

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ

Измерение параметров одномодового волоконного лазера

выполнила студентка 654а группы ФЭФМ

Карпова Татьяна

Содержание

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Цели работы | 2 |
| 2 | Оборудование, используемое в работе | 2 |
| 3 | Теоретические положения | 2 |
| 3.1 | Энергетические уровни иона Yb^{3+} в кварцевом стекле | 2 |
| 3.2 | Спектр усиления в световоде из активной среды, легированной ионами иттербия | 3 |
| 3.3 | Порог генерации | 4 |
| 3.4 | Конструкция волоконного лазера | 4 |
| 3.5 | Волоконная брэгговская решётка | 4 |
| 4 | Экспериментальная часть | 5 |
| 4.1 | Схема сборки волоконного лазера | 5 |
| 4.2 | Измерение характеристик диода накачки | 5 |
| 4.3 | Измерение характеристик изготовленного волоконного лазера | 6 |
| 4.4 | Определение уровня шума в волоконном лазере | 6 |
| 4.5 | Спектральная характеристика диода накачки | 7 |
| 4.6 | Спектральная характеристика волоконного лазера | 8 |
| 5 | Расчёты параметров активной среды | 10 |
| 5.1 | Коэффициент усиления в активном световоде | 10 |
| 5.2 | Коэффициент поглощения излучения накачки в активном световоде | 10 |
| 5.3 | Концентрация активных ионов | 11 |
| 5.4 | Коэффициент инверсии населённостей | 11 |
| 5.5 | Пороговая мощность генерации лазера | 11 |
| 5.6 | Число продольных мод резонатора | 11 |
| 5.7 | Изменение температуры брэгговской решётки | 12 |
| 6 | Вывод | 13 |

1 Цели работы

1. Изготовление волоконного лазера на базе волокна «двойка» с активной средой, легированной ионами Yb^{3+} , накачиваемой полупроводниковым диодом
2. Измерение ватт-амперной характеристики диода накачки и его спектра
3. Исследование следующих параметров изготовленного лазера:
 - непоглощённая мощность накачки
 - мощность излучения
 - ватт-ваттная характеристика
 - центральная длина волны
 - ширина спектра излучения
4. Определение по полученным данным параметров активной среды:
 - коэффициент усиления активной среды за один проход
 - коэффициент поглощения излучения накачки
 - концентрация активных ионов
 - коэффициент инверсии
 - порог лазерной генерации
5. Оценка эффективности преобразования излучения

2 Оборудование, используемое в работе

- Волокно DF “двойка” (включая активное волокно, легированное ионами Yb^{3+})
- Волокно SM (Single mode – одномодовое)
- Волокно MM (Multimode – многомодовое)
- Лазерный диод на гетероструктуре InGaAs/GaAs (длина волны генерации 964 nm)
- Фотодиод
- Осциллограф
- Спектроанализатор Anritsu MS9710C

3 Теоретические положения

3.1 Энергетические уровни иона Yb^{3+} в кварцевом стекле

Для создания мощных волоконных лазеров используется активная среда из кварцевого стекла, легированного ионами редкоземельных металлов (иттербия, эрбия, тулия, неодима). В работе исследуется активная среда, легированная ионами иттербия Yb^{3+} . Электронная структура атома иттербия Yb состоит из 13 заполненных оболочек и содержит 70 электронов (электронная конфигурация $4f^{14}6s^2$), при этом $4f$ -электроны связаны с ядром сильнее, чем $5d$ -электроны. Электронная конфигурация $4f^{13}$ свободного иона имеет только 2 уровня (термы $^2F_{5/2}$ и $^2F_{7/2}$ в приближении связи Рассела-Саундерса). Кратность вырождения этих уровней вычисляется как $2J+1$ (J – полный момент терма) и равна 6 и 8 соответственно. При этом внутреннее электрическое поле плавленого кварца снимает вырождение не полностью и уровни остаются двукратно вырожденными, разделяясь только на 3 и 4 компоненты соответственно. Согласно схеме энергетических уровней иона Yb^{3+} , помещённого в матрицу плавленого кварца (рис. 1), лазерная генерация может быть осуществлена по трёх- и четырёхуровневой системе.

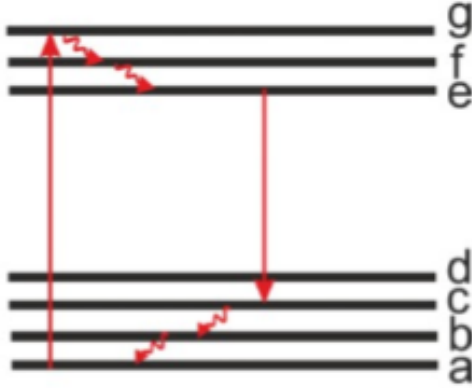


Рис. 1: Расщепление энергетических уровней иона Yb^{3+} в матрице плавленого кварца

