

Измерение характеристик волоконных брэгговских решеток с различным перекрытием сердцевины волокна, записанных фемтосекундным излучением

Котюшев Михаил Юрьевич

Физический факультет. Практикум по физической оптике. 4 семестр.

Группа №14305, 2016.

Научный руководитель:

А. А. Вольф, аспирант ИАиЭ СО РАН.

Аннотация

В данной работе было проведено исследование зависимости параметров волоконных брэгговских решеток, изготовленных различными методами, от внешних факторов, таких как температура и растяжение волокна. Так же исследовалась и сравнивалась устойчивость к высоким температурам ($T \sim 350^\circ$), долговременным высокотемпературным нагрузкам ($t \sim 20$ часов, T в пределах от 100° до 350°) и механическая прочность у различных типов решеток. Исследовались решетки с различными спектральными характеристиками и различным перекрытием сердцевины волокна, изготовленные с помощью фемтосекундной модификации показателя преломления.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, зависимость резонансной длины волны волоконных брэгговских решеток от температуры и растяжения волокна.

Работа выполнена в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН.

Аннотация

В данной работе было проведено исследование зависимости параметров волоконных брэгговских решеток, изготовленных различными методами, от внешних факторов, таких как температура и растяжение волокна. Так же исследовалась и сравнивалась устойчивость к высоким температурам ($T \sim 350^\circ$), долгосрочным высокотемпературным нагрузкам ($t \sim 20$ часов, T в пределах от 100° до 350°) и механическая прочность у различных типов решеток. Исследовались решетки с различными спектральными характеристиками и различным перекрытием сердцевины волокна, изготовленные с помощью фемтосекундной модификации показателя преломления.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, зависимость резонансной длины волны волоконных брэгговских решеток от температуры и растяжения волокна.

Работа выполнена в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН.

Оглавление

1	Введение	3
2	Теория	5
2.1	Введение в волоконную оптику	5
2.2	Теория волоконных брэгговских решеток	6
2.3	Создание волоконных брэгговских решеток и их применение в качестве датчиков физических величин	9
3	Эксперименты	12
3.1	Автоматизация получения и обработки данных	12
3.2	Температурное воздействие	13
3.3	Механическое воздействие	20
4	Заключение	25
5	Список литературы	26

1 Введение

Сенсоры на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) являются одним из важнейших приложений волоконной оптики ввиду своих уникальных свойств: малого размера, невосприимчивости к электромагнитным полям, химической инертности, устойчивости к высокой температуре и т. д. Стандартный метод создания ВБР основан на модификации показателя преломления сердцевины волокна ультра-фиолетовым (УФ) лазерным излучением. Такие решетки хорошо изучены и имеют ряд известных ограничений: низкий температурный порог деградации индуцированной модуляции показателя преломления, высокие требования к фоточувствительности, необходимость удаления защитного покрытия волокна перед записью решетки и т. д. Метод фемтосекундной (фс) записи ВБР, впервые продемонстрированный в 2004 г. [1], позволяет снять некоторые ограничения и снизить требования к волокну, однако имеет ряд недостатков, в частности относительно высокие потери интенсивности проходящего через ВБР излучения (5-20%). В 2013 г. был продемонстрирован метод записи со сканированием сердцевины волокна [2], который позволил значительно снизить потери (до 1%) за счет более эффективного перекрытия моды световода фс модификацией. Такой тип решеток еще не изучен в сенсорных приложениях, поэтому исследование его свойств является важной задачей, поскольку потенциально этот метод позволяет получить лучшие характеристики.

Данная работа посвящена сравнению характеристик решеток, записанных фс лазером различными методами: поточечным методом и методом сканирования сердцевины волокна. Была измерена чувствительность решеток к растяжению волокна и изменению температуры. Так же были проведены испытания на долговременные температурные воздействия и разрыв.

Для проведения экспериментов было написано несколько программных модулей, позволяющих автоматизировать процесс получения и обработки больших объемов данных, а также построение графиков.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что спектральные и прочностные характеристики ВБР, записанных фс лазером методом сканиро-

вания сердцевины волокна, не уступают характеристикам решеток, записанных фс и УФ лазером поточечно.

2 Теория

2.1 Введение в волоконную оптику

Оптические волноводы

Оптическое волокно — цилиндрический диэлектрический волновод, состоящий из сердцевины радиуса a и оболочки радиуса b (рис. 1). Сердцевина имеет показатель преломления n_1 , немного превышающий показатель преломления оболочки n_2 . Лучи, попадающие в сердцевину волокна под углами к оси меньше критического $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$, испытывают полное внутреннее отражение и движутся дальше по волноводу. Лучи, имеющие больший наклон, при отражении теряют часть мощности на прохождение в оболочку и в последствии быстро затухают. Ход лучей в оптическом световоде показан на рис. 1.

