

УДК 535  
ББК В3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ.

Зоидов Н.Н., Кучкаров Х.О., Халмирзаев А.А.

Наманганский государственный университет.

E-mail: anabiyev76@mail.ru

**Аннотация:** в работе рассмотрены физические основы экспериментальное изучение спектроскопические характеристики волоконных лазеров, функции составных элементов, состав оптоволокна и способы изучение оптические характеристики волоконного лазера.

**Ключевые слова:** оптоволоконный лазер, спектры, накачка, резонатор, оптическое волокно, зеркала Брэгга, активная среда, сердцевины и оболочки, диоды, коллиматор, ответвление, мощность.

**Annotation:** the paper discusses the physical basis of the operation of a fiber laser and the functions of its constituent elements, optical fiber composition and methods for studying the spectroscopic characteristics of a fiber laser.

**Key words:** fiber optic laser, spectra, pump, cavity, optical fiber, Bragg mirrors, active medium, cores and shells, diodes, collimator, branch, power.

**Актуальность** данной работы вызвано тем, что до сегодняшнего дня во многих учебных лабораториях отсутствует работы по изучению характеристики волоконных лазеров несмотря на их широкое применения в различных отраслях промышленности. Это негативно влияет в развитии студентов по практическому применению теоретических знаний в области лазерной технологии. Между тем, согласно образовательному стандарту, выпускники должны владеть практическое назначение изучаемых вопросов и теоретических заключений. В связи с этим актуальными является изучение различных характеристик волоконного лазера в лабораторных условиях.

**Цель работы:** показать принцип работы волоконных лазеров, определить порог генерации и исследовать спектроскопические характеристики волоконного лазера «Итларь-1080» в лабораторных условиях.

### Введение.

Волоконные лазеры - это тип твердотельных лазеров, в которых в качестве активной среды усиления используется оптическое волокно. В этих лазерах волокно из силикатного или фосфатного стекла поглощает исходящий свет от лазерных диодов накачки и преобразует его в лазерный луч с определенной длиной волны. Чтобы добиться этого, оптическое волокно легируется. Под легированием понимается подмешивание в волокно редкоземельного элемента. Используя различные легирующие элементы, можно создавать лазерные лучи с широким диапазоном длин волн.

Некоторые распространенные легирующие элементы в порядке

возрастания излучаемых длин волн: неодим (780-1100 нм), иттербий (1000-1100 нм), празеодим (1300 нм), эрбий (1460-1640 нм), тулий (1900-250 нм), гольмий (2025-2200 нм) и диспрозий (2600-3400 нм).

Благодаря такому широкому диапазону производимых длин волн, волоконные лазеры идеально подходят для различных применений, таких как лазерная резка, текстурирование, очистка, гравировка, сверление, маркировка и сварка. Это также позволяет использовать волоконные лазеры в различных отраслях, таких как медицина, оборона, телекоммуникации, автомобилестроение, спектроскопия, электротехника, производство и транспорт.

### **Основная часть**

Волоконный лазер назван в честь его активной среды, которая представляет собой оптическое волокно. Любая волоконная лазерная установка, которая производит хорошо коллимированный мощный лазерный луч, делает это за пять основных этапов:

- создание светового пучка накачки;
- сбор и перемещение в оптическое волокно;
- прохождение светового пучка накачки через оптическое волокно;
- стимулированное излучение в резонаторе лазера;
- усиление необработанного лазерного света в лазерный луч;

В волоконных лазерах используется электричество в качестве источника энергии. Лазерные диоды накачки, преобразуют электрическую энергию в световую. В высококачественных диодах преобразование надежно и эффективно и производит световую энергию только с определенной длиной волны[1,2].

В большинстве случаев этот свет накачки или луч накачки производится по частям несколькими лазерными диодами и затем соединяется в оптоволоконном кабеле. Например, существуют 20-ваттные лазерные установки, которые объединяют свет накачки от 11 лазерных диодов в оптоволоконном кабеле[3,4].

При этом соединитель объединяет свет от нескольких лазерных диодов в один. Этот соединитель является частью оптического волокна. С одной стороны, он имеет несколько точек входа, каждая из которых подключается к волокну от отдельного лазерного диода.

