

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 621.373

Трикшев Антон Игоревич

Когерентное сложение лазерных пучков  
волоконных лазеров

01.04.21 – лазерная физика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией  
Цветков Владимир Борисович

Москва – 2018

## Содержание

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                                                                                                                       | 4  |
| <b>Глава I. Литературный обзор.</b>                                                                                                                                            | 15 |
| 1.1. Методы сложения лазерных пучков.                                                                                                                                          | 15 |
| 1.2. Конструкции узкополосных задающих генераторов.                                                                                                                            | 25 |
| 1.3. Активные волокна для каскадов усиления.                                                                                                                                   | 29 |
| <b>ГЛАВА II. Одночастотный гибридный лазер мощностью 2.5 Вт.</b>                                                                                                               | 38 |
| 2.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР.                                                                        | 41 |
| 2.1.1. Зависимость мощности излучения от тока накачки.                                                                                                                         | 41 |
| 2.1.2. Спектр излучения лазерного диода.                                                                                                                                       | 42 |
| 2.1.3. Степень поляризации излучения лазерного диода.                                                                                                                          | 43 |
| 2.1.4. Измерение ширины линии генерации излучения полупроводникового лазерного диода с использованием сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.                      | 44 |
| 2.2. Определение основных параметров излучения после усиления.                                                                                                                 | 48 |
| 2.2.1. Спектральный состав выходного излучения после усиления.                                                                                                                 | 48 |
| 2.2.2. Зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки при максимальной мощности одночастотного полупроводникового лазерного диода.                               | 50 |
| 2.2.3. Поляризационная характеристика выходного излучения после усиления.                                                                                                      | 51 |
| 2.2.4. Влияние волоконного усилителя на ширину линии генерации одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра. | 54 |
| 2.2.5. Расходимость лазерного пучка.                                                                                                                                           | 56 |
| 2.3 Выводы к Главе II.                                                                                                                                                         | 58 |
| <b>Глава III. Фазировка семи каналов при когерентном сложении лазерных пучков с максимальной суммарной мощностью до 35 Вт.</b>                                                 | 59 |
| 3.1. Схема когерентного сложения.                                                                                                                                              | 59 |
| 3.1.1. Система волоконных ответвителей.                                                                                                                                        | 62 |
| 3.1.2. Фазовые корректоры.                                                                                                                                                     | 62 |
| 3.1.3. Система усиления рабочих каналов.                                                                                                                                       | 75 |
| 3.1.4. Система пространственного сложения пучков.                                                                                                                              | 76 |
| 3.1.5. Фотоприемная часть.                                                                                                                                                     | 82 |
| 3.1.6. Блок управления.                                                                                                                                                        | 82 |
| 3.2. Результаты.                                                                                                                                                               | 84 |
| 3.3. Выводы к Главе III.                                                                                                                                                       | 90 |
| <b>Глава IV. Одночастотный гибридный лазер мощностью 160 Вт на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР и активного волокна конической формы.</b>        | 91 |
| 4.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР (1062 нм).                                                              | 92 |
| 4.1.1. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока накачки.                                                                                                         | 93 |
| 4.1.2. Спектр излучения лазерного диода.                                                                                                                                       | 93 |
| 4.1.3. Поляризационная характеристика излучения лазерного диода.                                                                                                               | 94 |
| 4.1.4. Ширина линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего                                                               | 95 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| волоконного кольцевого интерферометра.                                                                                                                                                                                                                                   |     |
| 4.2. Волоконный предусилитель на GTWave волокне.                                                                                                                                                                                                                         | 95  |
| 4.2.1. Исследование спектральных характеристик диодов накачки.                                                                                                                                                                                                           | 97  |
| 4.2.2. Спектры спонтанной люминесценции и спектры выходного излучения после усиления в зависимости от длины активного волокна и длины волны накачки.                                                                                                                     | 98  |
| 4.2.3. Мощностные характеристики усиленного выходного излучения и излучения, распространяющегося в обратном направлении.                                                                                                                                                 | 103 |
| 4.2.4. Поляризационная характеристика выходного излучения после усиления.                                                                                                                                                                                                | 104 |
| 4.2.5. Ширина линии генерации выходного излучения после усиления с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.                                                                                                                                           | 105 |
| 4.2.6. Мощностные и спектральные характеристики предусилителя гибридного 160 Вт лазера.                                                                                                                                                                                  | 106 |
| 4.3. Параметры усилителя на коническом волокне.                                                                                                                                                                                                                          | 107 |
| 4.4. Зависимость выходной мощности излучения и мощности излучения распространяющегося в обратном направлении от мощности накачки.                                                                                                                                        | 109 |
| 4.5. Спектральная характеристика выходного излучения.                                                                                                                                                                                                                    | 110 |
| 4.6. Выводы к Главе IV.                                                                                                                                                                                                                                                  | 113 |
| <b>Глава V. Одночастотный гибридный лазер мощностью 120 Вт на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР и активного волокна с широким полем моды. Фазировка двух каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью до 60 Вт.</b> | 114 |
| 5.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР (1080 нм).                                                                                                                                                        | 116 |
| 5.1.1. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока накачки.                                                                                                                                                                                                   | 116 |
| 5.1.2. Спектр излучения лазерного диода.                                                                                                                                                                                                                                 | 117 |
| 5.1.3. Поляризационная характеристика излучения лазерного диода.                                                                                                                                                                                                         | 117 |
| 5.1.4. Ширина линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.                                                                                                                  | 118 |
| 5.2. Многокаскадный волоконный усилитель.                                                                                                                                                                                                                                | 119 |
| 5.3. Фазировка двух каналов при когерентном сложении лазерных пучков с максимальной суммарной мощностью до 60 Вт.                                                                                                                                                        | 121 |
| 5.4. Выводы к Главе V.                                                                                                                                                                                                                                                   | 124 |
| <b>Заключение.</b>                                                                                                                                                                                                                                                       | 125 |
| Литература.                                                                                                                                                                                                                                                              | 128 |

## Введение

**Актуальность работы.** Для использования в технологических и специальных целях требуются лазеры с выходной мощностью от сотен ватт до нескольких десятков киловатт. Одновременно предъявляются высокие требования к качеству излучения этих лазеров. До недавнего времени мощности излучения более нескольких киловатт при длительной работе, в основном, были доступны только при использовании химических или 10-мкм газовых лазеров, нашедших широкое применение в промышленности. Однако зачастую предпочтительным является диапазон длин волн  $\sim 1$  мкм. По мере увеличения мощности, повышения надежности и снижения стоимости лазерных диодов волоконные и твердотельные лазеры с диодной накачкой становятся конкурентами существующих газовых и химических лазеров. Основным недостатком использования полупроводниковых лазеров в качестве источников накачки является их высокая стоимость, однако она с лихвой компенсируется компактностью и простотой обслуживания.

Волоконные лазеры являются относительно новым типом лазеров. Данное направление активно развивается в последние 25 лет [1]. В качестве активной среды волоконных лазеров используются оптические волокна, легированные редкоземельными элементами. Это определяет такие преимущества волоконных лазеров как волноводный характер распространения излучения накачки и сигнала, компактность, эффективное рассеяние тепла за счет большой площади боковой поверхности и др. Использование волокон, рассчитанных на одномодовый режим распространения сигнала, обеспечивает расходимость выходного излучения близкую к дифракционной. В то же время, малый диаметр легированной сердцевины в сочетании с относительно большой длиной волокна увеличивают вероятность проявления нелинейных эффектов, таких как вынужденное рассеяние Манделштама - Бриллюэна (ВРМБ) [2-7] и вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) [8-12]. Также предел лучевой прочности для чистой двуокиси кремния составляет  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> [13,14].

Эти факты обуславливают преимущественное использование волоконных лазеров в качестве источников непрерывного излучения или для генерации импульсов с малой энергией (как правило, не выше нескольких нДж).

Для предотвращения или подавления указанных выше эффектов при создании мощных волоконных лазеров используют волокна с как можно большим диаметром сердцевины. Для сохранения одномодового характера распространения излучения используется снижение разности показателя преломления сердцевины и оболочки до уровня 0.001-0.002 и изгиба волокна с радиусом, обеспечивающим излучение высших мод без внесения дополнительных потерь для основной моды. При этом диаметр сердцевины 40 мкм можно считать предельным для активных световодов. Таким образом, максимальная мощность лазера ограничивается уровнем в несколько кВт. Следует отметить, что производимые, например, компанией IPG более мощные лазеры представляют собой многомодовые излучатели. Для увеличения мощности одним из способов является сложение излучения ряда волоконных лазеров. [15-16, 17, 18, 19]

Когерентное и спектральное сложение лазерных пучков, активно развиваемое в последние годы, привело к значительному росту мощности волоконных и твердотельных лазерных систем [15-19]. При этом мощность генерации в непрерывном режиме достигает величин в несколько десятков кВт при сохранении высокого качества результирующего излучения, близкого к дифракционному пределу [20, 21]. Оба метода обладают своими преимуществами и недостатками. Спектральное сложение весьма удобно в случае использования диодных или волоконных лазеров с относительно небольшой мощностью генерации единичного излучателя (до нескольких десятков Вт) и широким спектром излучения [22]. Принципиальная сложность использования данного метода сложения излучения мощных волоконных лазеров заключается в том, что обладающие мощностью 1 кВт лазеры имеют широкую линию излучения (несколько нм). Таким образом, возможное число суммируемых источников, излучающих в спектральном диапазоне усиления ионов иттербия (1.06 - 1.16 мкм)

не может быть большим. В случае сложения пучков мощных лазеров, предпочтительной является схема когерентного сложения [23, 24]. С одной стороны метод когерентного сложения лазерных пучков требует контроля и поддержания фазы излучения в каждом канале с высокой точностью, вплоть до 0.01 рад, с другой - позволяет получать высокие выходные мощности, вплоть до 100 кВт [25], без концентрации всей мощности на каком-либо одном оптическом элементе, как в случае спектрального сложения.

Однако при наличии большого количества экспериментальных и теоретических работ, посвященных различным методам сложения лазерных пучков с целью получения высокой мощности и яркости излучения, в настоящее время не существует единственного и наилучшего решения этого вопроса. В случае когерентного сложения излучения основные проблемы лежат в области точности и быстродействия фазовой подстройки излучения разных каналов. Другие проблемы являются техническими (конструктивными), но не менее важными. В частности решение вопроса о способах усиления лазерного излучения (волоконные или твердотельные усилители) и методах измерения и подстройки фазы излучения в лазерных каналах.

Все вышесказанное определило цели и задачи диссертационной работы.

Основной целью настоящей работы являлось создание полностью волоконной системы когерентного сложения лазерных пучков волоконных лазеров ближнего ИК диапазона и решение вопросов, связанных с поддержанием постоянной разности фаз между лазерными каналами в условиях случайного изменения фазы излучения в каждом канале. При этом учитывалось, что создаваемая лазерная система должна являться частью более мощной лазерной установки с усилителями на кристаллах, легированных ионами неодима, в выходных каскадах.

В процессе достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- реализация одночастотного задающего генератора на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с волоконной брэгговской решеткой (ВБР) и волоконного иттербиевого усилителя;
- создание волоконного усилителя в диапазоне мощностей до 200 Вт для одночастотного задающего генератора на основе активного GTWave волокна (названо по первым буквам фамилий авторов [26, 27]), волокна типа LMA (large mode area - волокно с большим полем моды) и активного волокна конической формы;
- исследование влияния волоконного усилителя на параметры излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР, такие как спектральный состав, ширина линии генерации, степень поляризации;
- оптимизация таких параметров волоконных усилителей, как длина волны накачки и длина активного волокна;
- создание системы контроля и удержания фазы в нескольких каналах лазерной установки;
- реализация семиканальной системы когерентного сложения лазерных пучков и последующее исследование профиля интенсивности суммарного поля; сравнение полученных данных с теоретическими расчетами;
- реализация мощной двухканальной системы когерентного сложения лазерных пучков и последующее исследование профиля интенсивности суммарного поля; сравнение полученных данных с теоретическими расчетами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложены, теоретически исследованы и экспериментально реализованы способ и устройство когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием.
2. Впервые реализована гибридная лазерная система генерации одночастотного излучения с выходной мощностью до 130 Вт на коническом иттербиевом волокне.
3. Впервые созданы двух- и семиканальная полностью волоконные системы с когерентным сложением излучения с выходной мощностью до 60 и 35 ватт соответственно с использованием оптоволоконных корректоров фазы с пьезоэлектрическим управлением и быстродействием лучше 0,1 с.

### Практическая ценность

Результаты исследований имеют широкий круг возможных применений, как в научных, так и в практических целях (например, лидары для дистанционного зондирования ветровых потоков, осуществления климатических наблюдений и повышения безопасности полетов самолетов в условиях возмущенной атмосферы [28, 29]; лазерный детектор гравитационных волн, удаленное лазерное воздействие на конструкционные материалы).

По результатам работы получен патент RU 2488862 C1 "Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием".

Положения, выносимые на защиту:

- Использование гибридной схемы с одночастотным полупроводниковым лазерным диодом с волоконной брэгговской решеткой и волоконным иттербиевым усилителем на основе GTWave волокна позволяет создать задающий генератор с шириной полосы излучения около 2 МГц и степенью поляризации выше 0,9;
- Использование волоконных усилителей, созданных на основе иттербиевого волокна без сохранения поляризации, в гибридных системах с выходной мощностью до 5 Вт не влияет на ширину линии и оказывает слабое влияние на поляризацию усиленного излучения, которое возможно компенсировать включением в схему усилителей контроллеров поляризации;
- Применение гибридной схемы с задающим генератором на одночастотном полупроводниковом лазерном диоде с волоконной брэгговской решеткой и последующее усиление в волоконных иттербиевых усилителях с оконечным каскадом на активном волокне с широким полем моды позволяют создать одночастотную лазерную систему с высокой выходной мощностью;
- Применение гибридной схемы с задающим генератором на одночастотном полупроводниковом лазерном диоде с волоконной брэгговской решеткой и последующее усиление в волоконных иттербиевых усилителях с оконечным каскадом на активном волокне конической формы позволяют создать одночастотную лазерную систему с высокой выходной мощностью;
- Возможна реализация когерентного сложения (фазировки) в полностью волоконной семиканальной лазерной системе с суммарной мощностью около 35 Вт, построенной по схеме задающий генератор – каскад усилителей, с помощью подстройки фазы оптоволоконными корректорами с пьезоэлектрическим управлением;
- Возможна реализация когерентного сложения в полностью волоконной двухканальной лазерной системе с суммарной мощностью около 60 Вт с

помощью подстройки фазы оптоволоконными корректорами с пьезоэлектрическим управлением.

### Апробация работы.

Основные результаты работы изложены в 6 работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах и одном патенте. Общее число опубликованных автором работ по теме диссертации 16 (включая тезисы докладов).

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.М. Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 656-658.
2. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. Одночастотный гибридный лазер с выходной мощностью до 3 Вт на длине волны 1064 нм //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 5. – С. 417-419.
3. Пырков Ю.Н., Трикшев А.И., Цветков В.Б. Фазировка нескольких усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 9. – С. 790-793.
4. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B., Filatova S.A., Kertulla J., Filippov V., Chamorovskiy Yu.K. and Okhotnikov O.G. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier //Laser Physics Letters. – 2013. – Т. 10. – №. 6. – С. 065101.
5. Трикшев А.И., Пырков Ю.Н., Цветков В.Б. Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной

мощностью 60 Вт //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 11. – С. 1045-1048.

6. Трикшев А.И., Цветков В.Б. Теоретический расчет спектров усиленной спонтанной люминесценции иттербиевого волокна //Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22. – №. 6. – С. 98-103.
7. Пырков Ю.Н., Курков А.С., Трикшев А.И., Цветков В.Б., Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием. Патент РФ № RU2 488 862 C1 Опубликовано: 27.07.2013 Бюл. № 21

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

1. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б.. Гибридный одночастотный лазер с мощностью более 300 мВт. Сборник трудов 9-й Всероссийской молодёжной научной школы "Материалы нано-, микро- оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение", Издательство Мордовского университета, Саранск, 2010, С. 65
2. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б.. Гибридный одночастотный лазер с мощностью до 3 Вт. 5-я Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям, Саров, 2011
3. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Lyashedko A.D., Seregin V.F., Tsvetkov V.B. Single-frequency laser diode master oscillator fiber preamplifier Nd:YAG power amplifier laser system. International Seminar «Physics of Lasers» of 20th International laser physics workshop LPHYS'11, Sarajevo, 2011, P4.3
4. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. Гибридный одночастотный лазер с мощностью до 3 Вт. Сборник трудов 10-й Всероссийской молодёжной научной школы "Материалы нано-, микро- оптоэлектроники и волоконной

оптики: физические свойства и применение", Издательство Мордовского университета, Саранск, 2011, С. 127.

5. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. Гибридный одночастотный лазер с мощностью до 3 Вт. Материалы 5-го Российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск. 2012, С. 125-126.
6. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Шолохов Е.М. Система когерентного сложения излучения иттербиевых волоконных лазеров, XI международная конференция "Забабахинские Научные Чтения". Снежинск. 2012, с. 76
7. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B., Filatova S.A., Kertulla J., Filippov V., Chamorovskiyy Yu.K. and Okhotnikov O.G. 160 W single-frequency laser based on active tapered double-clad fiber amplifier. Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике ICONO/LAT, Москва, 2013, LWJ6, – С. 70.
8. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Филатова С.А., Кертулла Ю, Филиппов В., Чаморовский Ю.К., Охотников О.Г., Одночастотный источник мощностью 160 Вт на основе активного конического волокна. 4-я Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2013, Пермь, //Фотон-экспресс. – 2013. – №. 6 (110). – С. 209.
9. Трикшев А.И., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н. Когерентное сложение излучения волоконных лазеров. 5-я Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2015, Пермь, //Фотон-экспресс. – 2015. – № 6 (126). – С. 96
10. Trikshev A.I., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B. 120W single-frequency laser based on LMA double-clad fiber amplifier, 17-я международная конференция "Оптика лазеров", Санкт-Петербург, 2016, ThR2-p01

### Личный вклад автора.

Содержание диссертации отражает личный вклад автора в опубликованные работы. Комплекс исследований, результаты которых приведены в настоящей диссертационной работе, выполнен автором лично или при определяющем его участии и заключается в разработке методов исследования, проведении численных расчетов и экспериментальных измерений, в написании научных статей и их подготовке к публикации. Работа выполнена в отделе Лазерных кристаллов и твердотельных лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 139 страниц, включая 90 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 108 наименований.

### Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи. Кратко рассмотрено состояние вопроса на момент начала исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и ее практическая ценность, описаны основные результаты и вклад автора в решение поставленных задач.

Первая глава диссертации носит обзорно-аналитический характер. В ней рассмотрены существующие к настоящему моменту методы сложения излучения нескольких лазерных источников. Приведен также обзор одночастотных задающих генераторов и активных волокон для создания системы когерентного сложения лазерных пучков.

Вторая глава посвящена описанию гибридного одночастотного лазера с выходной мощностью излучения до 3 Вт. В ней представлены результаты

исследования параметров излучения (спектральный состав, поляризация, ширина линии генерации) задающего генератора, в качестве которого использовался полупроводниковый лазерный диод с волоконной брэгговской решеткой, а также исследование влияния двухкаскадного волоконного иттербиевого усилителя на данные параметры.

Третья глава содержит результаты исследования системы когерентного сложения 7-ми лазерных каналов. В главе описаны стенд для исследования основных параметров системы и принцип фазовой подстройки каналов, основанный на синхронном детектировании выходного излучения. Также приведен сравнительный анализ полученных результатов с теоретическим расчетом.

Материалы, представленные в четвертой главе, связаны с работами по созданию и изучению одночастотного гибридного лазера на коническом волокне с выходной мощностью до 160 Вт. Приведены результаты исследования параметров его выходного излучения.

Пятая глава содержит результаты исследования одночастотного гибридного лазера на основе LMA волокна мощностью до 120 Вт. Изучена двухканальная система когерентного сложения, рабочие каналы которой представляют собой гибридные лазеры на основе LMA волокна.

В заключении приведены основные результаты работы и дан список публикаций по теме диссертации.

## Глава I. Литературный обзор.

### 1.1. Методы сложения лазерных пучков.

Волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных ионами трехвалентного иттербия, на сегодняшний день являются самыми яркими источниками лазерного излучения. Использование в качестве активной примеси ионов  $Yb^{3+}$  во многом определяет уникальные характеристики таких лазеров. Преимуществом такого выбора активной примеси является низкое тепловыделение в активной среде за счёт небольшой величины стоксова сдвига. На широкое применение иттербиевых волоконных лазеров повлияла также высокая лучевая стойкость и оптическая прозрачность кварцевого стекла, и геометрия активной среды, обладающая большим соотношением площади поверхности к объёму, что обеспечивает эффективный теплоотвод.

Методы сложения лазерных пучков можно разделить на две большие группы: когерентные методы и некогерентные (рис.1).

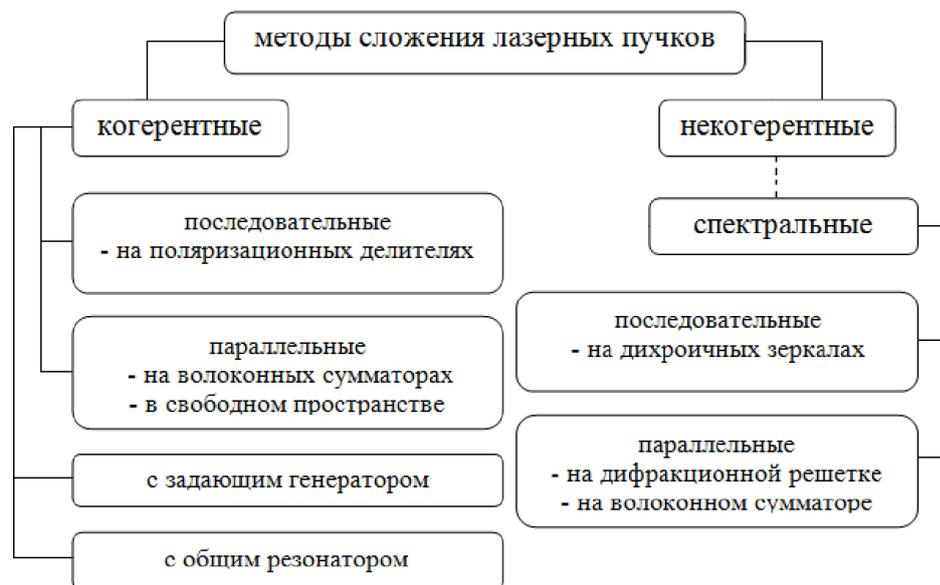


Рис. 1. Методы сложения лазерных пучков.

При когерентном сложении фазы излучения каждого источника на выходе из системы синхронизированы друг с другом, при некогерентном синхронизация отсутствует. Недостатком некогерентного метода сложения лазерных пучков

является уменьшение яркости результирующего пучка излучения в результате увеличения расходимости излучения. Отдельной группой некогерентного сложения можно выделить спектральное сложение лазерных каналов, при котором яркость суммарного излучения может быть увеличена. По структурной организации сложения можно выделить последовательное и параллельное расположение суммируемых каналов.

Использование метода **спектрального сложения** излучения волоконных лазеров основано на том, что однородное и неоднородное уширение линии излучения ионов иттербия в оптическом волокне позволяет получать генерацию иттербиевых лазеров на различных длинах волн в достаточно широком спектральном диапазоне. На рис. 2 представлена спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации лазеров на основе алюмосиликатного волокна с размером внутренней оболочки 120 мкм [30].

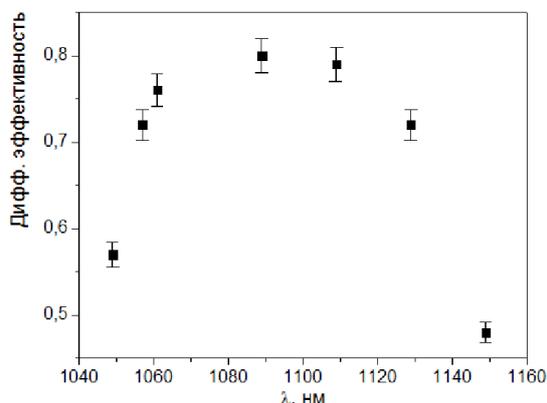


Рис. 2. Спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации иттербиевых лазеров.

Эффективность в коротковолновой части спектра может быть увеличена путем использования активного волокна на основе фосфорсиликатного стекла, а в длинноволновой — путем нагрева активной среды [31]. Общая спектральная ширина диапазона эффективной генерации может быть оценена в 100-120 нм.

Для сложения излучения на разных длинах волн необходимо использование дихроичных или диспергирующих элементов. Такие спектральные устройства отражают излучение, падающее под определенным углом и на длине волны, для

которых выполняется условие резонанса, и пропускают излучение на других длинах волн. Наиболее перспективным выглядит использование объемных брэгговских решеток [32, 33]. Такие решетки или дихроичные зеркала могут располагаться в свободном пространстве по траектории лазерного луча, обеспечивая ввод в общий луч излучения от дополнительных источников. [34, 35]

Примером последовательного спектрального сложения лазерного сложения является сложение на дихроичных зеркалах (рис. 3). Каждое зеркало имеет покрытие на пропускание определенной полосы частот. Недостатками такой схемы при получении большой средней мощности являются: 1) зеркала несут на себе оптическую нагрузку всех предыдущих каналов, 2) растущие потери на каждом последующем зеркале. Также к недостаткам можно отнести сложность изготовления таких элементов, а количество элементов равно числу суммируемых каналов. Однако в работах [34-36] чирпированные дихроичные зеркала показывают отличные результаты в схемах по получению ультракоротких импульсов (до 1.8 фс). Также методы сложения на дихроичных зеркалах активно применяются в микроскопии высокого разрешения PALM (photoactivated localization microscopy) [37, 38].

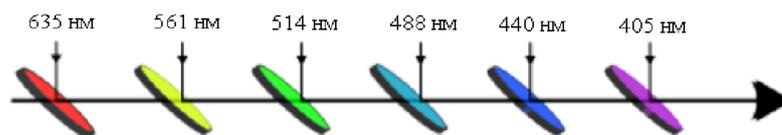
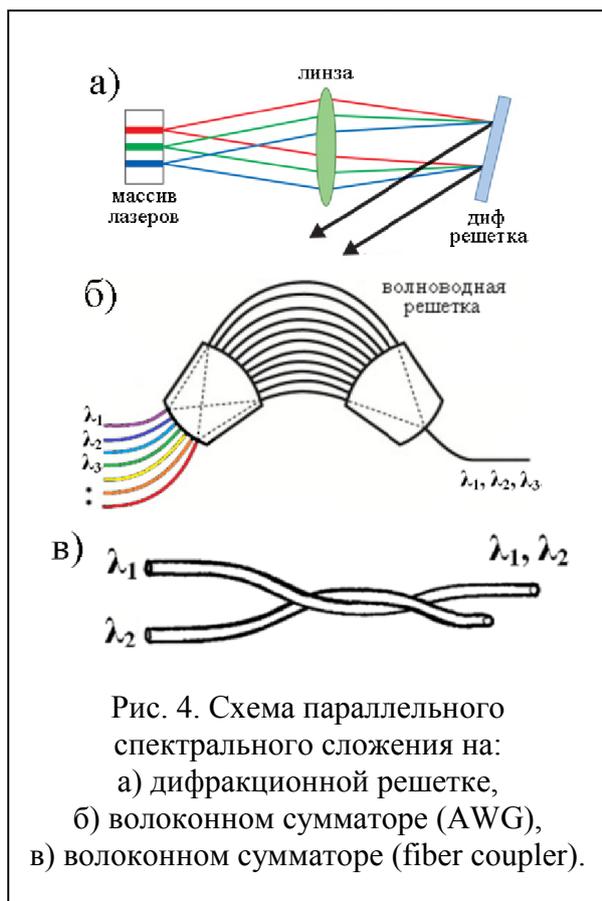


Рис. 3.Схема спектрального сложения на дихроичных зеркалах,

Примерами параллельного спектрального сложения являются сложение на дифракционных решетках (рис. 4а) и волоконных сумматорах типа AWG (Arrayed wave guide gratings - массив планарных волноводов, рис. 4б) [39, 40] или типа fiber coupler (полностью волоконный сумматор, рис.4в). Каждый тип сумматора используется под свои задачи. Дифракционные решетки используются там, где необходимо получать выходное излучение высокой мощности от сотен ватт [41, 42] до нескольких киловатт [43].



К недостаткам такой схемы можно отнести то, что вся мощность концентрируется на одном элементе, а при построении систем на объемных брэгговских решетках требуется число элементов равное числу каналов сложения, что затрудняет масштабируемость системы.

Волоконные сумматоры на планарных волноводах (AWG) широко применяются в системах оптоволоконной передачи данных [44, 45], но не подходят для построения мощных лазерных систем.

Полностью волоконные сумматоры используются в качестве элемента схемы накачки активных волокон, как в оболочку [46, 47], так и в сердцевину [48, 49]. Поэтому являются неотъемлемой частью при построении мощных волоконных систем. В основном используются как элементы в каскадах усиления.

Как указывалось выше, недостаток использования спектрального сложения излучения мощных волоконных лазеров заключается в большой ширине линии излучения одиночного источника (несколько нм). Таким образом, число суммируемых источников, излучающих в диапазоне 1.06-1.16 составляет 20-30, а суммарная мощность не превышает 20-30 кВт. Решение этой проблемы требует исследования механизмов уширения линии излучения при росте мощности генерации. Кроме того, один из спектральных элементов обязательно находится в пучке с суммарной мощностью всей системы и, таким образом, суммарная мощность излучения ограничивается оптической стойкостью этого элемента.

Следовательно, спектральное сложение мало применимо для создания мощных лазерных систем, несмотря на высокую яркость суммарного излучения.

Одна из сложностей, возникающих при использовании метода **когерентного сложения**, заключается в использовании узкополосного источника излучения для реализации возможно большей длины когерентности. Принципиальная сложность построения мощного узкополосного источника в оптоволоконном исполнении заключается в существовании эффекта вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ). ВРМБ проявляется в виде генерации стоксова излучения с меньшей, чем у накачки, частотой, причем величина частотного сдвига определяется нелинейной средой. Стоксова волна при ВРМБ распространяется навстречу волне накачки, величина смещения составляет около 10 ГГц. Поскольку ВРМБ-усиление зависит от свойств материала, составляющего оптическое волокно (плотности, показателя преломления, скорости звука), а порог ВРМБ зависит от длины волокна и площади моды, то эти свойства могут быть использованы для подавления ВРМБ в активных волокнах. Наиболее эффективными методами является неоднородное уширение спектра ВРМБ-усиления за счет градиента температуры и механических напряжений вдоль волокна (см., например рис.5 [2]), и оптимизация профиля показателя преломления и состава волокна.

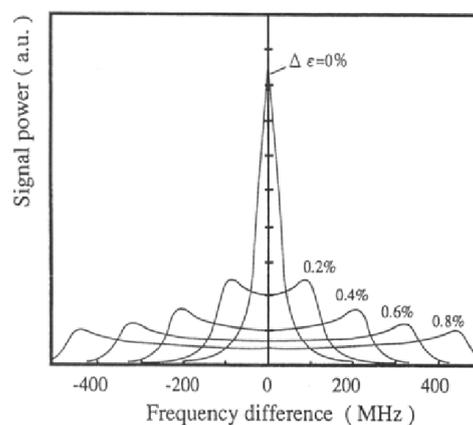


Рис. 5. Расчетное изменение спектра ВРМБ при приложении неоднородного напряжения с амплитудой  $\Delta\epsilon$ .

В работе [5] для повышения порога ВРМБ предлагается оптимизировать профиль показателя преломления таким образом, чтобы минимизировать

интеграл перекрытия оптической и акустической волн. На рис. 6 представлены модельные профили и распределения оптического поля и полей 3 акустических волн.

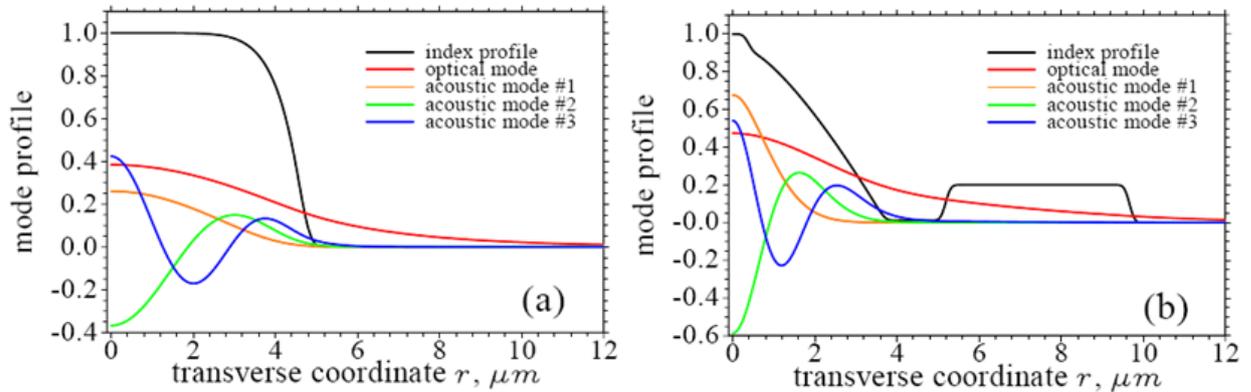


Рис. 6. Модельные профили показателя преломления и распределения оптического поля и полей 3 акустических волн для двух волокон: а) Corning SMF-28e, б) Corning LEAF® Fiber

Показано, что в случае профиля (b) с «растянутой» границей сердцевины и оболочки, и дополнительным кольцом в оболочке удается повысить порог ВРМБ примерно в 2 раза. Однако этот метод слабо применим для активных волокон с большим радиусом сердцевины, где требование поддержания одномодового режима и малое значение разности показателей преломления сердцевины и оболочки не позволяют существенно варьировать профиль показателя преломления.

Акустические свойства оптического волокна зависят от типа легирующих добавок. В работе [50] было показано, что легирование оболочки волокна оксидом алюминия приводит к подавлению ВРМБ за счет уменьшения показателя преломления для акустической волны. В работе [51] предлагается использовать для формирования профиля слои, легированные оксидами германия и алюминия. Это позволяет деформировать распределение акустического поля и уменьшить интеграл перекрытия с оптическим полем. На рис. 7 представлены соответствующие модельные профили и распределения оптических и акустических полей. На основании расчета перекрытия оптических и акустических полей был выбран профиль типа (a) на рис. 7.

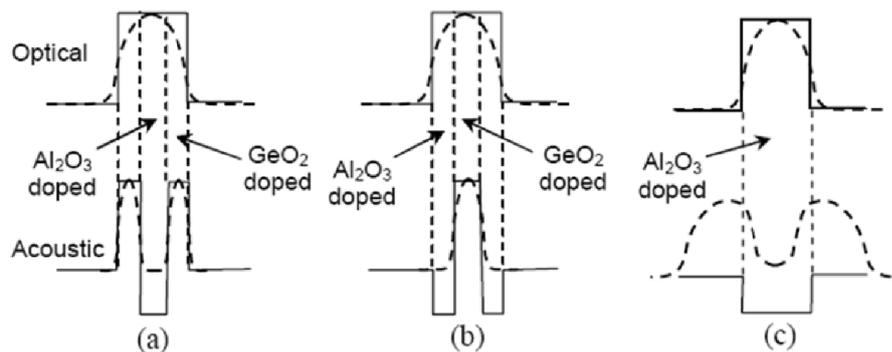


Рис. 7. Модельные профили показателя преломления и распределения оптических и акустических полей в зависимости от легирования, а) сильное легирование  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в центральной части и  $\text{GeO}_2$  по периферии сердцевины, б) сильное легирование  $\text{GeO}_2$  в центральной части и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по периферии сердцевины, в) сильное легирование сердцевины  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , легирование F оболочки

При этом для уменьшения влияния границы двух слоев концентрация Al линейно уменьшалась при увеличении радиуса, а Ge – увеличивалась. Использование данного подхода в сочетании с градиентом температуры волокна с перепадом около  $120^\circ$  позволило продемонстрировать узкополосный источник с выходной мощностью более 500 Вт [52]. При этом мощность, распространяющаяся в обратном направлении, не превысила 0.5 Вт.

Таким образом, для реализации когерентного сложения излучения волоконных лазеров требуется как обоснованного выбора ширины линии излучения, так и активного волокна, и схемы усилителей. [\[53-58\]](#)

Схема последовательного **когерентного сложения** на поляризационных делителях представлена на рис. 8. Также как и при спектральном сложении, при использовании данного метода довольно трудно получить на выходе предельно высокую среднюю мощность, поскольку последний элемент несет на себе всю оптическую нагрузку. Однако результирующий пучок имеет очень высокое дифракционное качество  $M^2 < 1.1$  [53-58]. К недостаткам данной схемы можно отнести также необходимость использования достаточно большого числа оптических элементов, что затрудняет юстировку и масштабируемость схемы.

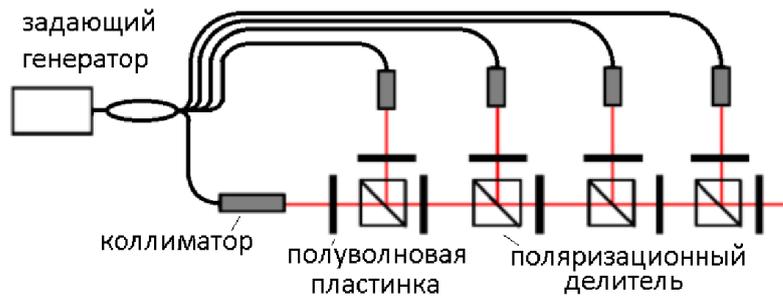


Рис. 8.Схема когерентного сложения на поляризационных делителях.

Схема параллельного когерентного сложения на волоконных сумматорах представлена на рис. 9. Используя данную схему можно получать выходное излучение с отличным качеством выходного пучка с мощностями до нескольких сотен ватт [53, 59]. Плюсом такой схемы является отсутствие активных элементов подстройки фазы пучков в каналах, поскольку реализуется метод общего резонатора. Недостатком схемы является трудность масштабирования для получения киловаттных мощностей, что связано с технологическими сложностями изготовления волоконных сумматоров большой мощности.

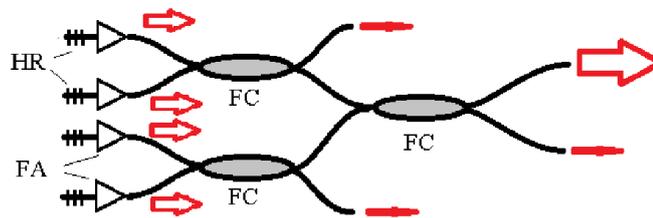


Рис. 9. Схема когерентного сложения на волоконных сумматорах.

HR - 100% брэгговская решетка, FA - волоконный усилитель, FC - волоконный сумматор, красными стрелками условно показан уровень интенсивности излучения.

Самыми распространенными методами когерентного сложения являются методы сложения в свободном пространстве, где излучение каналов объединяется в двухмерный массив, образуя единую выходную апертуру. Далее часть суммарного пучка отражается либо для контроля фазового поля, либо для возвращения обратно в систему с целью создания обратной связи и реализации общего резонатора в системе регенеративного усиления. На рис. 10 приведены наиболее распространенные схемы параллельного когерентного сложения в свободном пространстве с общим резонатором (а) [60-62] и с использованием

задающего генератора с опорным каналом (б) и без него (в) [63-65] (регенеративный усилитель).

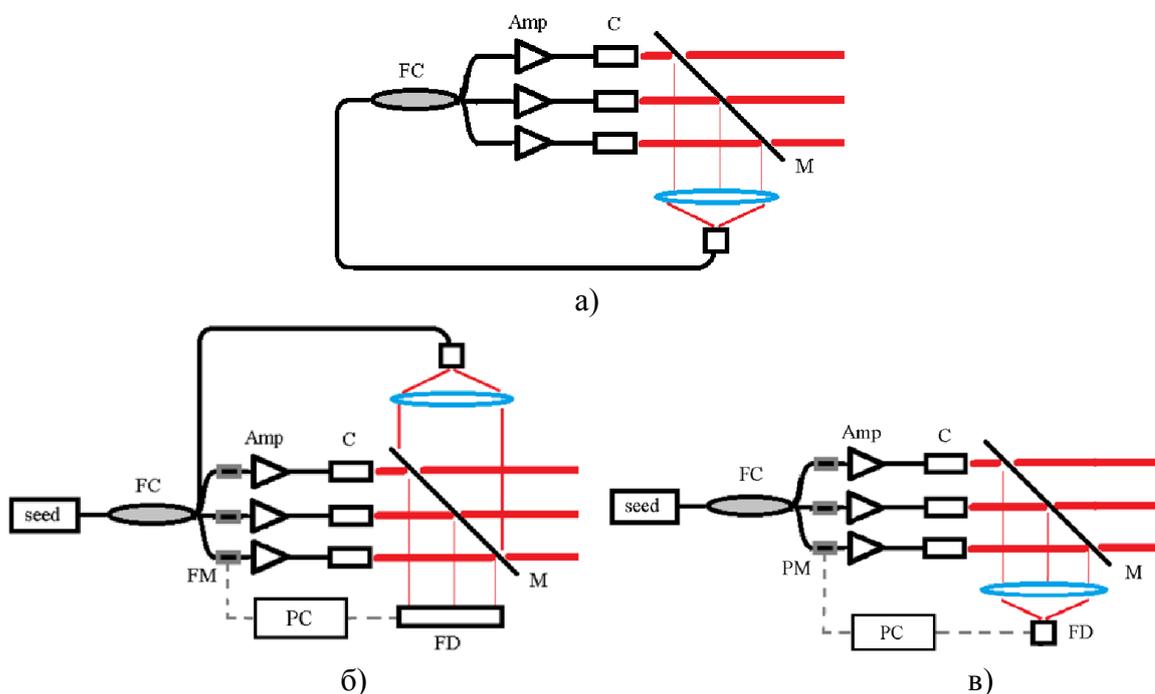


Рис. 10. Схема параллельного когерентного сложения в свободном пространстве.