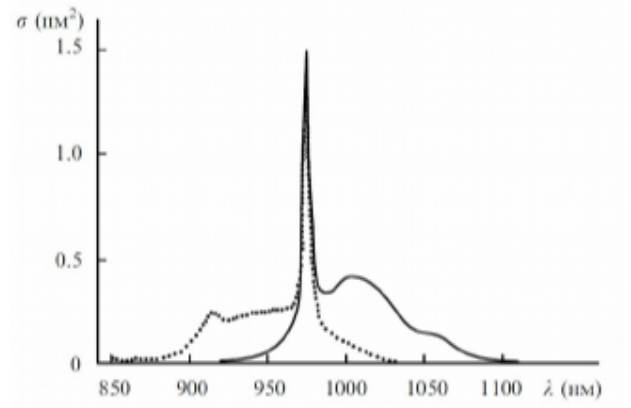


Рис. 2: Сечения поглощения (пунктирная линия) и люминесценции (сплошная линия) Yb^{3+} в фосфатном стекле

3.2 Спектр усиления в световоде из активной среды, легированной ионами иттербия

Вероятности индуцированного излучения $W_e = \sigma_e F$ и поглощения $W_a = \sigma_a F$ пропорциональны потоку фотонов $F = I/h\nu$ (I – интенсивность излучения). Коэффициенты пропорциональности называются сечениями переходов (σ_e – сечение люминесценции, σ_a – сечение поглощения). Спектр сечений поглощения и излучения ионов Yb^{3+} в фосфатном стекле приведён на рис. 2.

Рассчитаем мощность излучения лазера, реализованного по четырёхуровневой системе. Изменение мощности лазерного излучения в единице объёма сердцевинки определяется разницей между излучаемой ($N_2 W_e h\nu$) и поглощаемой ($N_1 W_a h\nu$) в этом объёме среды мощностью:

$$\frac{dP}{dV} = (N_2 W_e - N_1 W_a) h\nu, \quad (1)$$

где N_2 – объёмная концентрация ионов Yb^{3+} , находящихся в возбуждённом состоянии ($^2F_{5/2}$), N_1 – объёмная концентрация ионов, находящихся в основном состоянии на уровне $^2F_{7/2}$, $dV = Sdz$ – объём участка сердцевинки поперечного сечения S длины dz . Формула (1) с учётом соотношений для вероятностей для индуцированного излучения и поглощения может быть переписана в виде

$$\frac{dP}{dz} = g(N_2 \sigma_e - N_1 \sigma_a) P, \quad (2)$$

где g – коэффициент перекрытия моды сигнального излучения с сердцевинкой. Обозначим $k = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{N_2}{N}$ коэффициент инверсии среды и перепишем выражение (2) в виде

$$\frac{dP}{dz} = gN(k\sigma_e - (1-k)\sigma_a)P \quad (3)$$

Проинтегрировав это выражение, получим

$$P_z = P_0 \exp(gN(k\sigma_e - (1-k)\sigma_a)z), \quad (4)$$

где k_m – усреднённая по интегрируемой длине инверсия населённостей, P_0 – мощность накачки.

Данная форма не учитывает излучение люминесценции, эффект кросс-релаксации, оптические потери в резонаторе, перепоглощение генерируемого излучения и другие эффекты. Для излучения накачки с $\lambda = 960 - 970$ нм, как правило, выполняется условие $k_m \sigma_e \ll (1 - k_m) \sigma_a$, поэтому формула (4) принимает вид закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$P_z = P_0 \exp(-gN\sigma_a z) \quad (5)$$

Значение коэффициента усиления лазерной среды за один проход (L – длина активной среды):

$$K = \frac{P_L}{P_0} = \exp(gN(k_m \sigma_e - (1 - k_m) \sigma_a) L) \quad (6)$$

3.3 Порог генерации

Пороговая мощность накачки P_{th} – поглощённая мощность накачки, необходимая для достижения начала генерации лазера. Для активного световода длиной z , имеющего сердцевину площадью S , количество переходов из возбуждённого состояния в основное в единицу времени равно $kNSz/\tau$, где τ – время жизни возбуждённого уровня. Количество вынужденных переходов из основного состояния в возбуждённое равно $P/h\nu$, где P – мощность поглощённой накачки. Следовательно,

$$P_{th} = kNSzh\nu/\tau \quad (7)$$

3.4 Конструкция волоконного лазера

Основными элементами непрерывного одномодового волоконного лазера являются:

- активное оптическое волокно, легированное ионами редкоземельных металлов
- волоконные брэгговские решётки, обеспечивающие отражение на селективной длине волны
- диоды накачки для создания инверсии населённостей в активной среде



Рис. 3: Упрощённая схема волоконного лазера



Рис. 4: Схема ввода оптической накачки в двойном волокне

В лабораторной работе используется многомодовый полупроводниковый диодный лазер накачки с длиной волны излучения около 960 нм. Излучение накачки преобразуется в волоконном лазере в одномодовое излучение с длиной волны генерации около 1070 нм.