На другой стороне есть одна точка выхода, которая соединяется с основным волокном. Когда весь свет собран, он направляется к лазерной среде или среде усиления. На следующем этапе свет лазерного диода проходит через оптическое волокно к лазерной среде. Оптоволокно состоит из двух основных компонентов: сердцевины и оболочки. Сердцевина изготовлена из квartzевого стекла и обеспечивает путь для света. Сердцевина покрыта оболочкой. Когда свет достигает оболочки, он весь отражается обратно в сердцевину[5,6].

Волоконные лазеры неизменно теряют часть мощности из-за нагрева, но превосходное соотношение площади поверхности и объема способствует эффективному рассеиванию тепла, что приводит к очень незначительному тепловому износу.

При дальнейшем движении по оптическому волокну свет в конце концов достигает легированной части волокна. Эта часть известна как лазерный

резонатор.

Когда свет лазерного диода достигает легированного волокна, он ударяется об атомы редкоземельного элемента и возбуждает его электроны на более высокий энергетический уровень. Со временем это приводит к инверсной среде, которая необходима для создания стандартного лазера.

Инверсная среда в лазере относится к состоянию среды усиления, в которой большее количество электронов находится в возбужденном состоянии по сравнению с теми, которые не находятся в возбужденном состоянии. Оно называется инверсной средой, потому что это противоположно нормальному состоянию, в котором только несколько атомов имеют возбужденные электроны[7,8].

Когда некоторые из этих электронов естественным образом опускаются на более низкие энергетические уровни, они испускают фотоны только определенной длины волны. Эти фотоны взаимодействуют с другими возбужденными электронами, побуждая их испускать аналогичные фотоны и отступать на свои первоначальные более низкие энергетические уровни(рис.1). Это физический процесс "стимулированного излучения", который является частью аббревиатуры LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Электроны, которые возвращаются в свое первоначальное спокойное состояние, вновь возбуждаются входящим светом от диодов накачки. В конце концов, процесс достигает равновесия между возбужденными и спокойными электронами, давая нам постоянный поток необработанного лазерного света. Этот свет необходимо очистить, чтобы использовать его в различных целях.

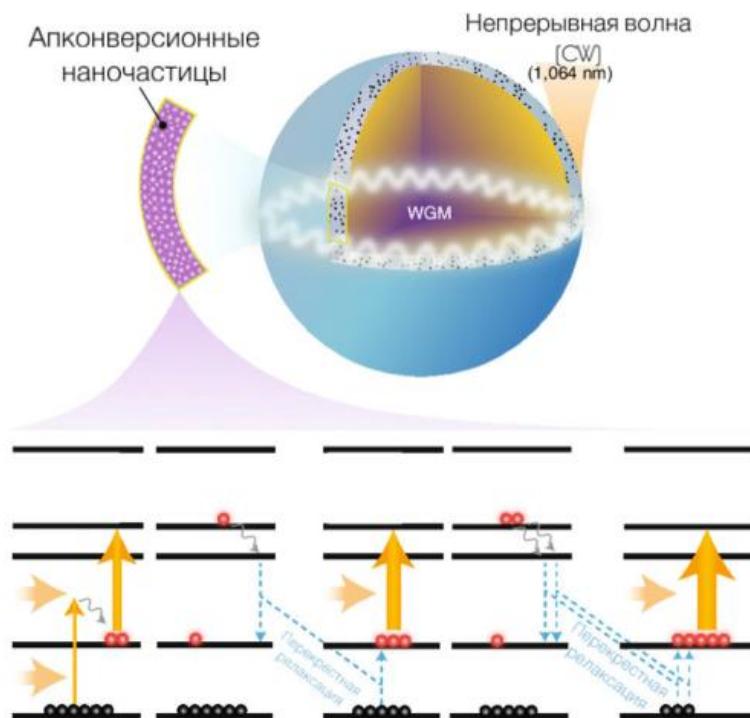


Рис. 1. Апконвертирующий-полостной лазер, использующий наночастицы с "энергетической петлей" апконверсии в качестве среды усиления.