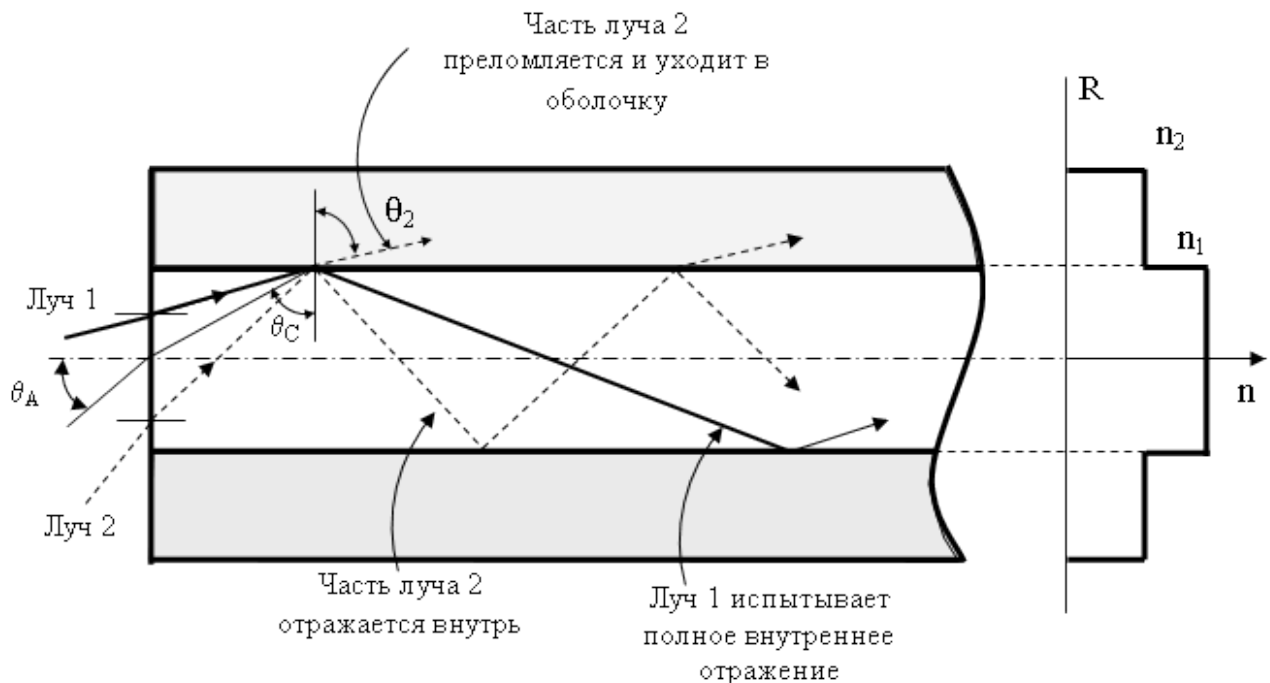


Рис. 1. Устройство оптического волокна и ход лучей в волокне

Сердцевина и оболочка оптического волокна часто изготавливаются из одного и того же материала, уменьшение или увеличение показателя преломления достигается путем легирования. Основным материалом для изготовления

является кварцевое стекло (SiO_2), легирующие материалы — германий, бор и др. [3]. Дробный показатель преломления Δ оптических волокон всегда мал:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1 \quad (1)$$

Типичные величины n_1 лежат в пределах от 1.44 до 1.46, Δ — от 0.001 до 0.02. Стандартное телекоммуникационное волокно SMF-28 имеет диаметр оболочки $2b = 125$ мкм и диаметр сердцевины $2a = 8.2$ мкм.

В зависимости от параметров оптические волокна делятся на одномодовые (обычно с малым диаметром сердцевины) — в них может существовать только одна мода волны, и многомодовые (с большим диаметром сердцевины) — в них может существовать одновременно несколько мод.

2.2 Теория волоконных брэгговских решеток

Основные понятия

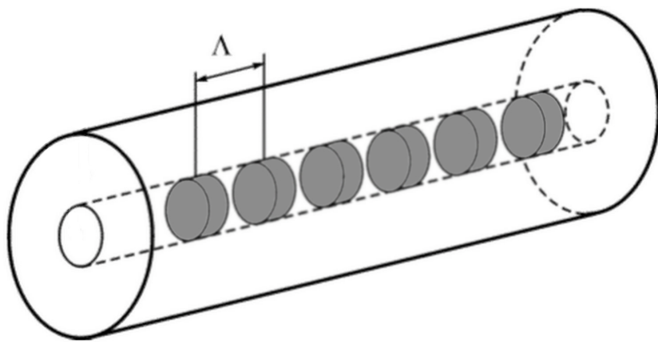


Рис. 2. Распределение показателя преломления по длине ВБР. Более темный цвет соответствует более высокому показателю преломления

Волоконная брэгговская решетка — объемная отражающая дифракционная решетка, сформированная в сердцевине оптического волокна вдоль направления распространения волны и имеющая узкий спектр отражения. ВБР формируется периодическим изменением показателя преломления сердцевины волокна вдоль длины решетки (рис. 2).