Наиболее эффективная схема ввода накачки обеспечивается в волокне-двойке (рис. 5), где два кварцевых волокна (активное одномодовое и пассивное многомодовое) находятся в оптическом контакте между собой и имеют общую волноведущую полимерную оболочку. Многомодовое излучение накачки от полупроводникового диода заводится через многомодовую оболочку двойного волокна, после чего распространяется по обоим кварцевым оболочкам, поглощаясь в активной сердцевине.

3.5 Волоконная брэгговская решётка

Волоконная брэгговская решётка (ВБР) – это участок одномодового волоконного световода с периодической модуляцией показателя преломления световедущей жилы вдоль оси световода. Принцип действия ВБР основан на явлении дифракции электромагнитной волны на периодической структуре. Для интерференционного усиления должно выполняться условие Брэгга-Вульфа:

$$2n\Lambda \sin \theta = m\lambda_B, \quad (8)$$

где n – показатель преломления среды, Λ – период решётки, $m = 1, 2, \dots$, λ_B – длина волны излучения. При нормальном падении $\theta = \pi/2$, тогда

$$\lambda_B = 2\Lambda n/m \quad (9)$$

Различают глухие волоконные решётки (с высоким коэффициентом отражения) и полупрозрачные (с низким коэффициентом отражения). Выход лазерного излучения из активной среды происходит со стороны полупрозрачной решётки.

4 Экспериментальная часть

4.1 Схема сборки волоконного лазера

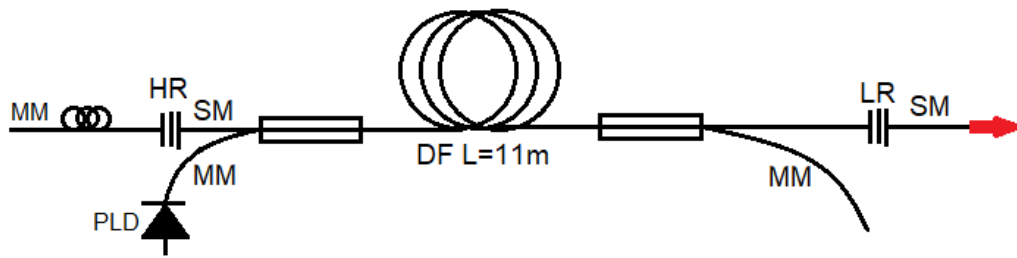


Рис. 5: Схема сборки волоконного лазера

Схема сборки волоконного лазера, исследуемого в лабораторной работе, приведена на рис. 5. Излучение лазерного диода накачки (PLD) заводится в многомодовое волокно (MM); участок этого волокна приваривается к многомодовому волокну «двойки» (DF), имеющему длину 11 м. Одномодовое волокно «двойки» приваривается к участкам одномодового волокна, на концах которых расположены глухая (HR) и полупрозрачная (LR) волоконные брэгговские решётки, образующие резонатор. К концу одномодового волокна со стороны глухой решётки приварен участок многомодового волокна, собранного в кольца для высвечивания остаточного излучения. Для защиты мест сварки использовались стеклянные трубки, заливаемые волноводящим полимером; для приваривания ВБР использовалась термоусадка. Перед сваркой с волокна механически удалялась полимерная оболочка, производилась очистка волокна этиловым спиртом.

4.2 Измерение характеристик диода накачки

Для разных токов и напряжений питания диода накачки с помощью измерителя мощности и мультиметра была измерена мощность излучения диода накачки. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1: Ватт-амперная характеристика диода накачки (стабилизация по току)

| | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| I , A | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 |
| U , V | 4 | 4.06 | 4.12 | 4.17 | 4.22 | 4.26 | 4.31 | 4.36 | 4.40 | 4.45 |
| P_{pump} , W | 0.051 | 1.37 | 2.78 | 4.26 | 5.62 | 7.02 | 8.41 | 9.78 | 11.18 | 12.51 |

По данным таблицы 1 построен график зависимости мощности излучения диода накачки от тока накачки (рис. 6) и от мощности тока накачки (рис. 7)