Прежде чем использовать необработанное лазерное излучение из легированного волокна, его необходимо сначала усилить. В волоконных лазерах это делается с помощью волоконных брэгговских решеток (FBG). Эти решетки заменяют обычные диэлектрические зеркала, действуя как зеркала с различной отражательной способностью.

Свет скачет туда-сюда между брэгговскими решетками. Часть лазерного света проходит в одном направлении, а оставшийся свет отражается в полость лазера. Та часть, которая проходит через решетку, становится лазерным лучом. Этот луч затем проходит через осциллятор (и иногда через комбинатор) для улучшения когерентности и затем подается на выход[9].

Волноводный характер распространения излучения накачки и сигнала, исключает потери на их излучение через боковые поверхности среды. Кроме того, оптические волокна обладают развитой боковой поверхностью, обеспечивающей эффективный теплоотвод[10].

Волноводный характер распространения излучения определяется профилем показателя преломления (ППП) волокна, наиболее простым из которых, является ступенчатый, который описывается следующим выражением:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, r \leq a \\ n_{cl}, r > a \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  - показатель преломления,  $a$  - радиус сердцевины,  $n_1$  - показатель преломления сердцевины волокна,  $n_{cl}$  - показатель преломления оболочки волокна. Соответствующий профиль представлен на рис. 2.

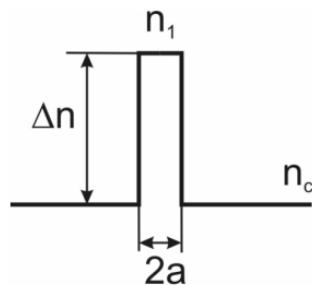


Рис. 2. Ступенчатый профиль показателя преломления.

Параметры профиля определяют модовый состав излучения и, соответственно, геометрию выходного пучка лазера. Для связи параметров оптического волокна и длины волны излучения распространяющегося в световоде, вводится нормированная частота  $v$ :

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{2\Delta n n_{cl}} \quad (2)$$

где  $\Delta n = n_1 - n_{cl}$ ,  $\lambda$  - длина волны излучения, распространяющегося в световоде[11,12].

Две другие характеристики, а именно мощность излучения и его геометрия оказываются связанными между собой. Как правило, полупроводниковые источники для волоконных лазеров имеют волоконный выход(рис.3). При этом, размеры сердцевины используемого волокна, определяются геометрией излучающей области полупроводникового лазера.

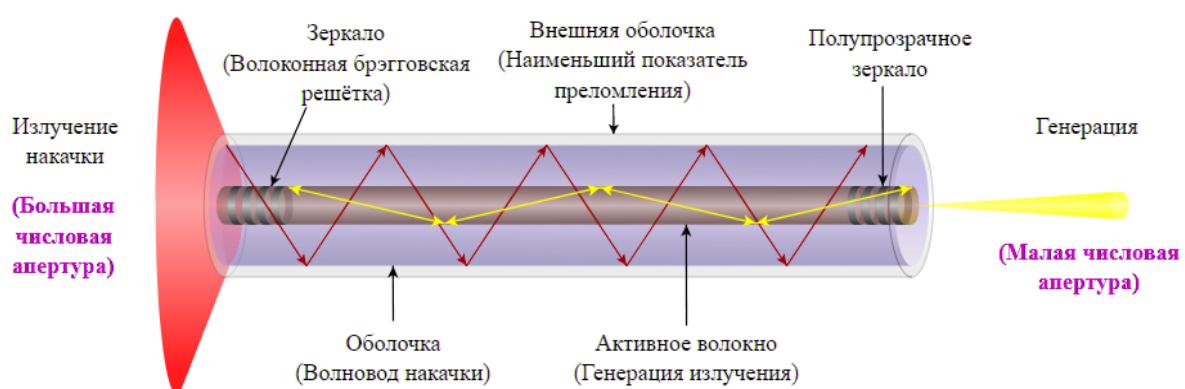


Рис. 3. Схема накачки лазера, основанного на волокне с двойным покрытием.