а) с общим резонатором, б) в) с задающим генератором.

seed - задающий генератор, FC - разветвитель, FM - фазовый модулятор, Amp - усилитель, FD - анализатор целевой функции, C - коллиматор, M - делительная пластинка.

Изображенная на рис. 10в схема является общей для нескольких разных способов анализа результата сложения лазерных пучков. Поэтому FD обозначает фотоприемник, отвечающий в разных методах за измерение различных целевых функций (осевой интенсивности излучения, мощности излучения, прошедшего через малую приосевую диафрагму, размера пучка или фазы излучения).

Представленные схемы позволяют получать самые высокие на сегодня средние мощности в суммарном пучке от сотен ватт [66, 67] до десятков киловатт [16]. В работе [25] представлена установка мощностью 100 кВт. Данные схемы возможно масштабировать до ста и более каналов [68, 69] с возможностью получения пучка дифракционного качества [70].

При анализе предложенных и использованных ранее схем когерентного сложения следует учитывать применимость использованных методов для

решения конкретной задачи. Основными характеристиками, описывающими используемые методы сложения и архитектуру всей системы, являются:

- метод оценки качества сложения и его точность,
- устойчивость к разбюстировке и случайным помехам,
- применимость метода для случая получения суммарного излучения высокой мощности (вплоть до десятков кВт),
- возможность масштабирования на большое число каналов,
- скорость реакции системы подстройки фазы (в случае с внешним управлением фазой излучения в каналах).

Представленные на рис. 10 схемы параллельного когерентного сложения на практике реализуются различными способами. Следует упомянуть о наиболее интересных из них, применительно только к случаю сложения непрерывного лазерного излучения.

Как указывалось выше, целевые функции, по которым оценивается качество сложения могут быть различными, так же как и методы регулирования фазы в лазерных каналах. В работах [71, 72] такой целевой функцией является осевая интенсивность излучения. Подстройка фазы в данных работах производилась с путем изменения напряжения на фазовом корректоре, выполненном из ниобата лития. В цепи обратной связи находился компьютер, который по сигналу с фотодиода рассчитывал управляющие напряжения на фазовых корректорах с использованием СПГ-алгоритма (стохастический параллельный градиентный алгоритм), что обеспечивало достаточно высокое быстродействие системы. Использование в качестве целевой функции осевой интенсивности излучения и расчетного метода для управления подстройкой фазы было вызвано, по всей видимости, дальнейшей целью применения лазерной системы с прохождением излучения через турбулентную атмосферу [73]. Использованный метод обеспечивает хорошие результаты, однако его применимость при масштабировании системы на большее количество каналов с сохранением высокой скорости подстройки не очевидна. Кроме того, в данном

случае происходил разрыв волоконной системы, поскольку корректор фазы находился в свободном пространстве.

Другой интересный способ подстройки фазы излучения с использованием изменения показателя преломления иттербиевого оптического волокна под действием излучения накачки описан в работе [74]. В данном случае также обеспечивалось высокое быстродействие системы обратной связи, и, кроме того, было возможно масштабирование системы на большее количество каналов. Однако для определения величины изменения фазы в каждом из каналов также использовался компьютер в системе обратной связи, что ограничивает быстродействие системы при масштабировании. Кроме того, в описанном случае производилась подстройка фазы 1.5-мкм лазера за счет изменения показателя преломления в иттербиевом волокне. В нашем случае (1-мкм лазер) пришлось бы выбирать какой-либо другой тип волокна для фазового модулятора с отсутствием потерь на длине волны генерации.

В связи с вышесказанным в данной работе была выбрана полностью волоконная схема когерентного сложения с использованием опорного канала для анализа фазы каждого рабочего канала.

## **1.2. Конструкции узкополосных задающих генераторов.**

Поскольку для когерентного сложения была выбрана схема сложения в свободном пространстве с использованием опорного канала и усилителей на активном волокне, то в качестве задающего генератора необходимо было использовать одночастотный лазер с большой длиной когерентности, чтобы компенсировать случайно возникающую в процессе работы разность оптической длины рабочих каналов.

Здесь следует отметить, что разность фаз излучения разных каналов может возникать в процессе работы за счет влияния разных физических процессов, в частности механических напряжений, вызываемых вибрациями установки и

нагревом волокна. Нагрев происходит за счет тепловыделения при накачке, поглощения излучения генерации в активном волокне из-за пассивных потерь и нагрева элементов конструкции за счет поглощения рассеянного излучения накачки и генерации. Также возможен разогрев активной среды вследствие неупругих нелинейных эффектов. Именно для волоконных лазеров и усилителей данный эффект может играть заметную роль вследствие высокой интенсивности лазерного излучения в сердцевине волокна и большой протяженности активной среды. При работе лазера наблюдается относительно небольшое приращение средней температуры активного волокна (несколько градусов Цельсия, см., например, [75]). Однако в сумме все перечисленные эффекты могут приводить к значительным случайным изменениям фазы излучения величиной до нескольких сотен радиан [76].

В качестве задающего генератора возможно использование следующих конструкций:

- 1) одночастотный полупроводниковый лазерный диод с волоконным брэгговским резонатором (ВБР) [77, 78],
- 2) одночастотный волоконный DFB (Distributed Feedback Laser, с распределенной обратной связью) лазер [79, 80],
- 3) одночастотный лазер на кристалле, активированном ионами неодима или иттербия [81, 82].

При выборе наиболее подходящего типа задающего генератора наряду с техническими характеристиками рассматривались также стоимость, надежность и удобство в работе.

В полупроводниковых лазерах генерация индуцированного излучения происходит вследствие взаимодействия активной (усиливающей свет) среды с излучением. Высокая эффективность взаимодействия излучения со средой достигается, благодаря использованию в лазерах оптических резонаторов.

Спектральные характеристики излучения лазера существенно определяются свойствами таких резонаторов. Собственные частоты  $\nu_N$  продольных мод резонатора Фабри-Перо, образованного двумя плоскими зеркалами, расположенными на расстоянии  $L$ , равны

$$\nu_N = N \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме,  $n$  - показатель преломления активной среды,  $N$  - целое число.

В режиме свободной генерации спектр  $P(\nu)$  излучения полупроводникового лазера носит линейчатый характер (рис. 11).

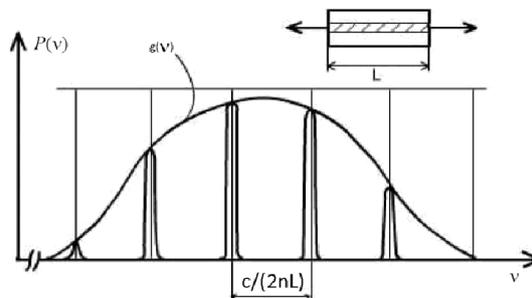


Рис. 11. Частотный спектр генерации лазера.  $g(\nu)$  – зависимость коэффициента усиления активной среды от частоты.

Использование резонаторов Фабри-Перо в полупроводниковых лазерах технически хотя и удобно (френелевские отражатели резонатора получают простым скалыванием образца искусственного кристалла вдоль атомных плоскостей, перпендикулярных оси резонатора), но не вполне эффективно совместимо с волноводной структурой активной области резонатора. Другим недостатком малоразмерных (обычно менее 500 мкм) резонаторов Фабри-Перо является наличие в них поперечных собственных мод, искажающих спектр генерации лазера и обуславливающих флуктуации мощности (шумы) излучения.

Применение в полупроводниковых лазерах волноводных решеток Брэгга, непосредственно связанных с активной средой, позволило улучшить спектральные характеристики излучателей и, в частности, обеспечить динамически одночастотный (высокоскоростной) режим работы лазера.

Преимуществами использования полупроводникового диода с ВБР в качестве задающего генератора являются его относительная дешевизна и простота в использовании. Наличие волоконного выхода решает проблему передачи излучения в волоконные усилительные каналы без юстировки. Ширина линии генерации типовых одночастотных диодов составляет 1-3 МГц при мощности излучения порядка 10 мВт. К недостаткам можно отнести высокую чувствительность полупроводникового диода к обратным отражениям и, как следствие, необходимость использования на выходе оптического изолятора с высоким уровнем подавления обратного излучения.

С технической точки зрения использование одночастотного волоконного DFB-лазера является самым предпочтительным. Данный источник обладает высокой стабильностью по частоте, стойкостью к обратным отражениям, относительно высокой выходной мощностью. Ширина линии генерации типовых источников составляет порядка 10 - 100 кГц при мощности излучения от 100 мВт до нескольких ватт. С экономической точки зрения данный источник на порядок дороже полупроводникового лазера.

Третий тип задающего генератора, лазер на кристалле, имеет исключительную стабильность по частоте, т.к. менее подвержен температурным эффектам и так же как волоконный DFB-лазер практически не чувствителен к обратным отражениям. Ширина линии генерации составляет порядка 100 кГц при мощности излучения порядка 100 мВт. К недостаткам этого типа лазеров можно отнести отсутствие волоконного выхода и, как следствие, сложность в юстировке. По цене сопоставим с волоконным DFB-лазером сравнимой мощности.

В наших условиях слишком узкая линия генерации могла играть отрицательную роль (см. выше, нелинейные эффекты). Поэтому по сумме характеристик (ширина линии генерации, стоимость, надежность, удобство в работе) было решено в качестве задающего генератора применить одночастотный лазерный диод с волоконным брэгговским резонатором и волоконным выходом.

### 1.3. Активные волокна для каскадов усиления.

Поскольку основной целью работы было создание и исследование системы, работающей на длинах волн 1062/1064нм (в зависимости от типа оконечных твердотельных усилителей на Nd:GGG или Nd:YAG), то было предложено использовать активные волокна, легированные ионами  $Yb^{3+}$ .

В настоящее время оптимальными источниками накачки твердотельных лазеров являются полупроводниковые лазерные диоды. В случае волоконных лазеров необходимо иметь в виду, что диаметр сердцевины оптического волокна, поддерживающего только основную  $HE_{11}$ -моду, составляет порядка 10 мкм. Это накладывает ограничения на характеристики полупроводникового источника накачки, который должен иметь характерный размер излучающей области того же порядка. Выходная мощность таких устройств не превышает сотен мВт. В то же время, выходная мощность полупроводниковых лазеров с излучающим волноводом шириной в сотни микрон составляет несколько Вт. Чтобы использовать такие источники для накачки волоконных лазеров была предложена технология волокон с двойной оболочкой.

Световоды с двойной оболочкой, используемые в качестве активной среды мощных волоконных лазеров, состоят из:

- одномодовой сердцевины, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и примесями, формирующими профиль показателя преломления;
- внутренней оболочки из кварцевого стекла;
- внешней оболочки с показателем преломления, пониженным по сравнению с кварцевым стеклом.

Модельный профиль показателя преломления данных световодов представлен на рис. 12. Внутренняя оболочка из кварцевого стекла является

многомодовым световодом, по которому распространяется излучение накачки. Она имеет типичный размер 0.1-1 мм, что обеспечивает возможность ввода излучения накачки от полупроводниковых источников с мощностью от нескольких Ватт до нескольких десятков Ватт.

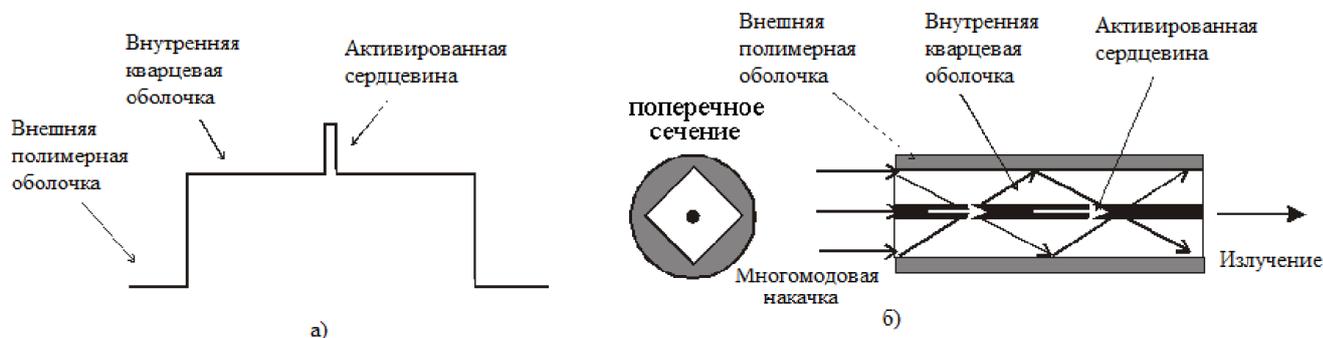


Рис. 12. Световод с двойной оболочкой.

а - модельный профиль показателя преломления,

б - иллюстрация преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера.

При распространении по внешнему световоду излучение накачки поглощается ионами редкоземельного элемента в активированной сердцевине волокна, вызывая люминесценцию, которая при наличии обратной связи может развиваться в лазерную генерацию. При этом область генерации оказывается локализованной в одномодовой сердцевине, то есть ее характерный поперечный размер составляет 5-10 мкм. Принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера иллюстрируется на рис. 12б [83].

Для наиболее распространенного типа волоконных световодов с двойной оболочкой в качестве материала внешней оболочки используются полимеры с низким показателем преломления. В частности, силиконовая резина, обеспечивающая числовую апертуру многомодового световода  $NA=0.38$ , и тефлон AF, позволяющий увеличить это значение до 0.6. Другая возможность состоит в использовании в качестве внешней оболочки фторсиликатного стекла с пониженным показателем преломления. В этом случае числовая апертура

составляет  $NA=0.2-0.25$ . Другим вариантом является использование активных волокон с микроструктурированной оболочкой [84] в которых волноводная структура создается за счет воздушных отверстий. Фотография поперечного сечения такого волокна представлена на рис. 13. Числовая апертура световодов данного типа ограничивается вытеканием мод высших порядков через перемычки, поддерживающие внутреннюю оболочку. Характерное значение этой величины составляет  $NA=0.6$ .

Существует ряд методов ввода излучения накачки в активное оптическое волокно. Для накачки волоконных лазеров могут использоваться полупроводниковые лазеры и их сборки с прямым выходом, а также, так называемые, «пигтелированные» полупроводниковые лазеры, т.е., лазеры с волоконным выходом.

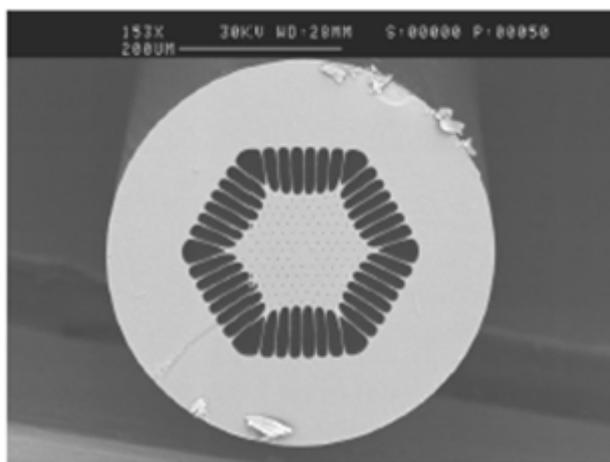


Рис.13. Изображение торца активного волокна с микроструктурированной оболочкой.

Для эффективной связи на торце волокна формируется микролинза, а само волокно жестко фиксируется на общей подложке. Волноводная структура выходного волокна, как правило, формируется с помощью использования стекол с разным показателем преломления. Характерное значение числовой апертуры таких волокон составляет 0.22, а диаметр сердцевины составляет 100 мкм и более (определяется размером излучающего полоска полупроводникового лазера). Для согласования волокна с набором полупроводниковых диодов и матрицами диодов используется фокусировка излучения в волокно с помощью микрооптики.

Наиболее простым способом ввода излучения в волоконный лазер является торцевая накачка. Схема лазера с торцевой накачкой представлена на рис. 14. При этом возможны две схемы ввода.

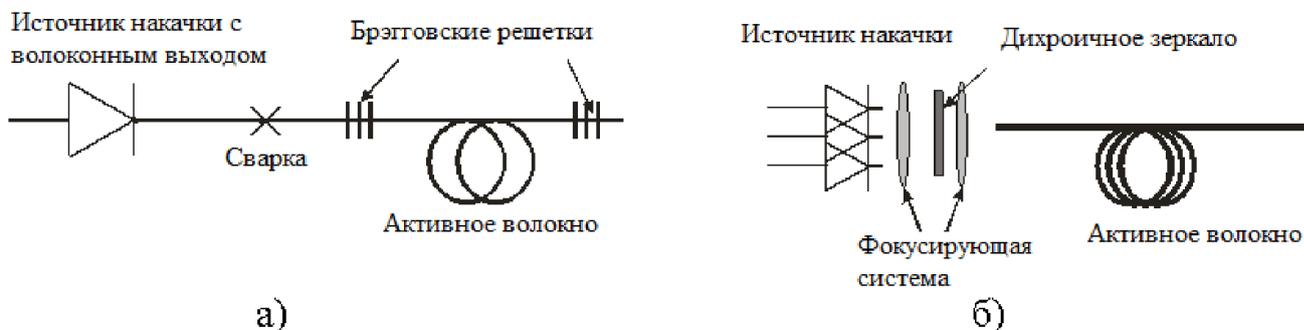


Рис. 14. Варианты схем ввода излучения накачки в активное волокно.  
 а) непосредственная сварка, б) с использованием объемных элементов.

В случае активного волокна с диаметром 100-200 мкм волоконный выход может жестко свариваться с волокнами, формирующими лазер. Как правило, в этом случае накачка осуществляется через волоконную брэгговскую решетку, формирующую входной отражатель лазера (рис. 14а). В случае активных волокон с внешним диаметром более 200 мкм использование стандартных сварочных аппаратов затруднено. Накачка вводится в лазер с использованием объемных оптических элементов через дихроичное зеркало, обеспечивающее обратную связь (рис.14б). Предельная мощность волоконных лазеров, построенных по таким схемам, ограничивается мощностью накачки одного или двух (в случае использования обоих торцов волокна) полупроводниковых источников. Для одиночного лазера накачки эта величина составляет несколько Вт, максимальная мощность сборки с выходным волокном диаметром 100 мкм составляет десятки ватт. Для сборок, согласующихся с активным волокном диаметром в несколько сот микрон, мощность накачки достигает субкиловаттного уровня. Следует также отметить, что мощные диодные сборки также часто имеют волоконный выход. В этом случае ввод излучения в волокно также осуществляется с помощью объемной оптики.

Существует также конструкция, получившая название GTWave-световода, который представляет собой два и более волоконных световодов с общим

полимерным покрытием, имеющим пониженный по сравнению с кварцем показатель преломления. Модельный профиль показателя преломления GTWave-световода с одним пассивным световодом представлен на рис.15а. Один из световодов (активный) имеет сердцевину, легированную ионами иттербия, а остальные (пассивные) – представляют собой перетянутый стержень из высокочистого кварцевого стекла. Излучение накачки от полупроводниковых излучателей вводится в пассивные световоды.

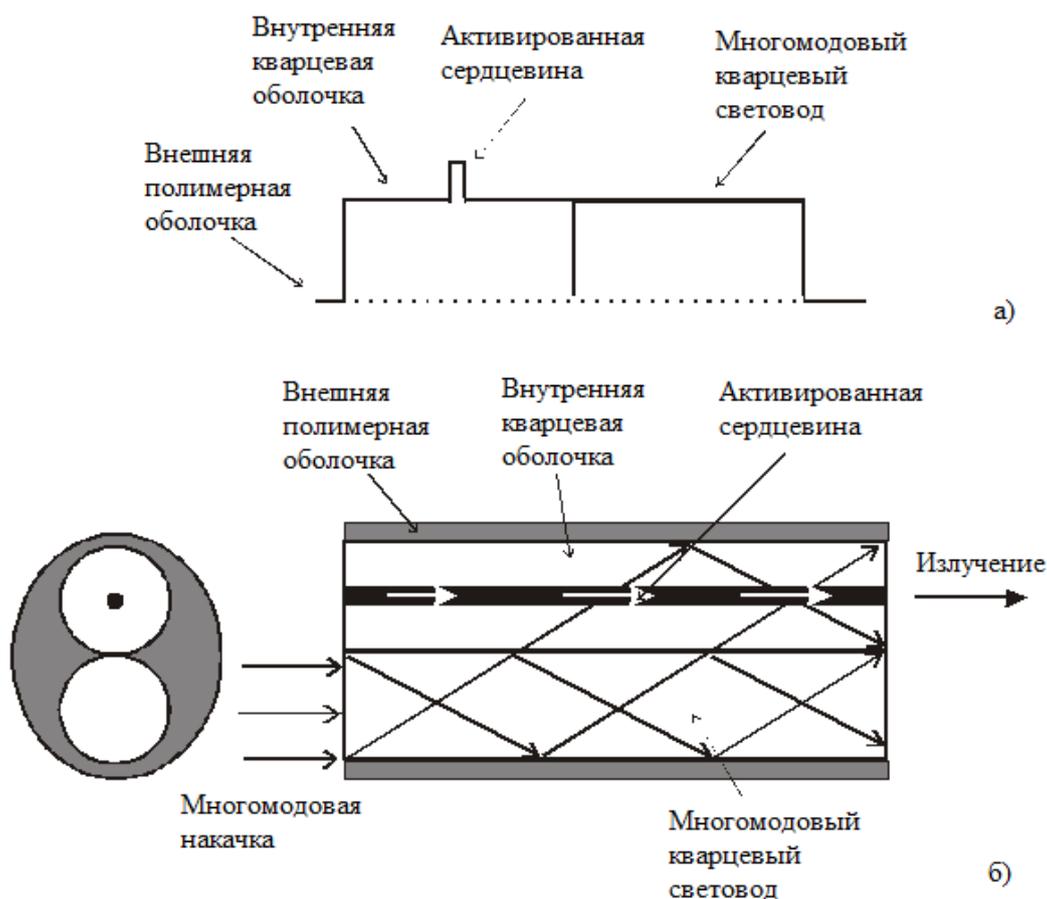


Рис. 15. GTWave - световод.

- а - модельный профиль показателя преломления;  
 б - иллюстрация перехода многомодовой накачки в активный световод и преобразования в одномодовое излучение волоконного лазера.

Принцип распространения излучения накачки и возникновения излучения в активной сердцевине показан на рис. 15б. При распространении по пассивным световодам излучение накачки переходит в активный световод, при этом

отношение мощностей накачки в световодах определяется соотношением площадей их оболочек. В активном световоде излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию и лазерную генерацию. При распространении по активному световоду поглощение части накачки в его сердцевине компенсируется дополнительной перекачкой излучения из пассивных световодов, необходимой для поддержания постоянного отношения мощностей накачки в активном и пассивных световодах. Другими словами, происходит распределенная накачка по всей длине активного световода.

На рис.16 представлена конфигурация лазера на основе GTWave волокна с двумя пассивными волокнами для накачки. Как видно из рисунка, в данной схеме возможно использование четырех источников накачки. Возможной представляется и конфигурация с последовательным соединением секций через сварку активных волокон. Соответствующая конфигурация показана на рис. 17.

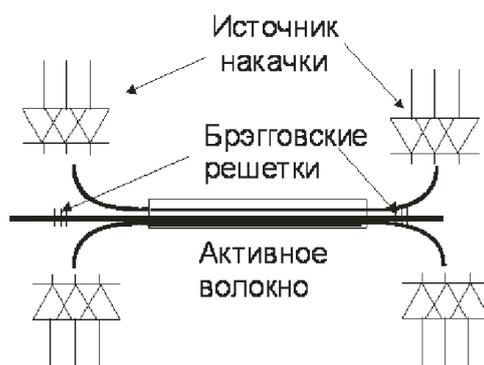


Рис. 16. Схема ввода излучения накачки в GTWave волокно.

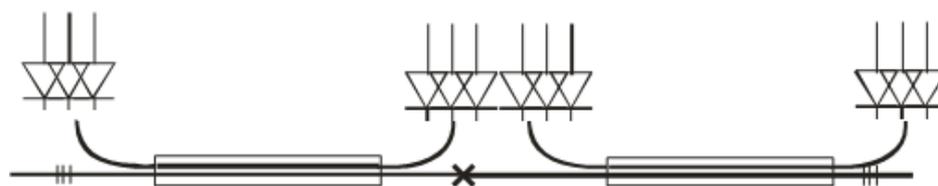


Рис. 17. Схема ввода излучения накачки в GTWave волокно с последовательным соединением секций.

Преимуществом волокон такого типа является простота накачки, поскольку излучение вводится непосредственно в пассивную жилу без использования волоконного комбайнера. При этом на выходе излучение имеет

хорошее качество пучка и среднюю мощность порядка 10 Вт [85, 86]. Недостатком таких волокон является малая концентрация активной примеси и, как следствие, большая длина. Так как в работе требовалось усиливать излучение с очень узкой линией генерации, то порог ВРМБ при этом был очень низкий, что затрудняло получение больших выходных мощностей.

В компании IPG была разработана технология бокового ввода накачки. В качестве источников используются сборки из трех диодов общей мощностью 10-12 Вт с волоконным выходом, имеющим  $NA=0.22$  и диаметр сердцевины 100 мкм. При внешнем диаметре активного волокна 125-150 мкм и апертуре 0.38-0.4, 70-90% излучения накачки переходит в оболочку активного волокна при их оптическом контакте. Для практической реализации ввода накачки часть волокна перетягивается до малого диаметра, затем обматывается вокруг активного волокна и проплавляется с ним. Участок ввода покрывается полимером с пониженным показателем преломления. На расстоянии, на котором происходит поглощение основной части накачки, можно осуществлять ввод от следующего источника накачки (рис. 18). Очевидным достоинством такой схемы является возможность масштабирования мощности лазера путем увеличения количества источников накачки.



Рис. 18. Организация накачки с боковым вводом излучения.

Наряду с таким достоинством, как возможность использования мощных источников накачки, активные волокна с двойной оболочкой обладают и очевидным недостатком. При распространении излучения накачки по внутренней оболочке активного волокна коэффициент перекрытия с активной сердцевиной

оказывается обратно пропорциональным отношению площадей оболочки и сердцевины. Это не позволяет получить высокую степень инверсии. При чрезмерном увеличении диаметра оболочки может сказываться перепоглощение лазерного излучения не инвертированной частью активных ионов. Вторая проблема волокон с двойной оболочкой заключается в уменьшении удельного поглощения накачки. Фактически, сечение поглощения падает пропорционально отношению площадей оболочки и сердцевины. Это приводит к увеличению длины активной среды лазера и, соответственно, к уменьшению эффективности из-за наличия нерезонансных потерь, как в сердцевине, так и оболочке волокна. Компенсировать этот недостаток увеличением концентрации активной примеси не представляется возможным из-за того, что растворимость редкоземельных ионов в кварцевом стекле ограничена. Поэтому, использование активных волокон с диаметром внутренней оболочки более 500 мкм выглядит бесперспективным. В свою очередь, это позволяет рассматривать как наиболее перспективные для создания мощных лазеров системы с распределенной по длине накачкой и волокном с относительно небольшим диаметром внутренней оболочки.

Поскольку мощность выходного излучения одночастотных лазерных систем ограничивается порогом ВРМБ, который можно оценить по формуле

$$P = 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (2)$$

где  $A_{eff}$ ,  $L_{eff}$  - эффективные площадь сечения и длина волокна,  $g_B$  - коэффициент усиления ВРМБ (типичное значения для плавленого кварца  $5 \cdot 10^{-11}$  м/Вт), то для получения излучения высокой мощности необходимо использовать волокна с как можно большей сердцевиной и увеличенной концентрацией активной примеси для уменьшения длины волокна. Примером таких волокон являются волокна с большим полем моды (LMA) [87]. В отличие от стандартных одномодовых волокон с диаметром сердцевины 6 мкм (для длин волн около 1 мкм), LMA-волокна имеют диаметр сердцевины порядка 10 мкм и больше. Высокий уровень легирования позволяет уменьшить длину усилителя до 1-3 метров, что в сумме с

большим диаметром сердцевины повышает порог генерации ВРМБ более чем на порядок по сравнению со стандартными одномодовыми активными волокнами. Это позволяет получать в одночастотном режиме генерации мощности в 100 Вт [88] и более (600 Вт [89]), а в одномодовом режиме более 1кВт [90, 91]. К недостаткам таких волокон можно отнести необходимость использования дорогостоящих волоконных комбайнеров для накачки и высокую стоимость самих волокон. Также для согласования с задающим генератором, на выходе которого обычно используется стандартное одномодовое волокно, требуется волоконный адаптер (представляющий собой волокно конической формы). В схемах с внешней накачкой в торец волокна с использованием дихроичного зеркала требуется дополнительная юстировка вспомогательных элементов, и назвать такую схему полностью волоконной уже нельзя.

В качестве мощного волоконного усилителя также можно использовать активные волокна конической формы. За счет геометрических особенностей, волокна данного типа, также как и волокна с большим полем моды, имеют высокий порог ВРМБ [4, 92] и позволяют получать высокие средние мощности выходного излучения, вплоть до 750 Вт в одномодовом режиме [93]. К недостаткам, можно отнести использование дорогостоящих волоконных комбайнеров для накачки либо использование дихроичных зеркал с фокусировкой излучения накачки в торец волокна. К недостаткам технологического плана можно отнести сложность изготовления волокон такого типа и, как следствие, высокую стоимость. В отличие от LMA-волокон, волокнам конической формы не требуется специальный адаптер для соединения с задающим генератором.

## ГЛАВА II. Одночастотный гибридный лазер мощностью 2.5 Вт.

При разработке задающего генератора была использована гибридная схема на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода и двухкаскадного волоконного иттербиевого усилителя с целью исследования влияния усилителя на такие характеристики излучения, как состояние поляризации, ширина линии генерации и спектральный состав.

Схема одночастотного гибридного лазера представлена на рис. 19.

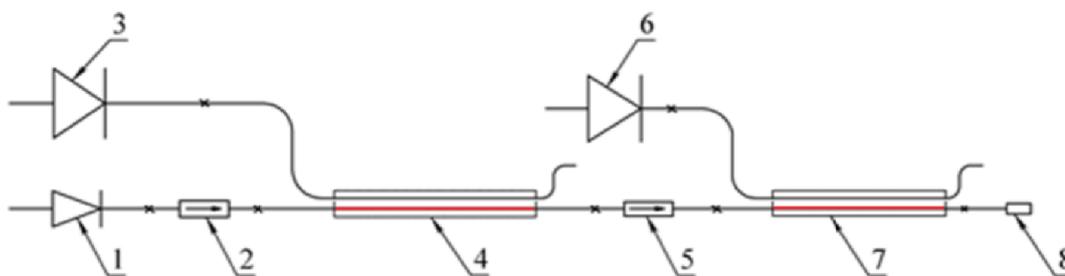


Рис. 19. Схема усилителя.

1 - задающий полупроводниковый лазерный диод с ВБР, 2 – волоконный изолятор Фарадея на 300 мВт; 3, 6 – мощные полупроводниковый диод накачки, 5 – волоконный изолятор Фарадея на 3Вт; 4, 7 – GTWave волокно; 8 – волоконный коллиматор.

В качестве задающего генератора в работе использовался одночастотный полупроводниковый лазерный диод на основе InGaAs с волоконной брэгговской решеткой записанной в одномодовом волокне [94]. Диаметр сердцевины/оболочки: 6/125 мкм ( $NA=0.11/0.45$ ). Решетка имела резонанс на длине волны около 1064 нм. Максимальная мощность выходного излучения составляла около 25 мВт. Излучение лазерного диода было линейно поляризованным, степень поляризации близка к 0,98. Выбор длины волны в 1064 нм основывался на том, что реализуемая система, построенная по гибридной схеме, будет применяться как задающий генератор в более мощной лазерной системе с твердотельными усилителями, где в качестве активной среды выступают кристаллы, легированные ионами неодима (Nd:YAG).

В качестве активной среды усилителя использовалось GTWave волокно (4, 7, рис. 19) длиной 20 м, активная сердцевина которого легирована ионами иттербия. Длина активного волокна выбиралась таким образом, чтобы поглощение накачки составляло около 20 дБ.

*Параметры активного волокна.* В качестве активного волокна применялось иттербиевое GTWave волокно, схематичное поперечное сечение которого представлено на рис. 20. Длина волокна 20 м. Диаметр активной сердцевины 6 мкм ( $NA=0.11$ ). Диаметр внутренней оболочки 125 мкм ( $NA=0.45$ ). Концентрация активной примеси была оценена по поглощению слабого сигнала активной частью волокна длиной 10 мм. Для этого к активному волокну приваривался кусок одномодового волокна, через который вводился свет от широкополосного источника. Спектр поглощения сердцевины активного волокна длиной 10 мм представлен на рис. 21.



Рис. 20. Поперечное сечение GTWave волокна.

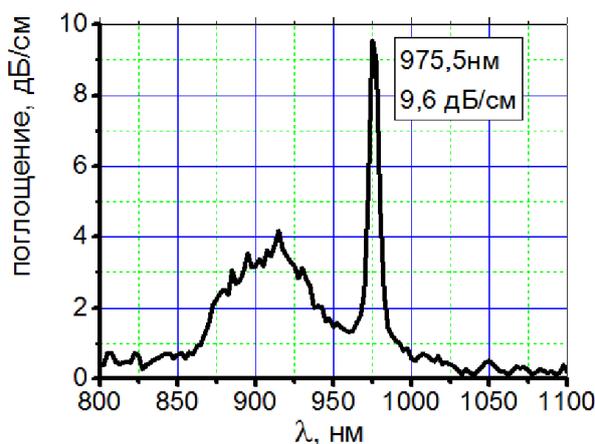


Рис. 21. Спектр поглощения сердцевины активного волокна.

Поглощение в волокне определяется законом Бугера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha L}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $L$  – длина волокна,  $I_0$ ,  $I$  – интенсивности света на входе и на выходе волокна соответственно.

Сигнал со спектроанализатора представлен в логарифмическом масштабе, поэтому его можно выразить по формуле:

$$a = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad (4)$$

Откуда коэффициент поглощения можно выразить как:

$$\alpha = \frac{a}{10 \cdot \log(e) \cdot L}, \quad (5)$$

Зная коэффициент поглощения и сечение поглощения можно определить концентрацию активной примеси, как:

$$N = \frac{\alpha}{\sigma_{\text{погл}}} = \frac{a}{10 \sigma_{\text{погл}} \cdot \log(e) \cdot L}. \quad (6)$$

Зависимости сечения поглощения и люминесценции иттербиевого алюмосиликатного волокна от длины волны представлены на рис. 22 [30].

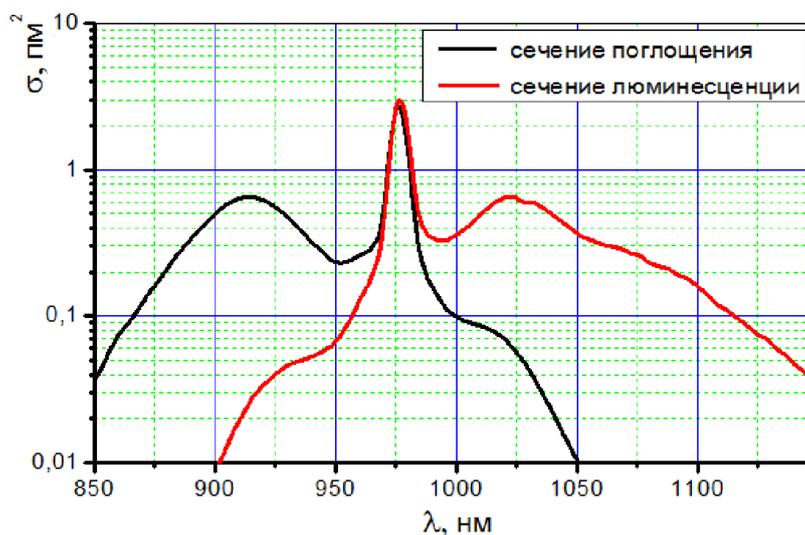


Рис. 22. Сечения поглощения и люминесценции иттербиевого волокна.

Рассчитанная по формуле (6) концентрация активной примеси в сердцевине составила  $8,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

В качестве накачки активных волокон применялись мощные полупроводниковые лазерные диоды (3, 6, рис. 19) с волоконным выходом с

диаметром сердцевины 50 мкм ( $NA=0.22$ ) и диаметром оболочки 125 мкм. Максимальная выходная мощность диодов накачки составляла 10 Вт. Так же в схему были включены волоконный коллиматор (8) с малым коэффициентом отражения на длине волны генерации (уровень отраженного сигнала -60дБ) и волоконные изоляторы Фарадея (2), (3) мощностью 300 мВт и 3 Вт соответственно.

## 2.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР.

### 2.1.1. Зависимость мощности излучения от тока накачки.

Измерения выходной мощности излучения лазерного диода проводились с помощью измерителя мощности ORION-TH при различных токах накачки лазерного диода. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока накачки представлена на рис. 23.

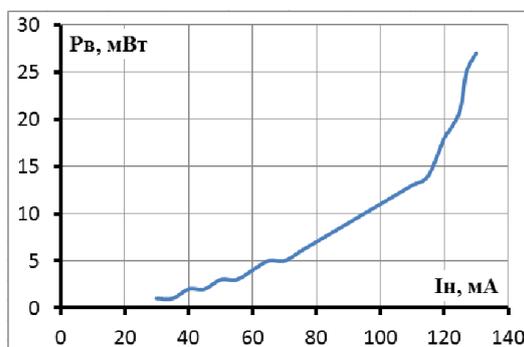


Рис. 23. Зависимость мощности излучения одночастотного лазерного диода от тока накачки.

Измерения проводились при оптимальной температуре диода, которая подбиралась по напряжению на термисторе и току накачки. В нашем случае оптимальной температурой диода была  $22^{\circ}\text{C}$ . Оптимальный ток накачки находился в районе 127-130 мА. Под оптимальными условиями работы лазерного диода понимаются такие условия, при которых наблюдается стабильный одночастотный режим работы с максимально возможной выходной мощностью.

### 2.1.2. Спектр излучения лазерного диода.

Определение спектральной зависимости излучения лазерного диода проводилось с помощью спектроанализатора INRITSUMS96A. Спектр снимался при рабочем токе 127 мА и температуре диода 22°C. Спектр излучения лазерного диода, сопоставленный со спектром люминесценции Nd:YAG, представлен на рис. 24а. Спектр излучения лазерного диода в логарифмическом масштабе при разрешении 0,1 нм представлен на рис. 24б. Максимум излучения приходится на максимум люминесценции ионов неодима, что составляет около 1064 нм. Значения длин волн по оси абсцисс приведены по показаниям спектроанализатора. Спектральная калибровка спектроанализатора не проводилась. При всех измерениях проводилось сопоставление со спектром излучения кристалла Nd:YAG, измеренным с помощью этого же спектроанализатора в том же цикле измерений, что и спектры излучения гибридного лазера. Для более точного измерения ширины линии генерации в дальнейшем применялся сканирующий волоконный кольцевой интерферометр.