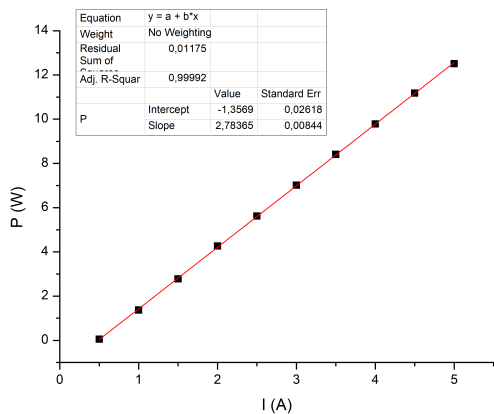


Рис. 6: Зависимость оптической мощности накачки от тока лазерного диода

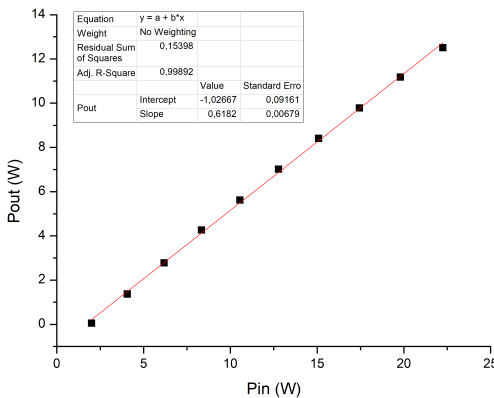


Рис. 7: Зависимость оптической мощности накачки от мощности тока лазерного диода

По наклону графика ватт-ваттной характеристики полупроводникового диода накачки (рис. 7) можно определить его КПД; точка пересечения аппроксимирующей прямой определяет пороговую мощность диода:

$$\eta_{diode} = 61.8 \pm 0.7\% \quad P_{th_d} = 1.8W$$

4.3 Измерение характеристик изготовленного волоконного лазера

Для разных токов и напряжений питания диода накачки с помощью измерителя мощности и мультиметра была измерена мощность излучения изготовленного волоконного лазера. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2: Ватт-амперная характеристика изготовленного волоконного лазера

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|---|
| I, A | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| P_{las}, W | 0.228 | 0.7 | 1.15 | 1.7 | 2.27 | 2.79 | 3.37 | 3.9 | 4.41 | 5.26 | 6.22 | 7 |

По данным таблиц 1 и 2 построены графики зависимости мощности излучения волоконного лазера от оптической мощности накачки (рис. 8)

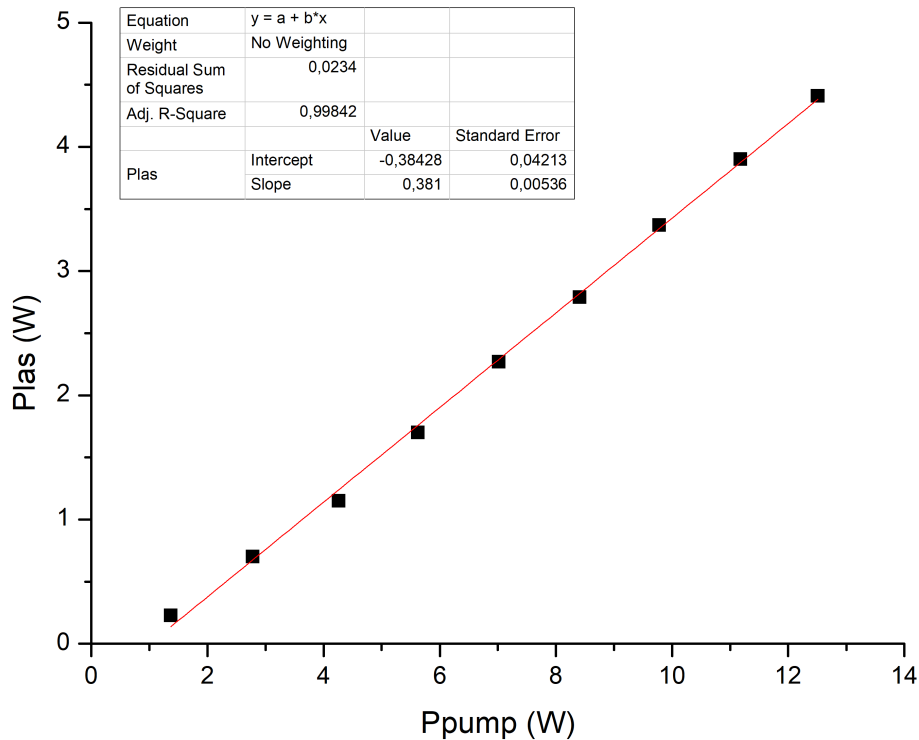


Рис. 8: Ватт-ваттная характеристика изготовленного волоконного лазера

По наклону графиков ватт-ваттных характеристик можно определить КПД изготовленного волоконного лазера от диода накачки и «от розетки»:

$$\eta_{laser} = 38.4 \pm 0.8\% \quad \eta_{full} = 23.4 \pm 0.3\%$$

Также по рис. 8 была определена пороговая мощность волоконного лазера:

$$P_{th_l} = 1W$$

4.4 Определение уровня шума в волоконном лазере

При помощи фотодатчика и осциллографа исследовалось излучение волоконного лазера для определения уровня шума при различных токах накачки. Результаты измерений зависимости отношения шума и полезного сигнала от силы тока диода накачки приведены в таблице 3. В таблице приведены значения величины отношения сигнал-шум ($SNR = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$) для разных токов накачки. Чем больше это отношение, тем меньше шум влияет на характеристики системы.