Принцип распространения излучения накачки и возникновения излучения в активной сердцевине показан на рис. 4,а,б. При распространении по пассивным волокнам излучение накачки переходит в активное волокно,

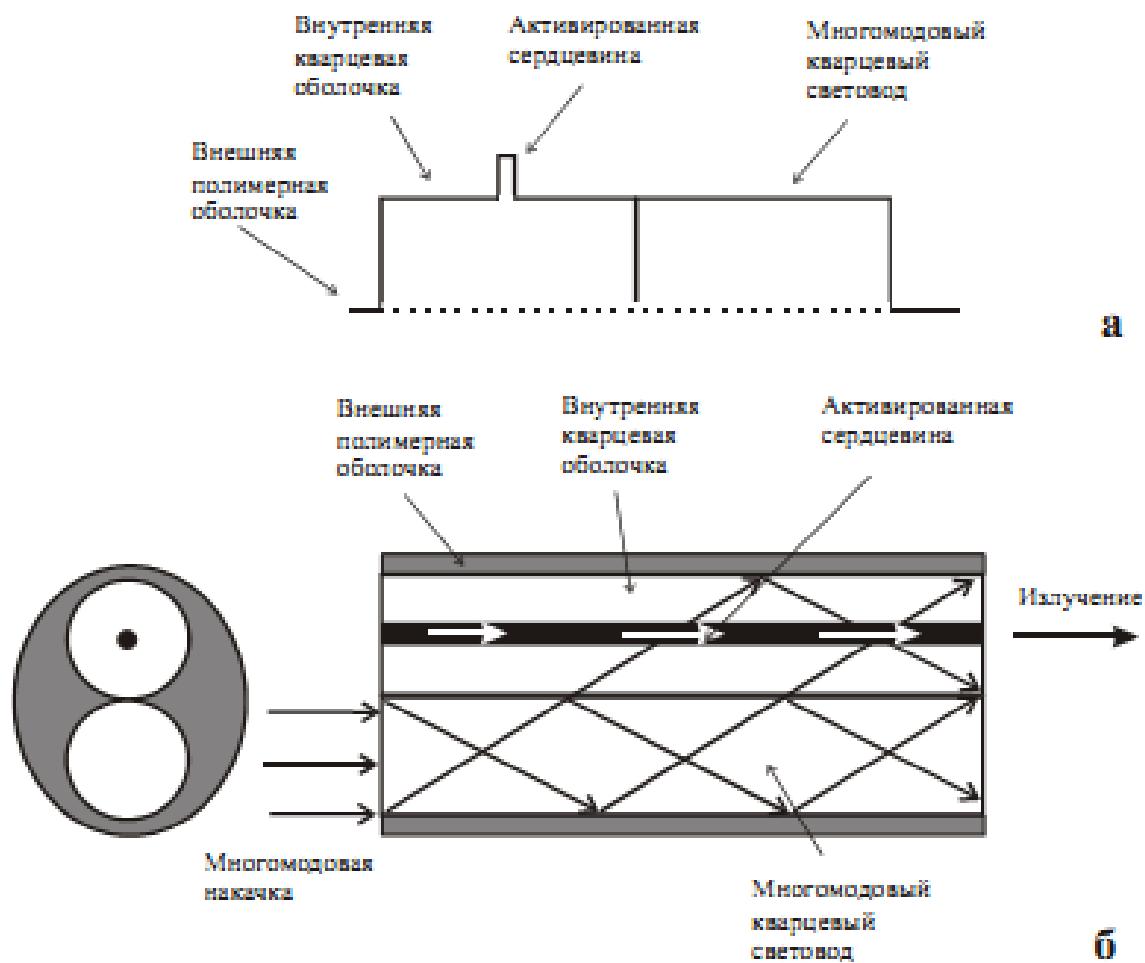


Рис.4. Профиль GTWave (генератор двухканальной волновод) волокно: (а) – модельный профиль преломления, (б) - иллюстрация перехода многомодовой накачки в активный световод и преобразования в одномодовое излучение волоконного лазера.

