	≥ 40
Дисперсионное рассеяние, дБ	≥ 50
Обратные потери, дБ	≥ 50
Поляризационная модовая дисперсия, пс	0,10
Допустимая мощность излучения, мВт	300
Температура эксплуатации, °С	От -40 до +70
Температура хранения, °С	От -40 до +85
Размеры, мм	-Ø5,5×50

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. П11.1, а основные характеристики – в табл. П11.1.

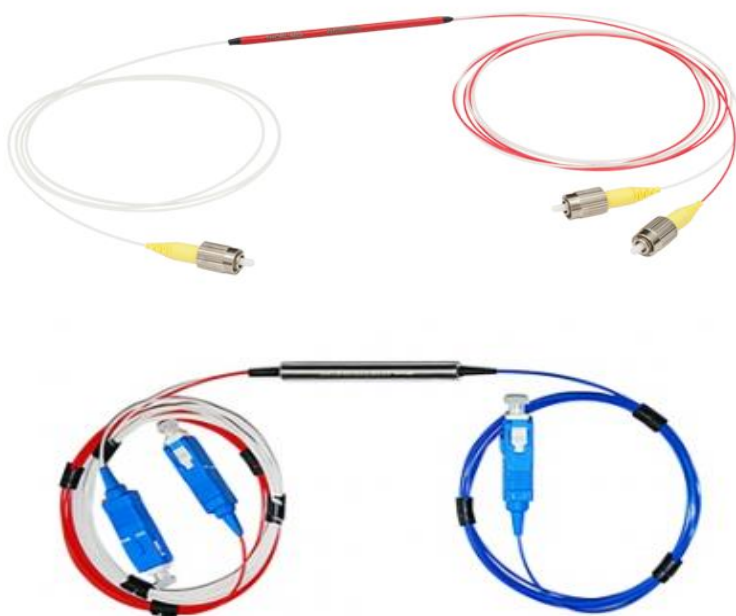


Рис. П10.1. Внешний вид оптического мультиплексора WDM 980/1550 нм

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	$\pm 10 / 20$
3	Минимальная изоляция, дБ	≥ 50
4	Собственные потери, дБ	$\leq 0,15$
5	Обратные потери, дБ	≥ 55
6	Рабочий диапазон температур, °C	$-5 \div +70$
7	Температура хранения, °C	$-40 \div +85$

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. 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).
5. Data Sheet FOL1437R50. URL: https://lenlasers.ru/upload/iblock/b2b/FOL1437_L.LS.pdf (accessed 29 August 2023).
6. SLED MODULES Products&Specification. URL: <https://www.exalos.com/sled-modules/> (accessed 29 August 2023).
7. 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).
8. Стандартный разветвитель 1310 / 1550 нм [Электронный ресурс]. URL: <https://lenlasers.ru/product/malogabaritnyj-standartnyj-razvetvitel-ssc/> (дата обращения: 29.08.2023).
9. 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).

10. 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/ (дата обращения: 29.08.2023).

11. Сплавной WDM 980/1550 нм серии WD9850 [Электронный ресурс]. URL:

<https://lenlasers.ru/product/splavnoy-wdm-980-1550-nm-serii-wd9850/> (дата обращения: 29.08.2023).

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
Работа 1. ИЗУЧЕНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ.....	4
1.1. Классификация пассивных элементов волоконной оптики.....	4
1.2. Оптические разветвители.....	6
1.3. Мультиплексоры и демультиплексоры.....	10
1.4. Порядок выполнения работы.....	13
1.4.1. Инструктаж.....	13
1.4.2. Исследование Y-разветвителя.....	14
1.4.3. Исследование мультиплексора.....	18
1.4.4. Исследование демультиплексора.....	25
Контрольные вопросы.....	25
Список литературы.....	26
Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА И Y-ЦИРКУЛЯТОРА.....	27
2.1. Краткая историческая справка.....	27
2.2. Поляризация света.....	27
2.2.1. Световая волна.....	27
2.2.2. Поляризация излучения.....	28
2.3. Магнитооптические явления.....	32
2.3.1. Эффект Зеемана. Классическая модель Г. А. Лоренца.....	32
2.3.2. Поворот плоскости поляризации в магнитном поле. Эффект Фарадея.....	36
2.4. Явление двулучепреломления.....	38
2.4.1. Преломление световых лучей в анизотропном кристалле.....	38
2.4.2. Поворот плоскости поляризации плоскополяризованной волны при прохождении через полуволновую фазовую пластину.....	40
2.5. Оптические изоляторы.....	42
2.5.1. Поляризационно-зависимые узкополосные неперестраиваемые волоконные оптические изоляторы.....	42
2.5.2. Поляризационно-зависимые узкополосные перестраиваемые оптические изоляторы.....	47
2.5.3. Поляризационно-независимые оптические изоляторы.....	48
2.5.4. Циркуляторы.....	51
2.6. Порядок выполнения работы.....	54
2.6.1. Инструктаж.....	54
2.6.2. Исследование оптического изолятора.....	55
2.6.3. Исследование оптического Y-циркулятора.....	59
2.7. Контрольные вопросы.....	64
Список литературы.....	65

Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ.....	66
3.1. Распространение света в волоконно-оптических кабелях.....	66
3.2. Волоконные брэгговские решётки.....	70
3.3. Метод записи брэгговской решётки в германо-силикатную сердцевину оптоволокна.....	74
3.4. Сдвиг длины волны Брэгга при растяжении оптоволокна.....	76
3.5. Порядок выполнения работы.....	78
3.6. Контрольные вопросы.....	93
Список литературы.....	94
Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ.....	95
4.1. Краткие теоретические сведения.....	95
4.2. Порядок выполнения работы.....	97
4.3. Контрольные вопросы.....	109
Список литературы.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Работа с источником излучения.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Измеритель оптической мощности E XFO-LTB-1.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Работа с анализатором оптических спектров Yokogawa AQ6370D.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD0906.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Модуль полупроводникового диода накачки FOL1437R50.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода EXS210108-01.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Модуль полупроводникового суперлюминесцентного диода IPSDD1602.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Y-разветвитель производства ПНППК.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Оптический изолятор стандарта Telcordia.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Оптический циркулятор GR-CIRC-55.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Мультиплексор WDM.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146

Учебное издание

Составители:

Вольхин Игорь Львович
Ажеганов Александр Сергеевич
Булатов Максим Игоревич
Луценко Андрей Сергеевич
Мальков Никита Андреевич

**Квантовая и оптическая электроника.
Часть 3. Волноводная фотоника
Лабораторный практикум**

Редактор *А. С. Серебренников*
Корректор *С. А. Вороненко*
Компьютерная верстка: *И. Л. Вольхин*

Объем данных 4,23 Мб
Подписано к использованию 05.12.2023

Размещено в открытом доступе
на сайте 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