Видно, что соотношение сигнал-шум резко увеличивается с ростом тока накачки. Вблизи пороговой мощности шум и полезный сигнал сравнимы по величине. Также с помощью осциллографа была оценена частота шумовых колебаний ($f_{noise} = 100 \text{ kHz}$), она остаётся практически постоянной при изменении тока накачки.

Таблица 3: Определение зашумлённости лазера

| | | | | |
|-----------------|------|-------|-------|-------|
| I , А | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |
| Сигнал, отн.ед. | 3.5 | 5.5 | 4.5 | 7 |
| Шум, отн.ед. | 3 | 0.5 | 0.4 | 0.3 |
| SNR | 1.16 | 11 | 11.25 | 23.33 |
| SNR (dB) | 0.64 | 10.41 | 10.51 | 13.67 |

4.5 Спектральная характеристика диода накачки

С помощью спектроанализатора были сняты спектральные характеристики полупроводникового диода накачки при разных значениях тока накачки. Графики спектральных характеристик приведены на рис. 9-13. По спектральным характеристикам при разных токах накачки были определены центральные длины волн λ и ширины спектров ($\Delta\lambda$), полученные значения занесены в таблицу 4.

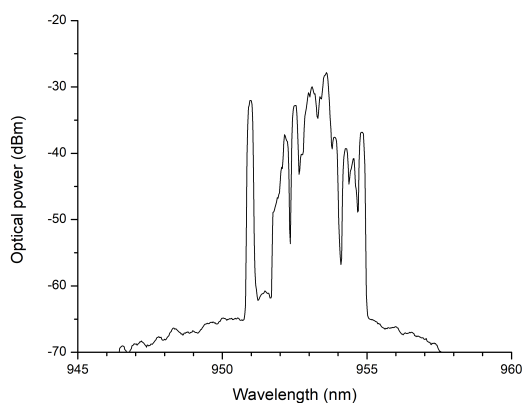


Рис. 9: Спектральная характеристика диода накачки при токе накачки 1 А

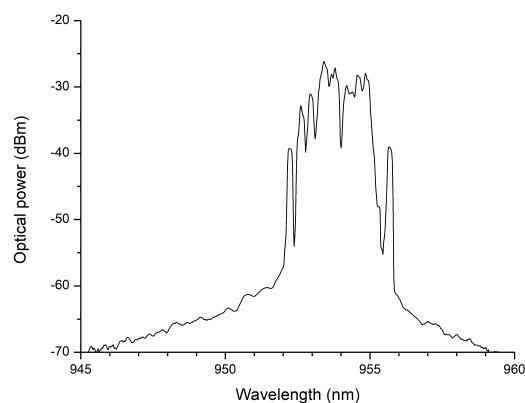


Рис. 10: Спектральная характеристика диода накачки при токе накачки 1 А

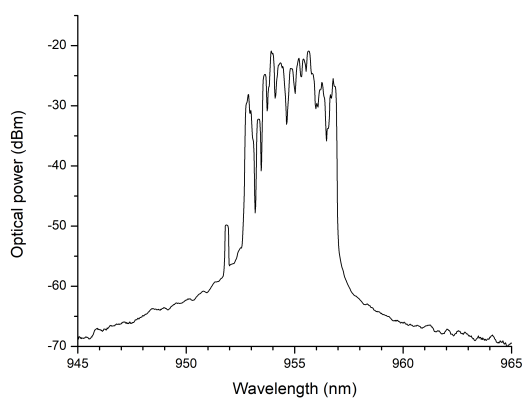


Рис. 11: Спектральная характеристика диода накачки при токе накачки 3 А

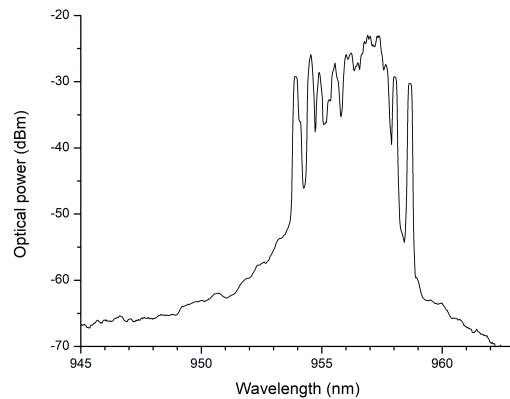


Рис. 12: Спектральная характеристика диода накачки при токе накачки 4 А

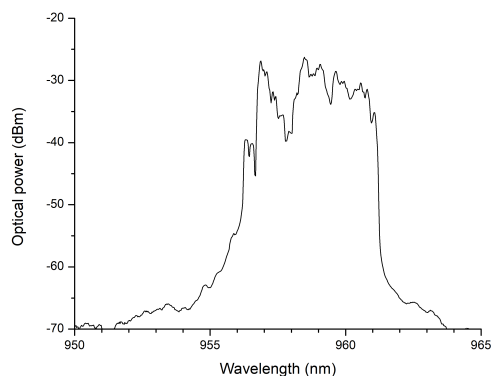


Рис. 13: Спектральная характеристика диода накачки при токе накачки 5 А

Таблица 4: Зависимость параметров спектра диода накачки от тока накачки

| | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I , А | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| λ , nm | 953 | 954 | 955 | 956 | 958 |
| $\Delta\lambda$, nm | 4 | 3.6 | 5 | 5.5 | 5 |

При увеличении тока накачки спектр смещается в длинноволновую область. Это обусловлено нагревом диода, приводящим к уменьшению ширины запрещенной зоны и, следовательно, к увеличению длины волны излучения рекомбинации. Также вследствие нагрева наблюдается уширение спектра лазерного диода.