при этом отношение мощностей накачки в волокнах определяется соотношением площадей их оболочек. В активном волокне излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию и лазерную генерацию. Поглощение части накачки в его сердцевине

компенсируется дополнительной перекачкой излучения из пассивных волокон, необходимой для поддержания постоянного отношения мощностей накачки в активном и пассивных волокнах. Отличительной особенностью GTWave волокна является то, что активное волокно не используется для ввода излучения накачки, что обеспечивает оптическую связь волоконного лазера и источника накачки. Кроме того, наличие одного и более пассивных волокон позволяет значительно увеличивать мощность вводимого излучения накачки, так как становится возможным присоединять источники накачки к каждому выходу пассивного волокна.

Также как и в случае лазеров других типов, для получения генерации в волоконном лазере требуется создание положительной обратной связи. Для этого, как правило, используются отражатели различных типов. Как и в твердотельных лазерах для этой цели могут применяться диэлектрические и металлические зеркала. Обычно они применяются в мощных волоконных лазерах, где используются активные волокна с большим внешним диаметром (более 300 мкм). В этом случае использование обычных волоконных технологий соединения с другими волоконными компонентами затруднено.

Особенностью волоконных лазеров является расходимость излучения на выходе активного волокна и его небольшие поперечные размеры. Поэтому, для согласования волокна с отражателем используются линзы, коллиматоры и другие оптические элементы. Использование объемных оптических элементов требует их тщательной юстировки, жесткой фиксации, обеспечения специальных внешних условий. То есть, такой волоконный лазер обладает типичными недостатками твердотельного лазера. На рис. 5 представлена упрощенная оптическая схема волоконного лазера с выносными оптическими элементами[13,14].

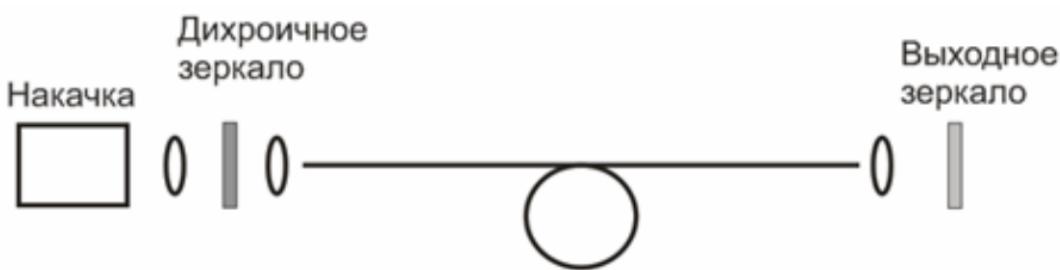


Рис.5 Схема лазера с резонатором Фабри-Перо на объемных элементах.

Полностью волоконное исполнение лазера возможно с использованием в качестве отражателей ответвителей и брэгговских решеток. Принцип действия таких устройств состоит в том, что для двух оптических волокон может быть сформирован участок связи, обеспечивающий обмен энергиями между волокнами. В сплавных ответвителях контакт волокон осуществляется их сплавлением при нагреве и последующим механическим вытягиванием. На рис. 6 схематически показан участок оптического контакта для биконического ответвителя.

Излучение, введенное во входное волокно, распространяется в виде направляемой моды сердцевины волокна. При вытягивании волокна его диаметр

уменьшается так, что излучение распространяется по оболочке волокна за счет полного внутреннего отражения на границе с воздухом. Два волокна, находящихся в оптическом контакте, могут обмениваться энергией, если обладают достаточно длинным участком связи[15,16,17].

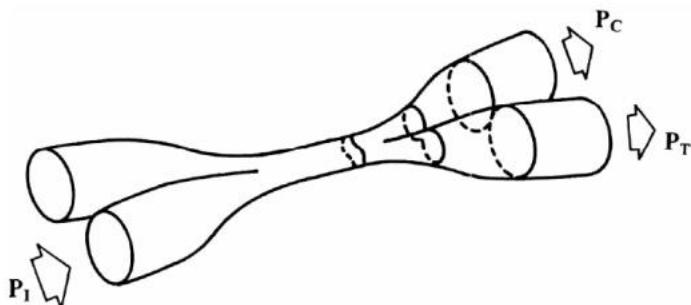


Рис. 6 Схема сплавного биконического ответвителя.