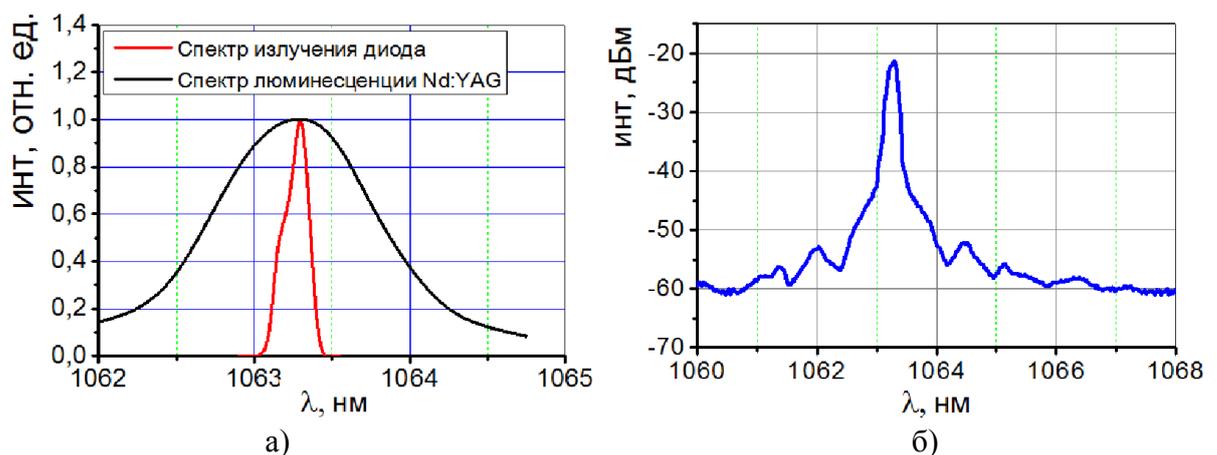


Рис. 24. Спектр излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода.  
 а - сопоставленный со спектром люминесценции неодима (разрешение 1 нм)  
 б - в логарифмическом масштабе (разрешение 0,1 нм)

### 2.1.3. Степень поляризации излучения лазерного диода.

Измерение поляризации проводилось по схеме, представленной на рис. 25. Схема включала в себя лазерный диод (1), оптический изолятор Фарадея (2), волоконный коллиматор (3). В зависимости от поворота призмы Глана (4) изменялась интенсивность прошедшего через нее излучения. Для определения абсолютного уровня сигнала на фотоприемнике (7) применялся модулятор (5). Уровень сигнала определялся на осциллографе (8) по высоте меандра. Чтобы фотоприемник не переходил в насыщение, ставился оптический фильтр (6).

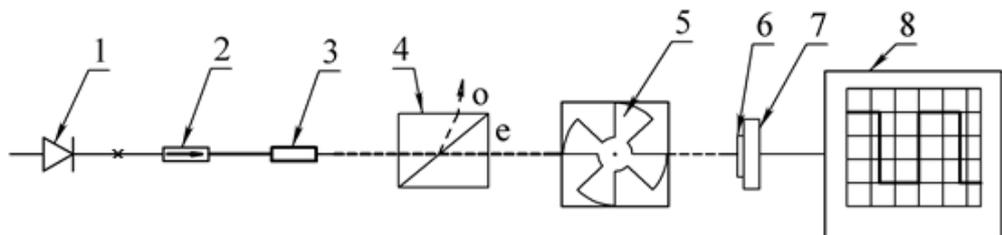


Рис. 25. Схема измерения поляризации излучения.

1 – одночастотный полупроводниковый лазерный диод, 2 – волоконный изолятор Фарадея,  
3 – волоконный коллиматор, 4 – призма Глана,  
5 – модулятор, 6 – фильтр, 7 – фотоприемник, 8 – осциллограф.

Полученная диаграмма поляризации излучения представлена на рис. 26а. Сплошной линией показана теоретическая зависимость  $\sim \cos^2 \varphi$ . Диаграмма поляризации излучения в логарифмическом масштабе представлена на рис. 26б.

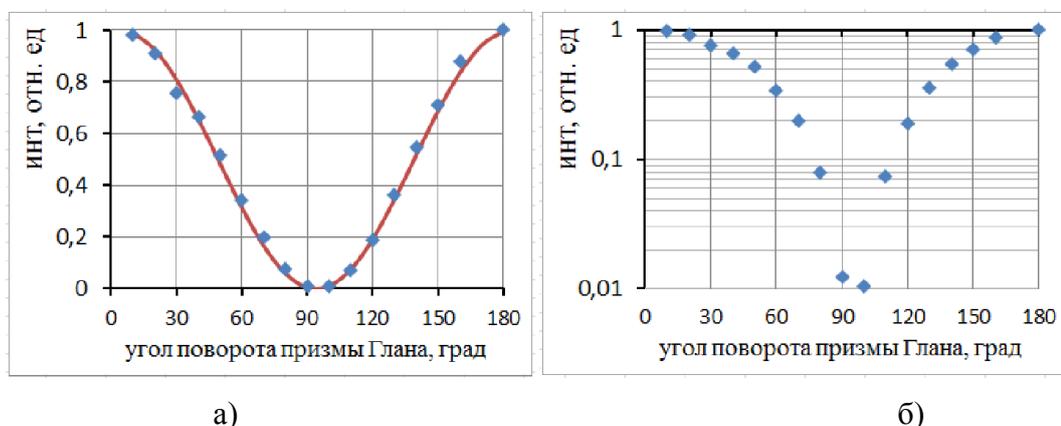


Рис. 26. Диаграмма поляризации излучения в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения, прошедшая через призму Глана, составляет 0,01 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0,98.

Формула для расчета степени поляризации:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (7)$$

где  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  – соответственно максимальная и минимальная интенсивность света, прошедшего через призму Глана.

#### 2.1.4. Измерение ширины линии генерации излучения полупроводникового лазерного диода с использованием сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Поскольку разрешение спектроанализатора (0.1 нм) не позволяет точно определить ширину линии генерации одночастотного лазерного диода порядка 1 МГц, что в пересчете на длины волн составляет порядка 10 фм, в работе применялся сканирующий волоконный кольцевой интерферометр [95].

На рис. 27 представлена схема измерения ширины линии генерации излучения полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

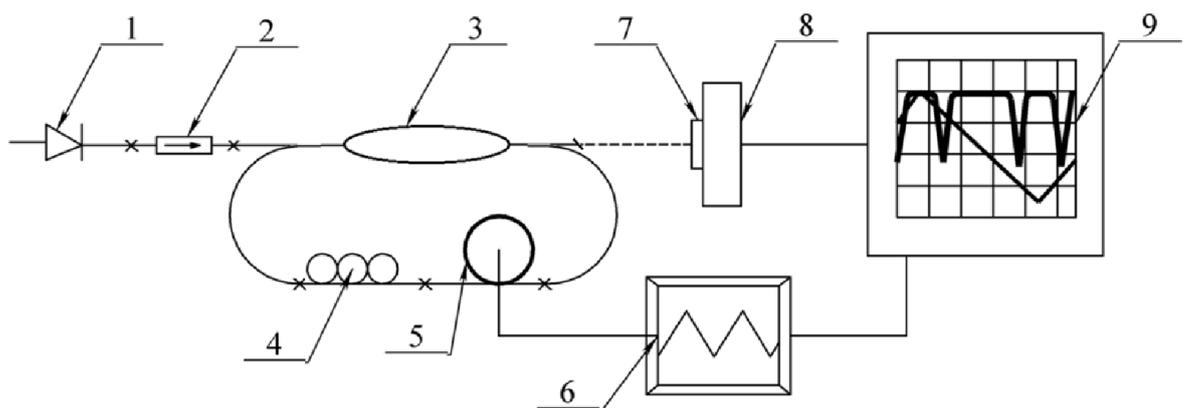


Рис. 27. Схема измерения ширины линии генерации излучения полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

- 1 – полупроводниковый лазерный диод с ВБР, 2 – изолятор Фарадея,  
3 – волоконный ответвитель, 4 – контроллер поляризации, 5 – пьезоэлемент,  
6 – генератор, 7 – оптический фильтр, 8 – фотоприемник, 9 – осциллограф.

Излучение одночастотного полупроводникового лазерного диода (1) вводилось в интерферометр через волоконный изолятор Фарадея (2). Степень изоляции составляла -30 дБ, что исключало влияние распространяющегося в обратном направлении излучения на режим работы одночастотного полупроводникового лазерного диода. После прохождения изолятора излучение попадало в волоконный ответвитель (3) с коэффициентом деления 20:1. При этом плечо, в которое выводилось меньшая часть мощности излучения, замыкалось в кольцо. Длина волоконной части интерферометра составляла 7 м. Волокно имело длину волны отсечки первой высшей моды 1 мкм, что обеспечивало одномодовый режим распространения излучения полупроводникового источника.

В соответствии с теорией волоконных интерферометров и интерферометра Фабри-Перо [96,97] область свободной дисперсии для волоконного кольцевого интерферометра определяется по формулам:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n \cdot L}, \quad \Delta f = \frac{c}{n \cdot L}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления сердцевины волокна,  $L$  – длина плеча интерферометра.

Спектральная ширина аппаратной функции  $\Delta\lambda$  и  $\Delta f$  определяется из соотношения:

$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda \cdot (1-r)}{\pi \cdot \sqrt{r}}, \quad \delta f = \frac{\Delta f \cdot (1-r)}{\pi \cdot \sqrt{r}}, \quad (9)$$

где  $r = 0.95$  (определяется коэффициентом деления волоконного ответвителя).

Исходя из соотношений (8), (9) область свободной дисперсии составляет 28 МГц, а спектральная ширина аппаратной функции - 470 кГц. Для компенсации эволюции состояния поляризации в интерферометре в схему был включен контроллер поляризации (4).

Для сканирования по оптической длине интерферометра большая часть волокна была намотана на пьезоэлектрический элемент (5). При подаче напряжения на пьезоэлемент происходило изменение его диаметра, и, соответственно, изменение оптической длины интерферометра. Пьезоэлемент представлял собой керамическое кольцо цилиндрической формы с алюминиевой

пленкой, напыленной на внешний и внутренний диаметр. Пьезоэлемент имел внешний диаметр 50 мм и высоту 20 мм. Длина волокна, намотанного на пьезоэлемент, составила около 6 м (40 витков). Чтобы исключить нелинейные искажения интерферограммы, напряжение, подаваемое на пьезоэлемент, имело форму треугольных импульсов, которая задавалась генератором треугольных импульсов (6). Амплитуда напряжения на пьезоэлементе подбиралась таким образом, чтобы обеспечивать изменение оптического пути порядка одной длины волны. Амплитуда напряжения составляла 28В. Частота модуляции напряжения на пьезоэлементе составляла 100 Гц. Выходящее из интерферометра излучение подавалось через фильтр (7) на фотоприемник (8) и анализировалось осциллографом (9).

На рис. 28а-д представлены спектры излучения, полученные с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра при различных параметрах. Поскольку в эксперименте применялась линейная развертка (красная линия на рисунках), то ширину линии генерации можно вычислить как  $k \cdot 28 \text{ МГц}$ , где  $k$  - отношение временного интервала по полувысоте пика и временного интервала между пиками.

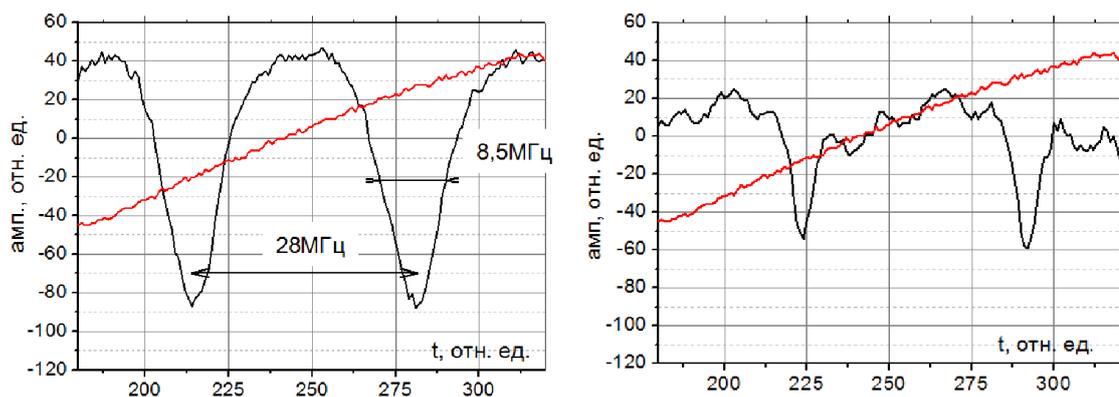


Рис. 28а. Спектры излучения, полученные с помощью сканирующего ВКИ в разные моменты времени. Ток накачки  $I_n=35 \text{ мА}$  (порог генерации), температура диода  $22^\circ \text{C}$ , выходная мощность  $P < 1 \text{ мВт}$ .

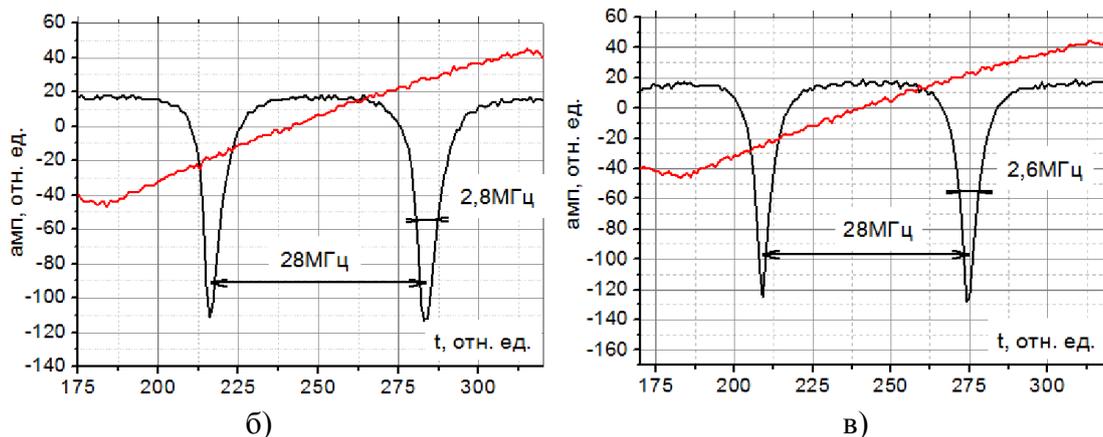


Рис. 28б. Спектр излучения, полученный с помощью сканирующего ВКИ.  
 б) Ток накачки  $I_n=60\text{мА}$ , температура диода  $22^\circ\text{С}$ , выходная мощность  $P=2\text{ мВт}$ .  
 в) Ток накачки  $I_n=127\text{мА}$ , температура диода  $22^\circ\text{С}$ , выходная мощность  $P=16\text{ мВт}$ .

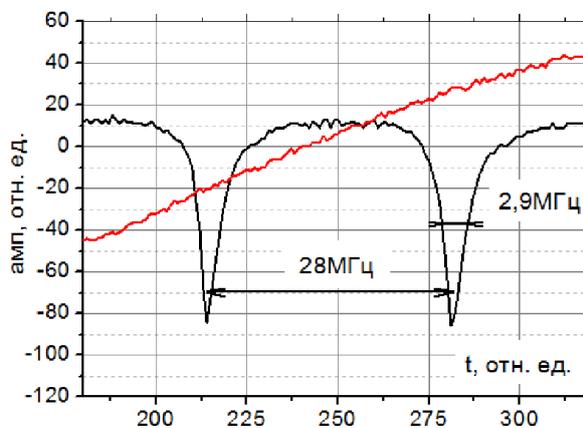


Рис. 28г. Спектр излучения, измеренный с помощью сканирующего ВКИ.  
 Ток накачки  $I_n = 136\text{мА}$ , температура диода  $30^\circ\text{С}$ , выходная мощность  $P=15\text{ мВт}$ .

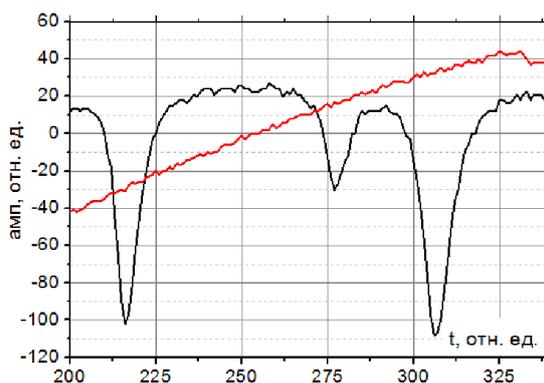


Рис. 28д. Спектр излучения, полученный с помощью сканирующего ВКИ  
 без контроля поляризации.  
 Ток накачки  $I_n = 127\text{ мА}$ , температура диода  $22^\circ\text{С}$ , выходная мощность  $P = 16\text{ мВт}$ .

На рис. 28а-в спектры снимались при температуре диода  $22^\circ\text{С}$ . При токах близких к порогу генерации наблюдалась нестабильная во времени картина (рис. 28а), обусловленная биением мод полупроводникового лазерного диода. При

токах в диапазоне 60-127 мА наблюдалась стабильная по форме интерференционная картина (рис. 28б, в). По полученным спектрам ширина линии генерации может быть оценена в диапазоне  $2,6 \pm 0,2$  МГц. Во всех случаях спектрограмма сигнала перемещалась на экране осциллографа относительно пилообразного сигнала попеременно вправо и влево. Это может объясняться недостаточной термостабилизацией полупроводникового лазерного диода.

Спектр представленный на рис. 28г снимался при температуре диода 30°C. Оптимальный ток при заданной температуре был подобран около 136 мА. Ширина линии генерации в данном режиме может быть оценена в  $2,9 \pm 0,2$  МГц. Стабильные режимы работы при других температурах или токах накачки найти не удалось.

На рис. 28д представлен спектр, измеренный с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра без контроля поляризации. Видно, что возникает третий пик. Из-за намотки волокна на пьезоэлемент возникает слабое наведенное двулучепреломление. Вследствие этого внутри волокна начинают распространяться две компоненты (обыкновенная и необыкновенная) электромагнитной волны, для которых волокно имеет разный показатель преломления. Следовательно, для этих волн имеет место минимум интерференции при разных значениях растяжения волокна. Таким образом, на интерференционной картине возникает дополнительный пик.

## **2.2. Определение основных параметров излучения после усиления.**

### **2.2.1. Спектральный состав выходного излучения после усиления.**

Определение спектрального состава выходного излучения проводилось с помощью спектрометра Anritsu MS96A. Спектры снимались при оптимальном режиме работы задающего лазерного диода ( $I_z = 127$  мА,  $T = 22^\circ\text{C}$ ). Спектры излучения, полученные при различных уровнях мощности накачки, представлены

на рис. 29а, б для первого и второго каскадов усиления соответственно. Максимум приходится на длину волны 1063,5 нм. Разрешение прибора составляло 0.5 нм. Особое внимание уделялось области спектра в районе 1080 нм, поскольку активное волокно на этой длине волны имело максимальную эффективность усиления. Как видно из полученных спектров после первого каскада усиления интенсивность излучения в этой области имеет приемлемый уровень.

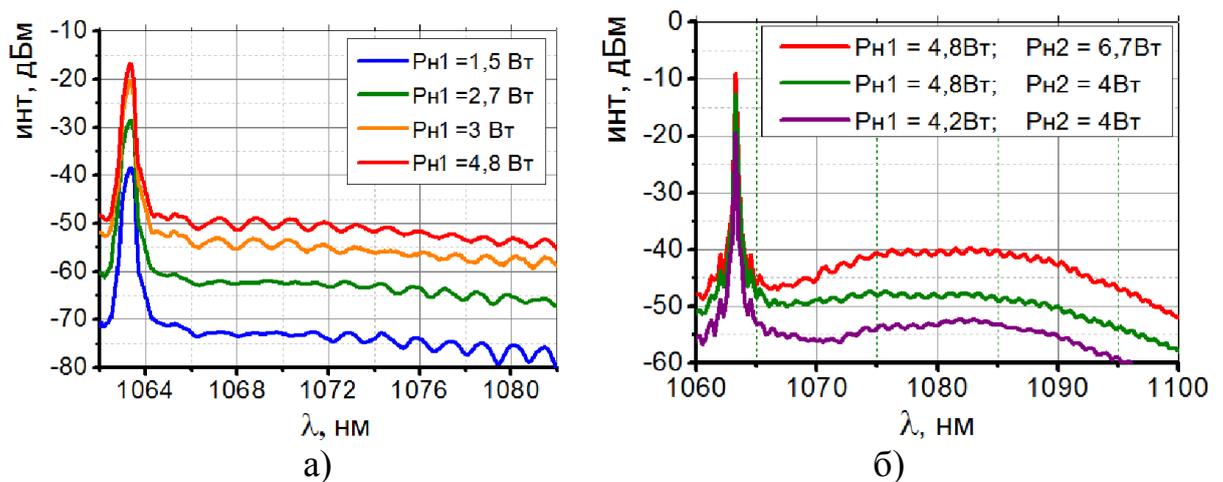


Рис. 29. Спектры излучения, полученные при различных уровнях мощности накачки.

$P_{н1}$ ,  $P_{н2}$  - мощности накачки на 1м и 2м каскадах соответственно.

Разность уровней интенсивности максимума генерации и интенсивности спонтанного излучения в данной области составляла около 35 дБ. Но после второго каскада усиления в области 1080 нм возникал заметный рост мощности спонтанной люминесценции, который ограничивал максимальную мощность накачки. При дальнейшем увеличении мощности накачки может возникнуть лазерная генерация на длине волны близкой к 1080 нм. А поскольку такая генерация идет в обе стороны усилителя, то существует большой риск вывода из строя чувствительного к обратным отражениям задающего полупроводникового лазерного диода. Также выйти из строя может оптический изолятор, если обратная мощность спонтанной генерации превысит порог допустимой рассеиваемой мощности.

### 2.2.2. Зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки при максимальной мощности одночастотного полупроводникового лазерного диода.

Измерения проводились при помощи измерителя мощности ORION-TN при различной мощности диода накачки. Задающий лазерный диод работал при оптимальном режиме ( $I_z = 127$  мА,  $T = 22^\circ\text{C}$ ). Поскольку в схему усилителя был включен волоконный изолятор Фарадея, который вносил оптические потери (около 30%), входная мощность составляла 18 мВт.

Полученные результаты приведены на рис. 30.

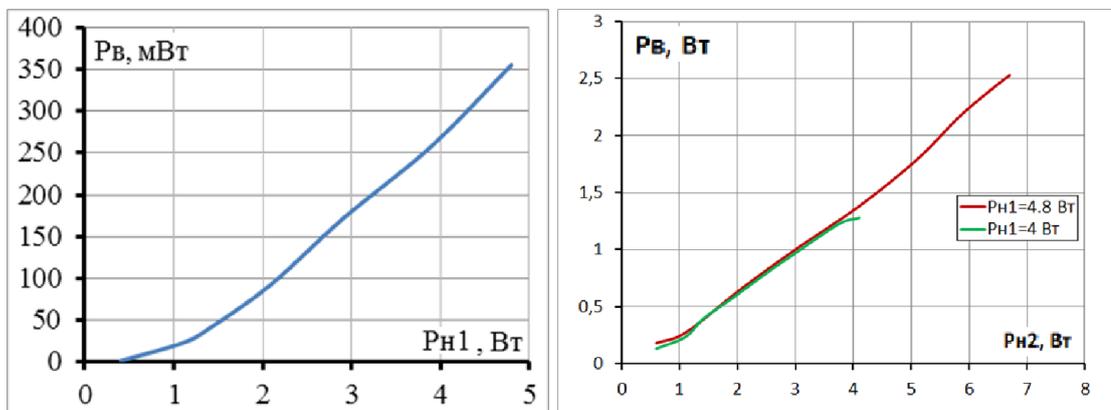


Рис. 30. Зависимость выходной мощности излучения от мощности накачки.  
а) после первого каскада усиления б) после второго каскада усиления  
 $P_{н1}$ ,  $P_{н2}$  – мощности накачки на 1м и 2м каскадах соответственно.

При мощности накачки в 4,8 Вт после первого каскада усиления получена мощность генерации 355 мВт. Дифференциальная эффективность при этом составила 10%, а коэффициент усиления 13 дБ.

При мощностях накачки в 4,8 Вт для первого каскада и 6,8 Вт для второго, на выходе системы была получена мощность генерации 2,5 Вт. Дифференциальная эффективность второго каскада усиления при этом составила 40%. Поскольку волоконный изолятор Фарадея, включенный между каскадами, вносил потери (около 30%), входная мощность на второй каскад усиления составляла 250 мВт. Коэффициент усиления второго каскада составил 10 дБ. Суммарный коэффициент усиления двухкаскадного усилителя составил 21 дБ.

При мощности накачки менее 4 Вт на первом каскаде усиления, мощность сигнала была недостаточной для устойчивой работы второго каскада усиления, поскольку возникал риск возникновения генерации на длине волны близкой к 1080 нм.

### 2.2.3. Поляризационная характеристика выходного излучения после усиления.

Измерение поляризационной характеристики выходного излучения проводилось по схеме, представленной на рис. 31.

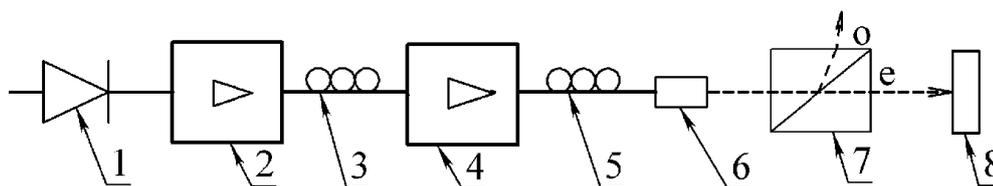


Рис. 31. Схема измерения поляризации излучения.

1 – одночастотный полупроводниковый лазерный диод, 2, 4 – 1й и 2й каскады усиления соответственно, 3, 5 – контроллеры поляризации, 6 – волоконный коллиматор, 7 – призма Глана, 8 – измеритель мощности

Измерения проводились последовательно, сначала была измерена диаграмма поляризации после первого каскада усиления, затем приваривался второй каскад усиления и измерения повторялись. Поскольку в данной работе, при построении волоконного усилителя, применялось волокно, не сохраняющее поляризацию излучения, в отличие волокна с сохранением поляризации [98], в оптическую схему были включены волоконные контроллеры поляризации (3, 5). Измерения проводились при оптимальном режиме работы задающего лазерного диода ( $I_n = 127$  мА,  $T = 22^\circ\text{C}$ ). Мощность накачки на первом каскаде усиления составляла 4,8 Вт и 6,8 Вт на втором каскаде. Диаграмма поляризации выходного излучения после первого каскада усиления, полученная без контроля поляризации, представлена на рис. 32.

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения, прошедшая через призму Глана, составляет 0.2 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0.65, рассчитанной по формуле (7).

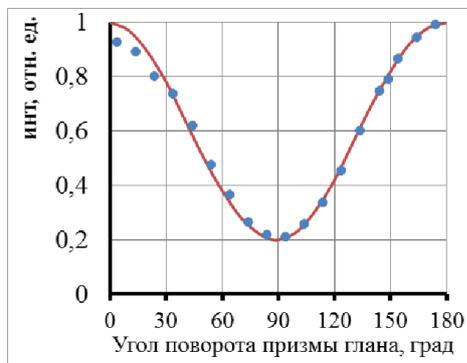


Рис. 32. Диаграмма поляризации излучения после 1го каскада усиления (без контроля поляризации).

Диаграммы поляризации излучения после 1го и 2го каскадов усиления, полученные с контролем поляризации, представлены на рис. 33, 34 соответственно.

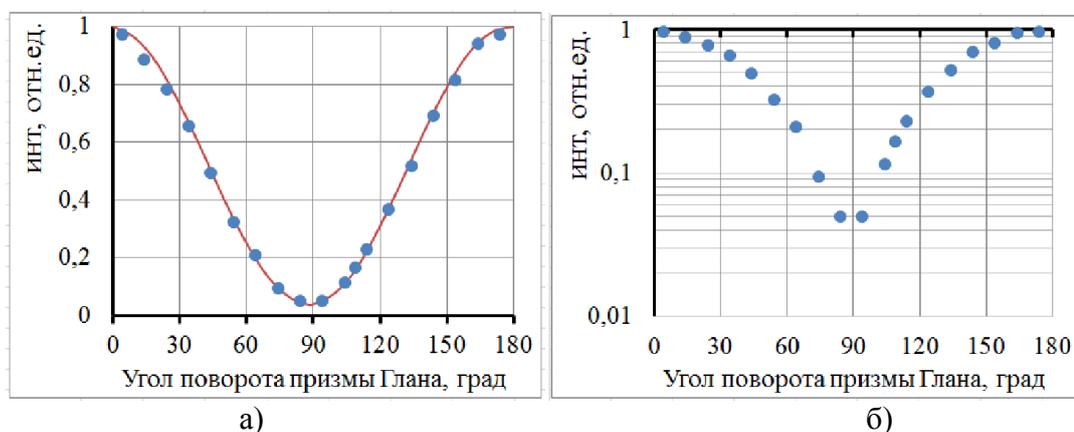


Рис. 33. Диаграмма поляризации выходного излучения (с контролем поляризации).

а) в линейном, б) в логарифмическом масштабе

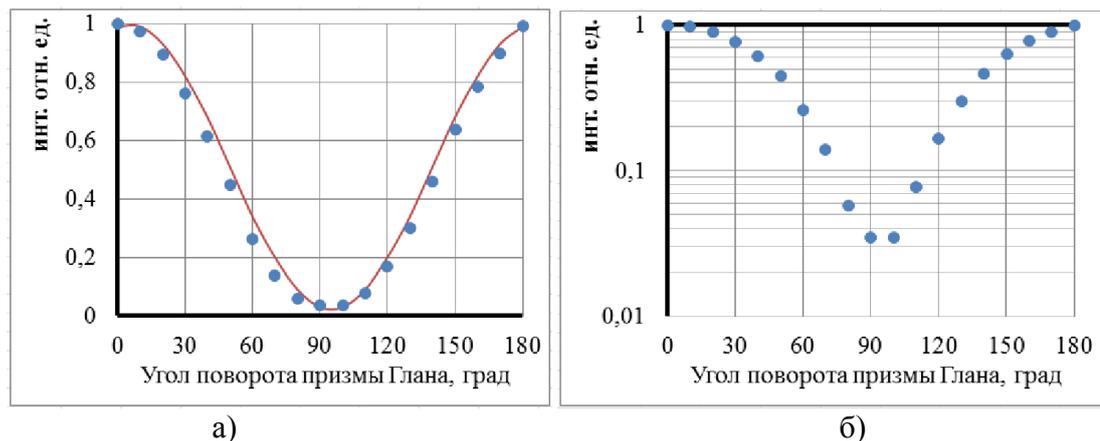


Рис. 34. Диаграмма поляризации выходного излучения (с контролем поляризации).  
а) в линейном, б) в логарифмическом масштабе

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения после 1го каскада усиления, прошедшая через призму Глана, составляет 0,05 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0.9. Минимальная интенсивность излучения после 2го каскада усиления, прошедшая через призму Глана, составляет 0.035 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0.93.

Не смотря на то, что волокно имеет малый коэффициент двулучепреломления, небольших механических напряжений и большой длины волокна достаточно, чтобы из линейно поляризованного излучение сделать эллиптически поляризованным. Так же интересен тот факт, что после второго каскада усиления степень поляризации выше, чем после одного каскада. По видимому, во втором случае двумя контроллерами поляризации удалось более точно скомпенсировать двулучепреломление от двух усилителей. В любом случае эксперимент показывает, что для достижения высокой степени поляризации необходимо ставить контроллеры поляризации после каждого каскада усиления.

## 2.2.4. Влияние волоконного усилителя на ширину линии генерации одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Измерение влияния волоконного усилителя на ширину линии генерации одночастотного полупроводникового лазерного диода проводилось по схеме, представленной на рис. 35 последовательно для каждого волоконного усилителя. Контроллеры поляризации и оптические изоляторы между каскадами усиления не показаны чтобы не загромождать схему. Выходное излучение подавалось в торец входного волокна ВКИ. Максимальные мощности накачки на первом и на втором каскадах усиления составляли 4,8 Вт и 6,8 Вт соответственно. Принцип измерения приведен в параграфе 2.1.4.

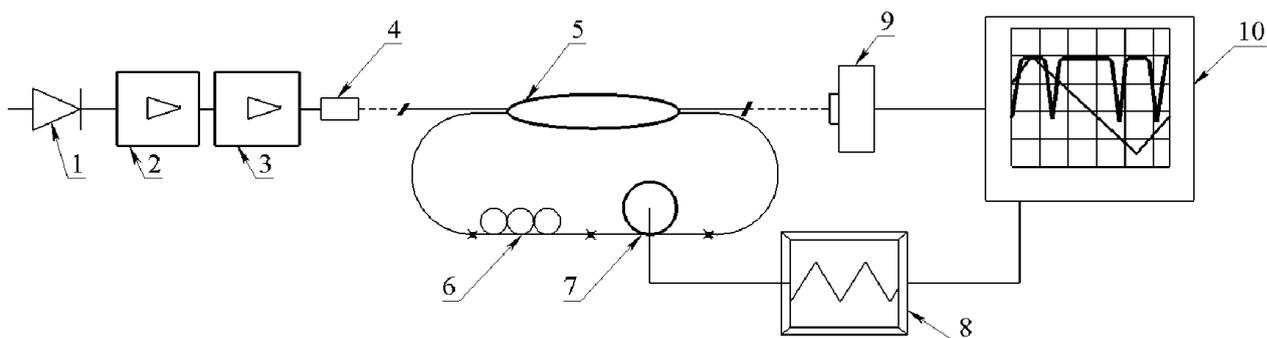


Рис. 35. Схема измерения ширины линии выходного излучения после второго каскада усиления с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

1 – одночастотный полупроводниковый лазерный диод, 2, 3 – каскады усиления,  
4 – волоконный коллиматор, 5 – волоконный ответвитель, 6 – контроллер поляризации,  
7 – пьезоэлемент, 8 – генератор, 9 – фотоприемник, 10 – осциллограф.

На рис. 36 и 37 представлены спектры излучения, полученные с помощью волоконного кольцевого интерферометра при различных режимах работы задающего лазерного диода после 1-го каскада усиления. На рис. 36 представлены спектры излучения, полученные с помощью волоконного кольцевого интерферометра после второго каскада усиления при оптимальных параметрах одночастотного полупроводникового лазерного диода ( $I_z = 127$  мА,  $T = 22^\circ\text{C}$ ).

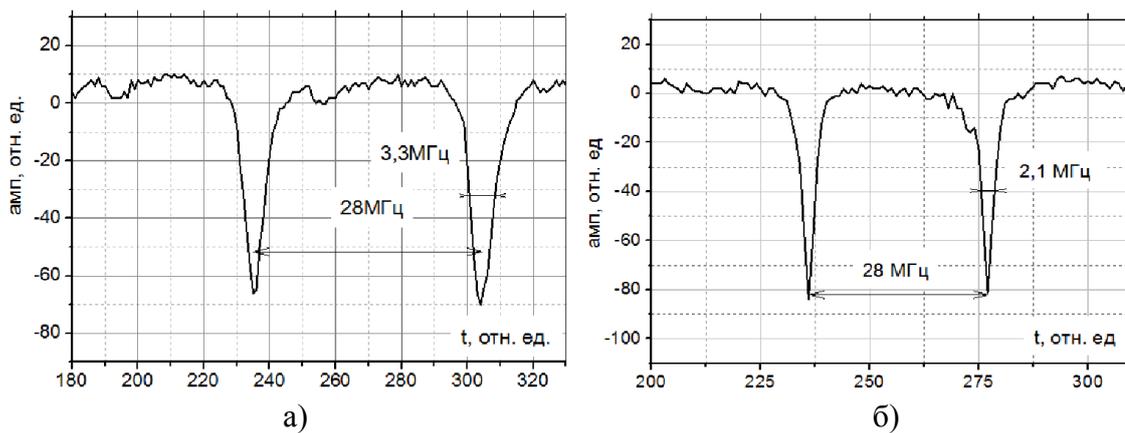


Рис. 36. Спектры излучения после второго каскада усиления, полученные с помощью ВКИ.  
 а) без тщательной подстройки контроллера поляризации;  
 б) с подстройкой контроллера поляризации

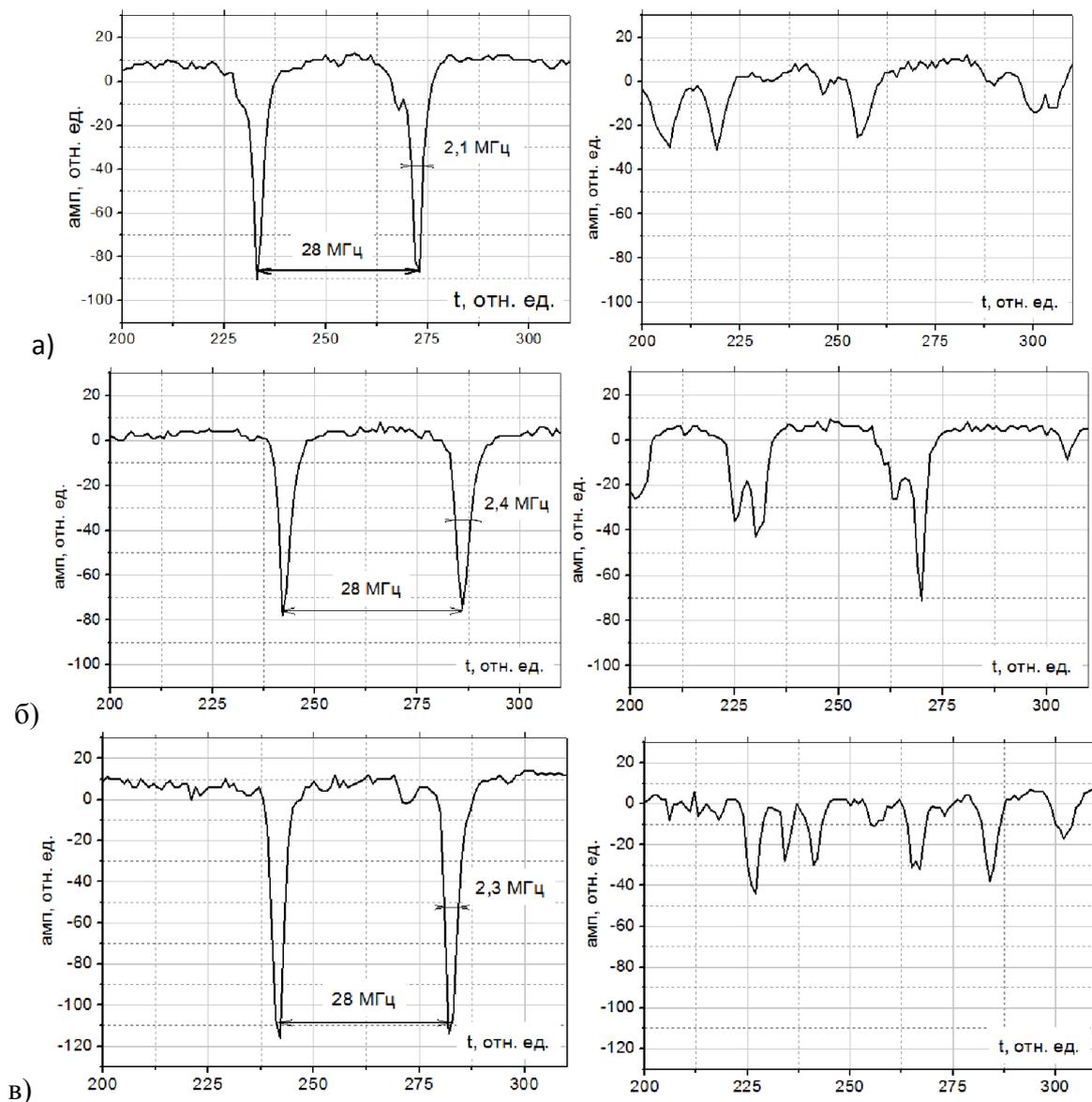


Рис. 37. Спектры излучения, полученные с помощью ВКИ в разные моменты времени.  
 а)  $I_z = 60$  мА, температура диода  $22^\circ\text{C}$ ; б)  $I_z = 127$  мА, температура диода  $22^\circ\text{C}$ .  
 в)  $I_z = 136$  мА, температура диода  $30^\circ\text{C}$ .

Ширина линии генерации была оценена в  $3,3 \pm 0,3$  МГц. Можно было сделать вывод, что 2й каскад усиления уширяет линию генерации и влияет на стабильность системы. Но более тщательная настройка контроллеров поляризации показала, что уширение было связано с наложением на общую картину второго поляризационного пика. По рис. 36б ширина линии генерации была оценена в  $2,1 \pm 0,2$  МГц.

Наилучшей стабильностью отличался режим работы при токе задающего диода  $I_z = 127$  мА и температуре диода  $22^\circ\text{C}$  (рис. 37б). Ширина линии генерации в этом режиме оценена в  $2,4 \pm 0,2$  МГц. Можно сделать вывод, что 1й каскад усиления не влияет на ширину линии, но влияет на стабильность одночастотной генерации полупроводникового лазерного диода. Это связано с недостаточным подавлением обратной мощности, идущей с усилителя на одночастотный лазерный диод. Введение дополнительного оптического изолятора между задающим полупроводниковым лазерным диодом и каскадом усиления восстанавливает стабильность системы.

### 2.2.5. Расходимость лазерного пучка.

Для определения расходимости пучка использовалась схема, приведенная на рис. 38.