4.6 Спектральная характеристика волоконного лазера

С помощью спектроанализатора были сняты спектральные характеристики изготовленного волоконного лазера при разных значениях тока накачки. Графики спектральных характеристик приведены на рис. 14. По спектральным характеристикам при разных токах накачки были определены центральные длины волн λ и ширины спектров на полувысоте (FWHM), полученные значения занесены в таблицу 5

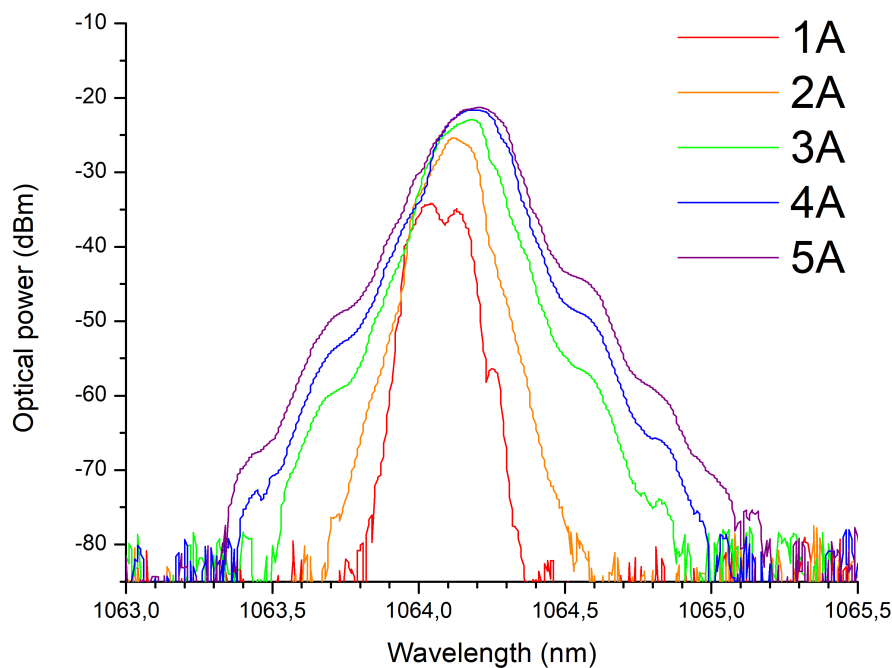


Рис. 14: Спектральные характеристики изготовленного лазера при различных токах накачки

Таблица 5: Зависимость параметров спектра лазера от тока накачки

| I , A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| λ , nm | 1064.07 | 1064.13 | 1064.17 | 1064.18 | 1064.20 |
| FWHM, nm | 0.19 | 0.13 | 0.17 | 0.19 | 0.22 |

На графиках, изображенных на рисунке 14, наблюдается увеличение ширины спектра генерации при увеличении тока накачки. Это объясняется эффектом пространственного «выжигания» инверсии продольными модами лазерного резонатора. Также наблюдается слабое увеличение длины волны центрального пика генерации с ростом тока накачки. Этот эффект может быть связан с разогревом брэгговских решеток.

5 Расчёты параметров активной среды

5.1 Коэффициент усиления в активном световоде

Пусть коэффициенты отражения глухой и полупрозрачной брэгговских решёток равны соответственно $R_1 = 0.99$ и $R_2 = 0.2$. Найдём коэффициент усиления K в активном световоде. Опишем изменение мощности излучения при его прохождении по лазерному резонатору:

1. Со стороны глухого зеркала в резонатор поступает излучение мощностью P_0
2. При прохождении от глухого зеркала до полупрозрачного мощность увеличивается в K раз, и у полупрозрачного зеркала становится равной KP_0
3. После отражения от полупрозрачного зеркала мощность становится равной R_2KP_0
4. При прохождении от полупрозрачного зеркала до глухого мощность вновь увеличивается в K раз, и у глухого зеркала становится равной $R_2K^2P_0$
5. После отражения от глухого зеркала мощность становится равной $R_1R_2K^2P_0$
6. В отсутствие потерь мощность после однократного прохода в резонаторе должна равняться входной мощности: $P_0 = R_1R_2K^2P_0$. Тогда для коэффициента усиления в активном световоде получаем формулу

$$K = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2}} \quad (10)$$

При $R_1 = 0.99$ и $R_2 = 0.2$

$$K = 2.25$$

Мощность выходного лазерного излучения будет равна $(1 - R_2)KP_0$. Для указанных значений K и R_2

$$P_{out} = 1.8P_0$$

5.2 Коэффициент поглощения излучения накачки в активном световоде

Для разных значений тока накачки с помощью измерителя мощности была определена величина мощности накачки, выходящей из многомодового волокна лазера; результаты измерений приведены в таблице 6.