В общем случае под фотоиндуцированной внутри волоконной брэгговской решеткой показателя преломления следует понимать отрезок волоконного волокна с модуляцией показателя преломления в световедущей области на уровне  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  с периодом порядка длины волны распространяющегося излучения.

Основными характеристиками решетки являются период модуляции показателя преломления  $\Lambda$ , величина наведенного изменения показателя преломления  $\delta n$ , число штрихов  $N$  или длина решетки  $L$ . Две моды взаимодействуют на решетке с периодом  $\Lambda$ , если их постоянные распространения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  удовлетворяют условию фазового синхронизма:

$$\beta_1 - \beta_2 = 2\pi l / \Lambda \quad (7)$$

где  $l$  – целое число, характеризующее порядок решетки, в котором реализуется межмодовое взаимодействие. Связь основной моды с модой, имеющей противоположное направление распространения, возникает на определенной длине волны  $\lambda_{Br}$ , задаваемой соотношением:

$$2n_{eff}^{core} \Lambda = \lambda_{Br} \quad (8)$$

где  $n_{eff}^{core}$  — эффективный показатель преломления основной моды волокна,  $\Lambda$  – период решетки, составляющий менее 1 мкм для решеток, отражающих в ближнем ИК-диапазоне. В результате, на длине волны  $\lambda_{Br}$  возникает отражение. Параметры решеток (спектральная ширина, коэффициент отражения) могут варьироваться в широких пределах в зависимости от условий записи и фоточувствительности волокна. Коэффициент отражения  $R$  однородной брэгговской решетки длины  $L$  определяется следующим выражением:

$$R = th^2(kL) \quad (9)$$

где  $k = \pi \eta \delta n / \lambda_{Br}$  — коэффициент связи, в котором  $\eta$  — доля мощности излучения, распространяющегося по области, в которой наведен показатель преломления. Спектральная ширина резонанса на полувысоте может быть выражена следующим соотношением:

$$\Delta\lambda = \lambda\alpha\sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (10)$$

где  $N$  — количество штрихов в решетке,  $\alpha$  — параметр приблизительно равный единице для глубоких решеток ( $R \sim 1$ ) и ( $R \sim 0.5$ ) для решеток небольшой глубины. Период брэгговской решетки составляет менее 1 мкм для отражения вблизи ИК-области спектра, поэтому ее запись производится в интерференционной картине УФ-излучения[8].

### Экспериментальное изучение физические характеристики волоконных лазеров.

Как уже было отмечено, период брэгговской решетки составляет менее 1 мкм для отражения вблизи ИК-области спектра, поэтому ее запись производится в интерференционной картине УФ-излучения.

Поскольку накачка вводится через отдельное волокно, решетки записывались на обычном телекоммуникационном волокне. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 7.

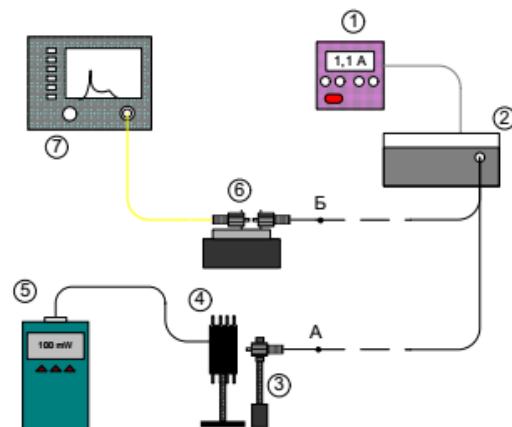


Рис.7. Блок схема экспериментальной установки. 1-Блок питания лазера, 2- иттербийовый волоконный лазер «Итларь-1080», 3-держатель волокна, 4-приемник измерителя мощности, 5- измеритель мощности, 6- измеритель мощности, 6-поворотный столик с разъемами для волоконных кабелей, 7-оптический спектр-анализатор.