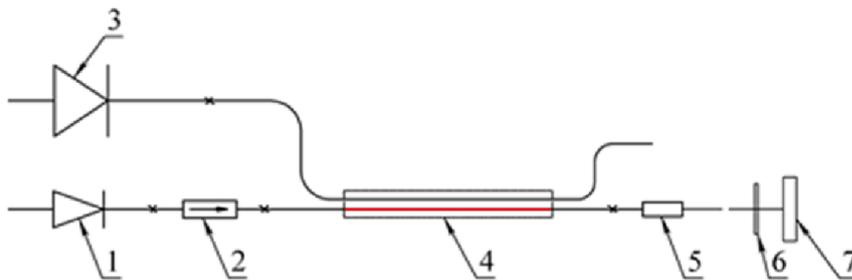


Рис. 38. Схема измерения расходимости лазерного пучка.

- 1 – одночастотный полупроводниковый лазерный диод, 2 – волоконный изолятор Фарадея, 3 – диод накачки, 4 – GTWave волокно,  
5 – волоконный коллиматор, 6 – оптический фильтр, 7 – ПЗС матрица

Изображение профиля интенсивности лазерного излучения в зависимости от расстояния фиксировалось с помощью ПЗС матрицы.

Профиль пучка и зависимость полуширины лазерного пучка (на полувысоте) от расстояния между коллиматором и ПЗС матрицей представлены на рис. 39.

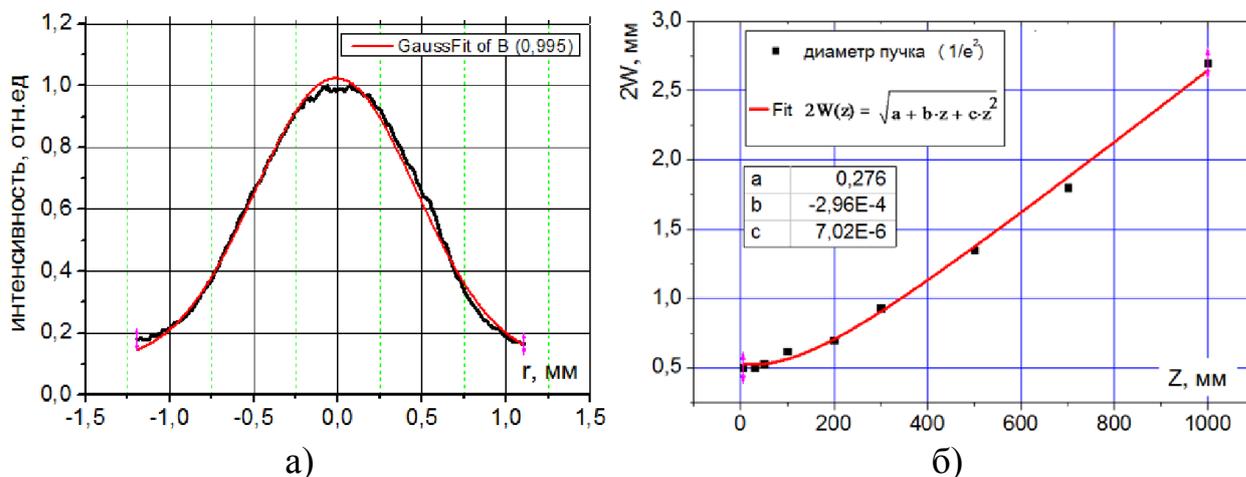


Рис. 39. а) Профиль интенсивности лазерного излучения пучка на расстоянии 500мм.

б) зависимость диаметра пучка от расстояния.

Полученные данные были аппроксимированы уравнением, вида:

$$2W(z) = \sqrt{a + b \cdot z + c \cdot z^2} \quad (10)$$

С помощью коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  можно определить следующие параметры пучка:

$$M^2 = \frac{\pi}{8 \cdot \lambda} \cdot \sqrt{4 \cdot a \cdot c - b^2} \quad \text{- параметр } M^2, \quad (11)$$

$$d_0 = \frac{1}{2\sqrt{c}} \sqrt{4ac - b^2} \quad \text{- диаметр пучка в перетяжке (уровень } 1/e^2), \quad (12)$$

$$\Theta = \sqrt{c} \quad \text{- общая угловая расходимость пучка,} \quad (13)$$

При расчете длина волны  $\lambda$  в миллиметрах. По формулам (10)-(13) из экспериментальных данных были получены следующие параметры  $M^2=1.01$ ,  $d_0 = 0.52$  мм,  $\Theta=2.6$ мрад.

### 2.3 Выводы к Главе II.

Был разработан и исследован одночастотный задающий генератор на основе активного GTWave волокна. Разработана схема измерения ширины линии генерации одночастотного излучения с разрешением 430 кГц. Проведены исследования основных характеристик выходного излучения как задающего полупроводникового лазерного диода, так и излучения после усиления. Определены оптимальные режимы работы системы. Измерены следующие характеристики выходного излучения полупроводникового лазерного диода при оптимальном режиме работы (ток накачки 127 мА, температура диода 22°C) и излучения после каскадов усиления. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики излучения одночастотного задающего генератора

|                                  | п/п лазерный диод | 1й каскад усиления | 2й каскад усиления |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| мощность выходного излучения, Вт | 0,025             | 0,35               | 2,5                |
| ширина линии генерации, МГц      | 2,4±0,2           | 2,4±0,2            | 2,1±0,2            |
| степень поляризации              | 0,98              | 0,9                | 0,93               |
| дифф. эффективность, %           |                   | 10                 | 40                 |
| коэффициент усиления, дБ         |                   | 13                 | 10                 |

Как показало исследование усилитель не влияет на ширину линии генерации и сохраняет степень поляризации выходного излучения на уровне более 0,9. Общий коэффициент усиления двухкаскадного усилителя с учетом потерь составил 21 дБ. Так же исследование показало, что для стабильной работы системы необходимо вводить дополнительные волоконные изоляторы для более сильного подавления обратной связи между каналами усиления.

### **Глава III. Фазирувка семи каналов при когерентном сложении лазерных пучков с максимальной суммарной мощностью до 35 Вт.**

В целях экспериментальной отработки методики измерения и управления фазой выходного излучения отдельных каналов была создана многоканальная волоконная система, включавшая в себя семь силовых каналов небольшой мощности (до 5 Вт каждый) и опорного канала.

#### **3.1. Схема когерентного сложения.**

Схема и вид экспериментальной установки представлен на рис. 40. Система когерентного сложения оптических сигналов собрана на базе модифицированного интерферометра Маха-Цендера [99], где по одному плечу распространяется опорное излучение, а по другому рабочие, усилительные каналы. Лазерная установка построена по схеме генератор – усилитель и работает следующим образом. Исходное одночастотное излучение формировалось задающим генератором (1), на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с длиной волны генерации 1064 нм и шириной линии генерации  $2,6 \pm 0,2$  МГц. Затем это излучение разделялось на восемь каналов (один опорный и семь «силовых» рабочих). В рабочих каналах излучение, пройдя через систему усилителей (5), достигало требуемого уровня мощности. После усиления излучение собиралось в систему параллельных, близко расположенных лазерных пучков, формируя, таким образом, синтезированную апертуру лазерной системы. На начальном проверочном этапе работы усиление обеспечивало уровень мощности в каждом канале не более 100 мВт, поскольку основная задача этой части работы состояла в измерении и поддержании синфазного излучения в каналах, а не в получении максимальной выходной мощности лазерной системы.

Для когерентного сложения излучений усиленных рабочих каналов необходимо отслеживать и управлять фазой каждого из них.

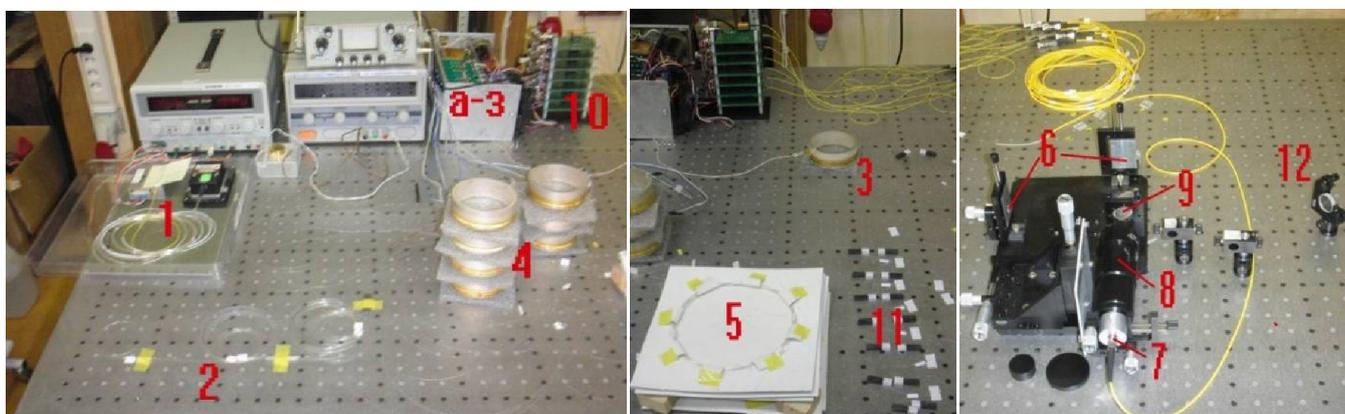
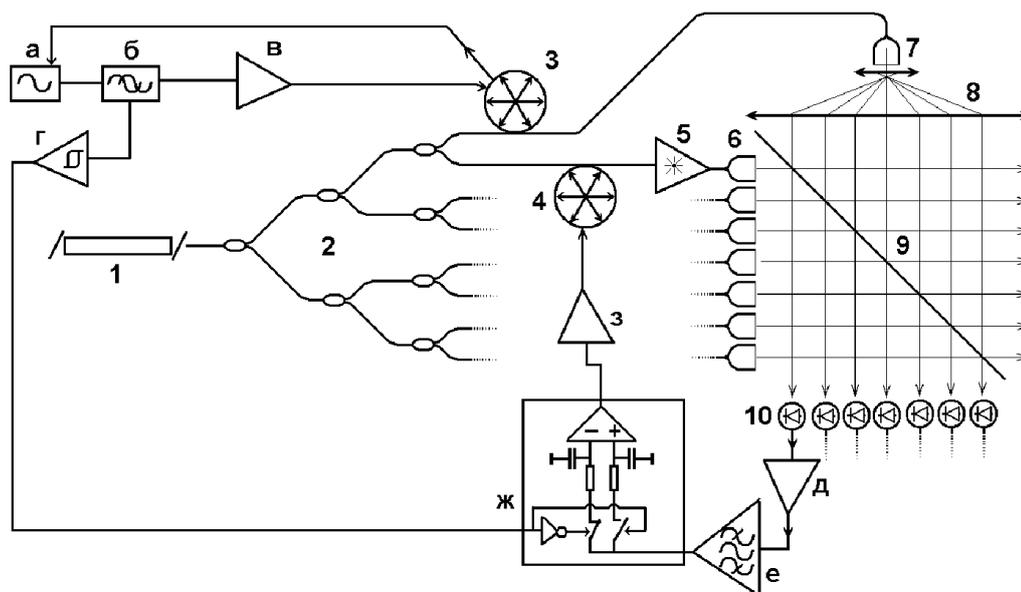


Рис. 40. Схема и общий вид установки.

Оптические элементы: 1 – задающий лазер, 2 – волоконные ответвители, 3 – пьезокерамический модулятор фазы, 4 – пьезокерамические управляющие элементы, 5 – волоконные иттербиевые усилители, 6 – коллиматоры рабочих каналов (в держателях), 7 – коллиматор опорного канала, 8 – телескоп, 9 – делительная пластина, 10 – фотоприемники, 11 – контроллеры поляризации с аттенуатором, 12 – поворотное зеркало.

Электронные компоненты: а) генератор гармонических (синусоидальных) колебаний на собственной частоте пьезокерамического модулятора, б) фазовращатель модулирующего и опорного сигналов, в) усилитель модулирующего сигнала, г) формирователь прямоугольного опорного сигнала, д) предусилитель для фотоприемника, е) селективный полосовой предусилитель, ж) синхронный детектор, з) выходной высоковольтный усилитель.

Опорный канал предназначен для того, чтобы относительно него фазировались рабочие каналы. Поскольку разность фаз рабочего и опорного каналов носит случайный характер, попытка фиксировать интерференционный сигнал выходного излучения по постоянному уровню не обеспечивает необходимой точности и стабильности. Поэтому следует использовать

модуляционные методики, для создания разности фаз ( $\Delta\varphi$ ) по определенному закону, чтобы в каждый момент времени знать точную разность между фазой опорного ( $\varphi_0$ ) канала и фазой рабочего канала ( $\varphi_n$ ). Если разность будет одинаковой для всех рабочих каналов, то у них у всех будет одна и та же фаза.

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 = \varphi_0 - \varphi_2 = \dots = \varphi_0 - \varphi_n = \text{const}, \quad (14)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_n. \quad (15)$$

В настоящей работе использовались волоконные пьезокерамические модуляторы (3, 4), которые конструктивно представляли собой цилиндрическую катушку из пьезокерамики с намотанным одномодовым волокном. Модуляция фазы опорного и подстройка фаз рабочих каналов осуществлялась за счет изменения оптического хода лучей в волокне при растяжении волокна вследствие изменения геометрии пьезокерамической катушки. Положительными сторонами такой конструкции являются простота, надежность и возможность изменения диапазона фазовой модуляции за счет изменения длины намотанного на пьезокерамику волокна при одних и тех же характеристиках электрического управляющего сигнала, отрицательными – низкая частота модуляции (несколько десятков килогерц), гистерезис характеристик пьезокерамики и их сильная температурная зависимость. Последние две отрицательные стороны могут быть компенсированы путем создания такого управляющего генератора, в частотно-определяющую цепь которого включена сама пьезокерамическая катушка. При этом амплитуда воздействия управляющего напряжения на катушку не будет зависеть от изменения характеристической частоты пьезокерамики. В экспериментах частота модуляции фазы опорного сигнала составляла 11 кГц.

Уровень регулировки фазы составлял в экспериментах 1 – 5 длин волн. Для исключения влияния неоднородностей активных волокон на поляризацию усиливаемого излучения использовались волоконные контроллеры поляризации (11). Выходная мощность в каждом рабочем канале выравнивалась аттенуатором. Выделение разностного сигнала, пропорционального разности фаз между

опорным и силовым каналами, происходило при сложении излучения опорного канала и части излучения силовых каналов на гетеродинных детекторах, индивидуальных для каждого канала. Полученный сигнал обрабатывался в блоке управления фазового модулятора (ФМ) и использовался в цепи обратной связи для управления ФМ.

### 3.1.1. Система волоконных ответвителей.

Система волоконных ответвителей (рис. 41) состояла из трех каскадов. Первый делит излучение задающего генератора на два канала, второй – на четыре, третий – на восемь. Каждый из восьми ответвителей представлял собой волоконный сплавной мультиплексор (каплер) OLCPL-S-SD-22-106-50-25-NC с коэффициентом деления 50/50 на длине волны 1064нм.

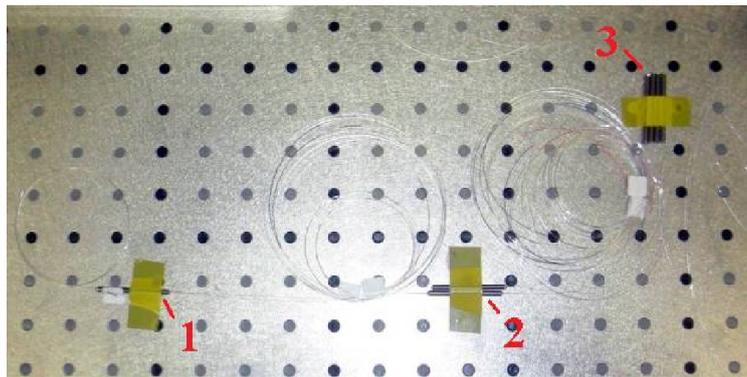


Рис. 41. Трехкаскадная система волоконных ответвителей:  
1, 2, 3 - первый, второй и третий каскады ответвителей соответственно

При входной мощности излучения 200мВт мощность на каналах варьировалась от 17 до 22 мВт. Это связано с неполной симметрией деления и наличием поглощения в ответвителях.

### 3.1.2. Фазовые корректоры.

В многоканальной схеме лазерной установки излучение отдельных каналов должно быть сфазировано. Этой цели добиваются, сравнивая фазу излучения

отдельных каналов с опорным каналом и подстраивая по разностному сигналу фазу силовых каналов.

Устройство определения и управления фазой излучения предназначено для определения текущего значения фазы излучения рабочего канала и изменения ее величины таким образом, чтобы разность фаз излучения рабочего и опорного каналов, измеряемая на выходе лазерной системы, была близка к нулю.

В состав устройства (см. рис. 42) определения и управления фазой излучения входят: фазовый корректор (или вариатор фазы) – (ФК); блок управления фазовым корректором; оптическая система сведения излучения опорного канала и части излучения силовых каналов с гетеродинным детектором.

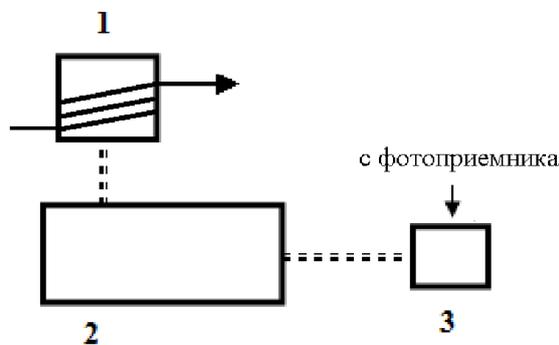


Рис. 42. Узел фазового корректора: 1 – фазовый корректор; 2 – блок управления фазовым модулятором; 3 – гетеродинный детектор.

Интерференционная картина, полученная от сведения части излучения рабочего и опорного каналов, фокусировалось на индивидуальный приемник (гетеродинный детектор). Полученный сигнал обрабатывался в блоке управления ФК и использовался в цепи обратной связи для управления фазовыми модуляторами.

Поскольку проводится сложение излучения каналов, работающих в непрерывном режиме, то равенство оптического пути для всех каналов не требуется. В этом случае достаточно, чтобы равенство оптического пути обеспечивалось с точностью до нескольких длин волн, т.е. чтобы диапазон регулировки фазы был равен  $2\pi \cdot N$ .

При определении необходимой скорости работы схемы обратной связи в системе измерения и управления фазой излучения силовых каналов следует

определить скорости паразитного изменения фазы за счет различных физических эффектов.

Основной причиной изменения фазы излучения являются тепловые процессы. Как показано в [100] температурное изменение оптической длины пути излучения в активном элементе в направлении его оси  $Z_c$  точностью до членов второго порядка малости имеет вид:

$$\Delta L = L(\Delta n + (n_0 - 1) \cdot \varepsilon_{zz}), \quad (16)$$

где  $L$  – длина активной среды. Здесь  $\Delta n$  включает изменения показателя преломления, связанные с температурой и с механическими напряжениями,  $(n_0 - 1) \cdot \varepsilon_{zz}$  учитывает удлинение активного элемента.

Скорость изменения  $\Delta L$  связана со скоростью изменения мощности накачки (флуктуации мощности из-за нестабильности блока питания) и скоростью теплоотвода.

Определяющим фактором здесь является характерная скорость теплоотвода. В идеализированном случае (однородное по объему тепловыделение, идеальный тепловой контакт, приводящий к граничным условия 1-го рода в уравнении теплопроводности) охлаждение активного элемента зависит только от его характерного размера и коэффициента температуропроводности. В этом случае можно ввести понятие постоянной времени тепловой релаксации  $\tau_T = r_0^2 / 4\mu$  [108], где  $\mu$  – коэффициент температуропроводности, равный  $\mu = \lambda_T / \rho C_p$ ,  $\lambda_T$  – теплопроводность,  $\rho$  – плотность,  $C_p$  – теплоемкость активного материала. Постоянная времени показывает, за какой промежуток времени величина  $\Delta T$  в активном элементе уменьшается в  $e$  раз. Для оценки такой подход можно использовать и в нашем конкретном случае пластинчатого активного элемента, принимая во внимание неидеальные условия охлаждения и неоднородное тепловыделение, т.е. в нашем случае время на удаление тепла будет больше. Характерный размер в системе теплоотвода  $r_0 = h/2 = 1$  мм (половина толщины активной пластины). В этом случае  $\tau_T \geq 0.2$  сек.

В случае оптического волокна характерные размеры меньше ( $r_0 \approx 0.1$  мм), но и температуропроводность сложной композиции стекло-стекло-пластиковая оболочка получается значительно меньшим, чем в случае кристалла. Поэтому для оптического волокна  $\tau_T \geq 0.1$  сек.

Таким образом, постоянная времени всей системы должна быть меньше 0.1 сек для возможности компенсации тепловых искажений фазы излучения.

Для создания фазового сдвига, как правило, используются следующие физические принципы:

1. явление электромагнитооптического эффекта в различных средах,
2. изменение геометрической длины пути электромагнитного излучения,
3. изменение оптической плотности веществ при изменении его термодинамических параметров.

При сравнении различных методов мы остановились на двух вариантах:

- Тип 1 – электрооптический кристалл, выполняющий роль фазовой пластинки, управляемой электрическим полем.
- Тип 2 – оптическое волокно, выполняющее роль фазовой пластинки, управляемой механическим напряжением.

Оба варианта могут быть легко и относительно недорого реализованы и обладают достаточно высоким быстродействием (порядка 1 мс для второго типа, что определяется скоростью отклика пьезокерамики, и порядка 1 мкс для первого типа).

В случае использования электрооптического кристалла (например,  $\text{LiNbO}_3$  – корректор первого типа) оптимальным вариантом взаимных направлений поля света и кристаллографических осей является такой, когда электрическое поле перпендикулярно оси  $OZ$ , а свет распространяется вдоль оптической оси  $OZ$ .

Положительными сторонами такого решения являются удобство управления, высокое качество электрооптических кристаллов (малые потери), отрицательными – сильная температурная зависимость характеристик, необходимость разрыва волоконной линии (появление дискретных оптических

элементов). При использовании электрооптической фазовой пластины в волоконном исполнении цена изделия сильно возрастает.

Корректор второго типа представляет собой одномодовое оптическое волокно, намотанное и приклеенное на пьезокерамическую катушку. В зависимости от величины управляющего напряжения, поданного на катушку, меняется величина механических напряжений в оптическом волокне и, соответственно, длина оптического пути. Для исключения влияния неоднородностей активного волокна на поляризацию усиливаемого излучения используются волоконные контроллеры поляризации.

Положительными сторонами такого решения являются безразрывность волоконной линии, начиная от задающего генератора, малые потери в модуляторе, малая величина управляющего напряжения, отрицательными – гистерезис характеристик и их температурная зависимость.

По результатам предварительных исследований было отдано предпочтение волоконному исполнению фазового корректора, поскольку такое решение позволяло с одной стороны построить полностью волоконную систему, а с другой позволяло легко изменить размах регулирования фазы путем увеличения длины волокна.

Следующим вопросом является измерение фазового сдвига между каналами. Оптическая (лазерная) интерферометрия совместно с высокоразвитой техникой фазометрии радиодиапазона [101] дает возможность создать высокоточные измерительные системы.

Практика создания измерителей фазового сдвига в оптическом диапазоне показывает, что чувствительность, погрешность и диапазон измерений в общем случае зависят от качества источника излучения, конкретной реализации схемы интерферометра, алгоритма приема и обработки измеренной информации.

Для измерения разности фаз излучение на входе измерителя обычно делится на два пучка: опорный, минуемый исследуемый объект, и сигнальный, отслеживающий перемещение объекта. После взаимодействия с фазовым объектом сигнальный пучок тем или иным способом совмещается с опорным.

Классификацию методов фазовых измерений целесообразно проводить, исходя из вида измерительных преобразований. По этому признаку существующие методы можно разделить на корреляционный, включающий в себя модуляционный и фазовый, гомодинный и гетеродинный методы с использованием различных средств для измерений изменения разности фаз в радиодиапазоне [102], а также компенсационные методы: модуляционный и визуальный.

Описанные выше способы извлечения информации о фазовых сдвигах лежат в основе работы различных интерференционных устройств. Чувствительность, точность, разрешающая способность зависят от характеристик конкретного устройства и могут быть улучшены в той или иной мере за счет конструктивных или схемных решений.

Существуют, однако, ограничения более принципиального характера, связанные с квантовой природой излучения, с одной стороны, и так называемыми ограничениями технического предела, с другой стороны. Последние обуславливают флуктуацию и дрейф самой измеряемой величины.

При небольших величинах падающей на приемник оптической мощности основные источники шума сосредоточены в самом фотодетекторе. Пока мощность шумов на выходе фотоприемника не зависит или слабо зависит от мощности излучения, то естественно для повышения чувствительности увеличить падающую на фотодетектор мощность. Наряду с квантовыми флуктуациями другой принципиальной причиной, ограничивающей чувствительность и точность фазовых измерений, является флуктуация оптической длины пути, вызываемая самыми разнообразными причинами: температурными вариациями длин плеч интерферометра и показателей преломления оптических элементов, механическими, акустическими и микросейсмическими колебаниями.

Неполное пространственное согласование опорного и сигнального пучков, «конечное» значение их апертур приводит к тому, что нормированная аппаратная функция становится меньше единицы и это условие также огрубляет чувствительность фазометра. Это приводит к тому, что фазовая чувствительность

реального интерферометрического устройства на один-два порядка хуже, чем предсказывают теоретические выкладки.

При гомодинном (гетеродинном) методе фазовых измерений сдвиг фазы оптического диапазона переносится с помощью фотосмещения в радиочастотный диапазон, а поскольку в радиодиапазоне погрешность измерения временных интервалов не хуже  $10^{-10}$  с, то ясно, что погрешность гомодинного и гетеродинного метода в основном лимитируется стабильностью и флуктуациями самой измеряемой величины.

Из изложенного выше следует, что модуляционно-компенсационный метод и метод переноса частоты (гомодинный или гетеродинный методы) являются наиболее точными и чувствительными при измерении фазовых сдвигов в оптике.

Гетеродинное детектирование – это метод детектирования излучения путем нелинейного смешения исследуемого излучения с опорным излучением.

Для модуляции излучения опорного можно использовать следующие виды модуляции:

- по интенсивности (МИ);
- по частоте (ЧМ);
- по фазе (ФМ);
- с использованием поляризации (ПМ).

В подавляющем большинстве случаев используется модуляция по интенсивности оптического излучения.

В работе [16] используется акустооптический модулятор, однако, возможно использование электрооптического или других видов амплитудных модуляторов. Однако, в этом случае придется, разрывать оптоволоконную линию и использовать монолитный оптический элемент, что не совсем удобно. В случае использования волоконных акустооптических модуляторов частота модуляции достигает сотен МГц, что затрудняет изготовление электроники.

В целях сохранения мощности излучения по оптоволоконным линиям вплоть до входа в предварительный усилитель мощности или в систему измерения/управления фазой силовых каналов было решено использовать

волоконный модулятор. Волоконный модулятор может быть реализован как на электрооптическом эффекте (модулятор интенсивности), так и на изменении оптической длины волокна.

Электрооптический модулятор широко используется в различных приложениях, и, прежде всего, в системах передачи информации нового поколения и мультиплексирования по длинам волн. Полуволновое напряжение для такого модулятора составляет около 1.5-2 В и частотный диапазон от единиц Гц до сотен МГц. Однако серийно выпускаемые модуляторы ориентированы на длину волны излучения 1.56 мкм и без дополнительных исследований не могут быть использованы.

Поэтому было решено остановиться на волоконном модуляторе фазы. Модуляция фазы в нашем случае производилась путем изменения механических напряжений в оптическом волокне, намотанном на пьезокерамическую катушку, на которую подается управляющий сигнал от генератора звуковых колебаний, работающего на резонансной частоте катушки (11 кГц).

В первых экспериментах использовался независимый генератор гармонических колебаний с добротностью не менее  $10^3$ - $10^4$ , но по результатам работы эта схема была признана не подходящей. Предлагаемая нами система когерентного сложения весьма чувствительна к фазовым шумам, поэтому вместо внешнего, независимого генератора было предложено использовать генератор, у которого в качестве частото задающего элемента использовался сам пьезоэлемент, как в кварцевых генераторах.

Для волн  $E_1 = E_{10} \cdot e^{i(\omega \cdot t + C)}$  рабочего канала и  $E_2 = E_{20} \cdot e^{i(\omega \cdot t + B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0))}$  опорного канала, интерференционный сигнал на выходе фотоприемника с предусилителем в зависимости от фазы опорного сигнала ( $\varphi$ ) можно описать таким образом:

$$I = A \cdot \cos(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + C) + D, \quad (17)$$

где  $A$  – амплитуда интерферирующей волны,

$B$  – амплитуда модуляции опорного канала по фазе,

$\varphi_0$  – сдвиг фазы механической модуляции и синхросигнала,

$C$  – сдвиг среднего значения фазы опорного и рабочего каналов,

$D$  – постоянная величина.

Знак и величина  $A$  может меняться от величины оптического лазерного сигнала, коэффициентов усиления электронных компонентов и полярностью подключения пьезокерамики. Постоянная составляющая подавляется на входе устройства фильтром низких частот. Поэтому данными параметрами можно пренебречь.

Из анализа, проведенного в работе [103], следует, что используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги на уровне 0.001 градуса на длине волны гелий-неонового лазера 632.8 нм с учетом большого класса шумов. Поскольку механические и акустические колебания ограничивают чувствительность и точность фазовых измерений, то эти значения можно улучшить сужением полосы приема, т.е. увеличением времени измерений или увеличением постоянной времени интегрирования в фазовом детекторе.

Система управления выполнена на базе синхронно-фазового детектора, который работает в области максимума или минимума интерференции. Ключевой синхронный детектор, собранный на стандартных микросхемах, позволяет работать на частотах модуляции до нескольких десятков кГц. Соотношение собственных значений сигнал/шум не хуже  $10^3$ . В области подъема или спада интенсивности интерференции будет наблюдаться максимальный размах амплитуды модуляции на частоте модуляции, но будет слабая чувствительность к разности фаз между опорным и рабочим каналом.

При работе в области максимума или минимума интерференции, когда разность средней фазы опорного сигнала и фазы рабочего канала сдвинуты на целое число полуволн, для амплитуд модуляции фазы опорного сигнала не более  $\pm 1/4$  длины волны будет наблюдаться модуляция сигнала интерференции на удвоенной частоте модуляции. Работа системы проиллюстрирована на рис. 43. Более наглядно режим работы в области максимума проиллюстрирован на рис. 44.

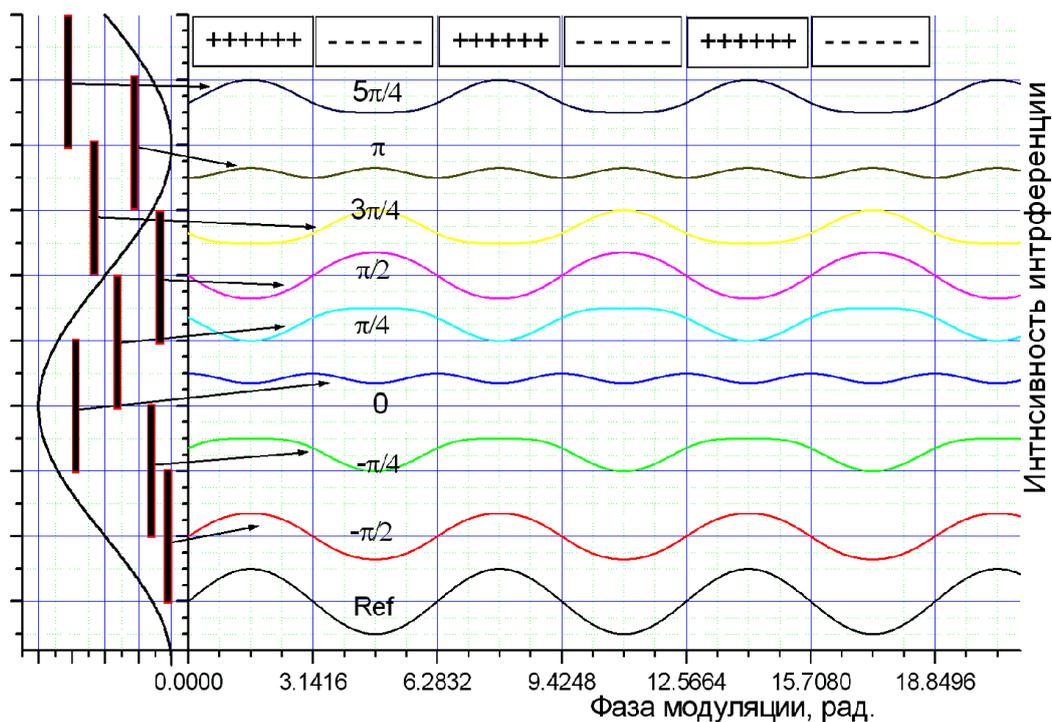


Рис. 43. Зависимость интенсивности интерференционной картины от фазы модулирующего сигнала (нижняя кривая) и от сдвига фаз рабочего канала относительно среднего значения фазы опорного. В верхней части рисунка показано как работает синхронный детектор, – какие области идут в полезный сигнал с «плюсом», какие с «минусом».

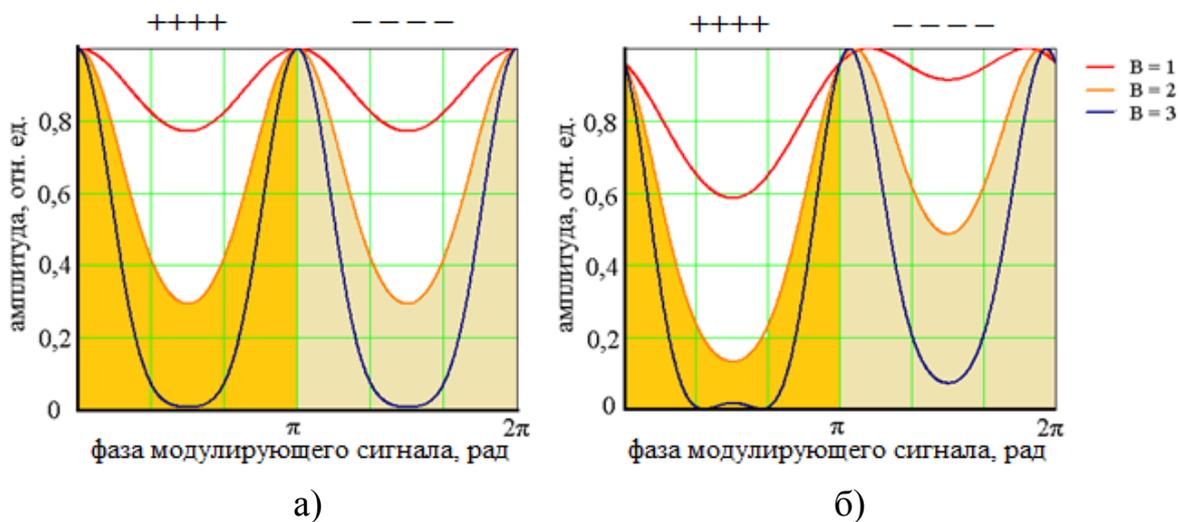


Рис. 44. Зависимость амплитуды интерференционного сигнала от фазы модулирующего сигнала при разных значениях амплитуды ( $B$ ) модуляции, а)  $C = n\lambda/2$ , б)  $C \neq n\lambda/2$ . В верхней части рисунка показано, какие области фазы модуляции приводят к увеличению полезного сигнала («плюс»), какие – к уменьшению («минус»).

Удвоенная частота модуляции будет наблюдаться, потому, что увеличение (для области минимума) или уменьшение (для области максимума) сигнала интерференции будет одинаковым и для положительной и для отрицательной полуволны модулирующего сигнала, таким образом, за один период опорного сигнала будет наблюдаться два одинаковых, симметричных пика интерференционной картины.

Синхронный детектор на выходе покажет нулевое значение сигнала, потому, что на плюсовой и минусовой входы дифференциального усилителя будут поступать одинаковые сигналы (определяется площадью под кривой).

Если же отстройки фазы опорного и рабочего канала не будут равны целым числам полуволн, картина перестанет быть симметричной и синхронный детектор выдаст ненулевой сигнал. Направляя этот сигнал на управляющий элемент, изменяющий длину оптического пути в рабочем канале, можно получить устойчивую, стабилизирующую отрицательную обратную связь. Полярность подключения управляющего элемента определит, где будет удерживаться сигнал интерференции в максимуме или в минимуме.

Управляющий сигнал на выходе ключевого синхронного детектора можно представить в виде разности интегралов сигнала с фотоприемника для первого и второго полупериодов модуляции:

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^{\pi} \cos(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + C) d\varphi - \int_{\pi}^{2\pi} \cos(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + C) d\varphi = \\
 &= -2\text{Sin}C \int_0^{\pi} \sin(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0)) d\varphi.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Видно, что при нулевом сдвиге фаз (C) рабочего канала и среднего значения фазы опорного управляющий сигнал нулевой, и система находится в устойчивом равновесии, так как при C отличном от нуля появится возвращающий отрицательный сигнал обратной связи.

Чувствительность системы определяется интегралом. Видно, что при  $\varphi = \pi/2$ , величина  $\text{Sin}(\varphi+\varphi_0)$  будет симметрично знакопеременной и, следовательно, интеграл обратится в ноль. Система перестанет реагировать на изменения  $C$  – это крайне нежелательная ситуация. При  $\varphi = \pi$  (сдвиг на полпериода) интеграл изменит знак на противоположный, система окажется в неустойчивом равновесии и быстро перейдет в устойчивое состояние, когда опорный и рабочий каналы будут не в фазе, а в противофазе. При амплитуде модуляции опорного канала по фазе  $B = 2$  выражение (22) принимает максимальное значение (рис. 45).



Рис. 45. Зависимость чувствительности управляющей системы от амплитуды модуляции фазы.

В результате математического анализа работы управляющей системы на базе ключевого синхронного детектора можно сказать, что:

1) следует следить за разностью фаз механических колебаний пьезокерамики и синхросигнала – не допускать сдвига более чем на  $\pi/4$  (хотя система продолжает работать, однако работа становится неустойчивой);

2) минимальная амплитуда модуляции длины оптического пути в опорном канале должна быть около  $1/3$  длины волны ( $2 \pm 0.4$  рад), при уменьшении уменьшается чувствительность, а увеличение чревато «перескоком» на противофазный режим, хотя и увеличивает чувствительность системы измерений.

В нашей установке один из восьми каналов выделялся как опорный и шел на пьезокерамический модулятор фазы (8, см. рис. 46). Остальные семь использовались как рабочие, и каждый шел на свой пьезокерамический

управляющий элемент (фазовые корректоры, 1-7, рис. 46). Чтобы предотвратить акустическую связь, между элементами были проложены виброизоляторы.

Каждый элемент представлял собой пьезоэлектрическую катушку диаметром 85 мм. Количество витков волокна на пьезоэлементе опорного канала – 4, рабочего канала – 10.

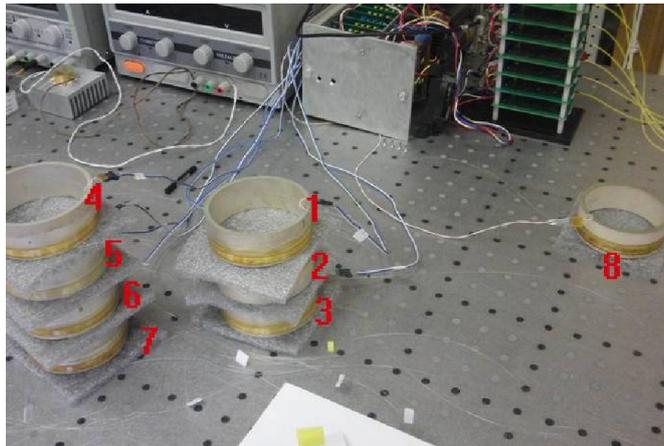


Рис. 46. Пьезокерамические элементы.

1-7 – управляющие элементы, 8 – модулятор фазы.

Опорный канал модулировался пьезокерамикой по фазе с глубиной модуляции (изменением длины оптического пути) до нескольких длин волн излучения и частотой модуляции 11 кГц (на первой резонансной частоте пьезокерамики). Модуляция на второй резонансной частоте (56 кГц) не применялась, поскольку в этом режиме изменение длины намотанного волокна на пьезоэлемент оказалось много меньше, чем в первом случае. Объяснить это можно тем, что длина окружности катушки на второй резонансной частоте изменяется меньше, чем на первой (рис. 47).

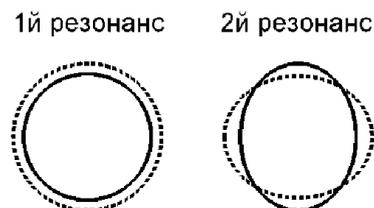


Рис. 47. Моды пьезокерамических полых цилиндров. Линиями показана деформация катушки в разные полупериоды модуляции.