Таблица 6: Зависимость выходящей мощности накачки от тока накачки

| I, A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{pump_{in}}, W$ | 1.37 | 4.26 | 7.02 | 9.78 | 12.51 |
| $P_{pump_{out}}, mW$ | 36 | 128 | 221 | 309 | 393 |
| $\alpha_{lightguide}, dB$ | 12.79 | 12.21 | 12.01 | 11.99 | 12.02 |

Коэффициент поглощения излучения накачки в активном световоде $\alpha_{lightguide}$ вычисляется по формуле

$$\alpha_{lightguide} = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (11)$$

В волокне-«двойке» излучение накачки делится поровну между одномодовым и многомодовым волокнами; на выходе остаточное излучение накачки также делится пополам. В таблице 6 приведены значения мощности, измеренные на выходе одного из волокон; следовательно, для вычисления коэффициента поглощения излучения накачки в активном световоде $\alpha_{lightguide}$ эти значения нужно умножить на 2. Вычисленные для каждого значения тока накачки $\alpha_{lightguide}$ также внесём в таблицу 6. Активное волокно изготовленного лазера имеет длину 11 м, среднее значение α можно получить в dB/m:

$$\alpha_{lightguide} = 1.11 \text{ dB/m}$$

Диаметр центральной жилы с активными ионами S_{core} равен $10\mu m$, диаметр кварцевой оболочки $S_{cladding}$ $125\mu m$. Отсюда коэффициент поглощения активной среды

$$\alpha_{medium} = \alpha_{lightguide} \frac{S_{cladding}}{S_{core}} = 346.9 \text{ dB/m}$$

5.3 Концентрация активных ионов

Согласно формуле (3),

$$\frac{P_z}{P_0} = \exp(-N\sigma_a z), z = L = 11m. \quad (12)$$

Но также по формуле (11)

$$\alpha_{medium} = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_L}{P_0}\right). \quad (13)$$

Тогда

$$\alpha_{medium} = \frac{10}{L} \log(\exp(-N\sigma_a L)) \quad (14)$$

Отсюда для концентрации активных ионов получаем формулу

$$N = -\frac{\alpha_{medium}}{10\sigma_a \log(e)} \quad (15)$$

Для длины волны диода накачки $\lambda = 965$ нм $\sigma_a = 0.25 \cdot 10^{-24}$ м². Окончательно концентрация активных ионов равна

$$N = 3.20 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$$

5.4 Коэффициент инверсии населённости

Для определения коэффициента инверсии воспользуемся формулой (6):

$$K = \frac{P_L}{P_0} = \exp(gN(k_m\sigma_e - (1 - k_m)\sigma_a)L) \quad (16)$$

Коэффициент усиления за один проход в активном световоде вычислен в пункте 5.1 и равен $K = 2.25$; $g \simeq 1$; концентрация активных ионов в среде вычислена в пункте 5.3 и равна $N = 3.20 \cdot 10^{26}$ м⁻³. Для длины волны излучения изготовленного лазера ($\lambda = 1064$ нм) сечение излучения ионов Yb⁺³ $\sigma_e = 1.46 \cdot 10^{-25}$ м², сечение поглощения $\sigma_a = 2.11 \cdot 10^{-27}$ м². Итоговая формула для вычисления коэффициента инверсии населённости

$$k = \frac{\ln K + gN\sigma_a L}{gNL(\sigma_e + \sigma_a)} = \frac{\ln K}{gNL(\sigma_e + \sigma_a)} + \frac{\sigma_a}{\sigma_e + \sigma_a} \quad (17)$$

С учётом указанных значений параметров активной среды получаем

$$k = 1.58 \cdot 10^{-2} = 1.58 \%$$

5.5 Пороговая мощность генерации лазера

Пороговую мощность генерации изготовленного лазера оценим по формуле (7)

$$P_{th_l} = \frac{kNSLh\nu}{\tau}, \quad (18)$$

где $\tau = 0.8$ мс – время жизни рабочего уровня, $S = 78.5 \mu\text{м}^2$ – площадь сердцевинки волокна. Тогда

$$P_{th_l} = 1.01 \text{ Вт}$$

Это значение хорошо совпадает с величиной пороговой мощности лазера, определённой в эксперименте ($P_{th} = 1$ Вт).