Основной частью экспериментальной установки является исследуемый волоконный лазер «Итларь-1080» (2). Активной средой для лазерной генерации является иттербийовое GTWave волокно, резонатор замыкается двумя волоконными брэгговскими решетками. Период решеток соответствовал максимальному отражению на длине волны 1080 нм. Накачка активного волокна производится с помощью полупроводникового лазера на длине волны 936 нм.

В ходе данной работы исследуются основные характеристики оптического излучения лазера: мощность, спектр и поперечное модовое распределение интенсивности. Измерение мощности производится измерителем мощности (4, 5). Для этого необходимо закрепить выходной оптический кабель лазера в

держателе (3) и совместить торец кабеля с центром приемной части. Показания значения мощности регистрируются с помощью блока (5).

Для измерения спектра выходного излучения применяется оптический спектр-анализатор (7). Для введения излучения лазера необходимо совместить торец волоконного кабеля, идущего на вход оптического спектр-анализатора с выходным торцом иттербийевого волоконного лазера (2) «Итларь-1080».

Анализ поперечного модового распределения интенсивности лазерной генерации осуществляется посредством(6) поворотного столика (рис.8). При этом мощность оценивается для максимума в спектре лазерной генерации, регистрируемого с помощью спектр-анализатора.

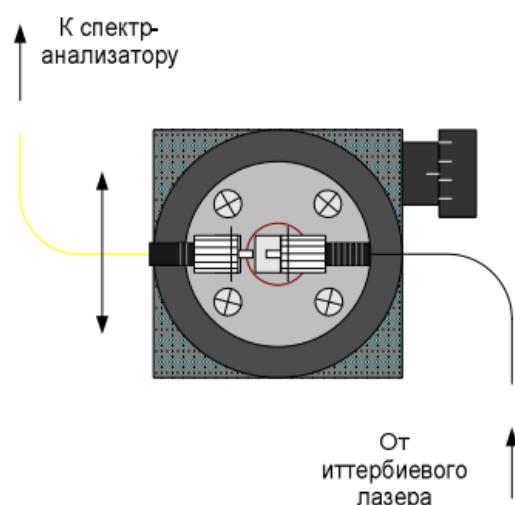


Рис. 8 Схема расположения торцов оптических кабелей лазера и приемной части на поворотном столике.

**Для определение порога генерации волоконного лазера** при выключенном блоке питания лазера установят оптический кабель лазера в положение «А» на штатив 3 перед приемной частью 4 измерителя мощности 5. Включив блок питания лазера выставляют нулевое значение тока (установить регулировку по току). С шагом 0.05 А провести измерение мощности выходного излучения лазера.

По окончанию измерений ток вывести на нулевое значение, выключить блок питания. Повторите измерение три раза. Найдите среднее значение выходной мощности для каждого значения тока инжекции лазерного диода накачки. Вычислите полную погрешность. Постройте график зависимости выходной мощности излучения лазера от тока лазерного диода накачки. По построенной кривой определить порог генерации волоконного лазера.

**Для исследования спектральных характеристик лазера** привыключенном блоке питания лазера установят оптический кабель лазера в положение «Б» на поворотный столик 6. Поворотной ручкой столика добейтесь, чтобы торцы волокон были установлены напротив друг друга (рис. 7).

Включая спектр-анализатор выставите центральную длину волн измерений в соответствии с брэгговскими решетками лазера. Установить интервал измерений шагом расстояния (SPAN) около 2 нм. Включит блок питания лазера и установит значение тока, соответствующее выходной

мощности 20 мВт.

Провести измерение спектра выходного излучения лазера при различном разрешении спектро-анализатора. С помощью курсоров измерить ширину спектра выходного излучения. Полученные данные занести в таблицу. По окончании измерений установите нулевое значение тока и выключите блок питания. Повторите измерение три раза. Найти среднее значение ширины спектра. Вычислите полную погрешность.

**Исследованиеоперечногораспределенияинтенсивности излучения волоконного лазера.** Для работы над данным упражнением необходимо сохранить предыдущие установки. Выставить разрешение спектр-анализатора на 1 нм (Спектр-анализатор нужно перевести в режим измерения непосредственно мощности в мВт (Такое распределение более показательно нежели в дБ)).