### 3.1.3. Система усиления рабочих каналов.

Волоконные усилители и диод накачки представлены на рис. 48. Волоконный усилитель (1) представлял собой GTWave волокно со следующими параметрами. Одна сердцевина - пассивная, многомодовая с диаметром 125 мкм ( $NA=0.45$ ), использовалась для ввода накачки. Другая - активная, одномодовая (6/125 мкм,  $NA=0.11$ ), легированная ионами  $Yb^{3+}$ . Длина волокна одного усилителя составляла около 20 м. Волокно было свернуто в кольца диаметром около 150 мм.

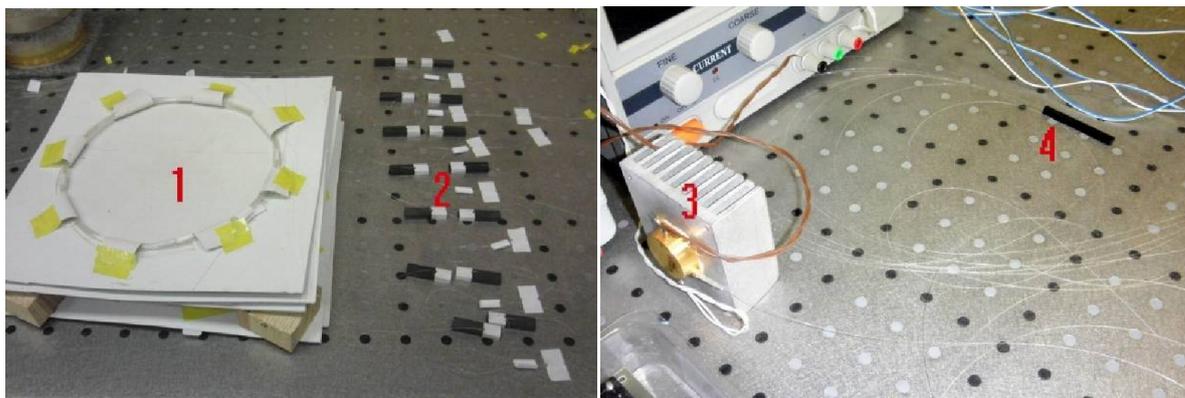


Рис. 48. Система усиления рабочих каналов.

1 - волоконный усилитель, 2 - система контроллер/аттенюатор, 3 - диод накачки, 4 - разветвитель.

Накачка производилась полупроводниковым диодом (3) с помощью семиканального разветвителя (4). Зависимость выходной мощности излучения диода от тока накачки представлена на рис. 49. Мощности в плечах семиканального разветвителя равнялись от 13% до 16% от входной мощности.

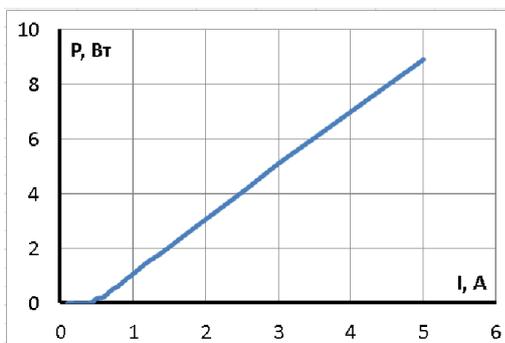


Рис. 49. Зависимость выходной мощности излучения диода от тока накачки.

Для исправления поляризации излучения в рабочих каналах после усилителей использовались контроллеры поляризации. Для выравнивания выходной мощности рабочих каналов использовались аттенюаторы. Система контроллер/аттенюатор представлена на рис. 50. Простейший контроллер поляризации представлял собой небольшую петлю волокна (1), закрепленную между двух магнитов. При перемещении магнитов друг относительно друга, вследствие перегиба, в петле наводились механические напряжения, что приводило к наведенному двулучепреломлению в сердцевине волокна, что в свою очередь позволяло преобразовывать эллиптическую поляризацию выходного излучения в линейную.

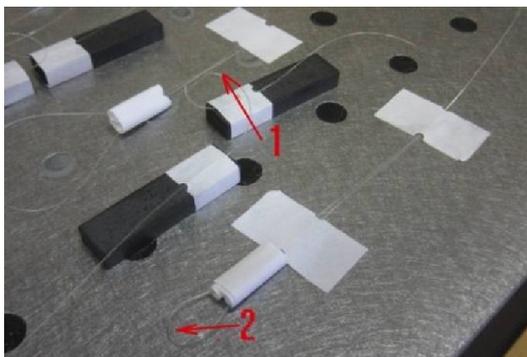


Рис. 50. Система контроллер/аттенюатор.  
1 - контроллер поляризации, 2 - аттенюатор.

Простейший аттенюатор представлял собой петлю волокна (2), диаметром 2 - 3 мм. При таких диаметрах петли становились значительными изгибные потери. Выходная мощность регулировалась за счет изменения диаметра петли.

#### **3.1.4. Система пространственного сложения пучков.**

После усиления и подстройки по мощности и поляризации излучение рабочих каналов шло в систему пространственного сложения пучков (рис. 51) и выводилось с помощью волоконных коллиматоров закрепленных в держателе (2). Излучение опорного канала с модулятора фазы выводилось расширенным пучком

(диаметром 12мм) с помощью коллиматора и объектива (1). Объединение опорного и рабочих пучков осуществлялось на делительной пластине (4) с коэффициентом деления 1/20. Часть излучения рабочих каналов, отраженная от делительной пластинки, и излучение опорного канала шли на фотоприемники через коллиматоры закрепленные в держателе (3).

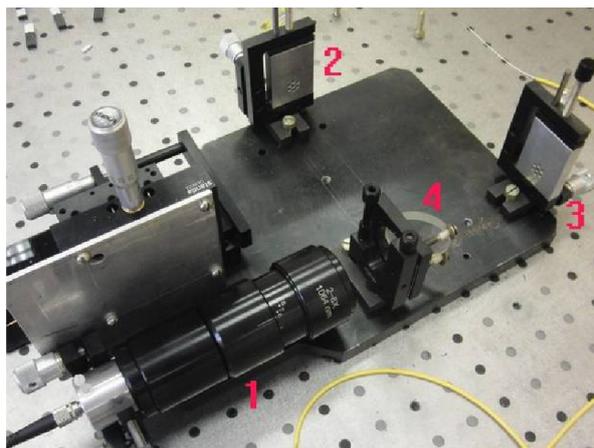


Рис. 51. Система пространственного сложения пучков.

1 – телескоп опорного канала, 2 – коллиматоры рабочих каналов в держателе, 3 – коллиматоры приемных фотодетекторов в держателе, 4 – делительная пластина.

Коллиматоры были вклеены в держатели таким образом, чтобы их оси излучения пересекались в одной точке на расстоянии 4 метров от держателя. Сами коллиматоры находились в вершинах правильного 6-ти угольника и в его центре. Конструкция коллиматоров не позволяла расположить их на расстояние ближе 4 мм. Вид держателя и распределение каналов по номерам показаны на рис. 52.

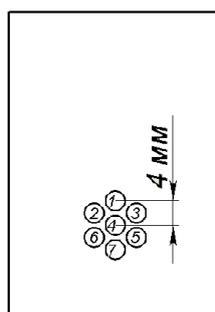


Рис. 52. Вид держателя и распределение каналов по номерам.

Влияние расстояния между коллиматорами (величины коэффициента заполнения) на суммарный профиль пучка можно легко рассчитать для сложения излучения одномодовых пучков. В данном случае одномодовый пучок представляет собой пучок Гаусса. Распределение напряженности поля такого пучка в ПДСК записывается в виде:

$$E(x, y, z) = \frac{W_0}{W(z)} \cdot \exp \left[ i \cdot (kz - \Phi(z)) - (x^2 + y^2) \cdot \left( \frac{1}{W(z)^2} - \frac{ik}{2R(z)} \right) \right], \quad (19)$$

$$\text{где } W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2} - \text{радиус пучка по уровню } 1/e, \quad (20)$$

$$R(z) = z \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\pi W_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] - \text{радиус волнового фронта}, \quad (21)$$

$$\Phi(z) = \arctg \left( \frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right) - \text{фаза волны}, \quad (22)$$

$W_0$  - радиус перетяжки на выходе из коллиматора,  $\lambda$  - длина волны,  $k$  - волновой вектор.

Профили интенсивности рассчитывались аналитически в программе MathCAD. В случае когерентного сложения двух каналов интенсивность рассчитывалась как:

$$I_{\text{sum}}(x, y) = \left| E_{\text{sum}}(x, y) \cdot \overline{E_{\text{sum}}(x, y)} \right|, \quad (23)$$

$$\text{где } E_{\text{sum}}(x, y) = E(x, y) + E(x, y + b). \quad (24)$$

В случае не когерентного сложения интенсивность рассчитывалась как:

$$I_{\text{sum}}(x, y) = 2 \left| E(x, y) \cdot \overline{E(x, y)} \right|, \quad (25)$$

В случае когерентного сложения семи каналов интенсивность рассчитывалась по формуле 23, где суммарное поле рассчитывалось по формуле 26, при  $N=1$  (при  $N = 2$  возможно рассчитать поле для 19 каналов).

$$E_{\text{sum}}(x, y) = \sum_{n=-N}^N E(x - n \cdot b, y) + \sum_{k=0}^1 \sum_{m=1}^N \sum_{n=-N}^{N-m} E \left[ x - m \cdot \frac{b}{2} - n \cdot b, y + (-1)^k \cdot m \cdot b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right], \quad (26)$$

где  $k, n, m, N$  - простые числа,  $b$  - расстояние между каналами.

В случае некогерентного сложения интенсивность рассчитывалась как:

$$I_{\text{sum}}(x, y) = 7 \left| E(x, y) \cdot \overline{E(x, y)} \right|, \quad (27)$$

Результаты теоретического расчета для двух и семи каналов представлены в таблицах 2 и 3 соответственно. В нашей системе коэффициент заполнения составлял около 16. Синей пунктирной линией показан суммарный профиль пучка при некогерентном сложении, красной – при когерентном сложении.

Таблица 2. Профили интенсивности в ближней и дальней зонах в зависимости от коэффициента заполнения (для двух каналов). Пунктирной линией показан профиль при некогерентном сложении.

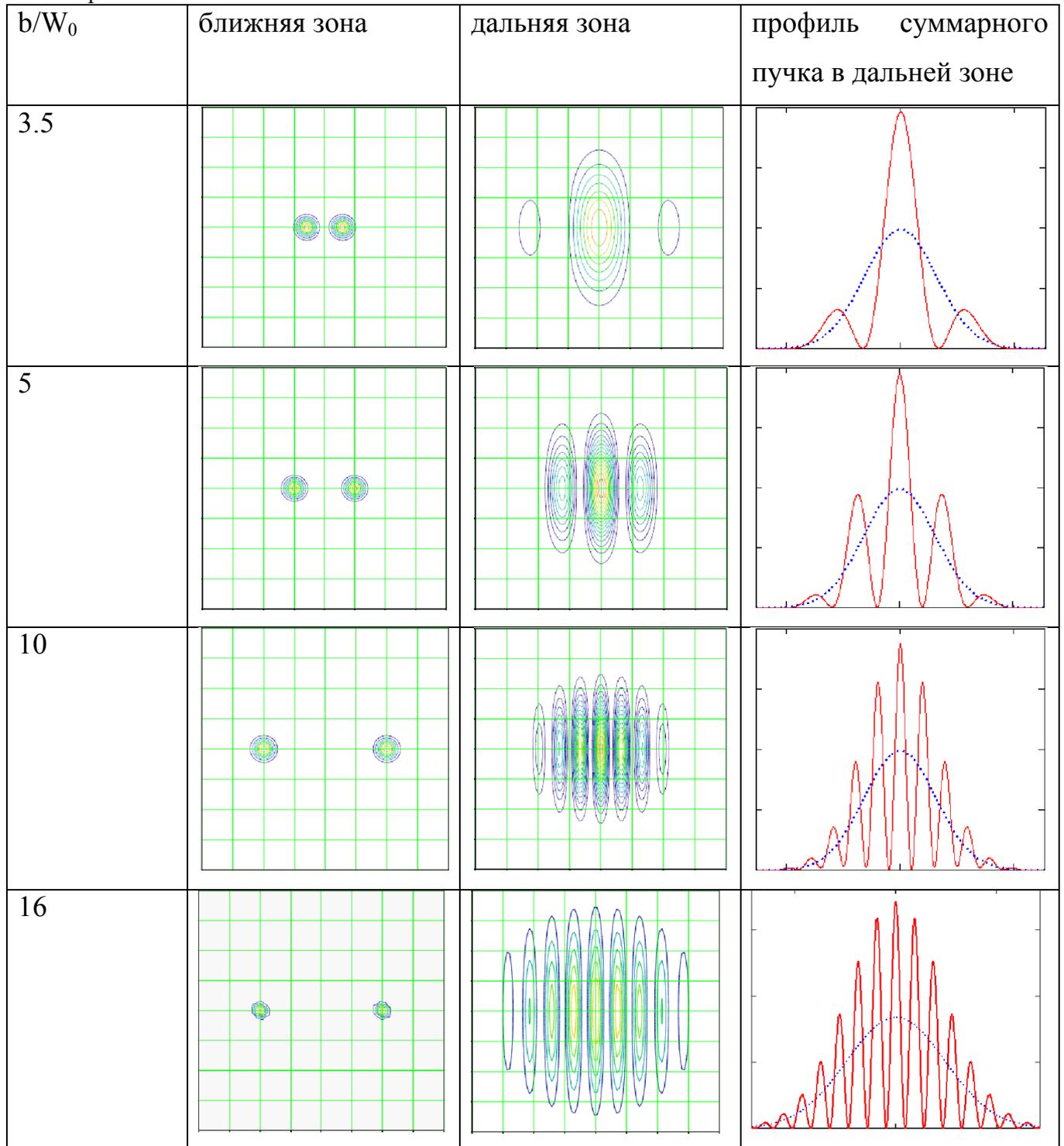
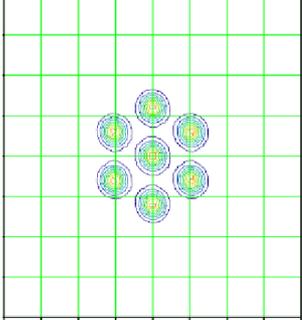
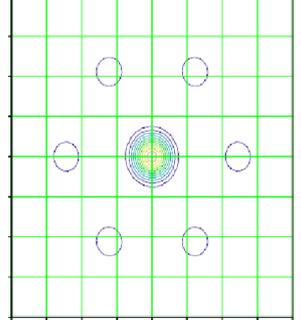
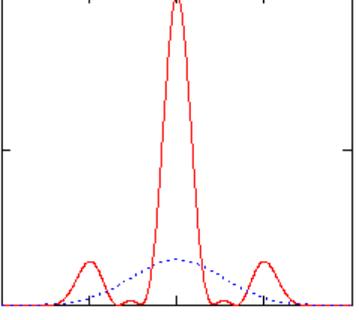
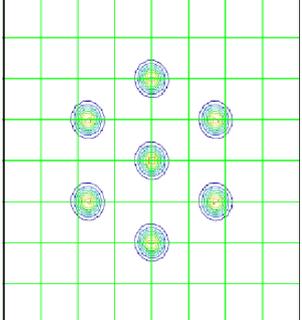
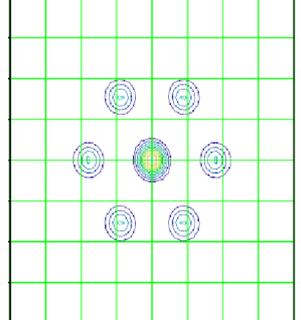
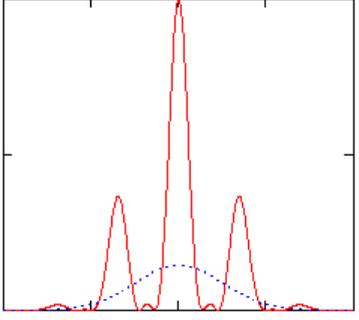
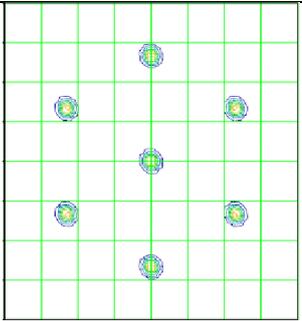
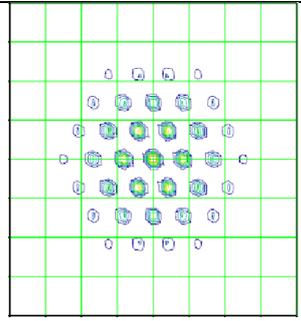
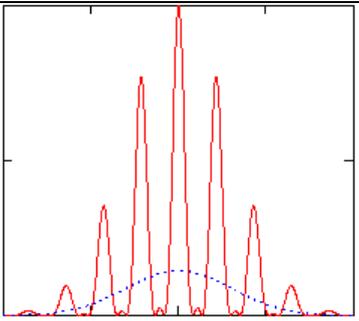
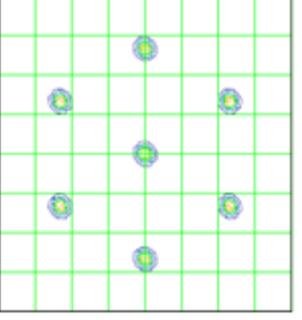
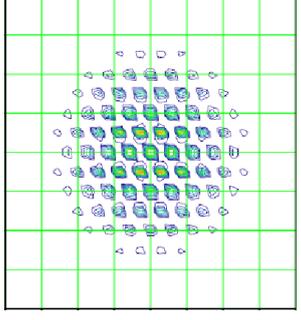
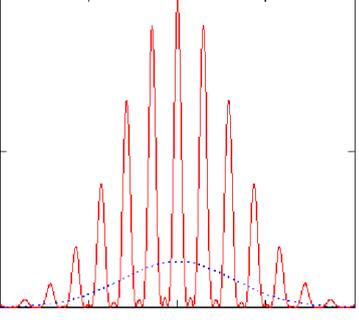


Таблица 3. Профили интенсивности в ближней и дальней зонах в зависимости от коэффициента заполнения (для семи каналов). Пунктирной линией показан профиль при некогерентном сложении.

| $b/W_0$ | ближняя зона                                                                        | дальняя зона                                                                         | профиль суммарного пучка в дальней зоне                                               |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.5     |    |    |    |
| 5       |   |   |   |
| 10      |  |  |  |
| 16      |  |  |  |

### 3.1.5. Фотоприемная часть.

С приемных коллиматоров излучение по одномодовым волокнам шло на 7 независимых фотоприемников (1-7, рис. 53). Усилитель фотоприемника имел двойной выход. С одного выхода сигнал шел на схему синхронного детектора, с другого – на осциллограф для контроля. На рисунке только один кабель (справа) вел к осциллографу, поскольку в работе использовался одноканальный осциллограф.

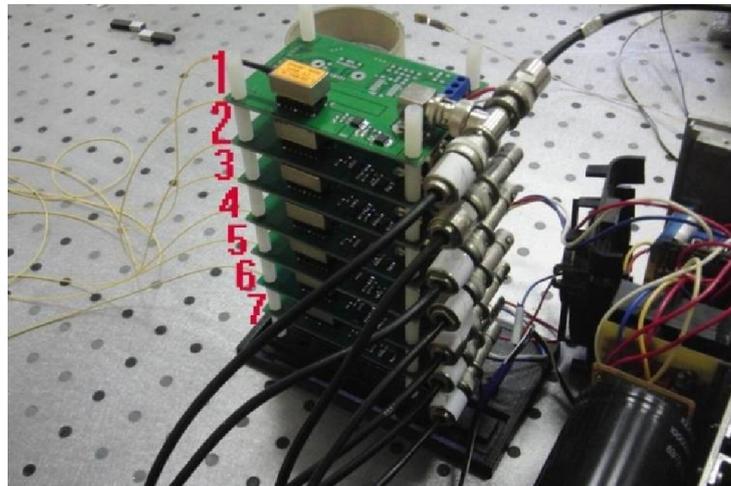


Рис. 53. Фотоприемная часть. 1-7 - фотоприемники.

### 3.1.6. Блок управления.

После фотодетектирования и предусиления сигнал поступал на блок управления (рис. 54).

Блок управления принимал и обрабатывал сигналы с фотоприемников, формируя гармонические колебания для фазового элемента, а также сигналы для управляющих пьезоэлементов. Блок управления состоял из плат синхронных детекторов (1-7), платы генератора гармонических колебаний (8), блока питания фотоприемников (9), общего блока питания (10).

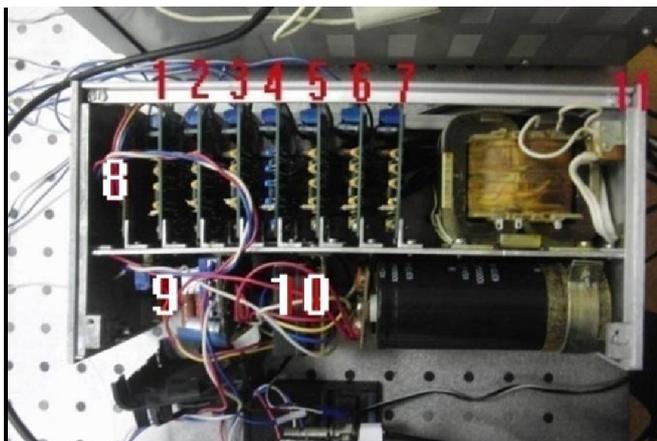


Рис. 54. Блок управления.

1-7 – платы синхронного детектора, 8 – плата генератора гармонических колебаний, в которую входят, 9 – блок питания фотодетекторов, 10 – общий блок питания, 11 – тумблер ВКЛ/ВЫКЛ,

Схемы а) и в) в модуле генератора гармонических колебаний (рис. 40) были необходимы для управления частотой и амплитудой модуляции пьезокерамического модулятора фазы оптического сигнала в опорном канале. Фазовращатель (рис. 40б) согласовал сдвиг фазы механических колебаний модулятора относительно электрических. Электрический опорный сигнал со схемы г) служил для управления синхронным детектором ж). Фотоприемник и предусилитель для него д) преобразовывали оптический интерференционный сигнал опорного и рабочего каналов в электрический. Селективный полосовой предусилитель е) подготавливал сигнал для синхронного детектора, усиливая сигнал на рабочей частоте и отсекая шумы в других частотных интервалах. Синхронный детектор ж) являлся фазочувствительным элементом, сигнал с которого поступал на исполнительный механизм — з) высоковольтный усилитель, который в свою очередь управлял пьезокерамическим фазосдвигающим устройством в рабочем канале.

### 3.2. Результаты.

Взаимное расположение пятен лазерных пучков на ПЗС матрице показано на рис. 55. Диаметр кругов около 4 мм соответствует диаметру лазерного пучка на полувысоте. Измерения проводились на расстоянии 4 м. Из рисунка следует, что погрешность сведения лазерных пучков в среднем по углу составляет менее 0,001 рад.

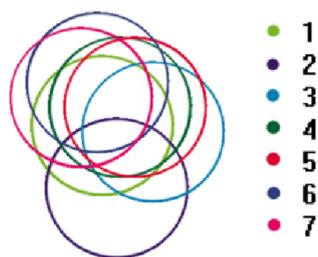


Рис. 55. Взаимное расположение пятен лазерных пучков на ПЗС матрице.

Экспериментальные и теоретические профили интенсивности суммарного поля при сложении различных каналов в режиме фазовой синхронизации представлены на рис. 56 - 59.

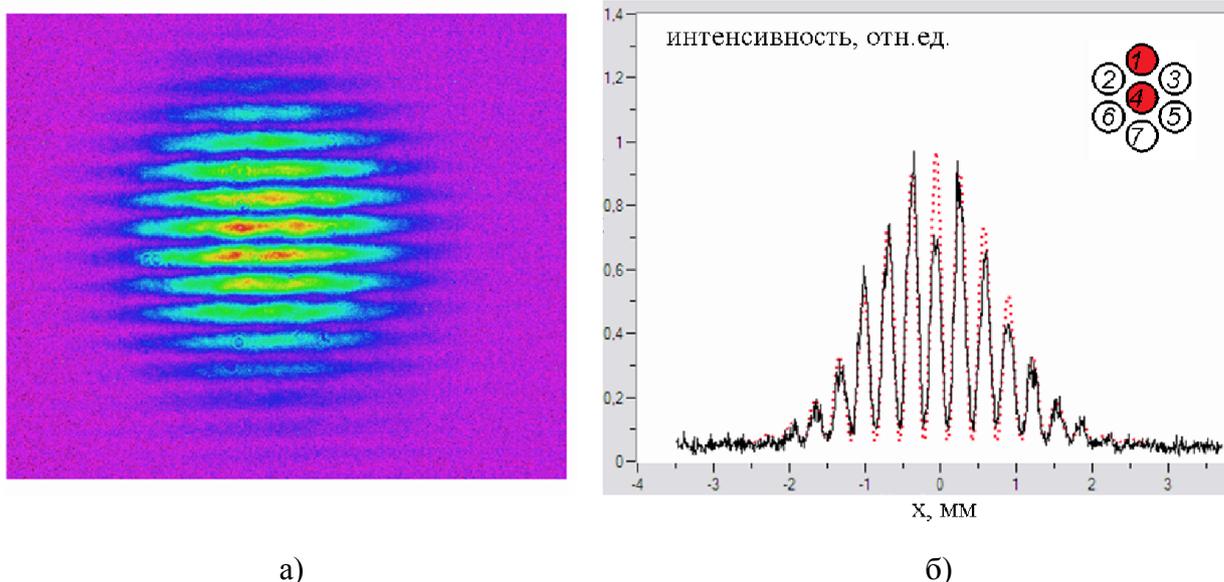
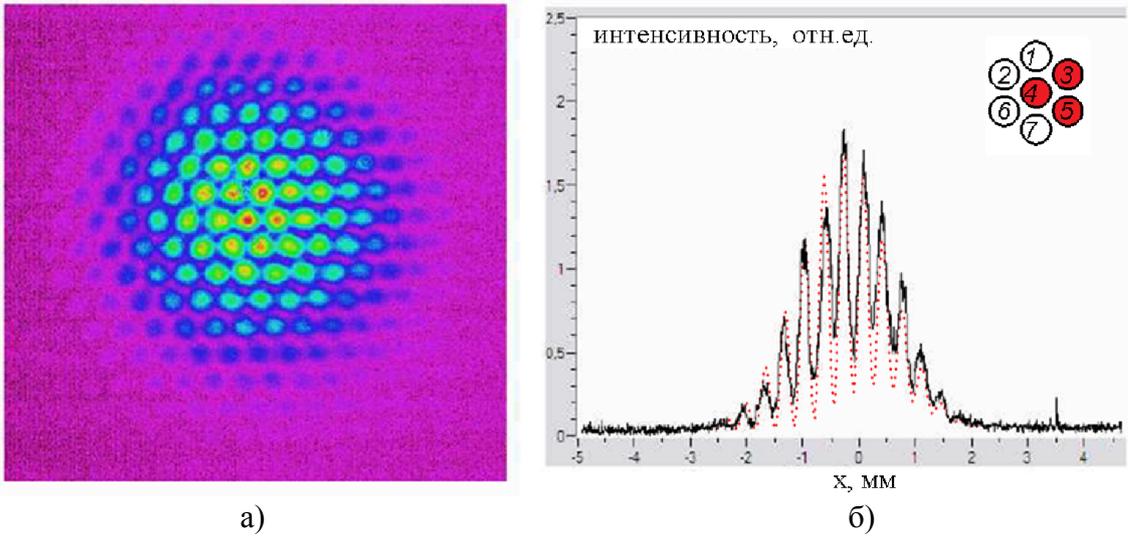


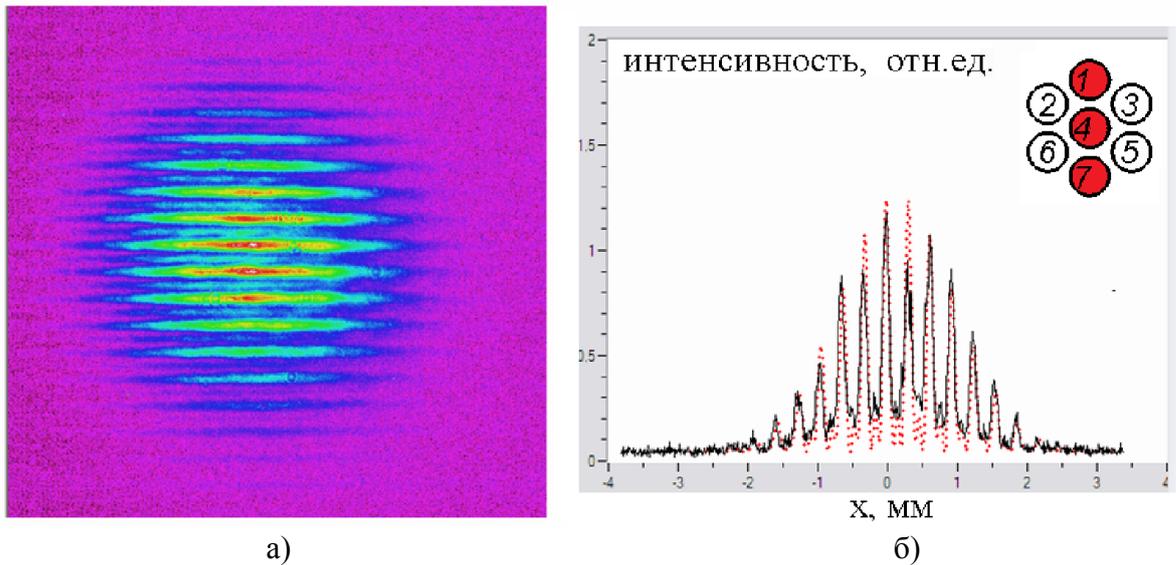
Рис. 56. Распределение поля при сложении каналов 1,4.

а) поле в дальней зоне, б) профиль интенсивности в дальней зоне (сплошная линия - эксперимент, пунктир - теоретический расчет)



а) поле в дальней зоне, б) профиль интенсивности в дальней зоне (сплошная линия - эксперимент, пунктир - теоретический расчет)

Рис. 57. Распределение поля при сложении каналов 3,4,5.



а) поле в дальней зоне, б) профиль интенсивности в дальней зоне (сплошная линия - эксперимент, пунктир - теоретический расчет)

Рис. 58. Распределение поля при сложении каналов 1,4,7.

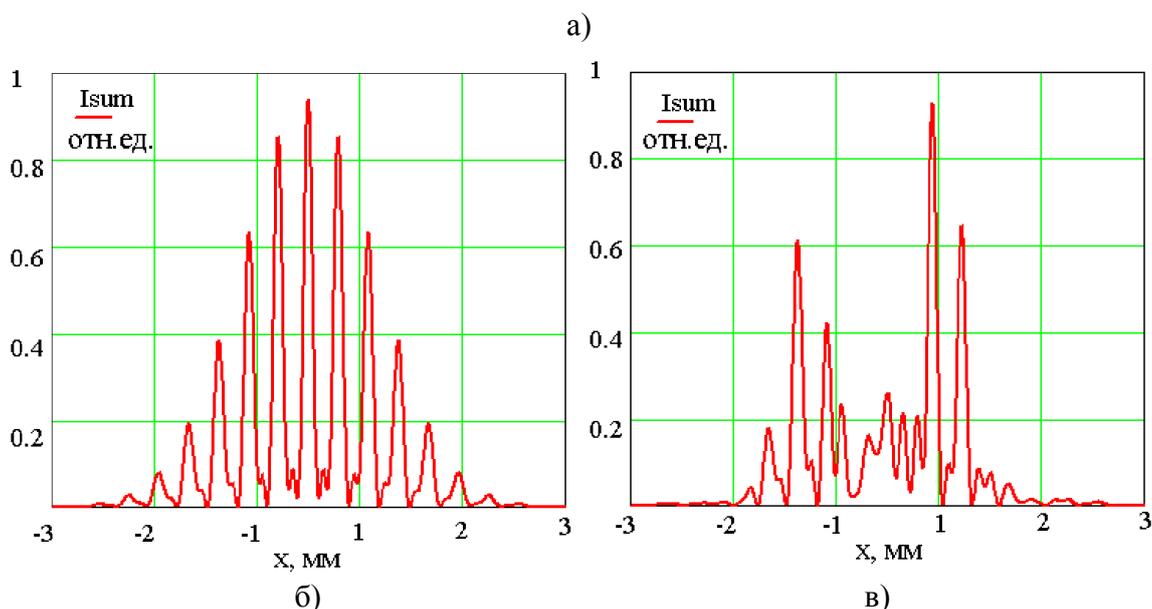
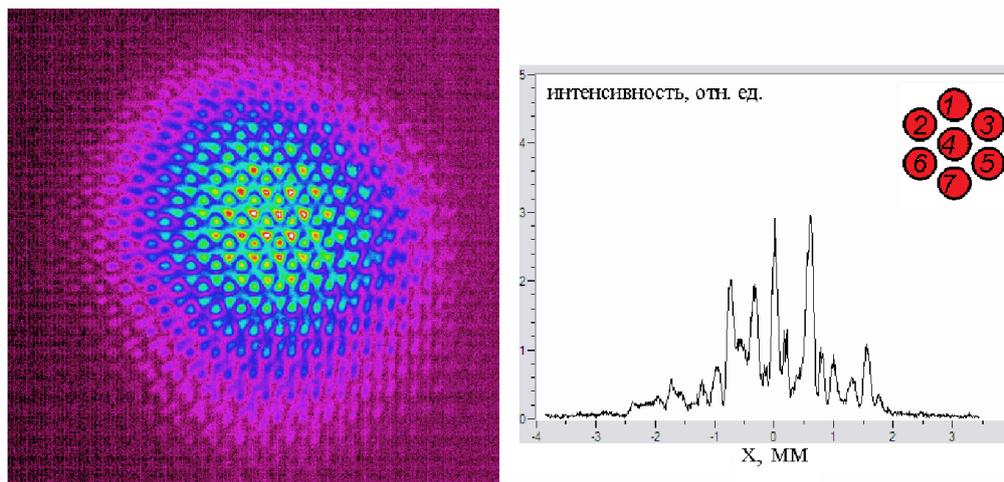


Рис. 59. Распределение поля при сложении всех 7ми каналов.  
 а) поле и профиль интенсивности в дальней зоне (эксперимент),  
 б) теоретический профиль интенсивности в дальней зоне,  
 в) теоретический профиль интенсивности в дальней зоне с учетом смещения плоскости ПЗС матрицы

Как видно из рисунков полученные данные хорошо согласуются с теоретическим расчетом. В случае, показанном на рис. 59а видно, что распределение суммарного поля не соответствует теоретическому расчету, представленному на рис. 59б. Такое рассогласование между экспериментом и расчетом могло произойти из-за небольшого смещения горизонтальной плоскости ПЗС матрицы относительно горизонтальной плоскости симметрии поля суммарного пучка. И с введением отклонения в 1 градус по оси симметрии и отклонения 1 мм по вертикальной оси теоретический расчет дает похожую картину (рис. 59в).

На рис. 60 приведена осциллограмма интенсивности излучения в центральной части суммарного профиля в зависимости от времени.

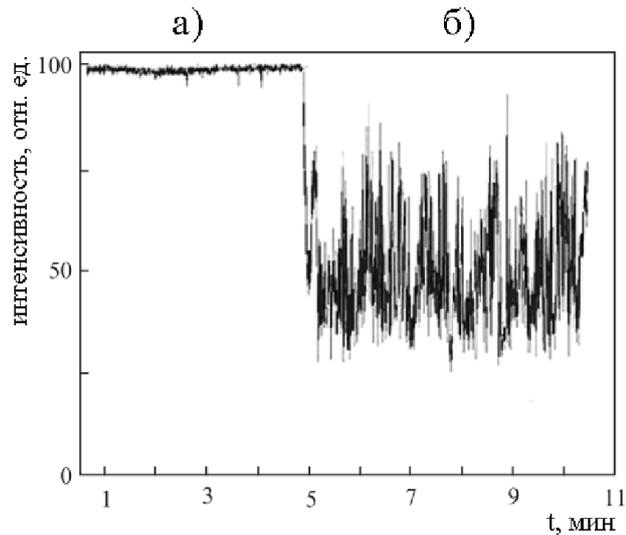


Рис. 60. Осциллограмма интенсивности излучения в центральной части суммарного профиля при включенной (а) и выключенной (б) системе удержания фазы.

После отработки системы когерентного сложения на малом уровне мощности выходного сигнала (50-100 мВт на рабочий канал) была собрана установка с максимальной суммарной выходной мощностью до 35 Вт, схема этой установки приведена на рис. 61. Отличия от установки, приведенной на рис. 40, состоят в том, что в данной системе был дополнительно использован волоконный предусилитель с двухкаскадным оптическим изолятором после одночастотного полупроводникового лазерного диода, а также каждый волоконный усилитель рабочих каналов накачивался отдельным диодом накачки с максимальной мощностью до 9 Вт каждый. После предусилителя для подавления обратной мощности с усилителей рабочих каналов был включен дополнительный оптический изолятор.

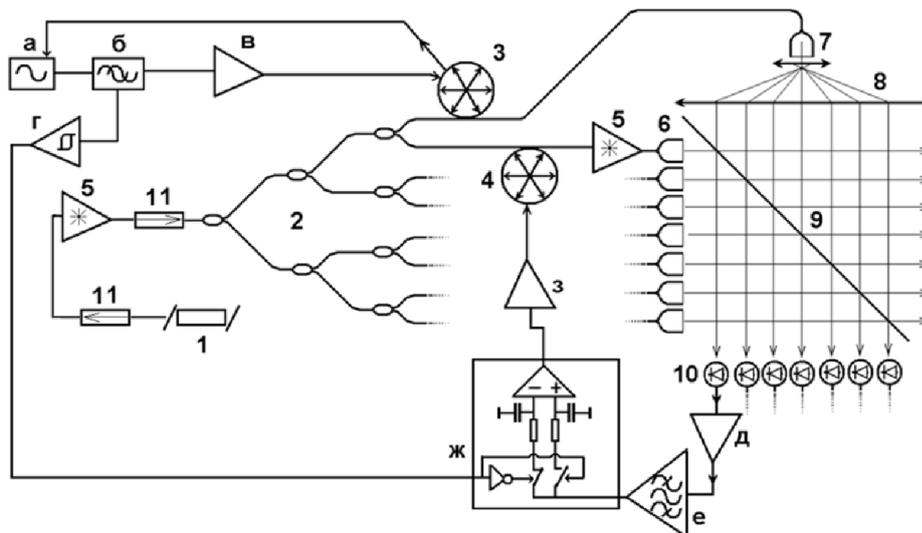


Рис. 61. Схема и общий вид установки.

*Оптические элементы:* 1 – задающий лазер, 2 – волоконные ответвители, 3 – пьезокерамический модулятор фазы, 4 – пьезокерамический управляющий элементы, 5 – волоконные иттербиевые усилители, 6 – коллиматоры рабочих каналов (в держателях), 7 – коллиматор опорного канала, 8 – телескоп, 9 – делительная пластина, 10 – фотоприемники, 11 - двухкаскадный оптический изолятор.

*Электронные компоненты:* а) генератор гармонических (синусоидальных) колебаний на собственной частоте пьезокерамического модулятора, б) фазовращатель модулирующего и опорного сигналов, в) усилитель модулирующего сигнала, г) формирователь прямоугольного опорного сигнала, д) предусилитель для фотоприемника, е) селективный полосовой предусилитель, ж) синхронный детектор, з) выходной высоковольтный усилитель.

Зависимости мощности выходного излучения рабочих каналов от мощности накачки представлены на рис. 62.

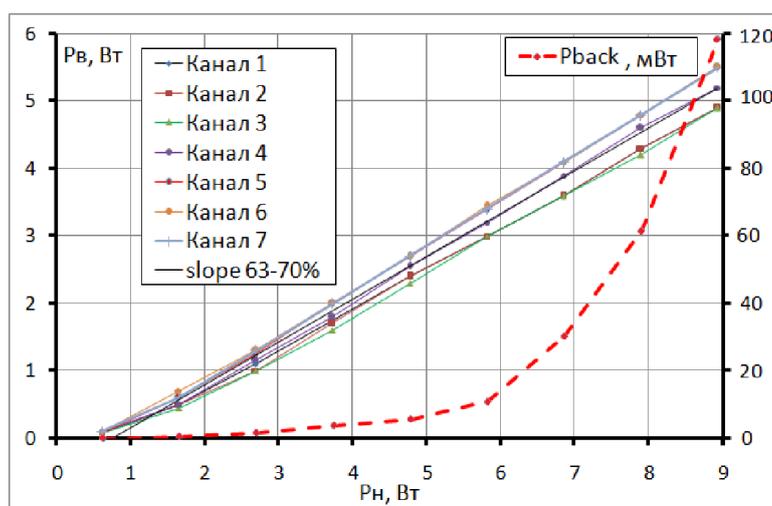


Рис. 62. Зависимости мощности выходного излучения рабочих каналов от мощности накачки.