5.6 Число продольных мод резонатора

На длине резонатора L может укладываться целое число длин полуволн:

$$L = \frac{k\lambda}{2n} = \frac{kc}{2n\nu}, \quad (19)$$

где k – целое число, $n = 1.5$ – показатель преломления кварца, λ – длина волны излучения, c – скорость света в вакууме, ν – частота излучения. Тогда интервал частот между соседними модами составляет

$$\Delta\nu_0 = \frac{c}{2nL} \quad (20)$$

Связь частотного интервала и интервала длин волн:

$$\Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (21)$$

Итого в интервале длин волн $\Delta\lambda$ помещается N продольных мод резонатора:

$$N = 2nL \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (22)$$

Используя спектральную характеристику излучения лазера (рис. 14), оценим количество продольных мод в резонаторе. Ширина спектра лазера $FWHM = 0.19$ нм (на токе накачки 1 А). Тогда число продольных мод в резонаторе

$$N \approx 6270$$

5.7 Изменение температуры брэгговской решётки

По изменению центральной длины волны спектра лазера можно определить изменение температуры брэгговской решётки при её нагреве. Для получения расчётной формулы воспользуемся соотношением (9), определяющим условие дифракции Брэгга-Вульфа при нормальном падении волны на решётку:

$$\lambda_B = \frac{2\Lambda n}{m}, \quad (23)$$

где n – показатель преломления среды, Λ – период решётки, $m = 1, 2, \dots$, λ_B – длина волны излучения. При изменении показателя преломления на Δn длина волны, удовлетворяющая условию Брэгга-Вульфа, также изменится: при $m = 1$

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n \quad (24)$$

Зная закон изменения показателя преломления в зависимости от температуры (для исследуемой решётки $\frac{dn}{dT} = 10^{-5}$) и пренебрегая коэффициентом температурного расширения материала решётки ($\frac{d\Lambda}{dT} = 10^{-7}$), можно получить формулу для определения изменения температуры по изменению длины волны, удовлетворяющей условию Брэгга-Вульфа:

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda n}{\frac{dn}{dT} \lambda} \quad (25)$$

Спектральные характеристики ВБР при комнатной температуре и после нагревания представлены на рис. 15. Центральная длина волны спектра сдвинулась на $\Delta\lambda = 0.42$ нм. Тогда изменение температуры решётки равно:

$$\Delta T = 59 \text{ K}$$

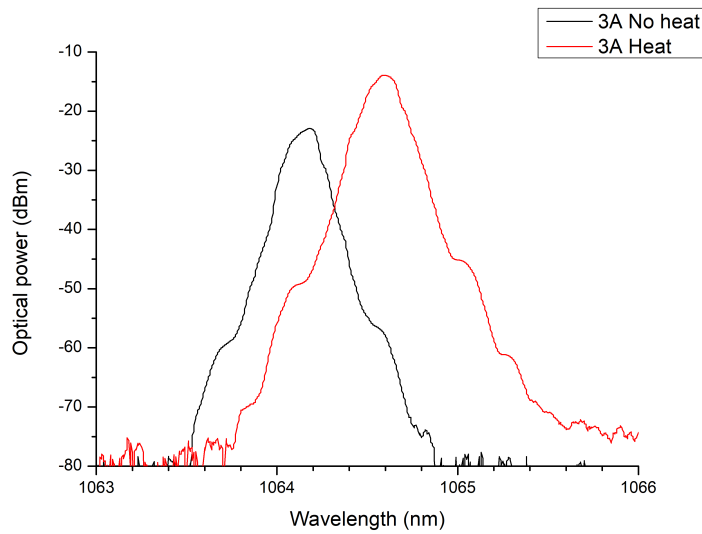


Рис. 15: Сравнение спектральных характеристик лазера при комнатной температуре и при нагреве (ток накачки 3 А)

6 Вывод

В ходе работы был изготовлен одномодовый волоконный лазер с активным волокном, легированным ионами иттербия Yb^{3+} , были следующие исследованы характеристики изготовленного лазера:

- КПД полупроводникового диода накачки $\eta_{diode} = 61.8 \pm 0.7\%$, пороговая мощность диода накачки $P_{th_d} = 1.8$ Вт
- КПД волоконного лазера (от диода накачки) $\eta_{laser} = 39.4 \pm 0.8\%$, КПД лазера «от розетки» $\eta_{full} = 24.4 \pm \%$, пороговая мощность волоконного лазера $P_{th_l} = 1$ Вт
- Центральная длина волны лазера $\lambda = 1064.15$ нм, ширина спектра 0.18 нм (среднее по разным токам накачки)
- Коэффициент усиления в активном световоде $K = 2.25$
- Коэффициент поглощения активной среды $\alpha_{medium} = 347$ dB/m
- Концентрация активных ионов $N = 3.20 \cdot 10^{26}$ м $^{-3}$
- Коэффициент инверсии населённостей $k = 1.58\%$
- Пороговая мощность генерации лазера (теоретическая оценка) $P_{th_l} = 1.01$ Вт
- Число продольных мод резонатора $N \approx 6270$