Включить блок питания лазера выставить значение тока как в предыдущей части опыта. Вращая рукоятку поворотного столика определить по пику на спектре оптимальное положение столика (соответствующее максимальной пиковой мощности).

От оптимального положения произвести измерения мощности излучения по и против часовой стрелки с равным шагом (рекомендованный шаг 4 малых деления). Полученные данные зафиксировать в таблице (по часовой стрелки – отрицательные шаги, против - положительные). Значения мощности определяются с помощью горизонтальных курсоров спектр-анализатора. Повторите измерение три раза. Найдите среднее значение мощности излучения. Вычислите полную погрешность.

Построить график зависимости интенсивности лазерного излучения от шага. Сделать выводы о модовом составе лазера.

### **Заключение**

На основе выше изученных можно сказать, что для развития творческих способностей студентов необходимо ознакомиться принципами работы лазеров, поскольку в нашей стране производство высокотехнологичной продукции на основе современных технологий лазеров является актуальной задачей, для достижения этих целей молодому поколению необходима изучить и проводить самостоятельно лабораторные работы, подобные по указанной теме.

### **Литература**

1. Звелто О. Принципы лазеров, 4-ое изд. - Санкт-Петербург: Лань, 2008. - 720 с.
2. Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. – М.: Техносфера, 2008. - 440 с.
3. Левин А. Квантовый светоч: История одного из самых важных изобретений XX века – лазера, Популярная механика, 2006, № 44.
4. Paschotta R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. - Berlin : Wiley-VCH, 2008. - 844 p.
5. Википедия [Электронный ресурс] Веб-сайт: [http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)
6. LaserFest Веб-сайт: <http://www.laserfest.org/lasers/history/timeline.cfm>

7. AlferovZh. I. The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology (Nobel Lecture), Reviews of modern physics.2001, v.73, 767-782.
8. Ghafouri-Shiraz H. Distributed Feedback Laser Diodes and Optical Tunable Filters.– Wiley, 2003. – 342 p.
9. М. Янг. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы. Москва. Мир. 2005. 541 с.
10. А. С. Курков, Е. М. Дианов. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. Квантовая Электроника, 34, 881 (2004).
11. С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, Е.М. Дианов. Волоконные решетки показателя преломления и их применения. Квантовая Электроника, 35, 1085 (2005).
12. Курков А.С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. –Ульяновск: УлГУ. 2012. – 184 с.
13. X.Qo`chqarov, M. Sharipova, E.Vazirova. Lazer nurlarini fazoviy kogorentligini aniqlovchi laboratori qurilmalarini yaratish va o`lchash usullari. Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi. 2022 yil, 3-son, b.29-38.
14. A.Karimov, A.Xolmirzayev, X.Qo`chqarov, N.Mavlonova, M.Qurbanov. “Lazerlargaoidmavzularnikompyutertexnologiyalariyordamidao’rganishningzarurativ aafzalliklari”. Respublika ilmiy-uslubiy anjuman. Namangan. 2020 yil 24-25-dekabr.
15. M.S.Qurbanov, X.O.Qo`chqorov, I.O.Zoxidov. “Yarimo’tkazgichli lazerlarda invers bandlik hosil qilish usullari”. Respublika online ilmiy anjuman. Namangan. 2021-yil 29-31-may.
16. N.N.Zoidov, X.O.Qo`chqorov, A.A.Xalmirzayev, M.Q.Muxsinova. Iqtidorli o’quvchi-talabalarni texnik fikrlash qobiliyatlarini lazerlar texnologiyasi misolida rivollantirish usullari. “Yarimo’tkazgichlar fizikasi, zamonaviy elektronika va energetikani fundamental va amaliy muammolari” mavzusiga bag’ishlangan Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari. 3-qism, 50-54 b. Namangan, Namangan muhandislik qurilish institute. 2024 y. 18-19 sentabr.
17. А.М.Каримов, А.А.Халмирзаев, Х.О.Қўчқаров. Информацион технологияларни қўллаш усуллари асосида лазерлар моҳиятини ўрганишни йўлга қўйиш. Наманган давлат университети илмий ахборотномаси. 2020 й. Maxsus сон. 487-491бетлар.