Максимальная мощность выходного излучения рабочих каналов варьировалась в пределах от 4,9 до 5,5 Вт при дифференциальной эффективности от 63 до 70%. Максимальная суммарная выходная мощность составила 35 Вт. Суммарные профили интенсивности лазерного пучка при сложении семи рабочих каналов в свободном режиме и в режиме фазовой синхронизации представлены на рис. 63.

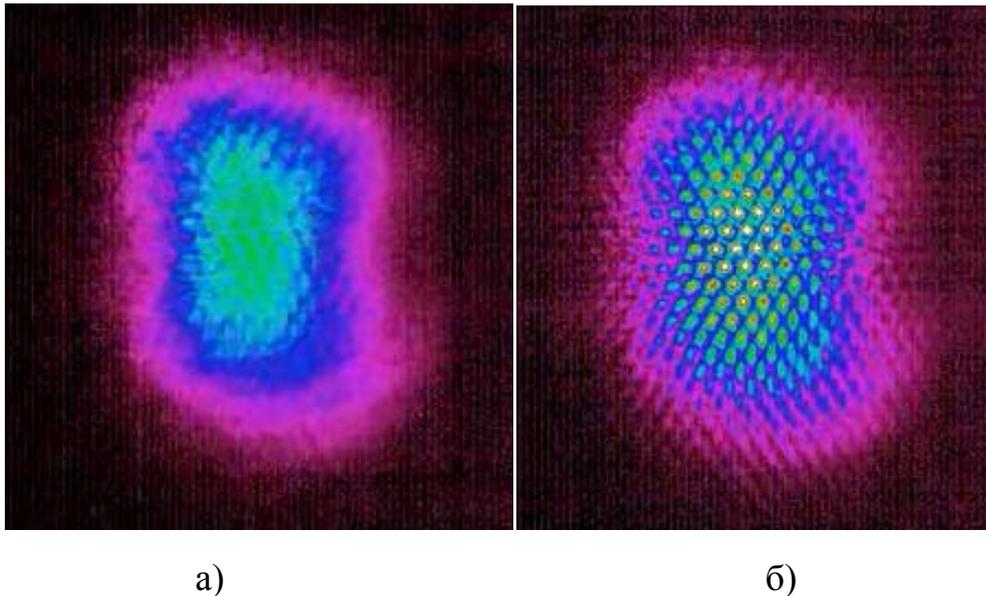


Рис. 63. Распределение поля при сложении семи каналов.  
а) свободный режим, б) режим фазовой синхронизации

После включения стабилизирующей отрицательной обратной связи интерферограмма устойчива, с небольшими смещениями. Сигнал в центральной части поля меняется не более чем на 10%.

В процессе исследования не только рассматривались медленные воздействия за счет дрейфа температуры в каналах, но и импульсные – касание волоконных каналов, удар. Эти возмущения превышают те, которые могут наблюдаться в реальной работе, примерно на порядок. Картинка резко менялась. Характерное время изменения составляла десятые доли секунды.

### **3.3. Выводы к Главе III.**

Создана простая и эффективная система удержания разности фаз между несколькими лазерными каналами и разработан алгоритм её работы. На примере когерентного сложения излучения семи каналов иттербиевых волоконных усилителей продемонстрирована устойчивая работа всей системы и показана возможность ее использования в более мощных лазерных системах для компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду, приводящему к относительно медленному (характерное время более 100 мс) изменению фазы излучения в отдельных каналах. Суммарная выходная мощность составила около 35 Вт.

#### **Глава IV. Одночастотный гибридный лазер мощностью 160 Вт на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР и активного волокна конической формы.**

В многокаскадных мощных лазерных системах, построенных по схеме генератор-усилитель, используется несколько промежуточных усилителей мощности, выполненных, как правило, на базе кристаллических или керамических активных элементов разной формы. Для достижения максимального коэффициента усиления и выходной мощности порядка 100 Вт в этих каскадах используются многопроходные схемы на небольших пластинчатых активных элементах или однопроходные на больших (см., например [104,105,106]). Для того, чтобы создать полностью волоконную систему, начиная с задающего генератора и заканчивая входом в мощные (до нескольких кВт на выходе) усилительные каскады, желательно заменить твердотельный предварительный усилитель мощности на волоконный. Такая замена позволит создать оптическую схему, не требующую обслуживания во время работы и значительно более устойчивую к внешнему механическому воздействию, чем многокомпонентный твердотельный усилитель.

С этой целью были проведены эксперименты по созданию мощной лазерной системы на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР и активного волокна конической формы.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 64. Установка состоит из двух главных частей. Первая – гибридный одночастотный лазер с выходной мощностью 5 Вт, подробно описанный в Главе II. Вторая – усилитель на коническом волокне (Т - усилитель).

Гибридный одночастотный лазер включает в себя одночастотный полупроводниковый лазерный диод с ВБР (длина волны генерации 1062 нм, ширина линии генерации  $1,9 \pm 0,2$  МГц), полупроводниковый диод накачки (длина волны накачки 975 нм), волоконный иттербиевый усилитель, двухкаскадный волоконный изолятор Фарадея на 300 мВт для подавления обратной мощности с

волоконного усилителя (подавление обратной мощности порядка 60 дБ), волоконный изолятор Фарадея на 10 Вт для подавления обратной мощности с Т-усилителя (подавление обратной мощности порядка 25 дБ), волоконные разветвители (коэффициент деления 50/50) для контроля мощности задающего генератора и контроля обратной мощности с усилителя.

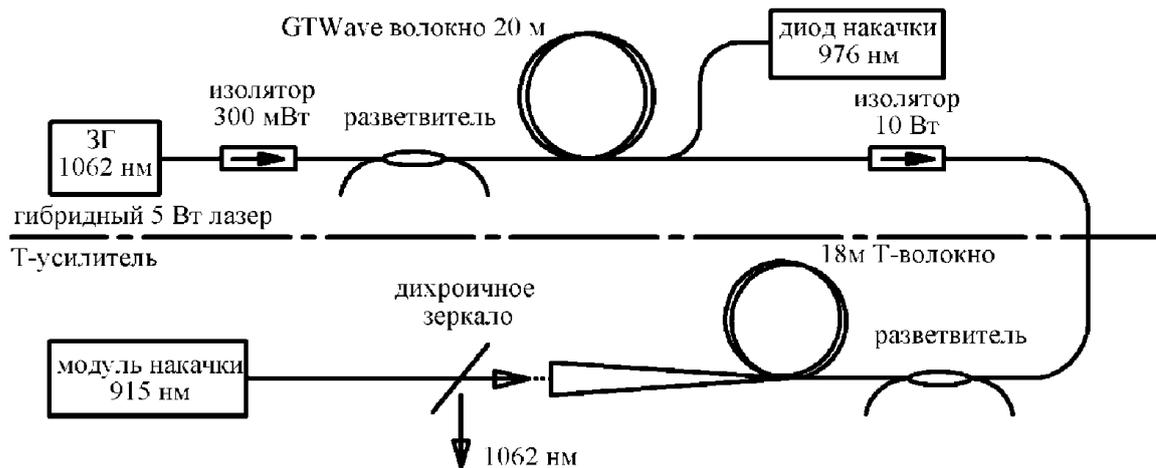


Рис. 64. Схема экспериментальной установки.

Т-усилитель включает в себя усилитель на основе конического волокна, модуль накачки (длина волны 915 нм), дихроичное зеркало (пропускание на 915 нм, отражение на 1062 нм), разветвитель (коэффициент деления 1/99) для контроля мощности с гибридного лазера и контроля обратной мощности с Т-усилителя.

#### 4.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР (1062 нм).

В связи с необходимостью перехода на длину волны 1062 нм, в работе был применен одночастотный полупроводниковый лазерный диод с ВБР с длиной волны генерации 1062 нм мощностью 20 мВт. Выбор длины волны в 1062 нм основывался на том, что, построенная по гибридной схеме, система должна была применяться, как задающий генератор в более мощной лазерной системе на

твердотельных усилителях, где в качестве активной среды выступают кристаллы легированные ионами неодима (Nd:GGG)

#### 4.1.1. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока накачки.

Измерение проводилось с использованием измерителя мощности ORION-TH при различных токах накачки диода. Измерения проводились при оптимальной температуре диода. Оптимальная температура подбиралась по сопротивлению термистора. Сопротивлению термистора, соответствующее оптимальной температуре, находилось в районе 9,5 кОм, что соответствует температуре диода 26°C. Оптимальный ток накачки находился в районе 115 мА. Полученные данные приведены на рис. 65.

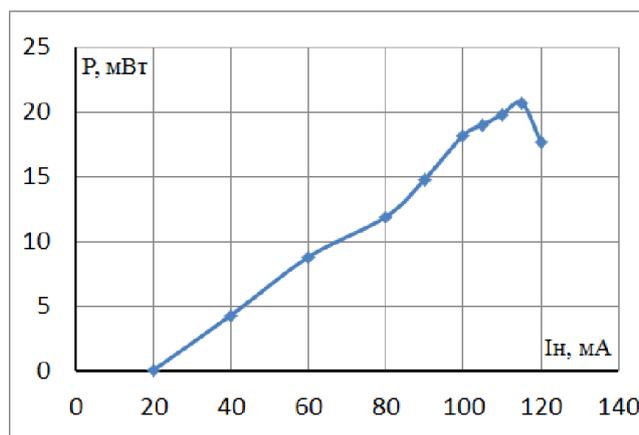


Рис. 65. Зависимость мощности излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР от тока накачки .

Максимальная выходная мощность задающего диода достигалась при токе накачки около 118 мА. Но данной точке режим работы диода носил неустойчивый характер.

#### 4.1.2. Спектр излучения лазерного диода.

Измерение проводилось с помощью спектрометра Anritsu MS96A. Спектр снимался при оптимальном режиме работы диода ( $I_z = 115$  мА,  $T = 26^\circ\text{C}$ ). Полученный спектр излучения представлен на рис. 66. Спектр получен при разрешении прибора 0,1 нм. Максимум излучения диода приходится на 1061,2 нм.

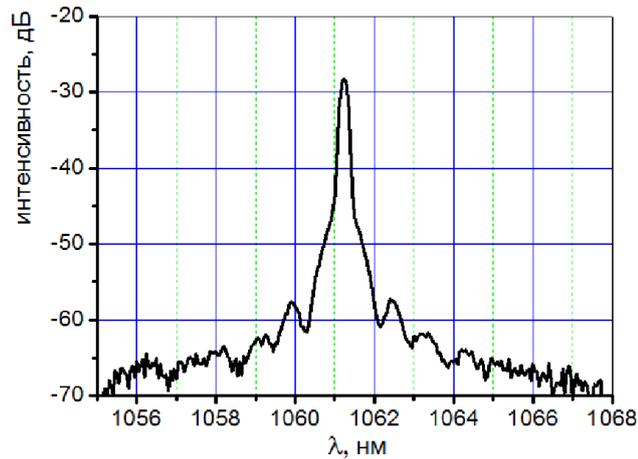


Рис. 66. Спектр излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР.

Так как предполагаемая ширина линии генерации одночастотного лазерного диода порядка 1 МГц (около 10 фм), то для более точного измерения ширины линии генерации в дальнейшем применялся сканирующий волоконный кольцевой интерферометр.

#### 4.1.3. Поляризационная характеристика излучения лазерного диода.

Измерение поляризационной характеристики излучения лазерного диода проводилось по схеме, представленной на рис. 31 (см. главу 2.1.3).

Полученная диаграмма поляризации излучения лазерного диода представлена на рис. 67. Сплошной линией показана теоретическая зависимость  $\sim \cos^2 \varphi$ .

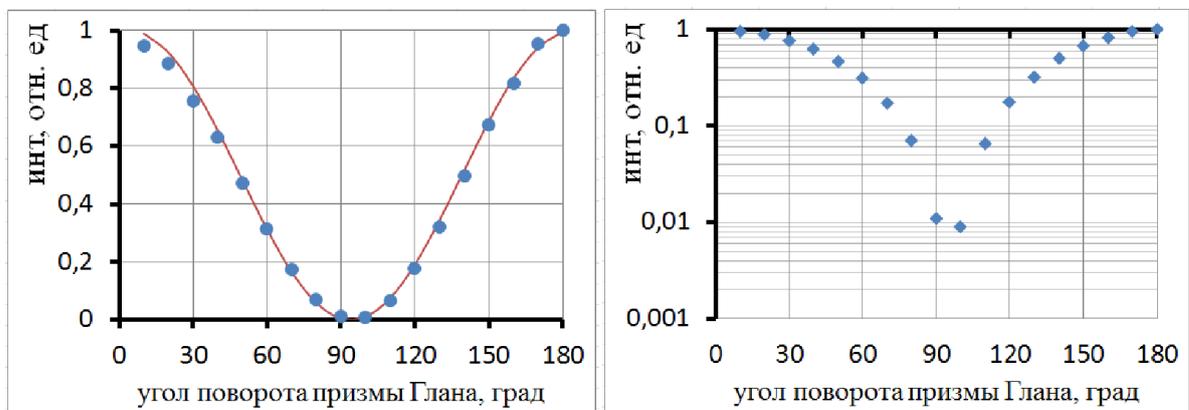


Рис. 67. Диаграмма поляризации излучения одночастотного диода  
а) в линейном масштабе, б) в логарифмическом масштабе.

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения, прошедшая через призму Глана, составляет 0,009 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0,98 (рассчитана по формуле 7).

#### 4.1.4. Ширина линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Схема измерения ширины линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра представлена на рис. 27. Спектр излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода полученный с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра при оптимальный параметрах ( $I_z = 115$  мА,  $T = 26^\circ\text{C}$ ) представлен на рис. 68.

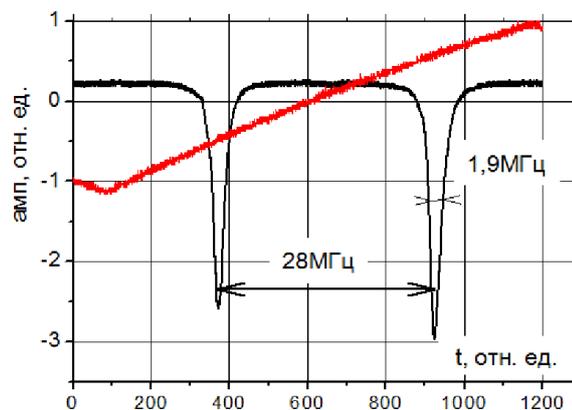


Рис. 68. Спектр излучения, измеренный с помощью волоконного кольцевого интерферометра при оптимальном режиме работы ( $I_n=115$  мА, температура диода  $26^\circ\text{C}$ ).

По полученному спектру ширина полосы может быть оценена в  $1,9\pm 0,2$  МГц.

#### 4.2. Волоконный предусилитель на GTWave волокне.

Схема и вид волоконного усилителя представлены на рис. 69. В качестве задающего генератора (1) служит одночастотный полупроводниковый диод с волоконной брэгговской решеткой с шириной линии генерации в  $1,9\pm 0,2$  МГц (при оптимальных значениях тока накачки - 115 мА и температуры диода в  $26^\circ\text{C}$ ).

В качестве накачки применялись диоды с выходной мощностью до 10 Вт. Исследуемые длины волн накачки, 915, 940 и 975 нм. В отличие от предыдущих схем накачки, где применялась попутная накачка, в данной схеме применялась встречная накачка. В качестве активной среды служило иттербиевое GTWave волокно (4). Исследуемые длины активного волокна 20, 18 и 16 м.

Также в схему были включены двухкаскадный волоконный изолятор Фарадея (2) на длину волны генерации (1062 нм) и волоконный коллиматор (5) с малым коэффициентом отражения (уровень отраженного сигнала -60 дБ) на длину волны генерации.

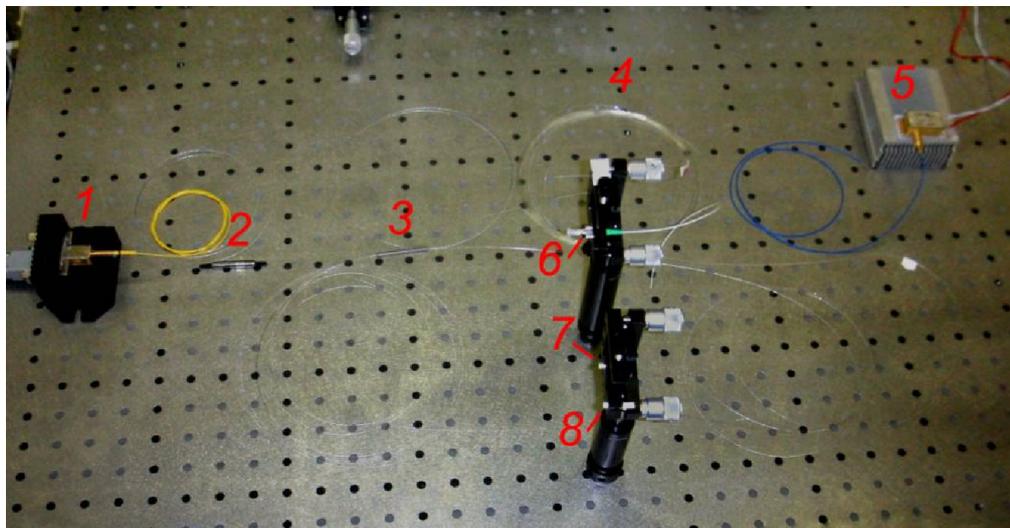
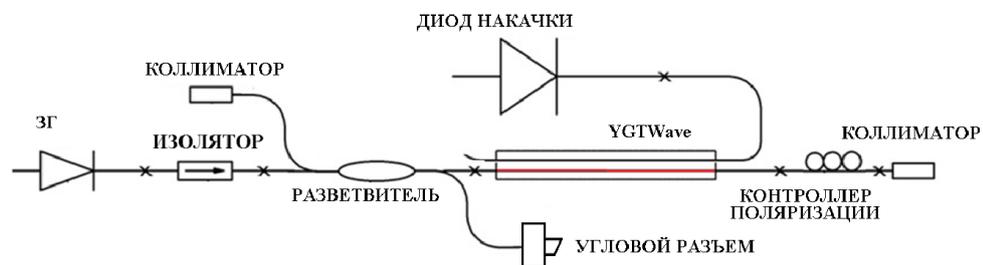


Рис. 69. Схема экспериментальной установки.

- 1 – одночастотный полупроводниковый лазерный диод с ВБР,  
 2 – волоконный изолятор Фарадея, 3 – волоконный разветвитель 50/50,  
 4 – GTWave волокно, 5 – диод накачки, 6 – угловой разъем FC-APC,  
 7, 8 – волоконный коллиматор.

Для определения мощности обратного излучения в схему включены волоконный разветвитель (3) с коэффициентом деления 50/50 и волоконный

коллиматор (7). С помощью патч-корда (6) (разъем с угловым торцом) контролируется мощность задающего диода и осуществляется контроль одночастотного режима. С учетом потерь на изолятор и ответвитель мощность, подаваемая на усилитель, составляла около 9 мВт.

#### 4.2.1. Исследование спектральных характеристик диодов накачки.

На рис. 70 спектры излучения диодов накачки сопоставлены со спектром поглощения активного GTWave волокна. Определение спектральных характеристик производились с помощью спектрометра Anritsu MS96A при разрешении 0,2 нм. Спектры представлены в общем виде и с масштабированы для наглядности.

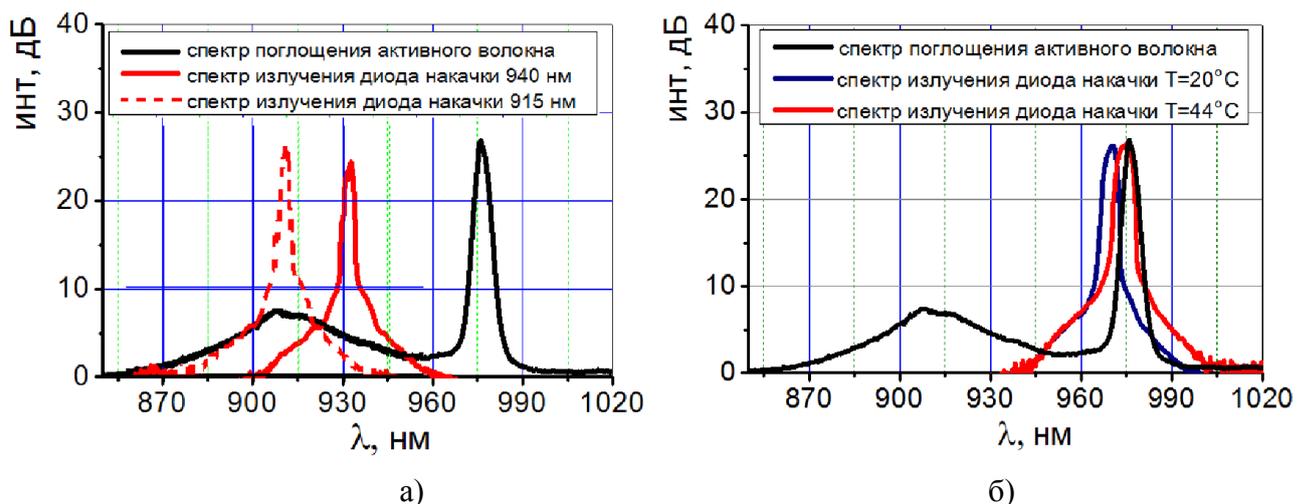


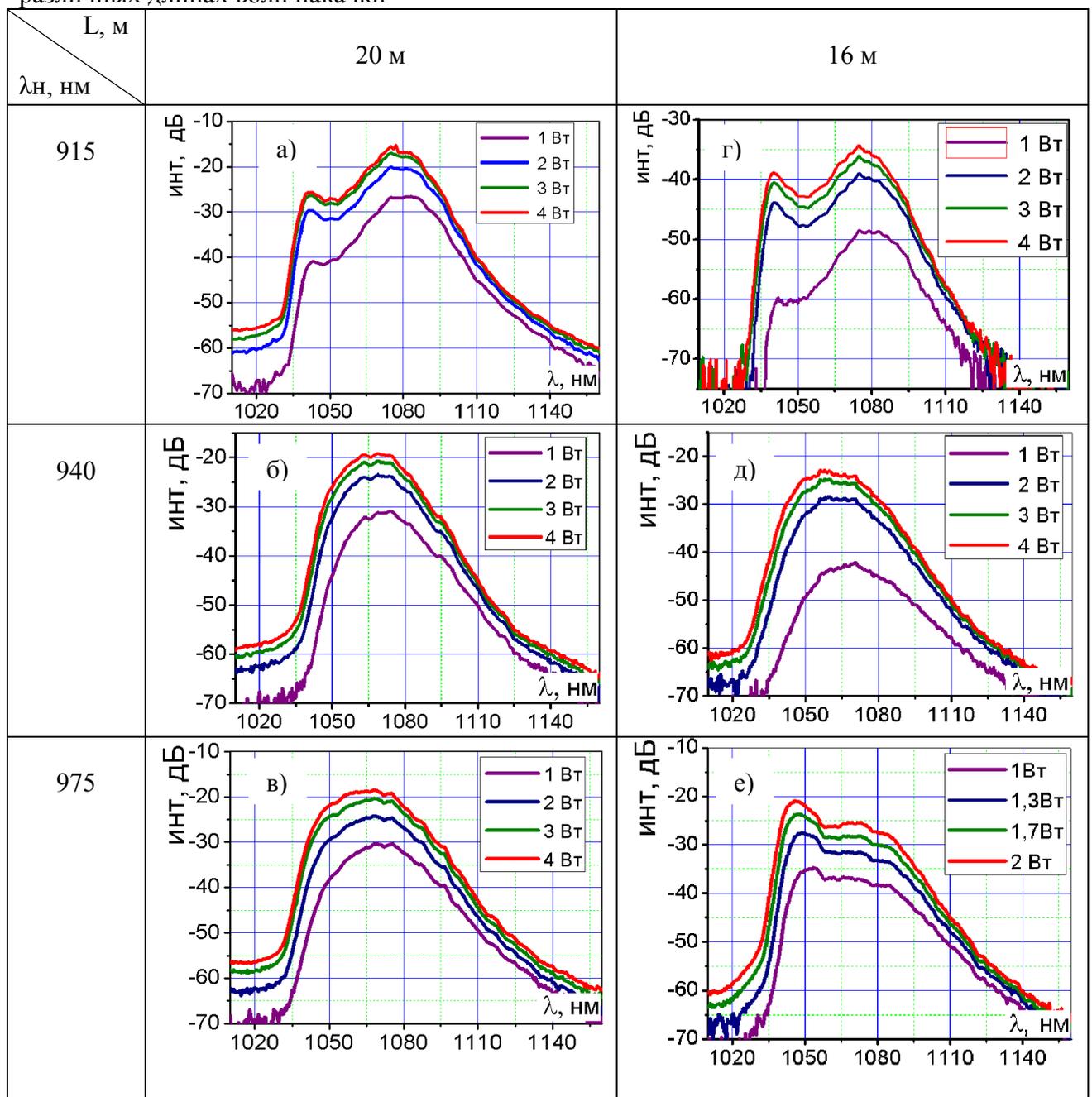
Рис. 70. Спектры излучения диодов накачки сопоставленные со спектром поглощения активного волокна: а) 915 и 940 нм, б) 975 нм, при разной температуре диода

Из рис. 70 видно, что для более точного совпадения максимума излучения диода накачки и максимума поглощения волокна, необходимо поддерживать температуру данного диода накачки выше 44°C, что способно существенно уменьшить срок службы (рекомендуемая производителем температура диода не более 35°C). Диоды накачки 915 и 940 нм работали при температуре 20°C.

#### 4.2.2. Спектры спонтанной люминесценции и спектры выходного излучения после усиления в зависимости от длины активного волокна и длины волны накачки.

Спектры спонтанной люминесценции активного GTWave волокна, полученные при различных длинах, мощности накачки и длинах волн накачки, представлены в таблице 4. Спектры регистрировались с помощью спектрометра Anritsu MS96A при разрешении 1 нм.

Таблица 4. Спектры спонтанной люминесценции при различных длинах активного волокна и различных длинах волн накачки



По полученным спектрам видно, что максимум спектра спонтанной люминесценции смещается в сторону коротких длин волн с увеличением мощности накачки и уменьшением длины активного волокна.

При накачке на 915 нм максимум спонтанной люминесценции приходится на длину волны вблизи 1080 нм. При накачке на 940 нм и длине активного волокна 16 м максимум приходится на длину волны генерации задающего диода (около 1060 нм). При накачке на 975 нм (таблица 4е) имеет место относительно прямолинейный участок в диапазоне 1060 – 1080 нм.

Для длин волн накачки на 915 нм и 975 нм был проведен теоретический расчет спектров спонтанной люминесценции и мощности выходного излучения. Для этого была численно решена система скоростных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} P_s &= \chi \cdot (n_1 \cdot \sigma_{\text{alem}}(\lambda_s) - n_0 \cdot \sigma_{\text{alabs}}(\lambda_s)) P_s - \alpha_s \cdot P_s, \\ \frac{d}{dz} P_p &= k \cdot (n_1 \cdot \sigma_{\text{alem}}(\lambda_p) - n_0 \cdot \sigma_{\text{alabs}}(\lambda_p)) P_p - \alpha_p \cdot P_p, \\ \frac{d}{dz} P_L &= \chi \cdot n_1 \cdot \sigma_{\text{alem}}(\lambda_L) \cdot \left( P_L + \frac{2 \cdot h \cdot c}{\lambda_L^2} \cdot \Delta \lambda_L \right) - \chi \cdot n_0 \cdot \sigma_{\text{alabs}}(\lambda_L) P_L - \alpha \cdot P_L, \end{aligned} \quad (28)$$

где  $P_s$  - мощность сигнала на длине волокна,

$P_p$  - мощность накачки на длине волокна,

$P_L$  - мощность излучения на длинах спонтанной люминесценции,

$n_1$  - заселенность верхнего энергетического уровня,

$n_0$  - заселенность нижнего энергетического уровня,

$\sigma_{\text{alem}}(\lambda_p)$  - сечение люминесценции на длине волны накачки,

$\sigma_{\text{alem}}(\lambda_s)$  - сечение люминесценции на длине волны сигнала,

$\sigma_{\text{alabs}}(\lambda_p)$  - сечение поглощения на длине волны накачки,

$\sigma_{\text{alabs}}(\lambda_s)$  - сечение поглощения на длине волны сигнала,

$\sigma_{\text{alem}}(\lambda_L)$  - сечение люминесценции на длинах волн люминесценции,

$\sigma_{\text{alabs}}(\lambda_L)$  - сечение поглощения на длинах волн люминесценции,

$\alpha_s$  - коэффициент серых потерь на длине волны сигнала,

$\alpha_p$  - коэффициент серых потерь на длине волны накачки,

$\alpha$  - эффективный коэффициент серых потерь,

$k$  - коэффициент перекрытия мод накачки активной сердцевины, который рассчитывался как отношение площади оболочки волокна к площади активной сердцевины, в нашем случае  $k = 0.001$

$\chi$  - коэффициент перекрытия моды сигнала активной сердцевины, который рассчитывался как отношение энергии волны основного сигнала, распространяющегося в активной сердцевине, к полной энергии сигнала в основной моде, в нашем случае  $\chi = 0,6$ .

Результаты теоретического расчета для длин волн 915 нм и 975 нм приведены на рис. 71.

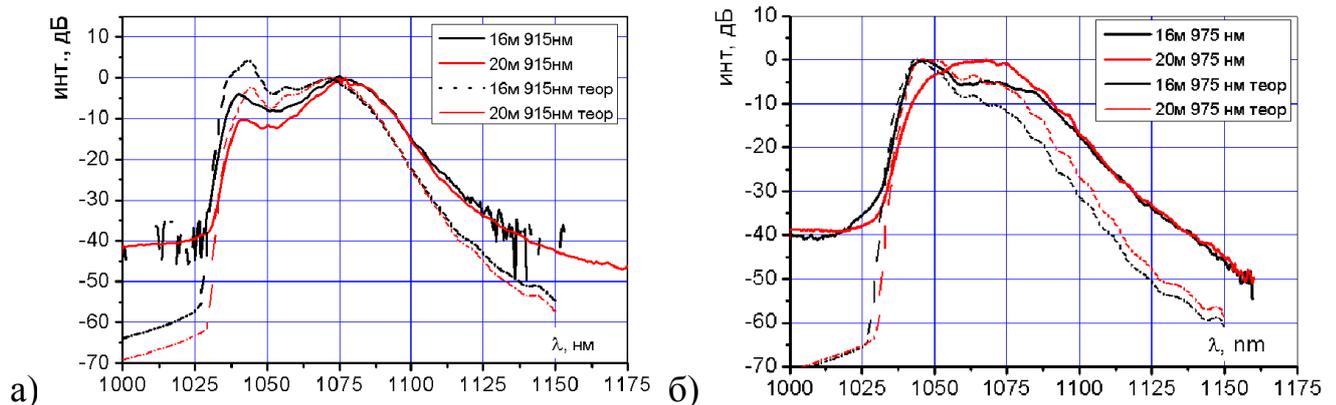


Рис. 71. Теоретические и экспериментальные спектры спонтанной люминесценции для длин волн накачки: а) 915 нм, б) 975 нм.

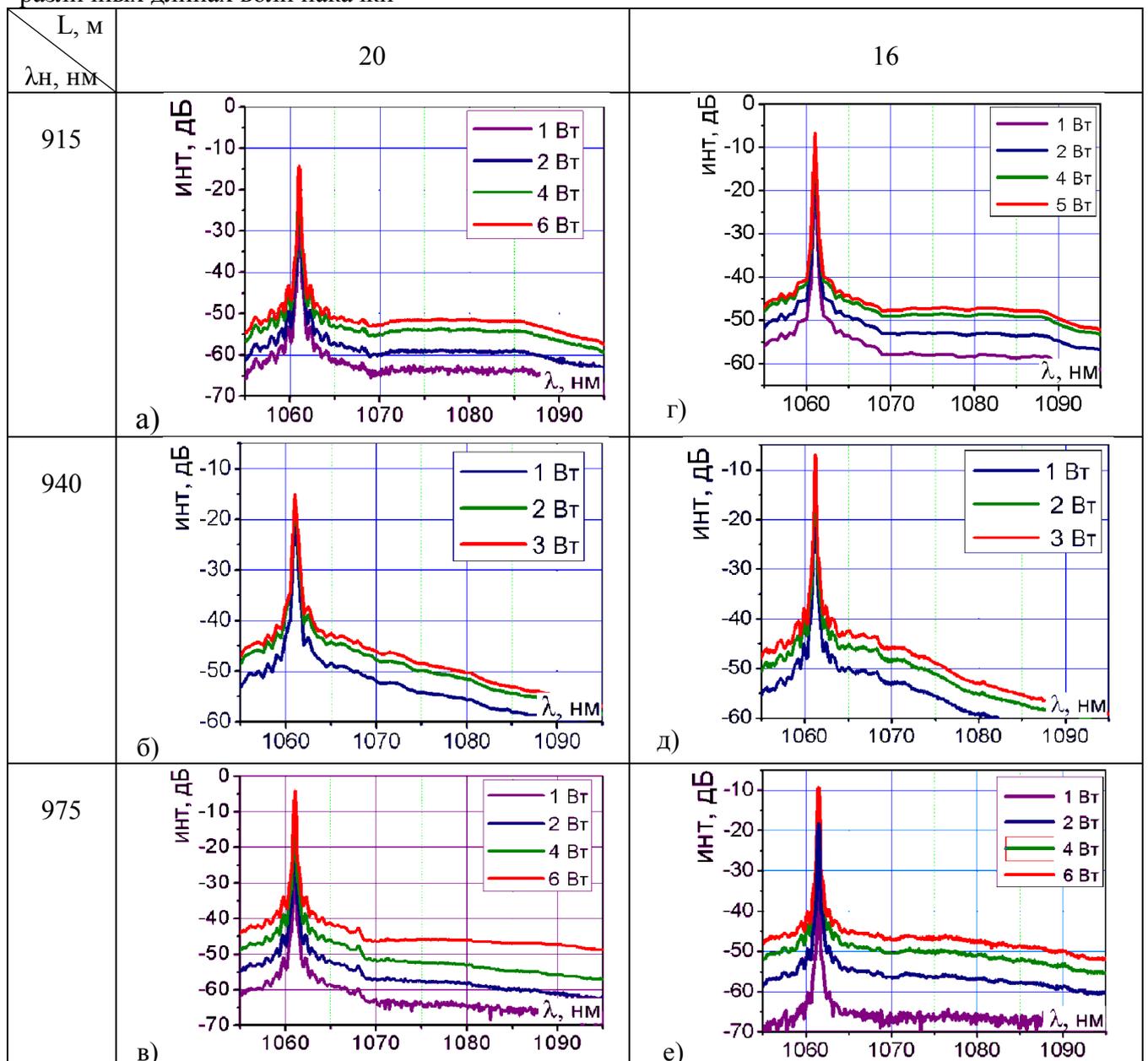
Расчет спектров спонтанной люминесценции показал хорошее качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Далее выполнялось исследование спектральных характеристик выходного излучения с включенным задающим генератором.

Определение спектральной зависимости выходного излучения проводилось с помощью спектрометра Anritsu MS96A с разрешением 0,2 нм. Спектры регистрировались при оптимальных условиях работы одночастотного полупроводникового лазерного диода ( $I_z = 115$  мА,  $T = 26^\circ\text{C}$ ).

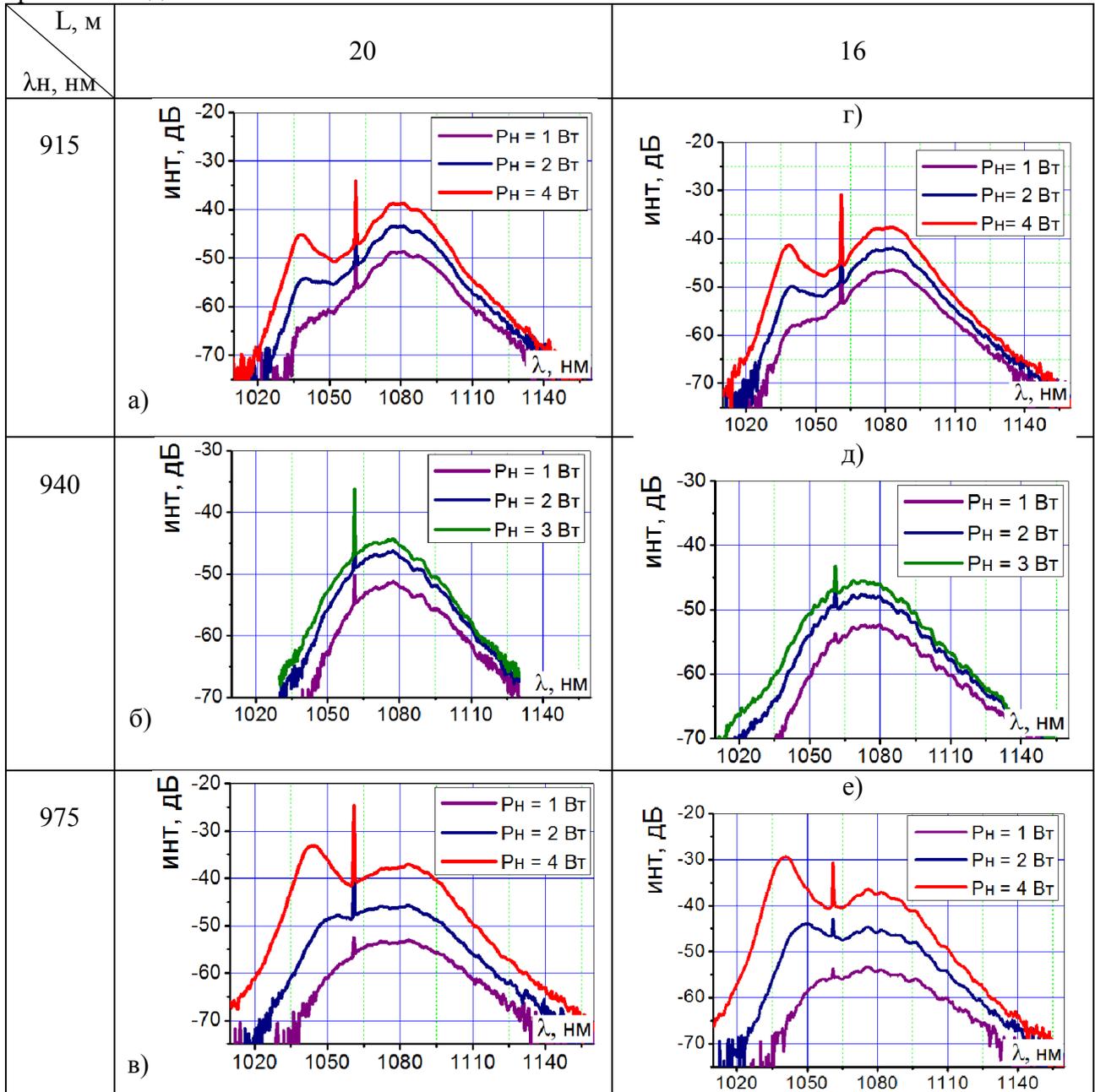
Спектры излучения, полученные при различных длинах волн накачки, мощности накачки и длинах активного волокна, представлены в таблице 5. Из полученных данных следует, что спектры выходного излучения в диапазоне 1070-1090 нм показывают поведение аналогичное спектрам спонтанной люминесценции. При накачке на 915 нм имеет место небольшой максимум на 1080 нм, при накачке на 940 нм – спад интенсивности, при накачке на 975 нм – относительно ровный спектр. Для получения выходного излучения с наиболее чистым спектром, оптимальной накачкой является накачка на 940 нм.

Таблица 5. Спектры выходного излучения при различных длинах активного волокна и различных длинах волн накачки



Спектры излучения, идущего в обратном направлении, полученные при различных длинах волн накачки, мощности накачки и длинах активного волокна, представлены в таблице 6.

Таблица 6. Спектры обратного излучения при различных длинах активного волокна и различных длинах волн накачки

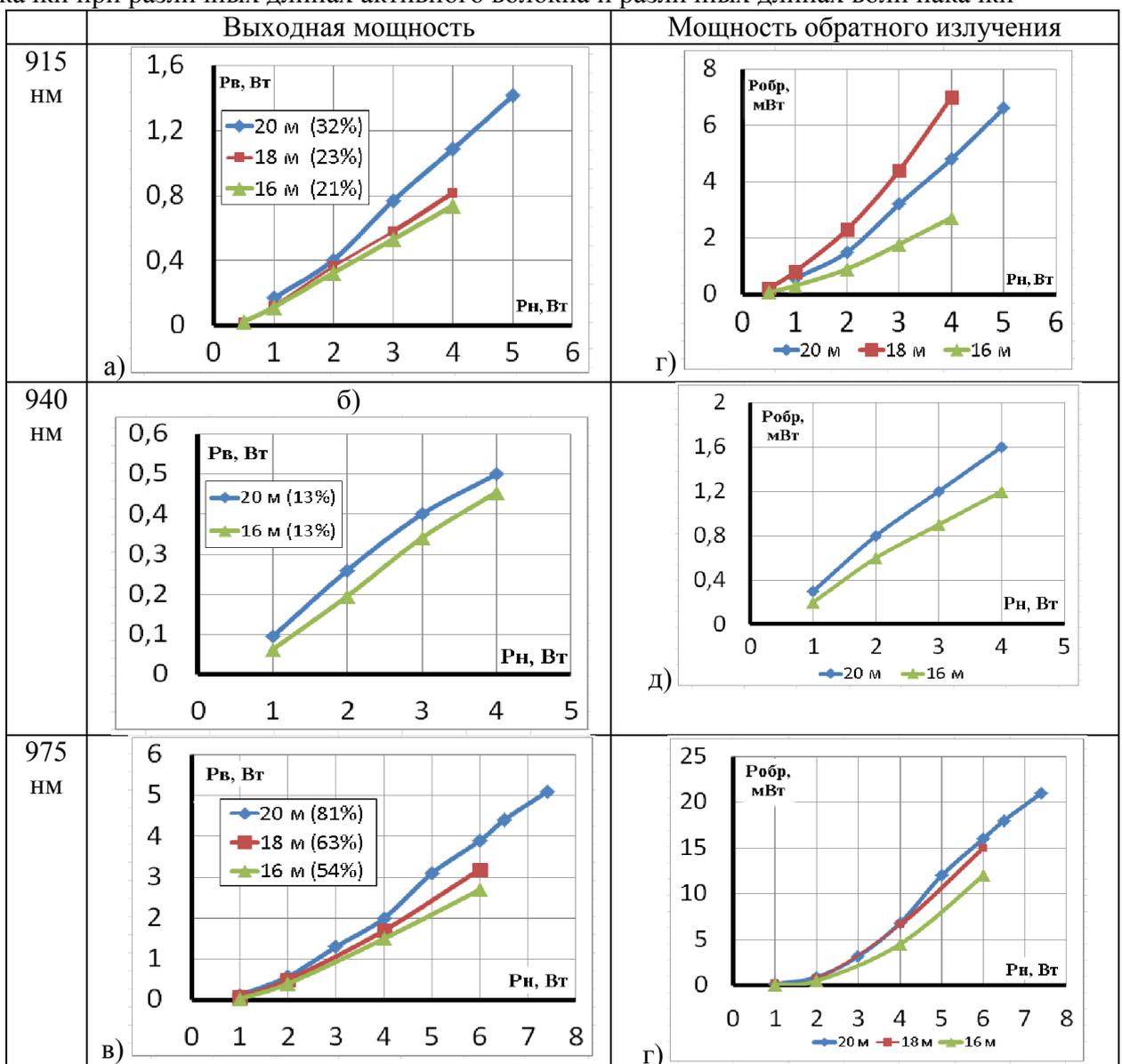


Как можно видеть, во всех экспериментах спектры обратного излучения содержат пик на длине волны близкой к 1062 нм. Поскольку с уменьшением длины активного волокна интенсивность пика, в большинстве случаев, падает, можно предположить, что этот пик обусловлен наличием ВРМБ.

### 4.2.3. Мощностные характеристики усиленного выходного излучения и излучения, распространяющегося в обратном направлении.

Измерения мощности излучения проводилось при помощи измерителя мощности ORION-ТН при различных длинах волн накачки, мощности накачки и длинах активного волокна. Измерения проводились при оптимальном режиме работы одночастотного полупроводникового лазерного диода, ток накачки 115 мА, температура 26°C. Мощность входного сигнала на усилитель с учетом потерь на изоляторе и разветвителе составляла около 9 мВт. Полученные данные приведены в таблице 7.

Таблица 7. Зависимости выходной мощности и мощности обратного излучения от мощности накачки при различных длинах активного волокна и различных длинах волн накачки



Из полученных данных следует, что максимальная дифференциальная эффективность была достигнута с использованием накачки на 975 нм при длине активного волокна 20 м и составила 81%, при этом максимальная мощность выходного сигнала составила 5,1 Вт при коэффициенте усиления около 27 дБ. При накачке на 915 нм максимальная дифференциальная эффективность составляла 32%. При этом максимальная выходная мощность составила 1,4 Вт при коэффициенте усиления около 21 дБ. При накачке на 940 нм дифференциальная эффективность составляла 13%. При этом максимальная выходная мощность составляла 0,5 Вт при коэффициенте усиления около 17 дБ.

На рис. 72 представлены результаты теоретического расчета зависимостей выходной мощности от мощности накачки.

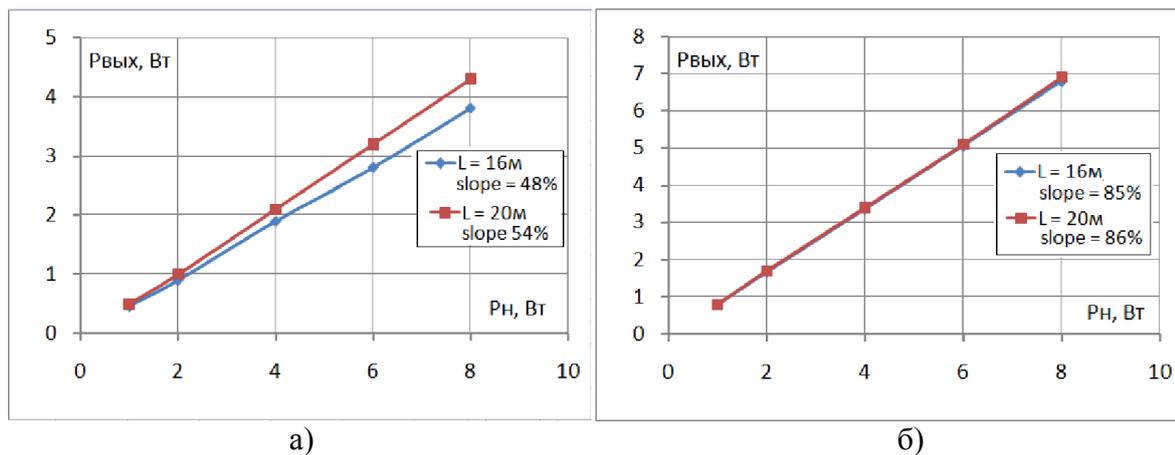


Рис. 72. Зависимости выходной мощности излучения от мощности накачки а) на 915 нм, б) на 975 нм.

По результатам численного моделирования видно, что для случая накачки на 915 нм расчетная мощность завышена в 2 раза, а в случае накачки на 975 нм результаты довольно точно согласуются для длины волокна в 20 м.

#### 4.2.4. Поляризационная характеристика выходного излучения после усиления.

Измерение поляризации проводилось по схеме аналогичной представленной на рис. 31 (см. главу 2.1.3). Измерения проводились при оптимальных параметрах

одночастотного полупроводникового лазерного диода, ток накачки 115мА, температура 26°С. Выходная мощность излучения 5 Вт. Диаграмма поляризации излучения представлена на рис. 73.

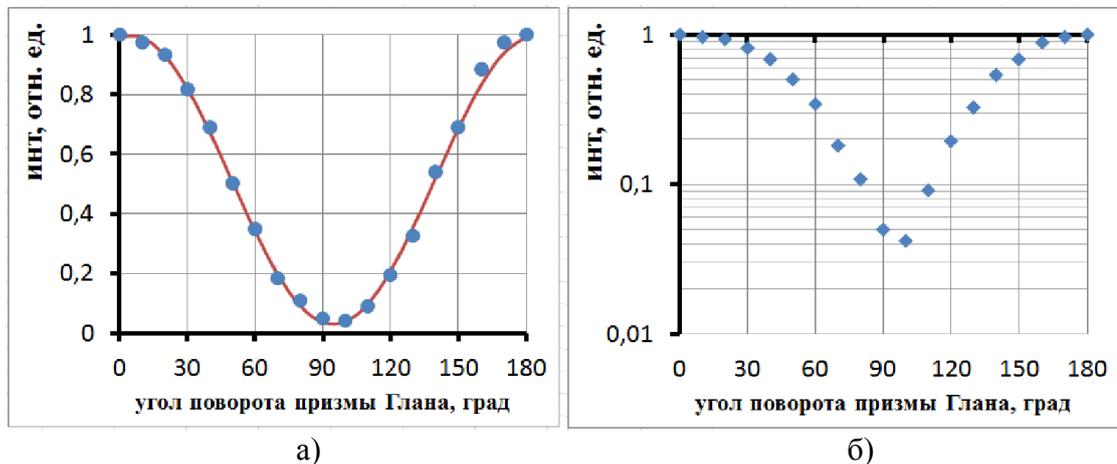


Рис. 73. Диаграмма поляризации излучения (с контролем поляризации), а – в линейном масштабе, б – в логарифмическом масштабе

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения, прошедшая через призму Глана, составляет 0,04 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0,92 (рассчитано по формуле 7).

#### 4.2.5. Ширина линии генерации выходного излучения после усиления с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Измерение ширины линии генерации выходного излучения после усиления проводилось по схеме аналогичной представленной на рис. 27. Выходное излучение подавалось в торец входного волокна сканирующего волоконного кольцевого интерферометра. Мощность выходного излучения составляла 5 Вт. Метод измерения приведен в главе 1.1.4.

Благодаря замене в схеме усилителя однокаскадного изолятора на двухкаскадный волоконный изолятор Фарадея с уровнем подавления обратной мощности в 60 дБ удалось полностью подавить влияние обратного излучения на работу одночастотного полупроводникового лазерного диода. Все спектры, полученные при разных мощностях накачки, были стабильны по форме во

времени. На рис. 74 представлен спектр излучения, полученный при оптимальных параметрах работы одночастотного полупроводникового лазерного диода и выходной мощности в 5 Вт.

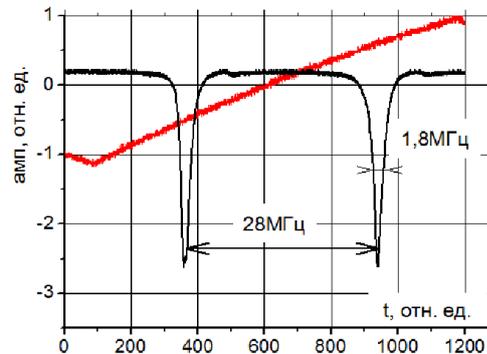


Рис. 74. Спектр выходного излучения, полученный с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Ток одночастотного лазерного диода  $I_z = 115$  мА, температура диода  $26^\circ\text{C}$ .

По полученному спектру ширина полосы может быть оценена в  $1,8 \pm 0,2$  МГц.

#### 4.2.6. Мощностные и спектральные характеристики предусилителя гибридного 160 Вт лазера.

В качестве предусилителя было решено использовать волоконный усилитель на активном GTWave волокне длиной 20 м с накачкой на длине волны 975 нм. Мощностные и спектральные характеристики предусилителя представлены на рис. 75а и б соответственно.

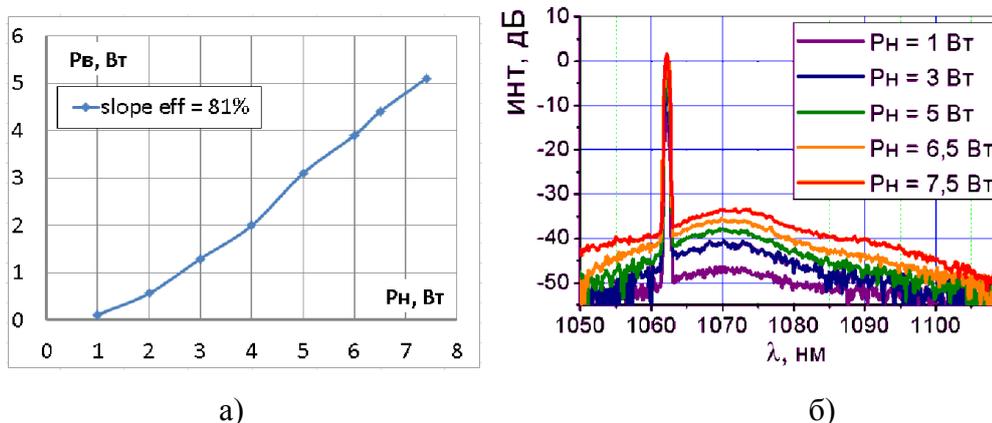


Рис. 75. Характеристики предусилителя:

- а) зависимость выходной мощности от мощности накачки.
- б) спектральная характеристика выходного излучения

Максимальная мощность излучения на выходе с предусилителя составила 5,1 Вт была достигнута при мощности накачки 7,4 Вт и температуре диода 44°C. Коэффициент усиления составил около 27 дБ. Дифференциальный КПД - около 80%.

На спектральной зависимости выходного излучения (рис. 75б) можно заметить наличие максимума спонтанной люминесценции на 1070 нм, который не наблюдался в предыдущих экспериментах, при использовании данной накачки (975нм) и используемой длине волокна в 20м. Одной из причин появления максимума может быть менее качественная сварка волоконного усилителя, что привело к возрастанию отражения на плохо сваренных торцах волокна.

#### 4.3. Параметры усилителя на коническом волокне.

Накачка Т-усилителя представляла собой диодный модуль с волоконным выходом с максимальной выходной мощностью 250 Вт на длине волны 915 нм.

*Активное волокно* представляло собой иттербиевое волокно конической формы, с плавно меняющимся диаметром (рис. 76). Данная геометрия позволила снизить эффекты связанные с ВРМБ.



Рис. 76. Зависимость диаметра оболочки активного конического волокна от длины.

Диаметры сердцевины и оболочки соответственно 44 и 700 мкм на одном торце, 7.5 и 120 мкм на другом. Волокно изготовлено методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (SPCVD) [107]. Апертура сердцевины  $NA = 0,11$ . Апертура оболочки 0,4. Длина волокна составляла 18 м.

Для предотвращения френелевского отражения широкий торец, в который вводилась накачка, был сколот под углом  $8^\circ$ .

Волокно укладывалось на охлаждаемую поверхность витками с радиусом 15 см. Спектры спонтанной люминесценции, полученные с обоих торцов волокна, представлены на рис. 77.

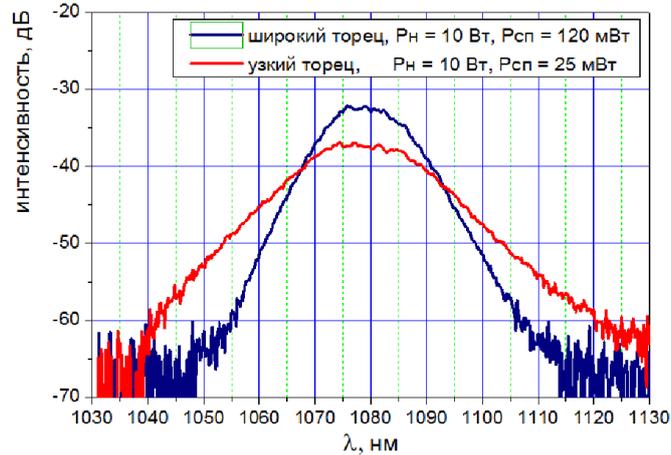


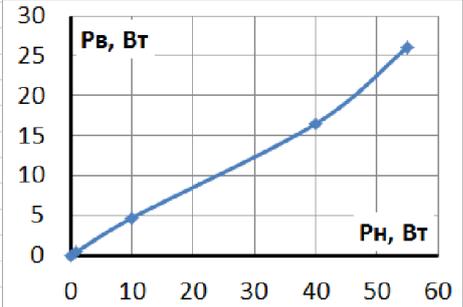
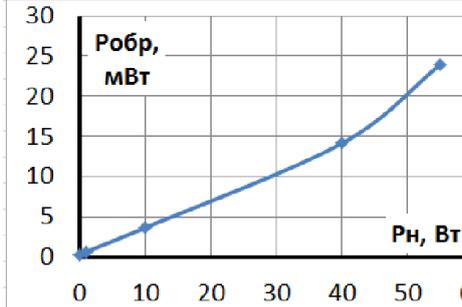
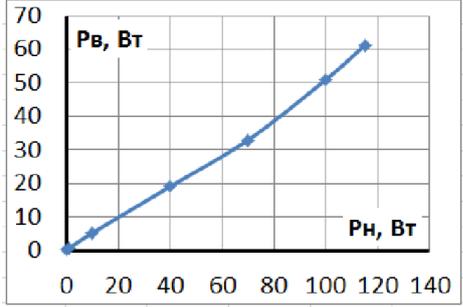
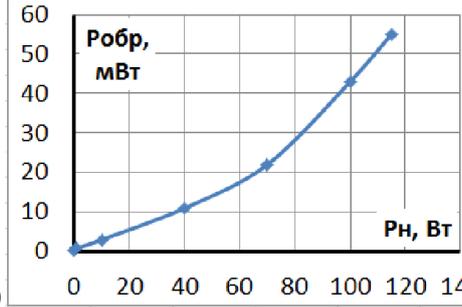
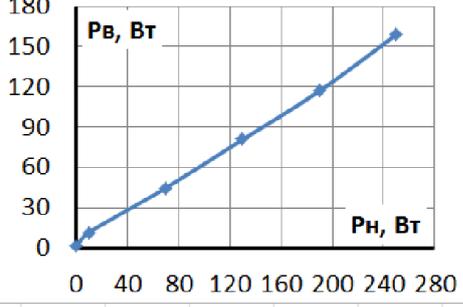
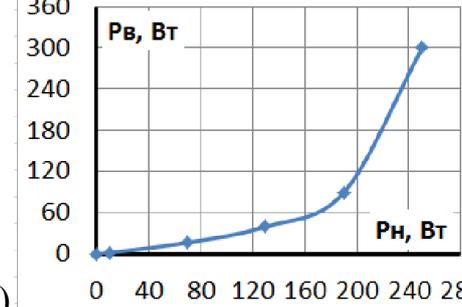
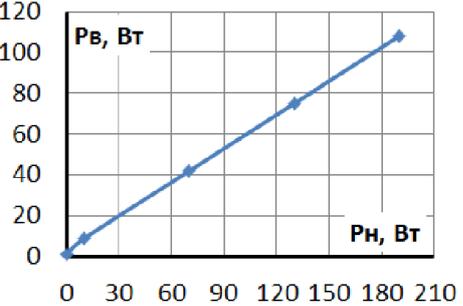
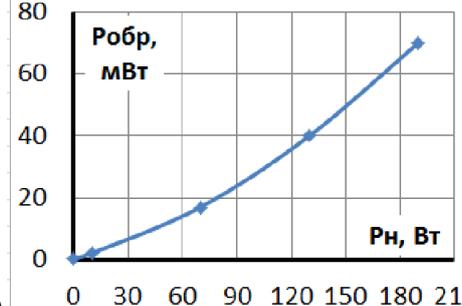
Рис. 77. Спектры спонтанного излучения конического волокна.

Спектры получены при мощности накачки в 10Вт. Мощность спонтанного излучения на выходе с широкого торца составила 120 мВт. На выходе с узкого торца 25 мВт. При распространении излучения в обратном направлении имеет место почти 5ти кратное подавление мощности. Можно предположить, что отличия форм спектров прямого и обратного излучения вызваны влиянием разветвителя на проходящее через него излучение. Численный расчет на основе предыдущей модели (расчет системы уравнений 28) не показал отличия в спектрах люминесценции прямого и обратного хода.

#### 4.4. Зависимость выходной мощности излучения и мощности излучения распространяющегося в обратном направлении от мощности накачки.

Мощностные характеристики излучения представлены в таблице 8. Слева приведена мощность излучения с гибридного лазера, поступающая на вход Т-усилителя.

Таблица 8. Зависимости выходной мощности и мощности обратного излучения от мощности накачки при различных уровнях излучения на предусилителе

| Р, Вт | Выходная мощность                                                                             | Мощность обратного излучения                                                                   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |  <p>а)</p>   |  <p>д)</p>   |
| 2,2   |  <p>б)</p> |  <p>е)</p> |
| 2,4   |  <p>в)</p> |  <p>ж)</p> |
| 2,5   |  <p>г)</p> |  <p>з)</p> |

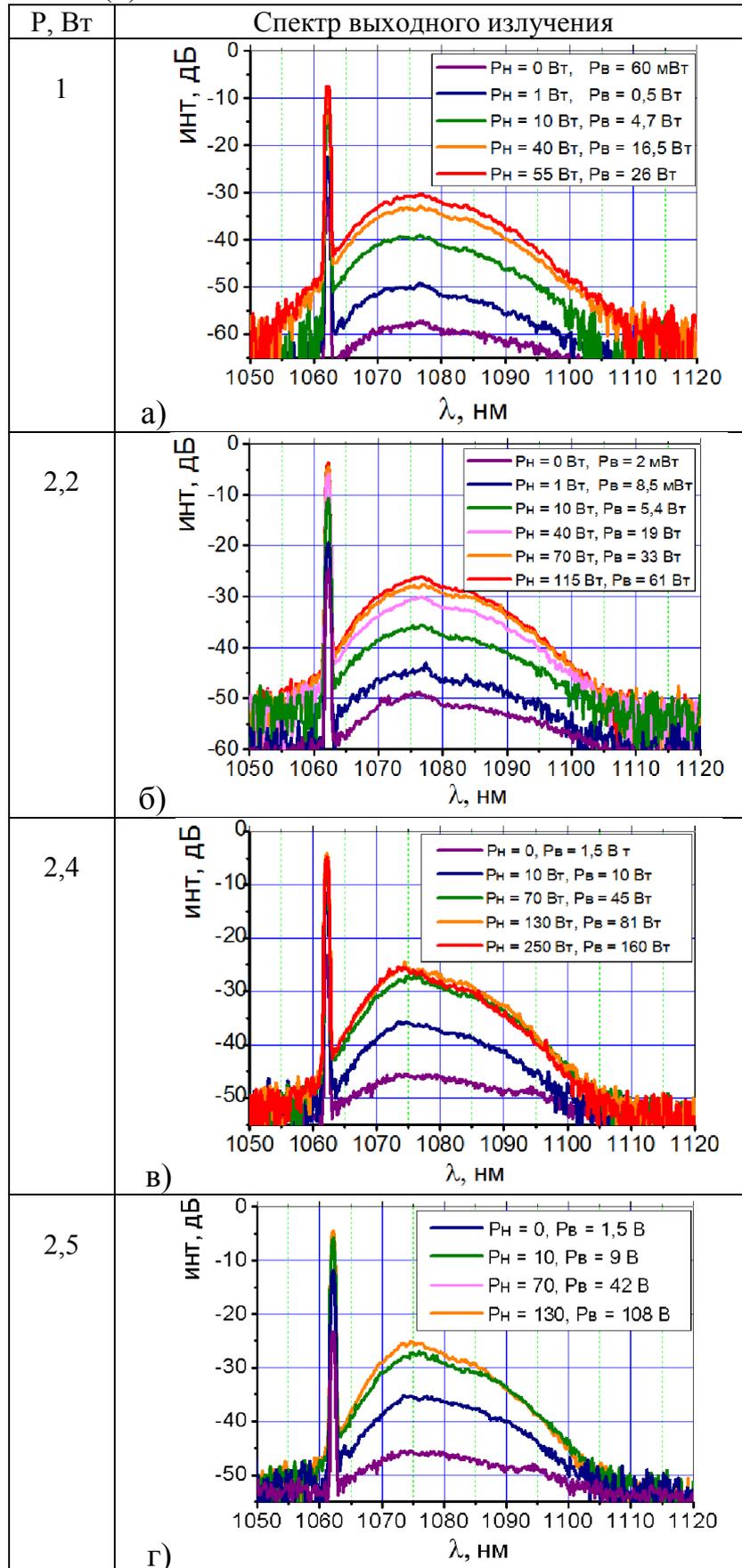
В процессе эксперимента было установлено, что каждому уровню мощности входного сигнала на Т-усилитель соответствует максимальная мощность накачки, после которой наблюдался импульсный режим генерации. Как видно из полученных данных максимально допустимая мощность накачки Т-усилителя, а соответственно и максимальная выходная мощность увеличивается с ростом уровня входного сигнала и имеет максимум при мощности входного сигнала в 2,4 Вт. Максимальная выходная мощность составила около 160 Вт. Дифференциальная эффективность при этом составила около 60%. Коэффициент усиления для Т-усилителя около 17 дБ (общий коэффициент усиления составил около 40 дБ). При дальнейшем увеличении мощности входного сигнала максимально допустимая мощность накачки падает. Это связано с тем, что при высоком уровне входного сигнала имеет место большой коэффициент усиления в активном волокне предусилителя, которое усиливает обратное излучение с Т-усилителя, ослабленное изолятором. Усиленное обратное излучение негативно влияет на стабильную работу системы.

Также из таблицы 8 видно, что при мощности накачки более 180 Вт (мощность входного сигнала 2.4 Вт) начинается резкий нелинейный рост мощности обратного излучения. Резкое увеличение обратной мощности может быть связано с ВРБМ.

#### **4.5. Спектральная характеристика выходного излучения.**

Спектры выходного излучения в зависимости от мощности накачки и уровня входного сигнала приведены в таблице 9.

Таблица 9. Спектры выходного излучения в зависимости от мощности накачки ( $P_H$ ) и уровня входного сигнала ( $P$ )



Вследствие того, что исходный сигнал на длине волны 1062 нм находится на краю спектра усиления конического волокна, имеет место широкий спектр усиленного спонтанного излучения от 1060 до 1100 нм аналогичный спектру спонтанного излучения выходящего с широкого торца конического волокна в отсутствие входного сигнала. Причем в данный диапазон входит как усиленная спонтанная люминесценция конического волокна, так и усиленное спонтанное излучение входного сигнала. Поскольку максимум спонтанной люминесценции конического волокна находится в районе 1080 нм, а у входного сигнала этот максимум приходится на 1070 нм, максимум суммарной спонтанной люминесценции находится в районе 1075 нм. При выходной мощности 160 Вт мощность полезного сигнала составляет около 130 Вт, поскольку на долю спонтанного излучения приходится около 20%.

На рис. 78 представлены спектры излучения, идущего в обратном направлении с Т-усилителя, при различной мощности накачки и уровня входного сигнала.

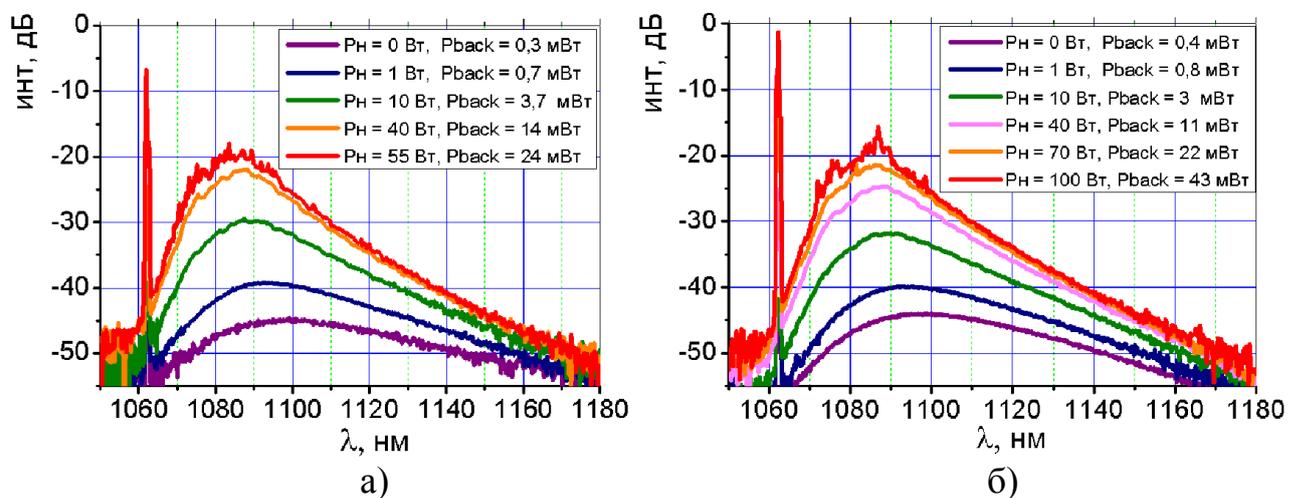


Рис. 78. Спектры обратного излучения при различной мощности накачки ( $P_n$ ) и уровня входного сигнала: а) 1 Вт, б) 2,2 Вт.

Из анализа спектров обратного излучения можно заключить, что при большой мощности накачки возникает слабая паразитная лазерная генерация в области 1080 нм. Дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к неустойчивому режиму работы усилителя.

#### 4.6. Выводы к Главе IV.

Впервые был разработан мощный одночастотный генератор на основе конического активного волокна. При накачке в 250 Вт получена выходная мощность в 160 Вт, из которых 130 Вт приходится на одночастотное излучение. За счет геометрии волокна имеет место подавление ВРМБ. При максимальной накачке мощность обратного излучения составила около 0,3 Вт. Степень поляризации выходного излучения на уровне  $> 0,9$ . Ширина линии генерации выходного излучения около 2 МГц.

Теоретически рассчитанные параметры модели показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

Установлено, что для исследованной системы существует оптимальный уровень входного сигнала на Т-усилитель, при котором возможно получить максимальную выходную мощность.

Для улучшения спектральных характеристик выходного излучения и увеличения выходной мощности необходимо, во-первых использовать Т-усилитель с максимумом в области длин волн вблизи 1060 нм. Для этого целесообразно использовать более короткое активное волокно. Во-вторых, отфильтровать в спектре входного сигнала спонтанное излучение. В-третьих, использовать перед Т-усилителем изолятор с бóльшим коэффициентом подавления обратной мощности. Доработав систему и применив более мощную накачку можно ожидать, по крайней мере, двукратного увеличения выходной мощности, т.е до 300 Вт.

**Глава V. Одночастотный гибридный лазер мощностью 120 Вт на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР и активного волокна с широким полем моды. Фазирувка двух каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью до 60 Вт.**

Лазерная система на основе конического волокна позволяет решить вопрос создания полностью волоконной одночастотной лазерной системы с выходной мощностью до нескольких сотен Ватт. Однако подобное волокно не является серийным изделием, и возможность его широкого использования мала. Поэтому представляет интерес исследование возможности создания указанной выше одночастотной лазерной системы с использованием серийно выпускаемых активных волокон. Описанные ниже эксперименты проводились без привязки к длине волны последующего усилителя на кристаллических активных элементах. Основной целью являлось определение возможности создания мощной одночастотной лазерной системы и определение факторов, препятствующих достижению цели. Работа установки была ориентирована на длину волны 1,08 мкм, оптимальную для создаваемой волоконной лазерной системы.

Для реализации мощного полностью волоконного одночастотного лазера была реализована схема многокаскадного волоконного усилителя.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 79. Задающий генератор представлял собой одночастотный полупроводниковый лазерный диод с ВБР (длина волны генерации 1080 нм, ширина линии генерации  $2,8 \pm 0,2$  МГц). Первый каскад усиления представлял собой активное GTWave волокно длиной 16 м, легированное ионами иттербия. Накачкой осуществлялась на длине волны 940 нм. Выходная мощность с предусилителя составляла 200 мВт при хороших спектральных параметрах. Второй и третий каскады представляли собой активное GTWave волокно легированное ионами иттербия, длиной 20 м каждый. Накачка осуществлялась на длине волны 975 нм.

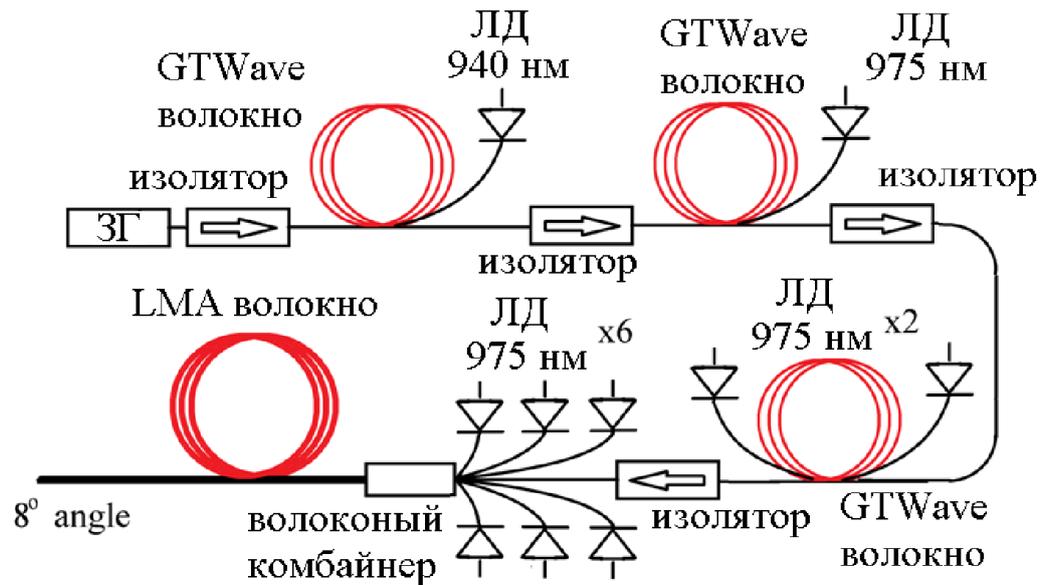


Рис. 79. Схема экспериментальной установки. ЛД - лазерный диод накачки.

На первом каскаде при накачке в 8 Вт выходная мощность составляла около 5 Вт. На втором каскаде при двухсторонней накачке суммарной мощностью 16 Вт выходная мощность составляла около 10 Вт. Мощный усилитель представлял собой активное волокно длиной 2,5 м с широким полем моды, легированное ионами иттербия. Диаметр сердцевины составлял 25 мкм ( $NA = 0.06$ ). Диаметр оболочки 250 мкм. Коэффициент поглощения на длине волны накачки составлял около 10 дБ/м. Для оптической развязки каскадов усиления использовались волоконные изоляторы Фарадея. Накачка осуществлялась шестью диодами с волоконными выходами, объединенными мощным волоконным комбайнером. Суммарная мощность накачки составляла около 180 Вт. Для согласования апертур волокон комбайнера и выходного волокна третьего каскада применялся модовый адаптер, представляющий собой волокно конической формы, с плавным изменением диаметра сердцевины с 6 мкм до 25 мкм.

## 5.1. Определение основных параметров излучения полупроводникового одночастотного лазерного диода с ВБР (1080 нм).

Поскольку результаты предыдущих экспериментов показали, что наилучшим усилением обладают длины волн вблизи значения 1080 нм, то при реализации мощного одночастотного лазера на LMA волокне в качестве задающего генератора был выбран полупроводниковый лазерный диод с ВБР с длиной волны генерации 1080 нм. Данная длина волны была выбрана для улучшения спектральных выходных характеристик, и как следствие повышения эффективности генерации на основной длине волны.

### 5.1.1. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока накачки.

Измерение проводилось с использованием измерителя мощности ORION-TN при различных токах накачки диода. Измерения проводились при оптимальной температуре диода ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ). Оптимальная температура подбиралась по сопротивлению термистора. Значение оптимального тока накачки составило 134 мА. Полученные данные приведены на рис. 80. Максимальная выходная мощность лазерного диода составила 11 мВт.

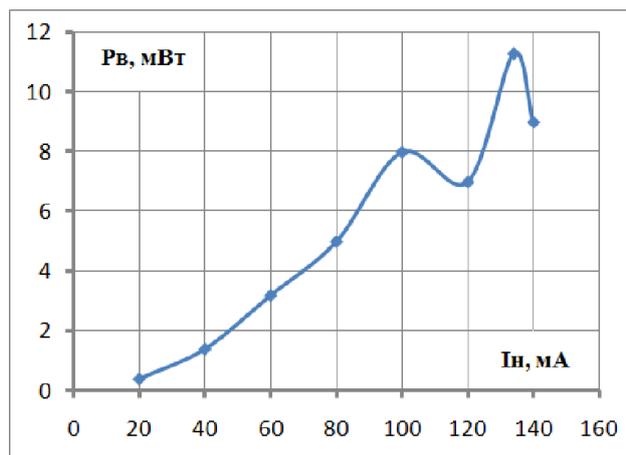


Рис. 80. Зависимость мощности излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР от тока накачки .

### 5.1.2. Спектр излучения лазерного диода.

Регистрация спектра излучения проводилась при оптимальном режиме работы диода ( $I_z = 134$  мА,  $T = 20^\circ\text{C}$ ) с помощью спектрометра Anritsu MS96A. Полученный спектр излучения представлен на рис. 81. Регистрация спектра проводилась при разрешении прибора 0,2 нм. Максимум излучения диода приходится на 1079,7 нм.

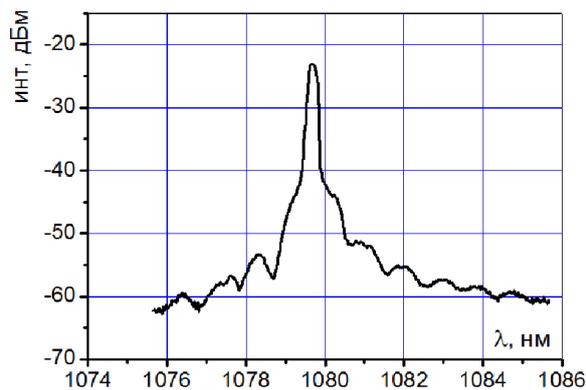


Рис. 81. Спектр излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР.

Так как предполагаемая ширина линии генерации одночастотного лазерного диода порядка 1 МГц (около 10 фм), то для более точного измерения ширины линии генерации в дальнейшем применялся сканирующий волоконный кольцевой интерферометр.

### 5.1.3. Поляризационная характеристика излучения лазерного диода.

Измерение поляризационной характеристики излучения лазерного диода проводилось по схеме, представленной на рис. 31. Полученная диаграмма поляризации излучения лазерного диода представлена на рис. 82. Сплошной линией показана теоретическая зависимость  $\sim \cos^2 \varphi$ .

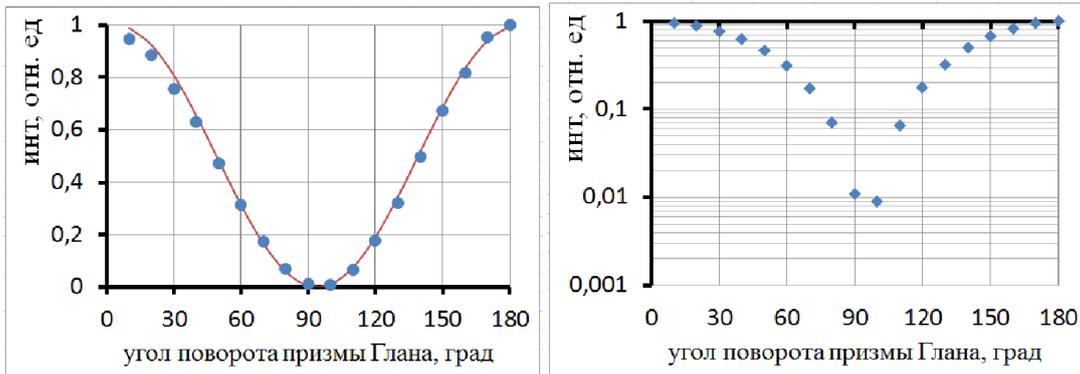


Рис. 82. Диаграмма поляризации излучения одночастотного диода  
а) в линейном масштабе, б) в логарифмическом масштабе.

Из полученных данных следует, что минимальная интенсивность излучения, прошедшая через призму Глана, составляет 0,009 от максимальной, что соответствует степени поляризации излучения 0,98 (рассчитана по формуле 7).

#### 5.1.4. Ширина линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью сканирующего волоконного кольцевого интерферометра.

Схема измерения ширины линии генерации излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с помощью ВКИ представлена на рис. 27. Спектр излучения диода полученный с помощью ВКИ при оптимальный параметрах ( $I_z = 134\text{мА}$ ,  $T = 20^\circ\text{С}$ ) представлен на рис. 83.

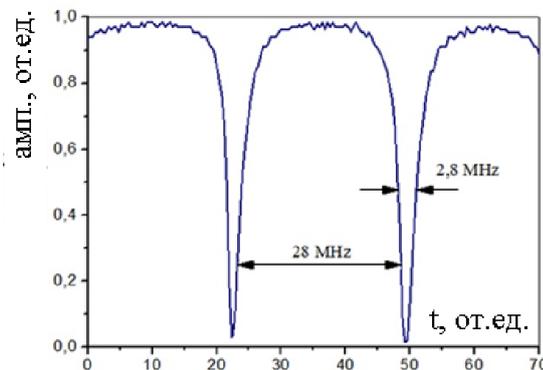


Рис. 83. Спектр излучения, измеренный с помощью ВКИ при оптимальном режиме работы  $I_n=134\text{мА}$ ,  $T = 20^\circ\text{С}$ .

По полученному спектру ширина полосы была оценена в  $2,8 \pm 0,2$  МГц.

## 5.2. Многокаскадный волоконный усилитель.

Как было показано в предыдущих параграфах очень трудно получить большую выходную мощность, используя один волоконный усилитель, так как с увеличением мощности накачки, начиная с определенного момента, из-за ВРМБ резко возрастает обратная мощность. Поэтому одним из путей увеличения выходной мощности является использование нескольких каскадов усиления. Поскольку в данном случае развитие ВРМБ на каждом каскаде начинается заново, и уровень мощности обратного излучения не успевает подняться до критического значения.

Первый и второй каскады усиления представляли собой исследованные ранее (см. п. 4.2) волоконные усилители на GTWave волокне, легированном ионами иттербия. Третий каскад также представлял собой волоконный усилитель на GTWave волокне, легированном ионами иттербия, но с двунаправленной накачкой с суммарной мощностью около 16 Вт и выходной мощностью около 10 Вт. Спектр выходного излучения после третьего каскада усиления представлен на рис. 84.

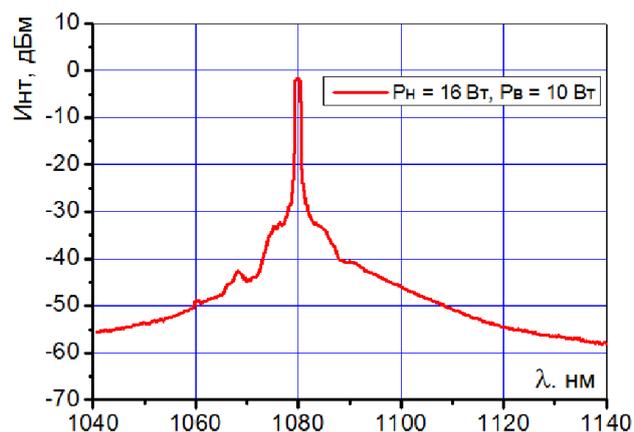


Рис. 84. Спектр выходного излучения после третьем каскада усиления.

Как видно из полученных данных между пиком генерации и уровнем спонтанного излучения более 30 дБ.

Четвертый каскад усиления представлял собой высоколегированное ионами иттербия волокно с широким полем моды (LMA). Накачка осуществлялась с помощью шести лазерных диодов с волоконным выходом. Суммарная мощность накачки составила около 180 Вт. Однако с учетом потерь на сварных соединениях волокон и внутри волоконного сумматора эта мощность составила в реальности 175 Вт. При максимальной мощности накачки выходная мощность составила около 120 Вт при дифференциальной эффективности около 68%. Зависимость выходной мощности лазерной системы от мощности накачки представлена на рис. 85.

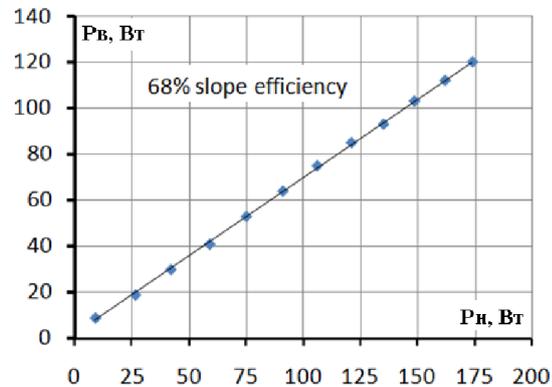


Рис. 85. Зависимость выходной мощности от мощности накачки выходного каскада усиления.

Определение спектральной зависимости выходного излучения проводилось с помощью спектрометра Anritsu MS96A с разрешением 0,2 нм. Спектры излучения, полученные при разных мощностях накачки, представлены на рис. 86.

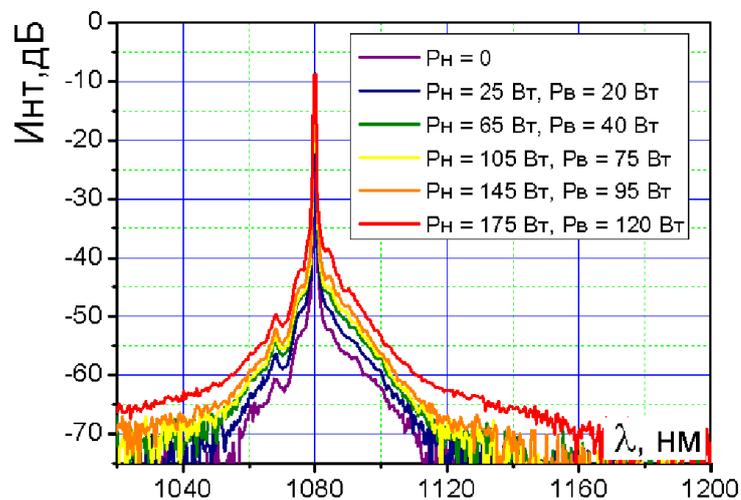


Рис. 86. Спектры выходного излучения после усилителя на LMA-волокне.

По полученному спектру, путем интегрирования, можно определить, что на долю основного излучения приходится 98% всей выходной мощности, что соответствует 117 Вт, и только 3 Вт приходится на мощность спонтанного излучения.

### 5.3. Фазировка двух каналов при когерентном сложении лазерных пучков с максимальной суммарной мощностью до 60 Вт.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 87.

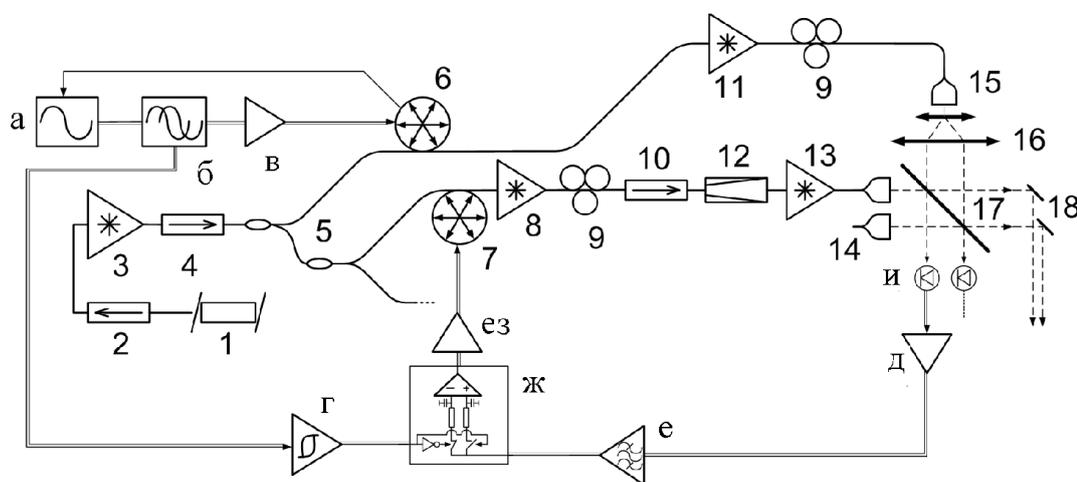


Рис. 87. Схема экспериментальной установки.

*Оптические компоненты:* 1 – задающий генератор, 2 – двухкаскадный волоконный изолятор на 300 мВт, 3, 8, 11 – волоконные усилители на GTWave волокне, 4 – волоконный изолятор на 3 Вт, 5 – система волоконных разветвителей, 6 – пьезокерамический управляющий элемент, 7 – пьезокерамический модулятор фазы, 9 – контроллеры поляризации, 10 – волоконный изолятор на 10 Вт, 12 – модовый адаптер, 13 – волоконный усилитель на LMA волокне, 14 – коллиматоры рабочих каналов, 15 – коллиматор опорного канала, 16 – телескоп, 17 – делительная пластина, 18 – поворотные зеркала

*Электронные компоненты:* а) генератор гармонических (синусоидальных) колебаний, б) фазовращатель модулирующего и опорного сигналов, в) усилитель модулирующего сигнала, г) формирователь прямоугольного опорного сигнала, д) предусилитель для фотоприемника, е) селективный полосовой предусилитель, ж) синхронный детектор, з) выходной высоковольтный усилитель, и) фотоприемники

Отличие работы, представленной в данном разделе, от описанных выше экспериментов по сложению излучения двух и более лазерных каналов заключается в мощности излучения. Ранее проводилось сложение маломощных каналов, не более 5 Вт на один канал, в данном случае мощность излучения

одного канала составляла около 30 Вт. При этом случайные флуктуации фазы достигают величины 500-1000 рад [108], что превышает величину флуктуаций в маломощном случае на один-два порядка.

Принцип работы установки аналогичен установке, представленной на рисунке 30, и описанной в третьей главе. Отличие от установки, приведенной на рисунке 30, состоит в том, что рабочие каналы построены на основе многокаскадного усилителя с мощным каскадом на LMA волокне. Количество каналов сокращено до двух. Также для выравнивания мощности опорного канала с мощностью рабочих каналов, отраженной от делительной пластинки, использовался дополнительный волоконный усилитель на GTWave волокне. Система управления была также выполнена на базе синхронно-фазового детектора, работающего в области максимума или минимума сигнала интерференции (см. главу 3.1.2).

Для получения одного центрального максимума в дальней зоне было необходимо свести лазерные пучки на расстояние менее  $4w$ , где  $w$  - радиус перетяжки лазерного пучка. Геометрия коллиматоров не позволяла сделать это напрямую. Для сведения применялась система отражающих зеркал. Поскольку некоторая часть пучка попадала на край зеркала, то это приводило к искажению профиля интенсивности. Суммарный профиль интенсивности двух рабочих каналов в режиме фазовой синхронизации представлен на рис. 88.

Осциллограмма интенсивности центрального максимума интерференционной картины в дальней зоне в свободном режиме и в режиме фазовой синхронизации представлена на рис. 89. По сигналу с синхронного детектора (рис. 90), при кратковременном воздействии на один из каналов, быстродействие системы было оценено в 100 мс .

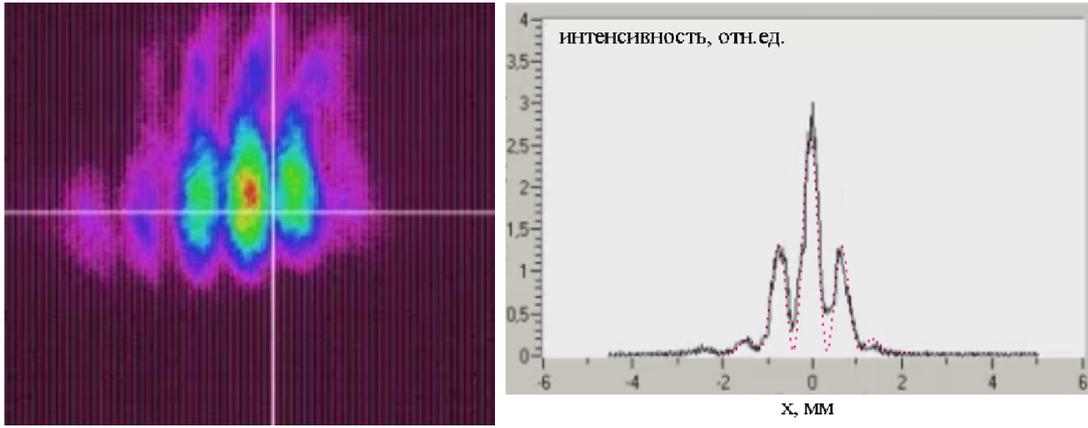


Рис. 88. Профиль интенсивности суммарного поля двух рабочих каналов. Пунктиром показан теоретический профиль интенсивности.

Результаты эксперимента показывают хорошее согласование с теоретической моделью, описанной в Главе IV.

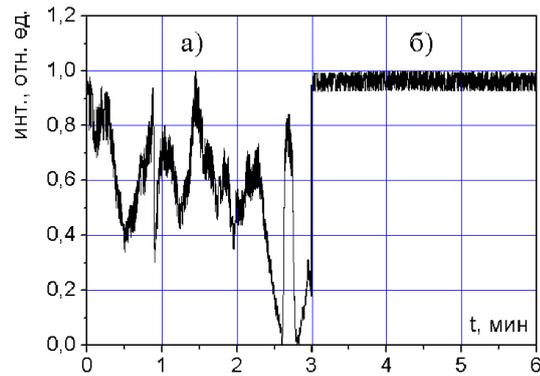


Рис. 89. Интенсивной выходного излучения в центральной части:  
а) в свободном режиме, б) в режиме синхронизации

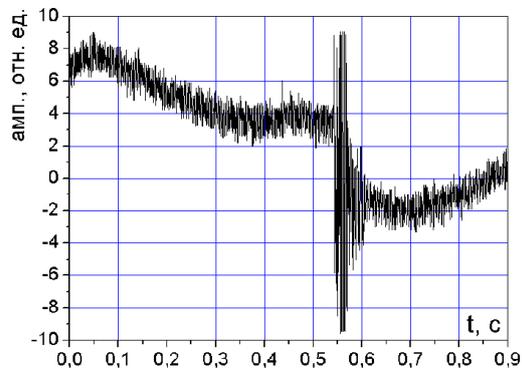


Рис. 90. Сигнал с синхронного детектора одного из рабочих каналов.

#### 5.4. Выводы к Главе V.

Разработан мощный одночастотный генератор на основе волокна с широким полем моды. Для согласования апертур предусилителя на GTWave волокне и основного усилителя на LMA волокне использовался модовый адаптер, представляющий собой волокно конической формы с плавным изменением диаметра сердцевины с 6 мкм до 25 мкм. При накачке в 175 Вт получена выходная мощность в 120 Вт. Из которых 117 Вт приходится на одночастотное излучение. Суммарный коэффициент усиления с (учетом потерь -5 дБ) составил около 40 дБ при дифференциальной эффективности около 68 %. Степень поляризации выходного излучения на уровне выше 0,9. Ширина линии генерации выходного излучения составила  $2,8 \pm 0,2$  МГц.

Создана и исследована двухканальная полностью волоконная лазерная система с когерентным сложением каналов и суммарной мощностью до 60 Вт, работоспособная при внешних механических возмущениях и флуктуациях температуры. Полученные экспериментальные данные соответствуют теоретическим расчетам. Продемонстрирована устойчивая работа системы обратной связи при компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду с характерным временем фазировки около 100 мс.

## **Заключение.**

Основными результатами и выводами настоящей диссертационной работы являются:

1) Создан гибридный одночастотный лазер на основе двухкаскадного волоконного усилителя и задающего одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР. Выходная мощность составила 2,5 Вт при коэффициенте усиления около 20 дБ и максимальной дифференциальной эффективности около 80%. Установлено, что волоконный усилитель существенно не влияет на параметры излучения. При оптимальном режиме работы ширина линии генерации составляла  $2,4 \pm 0,2$  МГц как до, так и после усиления. Степень поляризации излучения после усиления сохранялась на уровне выше 0,9.

2) Впервые предложена и разработана система контроля и управления фазой излучения с использованием оптоволоконных корректоров фазы с пьезоэлектрическим управлением и быстродействием лучше 0,1 с. Алгоритм работы обратной связи теоретически разработан и экспериментально апробирован на примере двух- и семиканальной схемы когерентного сложения. Продемонстрирована семиканальная лазерная система с когерентным сложением каналов с суммарной выходной мощностью до 35 Вт, работоспособная при внешних возмущениях. Полученные данные соответствуют теоретическим расчетам.

3) Впервые создана гибридная одночастотная лазерная система на основе иттербиевого двухкаскадного волоконного усилителя с использованием двух типов активных волокон (GTWave волокно в первом каскаде усиления и коническое волокно с двойным покрытием во втором каскаде). При мощности накачки в 250 Вт на длине волны 915 нм получена выходная мощность в 160 Вт, 130 Вт из которых приходилось на одночастотное излучение. Суммарный коэффициент усиления с учетом потерь (-5 дБ) составил около 40 дБ при

дифференциальной эффективности не меньше 60% и максимальной мощности обратного излучения не более 0,3 Вт.

4) Создана гибридная одночастотная лазерная система на основе 4-х каскадного волоконного усилителя. Первые три каскада усиления представляли собой активное GTWave волокно. В выходном каскаде использовано активное волокно с широким полем моды (LMA волокно). При мощности накачки в 175 Вт на длине волны 975 нм получена выходная мощность около 120 Вт, 117 Вт из которых приходилось на одночастотное излучение. Суммарный коэффициент усиления с (учетом потерь -5 дБ) составил около 40 дБ при дифференциальной эффективности около 68%. Для согласования апертур GTWave и LMA волокна использовался модовый адаптер, представляющий собой волокно конической формы с плавным изменением диаметра сердцевины с 6 мкм до 25 мкм.

5) Создана и исследована двухканальная полностью волоконная лазерная система с когерентным сложением каналов и суммарной мощностью до 60 Вт, работоспособная при внешних механических возмущениях и флуктуациях температуры. Полученные экспериментальные данные соответствуют теоретическим расчетам. Продемонстрирована устойчивая работа системы обратной связи при компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду с характерным временем фазировки около 0,1 с.

**Благодарности.**

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю доктору физико-математических наук Владимиру Борисовичу Цветкову за предложенную тематику исследований, всестороннюю поддержку и ценные обсуждения и замечания в ходе выполнения работы.

Автор выражает благодарность старшему научному сотруднику лаборатории активных сред твердотельных лазеров Пыркову Юрию Николаевичу за помощь в подготовке и проведении экспериментов. Также Егоровой Ольге Николаевне, научному сотруднику лаборатория технологии волоконных световодов НЦВО, за предоставление волоконных модовых адаптеров.

Автор выражает свою признательность ведущему научному сотруднику лаборатории активных сред твердотельных лазеров А.С. Куркову, а так же научным сотрудникам и аспирантам ИОФ РАН: Е.М. Шолохову, В.А. Камынину и С.А. Филатовой за всестороннюю помощь и поддержку при проведении работы.

## Литература.

- 
- [1] Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности //Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – №. 10. – С. 881-900.
- [2] Yoshizawa N., Imai T. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling //Journal of Lightwave Technology. – 1993. – Т. 11. – №. 10. – С. 1518-1522.
- [3] Imai Y., Shimada N. Dependence of stimulated Brillouin scattering on temperature distribution in polarization-maintaining fibers //IEEE photonics technology letters. – 1993. – Т. 5. – №. 11. – С. 1335-1337.
- [4] Shiraki K., Ohashi M., Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius //Electronics letters. – 1995. – Т. 31. – №. 8. – С. 668-669.
- [5] Kobayakov A., Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold //Optics Express. – 2005. – Т. 13. – №. 14. – С. 5338-5346.
- [6] Kovalev V. I., Harrison R. G. Threshold for stimulated Brillouin scattering in optical fiber //Optics Express. – 2007. – Т. 15. – №. 26. – С. 17625-17630.
- [7] Liu A. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient //Optics express. – 2007. – Т. 15. – №. 3. – С. 977-984.
- [8] Lan G.L., Banerjee P.K., Mitra S.S. Raman scattering in optical fibers //Journal of Raman spectroscopy. – 1981. – Т. 11. – №. 5. – С. 416-423.
- [9] Yeniay A., Delavaux J. M., Toulouse J. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers //Journal of lightwave technology. – 2002. – Т. 20. – №. 8. – С. 1425.
- [10] Shen Y.R., Bloembergen N. Theory of stimulated Brillouin and Raman scattering //Physical Review. – 1965. – Т. 137. – №. 6A. – С. A1787.
- [11] Singh S. P., Singh N. Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications //Progress In Electromagnetics Research. – 2007. – Т. 73. – С. 249-275.

- 
- [12] Agrawal, G.P., *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd edition. – Academic Press, SanDiego, CA, 2001
- [13] Б.М. Ашкинадзе, В.И. Владимиров, В.А.Лихачев, С.М. Рывкин, В.М. Салманов, И.Д. Ярошецкий, "Разрушение прозрачных диэлектриков под действием мощного лазерного излучения", *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1966. – Т. 50. – № 5. – С. 1187.
- [14] И.В. Алешин, С.И. Анисимов, А.М. Бонч-Бруевич, Я.И. Имас, В.Л. Комолов. Оптический пробой прозрачных сред, содержащих микронеоднородности // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1976. – Т. 70. – №. 4. – С. 1214-1224.
- [15] Brignon A. (ed.). *Coherent Laser beam combining*. – John Wiley & Sons, 2013. - p. 498.
- [16] Goodno G.D., Komine H., McNaught S. J., Weiss S.B., Redmond S., Long W., Simpson R., Cheung E.C., Howland D., Epp P., Weber M., McClellan M., Sollee J., and Injeyan H. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers // *Optics letters*. – 2006. – Т. 31. – №. 9. – С. 1247-1249.
- [17] Hecht J. et al. Combining beams can boost total power // *Laser focus world*. – 2008. – Т. 44. – №. 7. – С. 76-79.
- [18] Redmond S.M., Creedon K.J., Kansky J.E., Augst S.J., Missaggia L.J., Connors M.K., Huang R.K., Chann B., Fan T.Y., Turner G.W., Sanchez-Rubio A. Active coherent beam combining of diode lasers // *Optics letters*. – 2011. – Т. 36. – №. 6. – С. 999-1001.
- [19] Yu C.X., Augst S.J., Redmond S.M., Goldizen K.C., Murphy D.V., Sanchez A., and Fan T.Y. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array, // *Optics letters*. – 2011. – Т. 36. – №. 14. – С. 2686-2688.
- [20] Lavan M. High energy laser systems for short range defense // *Acta Physica Polonica-Series A General Physics*. – 2009. – Т. 115. – №. 6. – С. 959.

- 
- [21] Flores A., Shay T.M., Lu C.A., Robin C., Pulford B., Sanchez A.D., Hult D.W., and Rowland K.B., Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime //Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011 Conference on. – IEEE, 2011. – C. 1-2.
- [22] Augst S. J.; Redmond S.M.; Yu C.X.; Ripin D.J.; Fan T.Y.; Goodno G.D.; Thielen P.A.; Rothenberg J.E.; Sanchez-Rubio A., Coherent and spectral beam combining of fiber lasers //Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – T. 8237. – C. 823704.
- [23] Yu C.X., Kinsky J.E., Shaw S.E.J., Murphy D.V., Higgs C., Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array, //Electronics Letters, 2006, – №. 18, pp.– T. 42. – C. 1024-1025.
- [24] Shay T. M. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam //Optics Express. – 2006. – T. 14. – №. 25. – C. 12188-12195.
- [25] McNaught S.J., Komine H., Weiss S.B., Simpson R., Johnson A.M., Machan J., Asman C.P., Weber M., Jones G.C., Valley M.M., Jankevics M., Burchman D., McClellan M., Sollee J., Marmo J. and Injeyan H., 100 kW coherently combined slab MOPAs //Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference. CLEO/QELS 2009. Conference on. – IEEE, 2009. – C. 1-2.
- [26] Grudinin A.B., Payne D., Turner P.W., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K.. An optical fiber arrangement. //International patent WO 00/67350, priority date 30.04, 1999.
- [27] Grudinin A.B., Payne D., Turner P.W., Nilsson J., Zervas M.N., Ibsen M. and Durkin M.K. Multi-fibre arrangements for high power fibre lasers and amplifiers //US Patent 6,826,335, priority date 04.28, 2000.
- [28] Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды //Квант. электроника. – 2006. – Т. 36. – №. 9. – С. 801–820.
- [29] Carlson C.G., Dragic P.D., Graf B.W., Price R.K., Coleman J.J., Swenson G.R. High power Yb-doped fiber laser-based LIDAR for space weather //Fiber Lasers V:

---

Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2008. – T. 6873. – C. 68730K.

[30] Kurkov A.S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers //Laser Physics Letters. – 2006. – T. 4. – №. 2. – C. 93.

[31 ] Kurkov A.S., Paramonov V.M., Medvedkov O.I. Ytterbium fiber laser emitting at 1160 nm //Laser Physics Letters. – 2006. – T. 3. – №. 10. – C. 503-506.

[32] Andrusyak O., Ciapurin I., Smirnov V., Venus G., and Glebov L. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density //Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2007. – T. 6453. – C. 64531L.

[33] O. Andrusyak, Rotar V., Sevian A., Smirnov V., Venus G., and Glebov L. Spectral beam combining by stack of volume Bragg gratings in PTR glass //SSDLTR-2007 Technical Digest. – 2009.

[34] Cirmi G., Fang S., Chia S.H., Mücke O.D., Manzoni C., Farinello P., Cerullo G., and Kärtner F.X., Towards parametric synthesis of millijoule-level two-octave-wide optical waveforms for strong-field experiments //Ultrafast Optics 2013 (UFO IX). – 2014.

[35] Fang S., Cirmi G., Chia S.H., Mücke O.D., Kärtner F.X., Manzoni C., Farinello P., and Cerullo G. Multi-mJ parametric synthesizer generating two-octave-wide optical waveforms //Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2013 Conference on. – IEEE, 2013. – C. 1-2.

[36] Rossi G.M., Cirmi G., Fang S., Chia S.H., Mücke O.D., Kärtner F.X., Manzoni C., Farinello P., and Cerullo G. Spectro-temporal characterization of all channels in a sub-optical-cycle parametric waveform synthesizer //CLEO: Science and Innovations. – Optical Society of America, 2014. – C. SF1E. 3.

[37] Hess S.T., Girirajan T.P.K., Mason M.D. Ultra-high resolution imaging by fluorescence photoactivation localization microscopy //Biophysical journal. – 2006. – T. 91. – №. 11. – C. 4258-4272.

[38] Berning S., Willig K.I., Steffens H., Dibaj P., Hell S.W. Nanoscopy in a living mouse brain //Science. – 2012. – T. 335. – №. 6068. – C. 551-551.

- 
- [39] Vanani A.S., Ghayour R. New structural design of passive optical array waveguide grating-wavelength division multiplexing to upgrade the multiplexing/demultiplexing characteristic //Optical Engineering. – 2011. – Т. 50. – №. 10. – С. 105004.
- [40] Lu S., Yang C., Yan Y., Jin G., Zhou Z., Wong W.H., and Pun E.Y.B. Design and fabrication of a polymeric flat focal field arrayed waveguide grating //Optics Express. – 2005. – Т. 13. – №. 25. – С. 9982-9994.
- [41] Meng H., Sun T., Tan H., Yu J., Du W., Tian F., Li J., Gao S., Wang X. and Wu D. High-brightness spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity //Optics Express. – 2015. – Т. 23. – №. 17. – С. 21819-21824.
- [42] Andrusyak O., Smirnov V., Venus G., Vorobiev N., Glebov L. Applications of volume Bragg gratings for spectral control and beam combining of high power fiber lasers //Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2009. – Т. 7195. – С. 71951Q.
- [43] Wirth C., Schmidt O., Tsybin I., Schreiber T., Peschel T., Brückner F., Clausnitzer T., Limpert J., Eberhardt R., Tünnermann A., Gowin M., ten Have E., Ludewigt K., and Jung M. 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers //Optics express. – 2009. – Т. 17. – №. 3. – С. 1178-1183.
- [44] Doi Y., Oguma M., Ito M., Ogawa I., Yoshimatsu T., Ohno T., Yoshida E., Takahashi H. Compact ROSA for 100-Gb/s (4 x 25 Gb/s) Ethernet with a PLC-based AWG demultiplexer //National Fiber Optic Engineers Conference. – Optical Society of America, 2013. – С. NW1J. 5.
- [45] Liu X., Gill D.M., Chandrasekhar S., Buhl L.L., Earnshaw M., Cappuzzo M.A., Gomez L.T., Chen Y., Klemens F.P., Burrows E.C., Chen Y.K., Tkach R.W. Multi-carrier coherent receiver based on a shared optical hybrid and a cyclic AWG array for terabit/s optical transmission //IEEE Photonics Journal. – 2010. – Т. 2. – №. 3. – С. 330-337.
- [46] Котов Л.В., Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Медведков О.И., Липатов Д.С., Вечканов Н.Н., Гурьянов А.Н. Высокоэффективные лазер и усилитель на основе

---

легированных оксидом эрбия световодов с накачкой в оболочку //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 5. – С. 432-436.

[47] Pavlov, I., Ilbey, E., Dülgergil, E., Bayrı, A., and Ilday, F.Ö. High-power high-repetition-rate single-mode Er-Yb-doped fiber laser system //Optics express. – 2012. – Т. 20. – №. 9. – С. 9471-9475.

[48] Курков А.С., Парамонов В.М., Егорова О.Н., Медведков О.И., Дианов Е.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н., Залевский И.Д., Гончаров С.Е. Мощный эрбиевый волоконный усилитель с накачкой от рамановского волоконного конвертера на основе фосфоросиликатного световода //Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – №. 9. – С. 801-803.

[49] Koponen J., Laurila M., Hotoleanu M. Inversion behavior in core-and cladding-pumped Yb-doped fiber photodarkening measurements //Applied optics. – 2008. – Т. 47. – №. 25. – С. 4522-4528.

[50] Dragic P. D. et al. Optical fiber with an acoustic guiding layer for stimulated Brillouin scattering suppression //Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2005. – С. CThZ3.

[51] Li M.J., Chen X., Wang J., Gray S., Liu A., Demeritt J.A., Ruffin A.B., Crowley A.M., Waltonand D.T., Zenteno L.A. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold //Optics Express. – 2007. – Т. 15. – №. 13. – С. 8290-8299.

[52] Gray S., Liu A., Walton D. T., Wang J., Li M.-J., Chen X., A. Ruffin B., De Merittand J., Zenteno A.L.A. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier //Optics express. – 2007. – Т. 15. – №. 25. – С. 17044-17050.

[53] Kienel M., Müller M., Demmler S., Rothhardt J., Klenke A., Eidam T., Limpert J., and Tünnermann A. Coherent beam combination of Yb: YAG single-crystal rod amplifiers //Optics letters. – 2014. – Т. 39. – №. 11. – С. 3278-3281.

[54] Zhou P.F. Ma, P., Su R.T., Ma Y.X., Wang X.L., Liu Z.J. Passive Coherent Polarization Beam Combination of a Four-Fiber Amplifier Array //IEEE Photonics Journal. – 2013. – Т. 5. – №. 6. – С. 7101307-7101307.

- 
- [55] Ma P., Tao R., Wang X., Ma Y., R. Su, and Zhou P. Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime //Optics express. – 2014. – T. 22. – №. 4. – C. 4123-4130.
- [56] Goodno G.D., Weiss S.B. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking //Optics express. – 2012. – T. 20. – №. 14. – C. 14945-14953.
- [57] Uberna R., Bratcher A., Tiemann B.G. Coherent polarization beam combination //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2010. – T. 46. – №. 8. – C. 1191-1196.
- [58]Uberna R., Bratcher A., Tiemann B. G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination //Applied optics. – 2010. – T. 49. – №. 35. – C. 6762-6765.
- [59] Wang B., Sanchez A.D. All-fiber passive coherent combining of high power lasers //Optical Engineering. – 2011. – T. 50. – №. 11. – C. 111606.
- [60] Zhou P., Ma Y., Wang Xiao X., Leng H., J., Xu X., and Liu Z. Coherent beam combination of thulium-doped fiber lasers //SPIE Newsroom. doi. – 2011. – T. 10. – №. 2.1201101. – C. 003488.
- [61] Flores A., Shay T. M., Lu C. A., Robin C., Pulford B., Sanchez A. D., Hult D. W., and Rowland K. B. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime //Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011 Conference on. – IEEE, 2011. – C. 1-2.
- [62] Vorontsov M. A., Lachinova S. L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis //JOSA A. – 2008. – T. 25. – №. 8. – C. 1949-1959.
- [63] Shay T. M., Benham V., Baker J.T., Ward B., Sanchez A.D., Culpepper M.A., Pilkington D., Spring J., Nelson D.J., and Lu C.A. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array //Optics express. – 2006. – T. 14. – №. 25. – C. 12015-12021.
- [64] Xiao R., Hou J., liu M., Jiang1Z. F. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays //Optics express. – 2008. – T. 16. – №. 3. – C. 2015-2022.

- 
- [65] Augst S.J., Fan T. Y., and Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers //Optics Letters. – 2004. – Т. 29. – №. 5. – С. 474-476.
- [66] Zhou P., Ma Y., Wang X., Ma H., Wang J., Xu X., and Liu Z. Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber amplifier array //Applied optics. – 2009. – Т. 48. – №. 33. – С. 6537-6540.
- [67] Xiao L., Hu X., Xiao-Lin D., Yan-Xing M., Xiao-Jun X., Coherent beam combining of two slab laser amplifiers and second-harmonic phase locking based on a multi-dithering technique //Chinese Physics Letters. – 2011. – Т. 28. – №. 9. – С. 094210.
- [68] Bourderionnet J., Bellanger C., Primot J., and Brignon A. Collective coherent phase combining of 64 fibers //Optics express. – 2011. – Т. 19. – №. 18. – С. 17053-17058.
- [69] Goodno G.D., Asman C.P., Anderegg J., Brosnan S., Cheung E.C., Hammons D., Injeyan H., Komine H., Long W.H., McClellan M., McNaught S.J., Redmond S., Simpson R., Sollee J., Weber M., Weiss S. B., and Wickham M. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2007. – Т. 13. – №. 3. – С. 460-472.
- [70] Cheung E.C., Ho J.G., Goodno G.D., Rice R.R., Rothenberg J., Thielen P., Weber M., and Wickham M. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array //Optics letters. – 2008. – Т. 33. – №. 4. – С. 354-356.
- [71] Волков В.А., Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В., Чапарин Д.А. Динамическая фазировка многоканального непрерывного лазерного излучения с использованием стохастического градиентного алгоритма //Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – №. 9. – С. 852-856.
- [72] Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Синявин Д.Н., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В., Чапарин Д.А. Фазировка семиканальной непрерывной оптоволоконной лазерной

---

системы с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма //Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №. 11. – С. 1039-1042.

[73] Волков В.А., Волков М.В., Гаранин С.Г., Стариков Ф.А. Расчетное исследование фазировки многоканального лазерного пучка в турбулентной атмосфере //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 12. – С. 1125-1131.

[74] Fotiadi A.A., Zakharov N.G., Antipov O.L., Mégret P. All-fiber coherent combining of Er-doped fiber amplifiers by active resonantly induced refractive index control in Yb-doped fiber //Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2008. – С. CWB2.

[75] Гайнов В.В., Шайдуллин Р.И., Рябушкин О.А. Стационарный разогрев активных волоконных световодов при оптической накачке //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 637-643.

[76] Гайнов В.В. «Оптическая интерферометрия кварцевого волоконного световода легированного редкоземельными ионами в условиях генерации лазерного излучения», диссертация на соискание к.ф.м.н., Москва. – 2016, – С. 156

[77] Bird D.M., Armitage J.R., Kashyap R., Fatah R.M.A., Cameron K.H. Narrow line semiconductor laser using fibre grating //Electronics Letters. – 1991. – Т. 27. – №. 13. – С. 1115-1116.

[78] Morton P.A., Mizrahi V., T. Tanbun-Ek, Logan R.A., Lemaire P.J., Presby H.M., Erdogan T., Woodward S.L., Sipe J.E., Phillips M.R., Sergeant A.M., and Wecht K.W. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth //Applied physics letters. – 1994. – Т. 64. – №. 20. – С. 2634-2636.

[79] Polynkin A., Polynkin P., Mansuripur M., and Peyghambarian N. Single-frequency fiber ring laser with 1W output power at 1.5  $\mu\text{m}$  //Optics Express. – 2005. – Т. 13. – №. 8. – С. 3179-3184.

[80] Babin S.A., Churkin D., Kablukov S.I., Nikulin M.A. Single frequency linearly polarized DFB fiber laser source //ICONO 2007: Nonlinear Laser Spectroscopy and High-Precision Measurements; and Fundamentals of Laser Chemistry and

---

Biophotonics. – International Society for Optics and Photonics, 2007. – Т. 6727. – С. 672716.

[81] Shie N.C., Hsieh W.F., and Shy J.T. Single frequency 1070 nm Nd: GdVO<sub>4</sub> laser using a volume Bragg grating //Optics Express. – 2011. – Т. 19. – №. 22. – С. 21109-21115.

[82] Chung T.Y., Rapaport A., Smirnov V., Glebov L.B., Richardson M.C., and Bass M. Solid-state laser spectral narrowing using a volumetric photothermal refractive Bragg grating cavity mirror //Optics letters. – 2006. – Т. 31. – №. 2. – С. 229-231.

[83] Snitzer E., Po H., Hakimi F., Tumminelli R., McCollum B.C., Proc. Conf. Optical Fiber Sensors, Postdeadline paper PD5 (1988),

[84] Limpert J., Schreiber T., Nolte S., Zellmer H., Tünnermann A. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser //Optics Express. – 2003. – Т. 11. – №. 7. – С. 818-823.

[85] Буфетов И.А., М Бубнов.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. Волоконные Yb-, Er-Yb-и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой //Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – №. 4. – С. 328-334.

[86] Yla-Jarkko K.H., Codemard C., Singleton J., Turner P.W., Godfrey I., Alam S.U., Nilsson J., Sahu J.K., and Grudinin A.B. Low-noise intelligent cladding-pumped L-band EDFA //IEEE Photonics Technology Letters. – 2003. – Т. 15. – №. 7. – С. 909-911.

[87] Wang P. and Clarkson W.A. High-power, single-mode, linearly polarized, ytterbium-doped fiber superfluorescent source //Optics letters. – 2007. – Т. 32. – №. 17. – С. 2605-2607.

[88] Liem A., Limpert J., Zellmer H., and Tünnermann A. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier //Optics Letters. – 2003. – Т. 28. – №. 17. – С. 1537-1539.

[89] Wang X.L., Zhou P., Tao R.M., Su R.T., and Xu X.J. 670 W Single-frequency Retrievable Multi-tone All-fiber MOPA //PIERS Proceedings. – 2014. – С. 2289-2293.

- 
- [90] Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., and Nilsson J. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power //Optics express. – 2004. – Т. 12. – №. 25. – С. 6088-6092.
- [91] Zhan H., Liu Q., Wang Y., Ke W., Ni L., Wang X., Peng K., Gao C., Li Y., Lin H., Wang J., Jing F., Lin A. 5kW GTWave fiber amplifier directly pumped by commercial 976nm laser diodes //Optics express. – 2016. – Т. 24. – №. 24. – С. 27087-27095.
- [92] Filippov V., Chamorovskii Yu., Kerttula J., Golant K., Pessa M., and Okhotnikov O.G. Double clad tapered fiber for high power applications //Optics express. – 2008. – Т. 16. – №. 3. – С. 1929-1944.
- [93] Filippov V., Kerttula J., Chamorovskii Y., Golant K., and Okhotnikov O.G. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser //Optics Express. – 2010. – Т. 18. – №. 12. – С. 12499-12512.
- [94] Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Шишков В.В. Одночастотный полупроводниковый лазер на  $\lambda = 1.06$  мкм с распределенным брегговским зеркалом в волоконном световоде //Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – №. 4. – С. 301-302.
- [95] Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.М. Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 656-658.
- [96] Лиокумович Л. Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. – Изд-во Политехнического ун-та, – 2007. – С. 110
- [97] Матвеев А.Н. Оптика: Учебное пособие для физ. спец. вузов. - М.: Высш. шк., – 1985, – С. 351.
- [98] Noda J., Okamoto K., and Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications //Journal of Lightwave Technology. – 1986. – Т. 4. – №. 8. – С. 1071-1089.
- [99] Пырков Ю.Н., Трикшев А.И., Цветков В.Б. Фазировка нескольких усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 9. – С. 790-793.

- 
- [100] Мезенов А.В., Сома Л.Н., Степанов А.И. Термооптика твердотельных лазеров. — Л. Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. — С. 20
- [101] Валитов Р.А. Радиотехнические измерения. / Р.А.Валитов, В.Н. Сретенский. -М.: Сов. Радио, 1970. с. 712.
- [102] Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин, Методы модуляции и сканирования света. -М.: Наука, 1970. с. 295.
- [103] Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений //Труды ИОФАН. – 2006. – Т. 62. – С. 14-35.
- [104] Kane T.J., Kozlovsky W.J., and Byer R.L. 62-dB-gain multiple-pass slab geometry Nd: YAG amplifier //Optics letters. – 1986. – Т. 11. – №. 4. – С. 216-218.
- [105] Rus sbuedt P., Hoffmann D., Hoeferet al M. Innoslab amplifiers //IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2015. – Т. 21. – №. 1. – С. 447-463.
- [106] Cha Y.H., Lee S.M., Lim G., Baik S.H., Kwon S.O., Cha B.H., Lee J.H., and Kang E.C. Development and characterization of a 400-W slab-type Nd: YAG gain module //Journal of the Optical Society of Korea. – 2012. – Т. 16. – №. 1. – С. 53-56.
- [107] Golant K. M. Surface plasma chemical vapor deposition: 20 years of application in glass synthesis for lightguides (a review) //Proceedings of XXI International Congress on Glass. – 2007. – С. L13.
- [108] Gainov V., Ryabushkin O.A. Quadrature Michelson Interferometer for Temperature Measurement in the Core of Active Fiber of a High-Power Fiber Laser //Journal of Lightwave Technology. – 2017. – Т. 35. – №. 2. – С. 334-340.