Условие Брэгга позволяет из параметров ВБР определить резонансную длину волны спектра отражения [4]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}^i \Lambda \quad (2)$$

где n_{eff}^i — эффективный показатель преломления i -ой моды волны (отношение

фазовой скорости моды в волокне к скорости света в вакууме), Λ – период ВБР.

Коэффициент отражения $R(\lambda)$ в приближении для однородной решетки длины L с гармонической модуляцией показателя преломления задается следующей формулой:

$$R(L, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (3)$$

где $\Omega = \pi\Delta n_{\text{mod}}\eta_B/\lambda_B$ – коэффициент связи, Δn_{mod} – амплитуда модуляции показателя преломления в первом порядке разложения формы штриха в ряд Фурье, η_B – доля мощности волны, распространяющаяся по сердцевине волокна радиуса (в большинстве случаев $\eta_B = 1$), $S = \sqrt{\Omega^2 + \Delta\beta^2}$, $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$ – отстройка волнового числа, $\beta = 2\pi n_0/\lambda$ – постоянная распространения.

График этой зависимости для решетки с параметрами $n = 1.4486$, $\Delta n = 1.5 \cdot 10^{-5}$, $\Lambda = 535$ нм, $L = 3$ мм представлен на рис. 3.

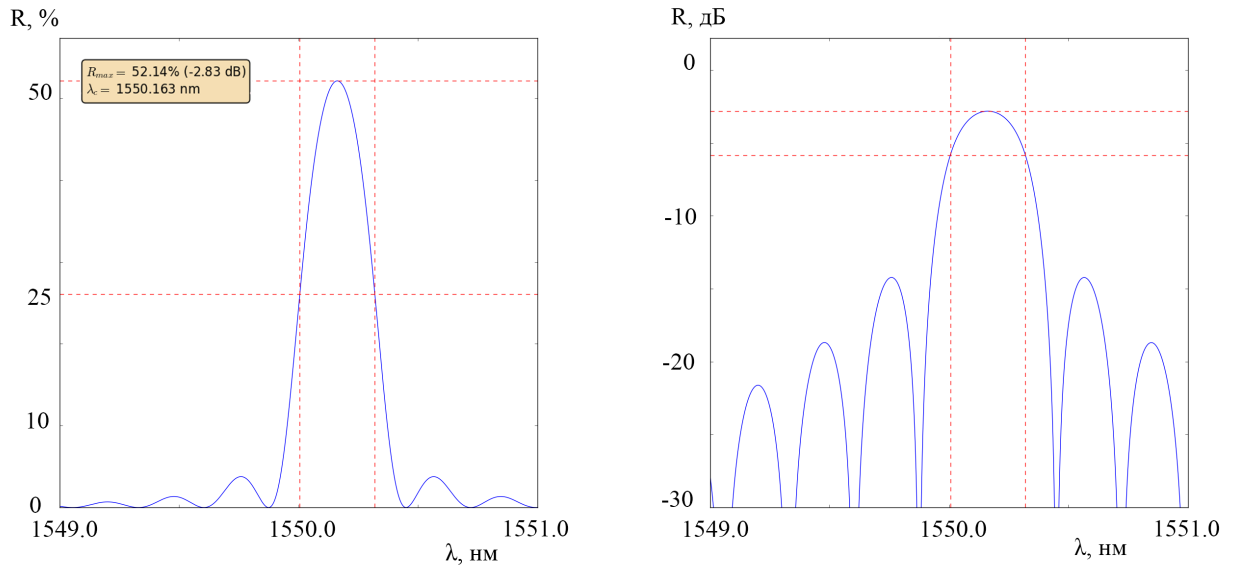


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения ВБР от длины волны вблизи резонанса в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабе

При $\lambda = \lambda_B$ — максимум резонанса ВБР ($\Delta\beta = 0$) — амплитуда максимума

зависит от параметров решетки следующим образом:

$$R(L, \lambda_B) = \tanh^2(\Omega L) \quad (4)$$

Величина сдвига резонансной длины волны при температурных и механических воздействиях описывается следующей формулой:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta L + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T \quad (5)$$

Основы теории прочности для оптического волокна

Статистическое распределение прочности для оптического волокна находится эмпирически и описывается статистической моделью Вейбулла [5]. Кумулятивная вероятность (вероятность того, что случайная величина не больше заданной) разрыва волокна в этой модели (рис. 4) определяется следующим распределением:

$$F(S, L) = 1 - P(S, L), \quad (6)$$

где S – инертная прочность (характеристика материала), L – длина волокна,

$$P(S, L) = e^{-L/L_0(S/S_0)^m} \quad (7)$$

– кумулятивная вероятность "выживания" волокна (англ. *cumulative survival probability*), m – модуль Вейбулла, L_0 – начальная длина волокна, S_0 – вейбулловская прочность.

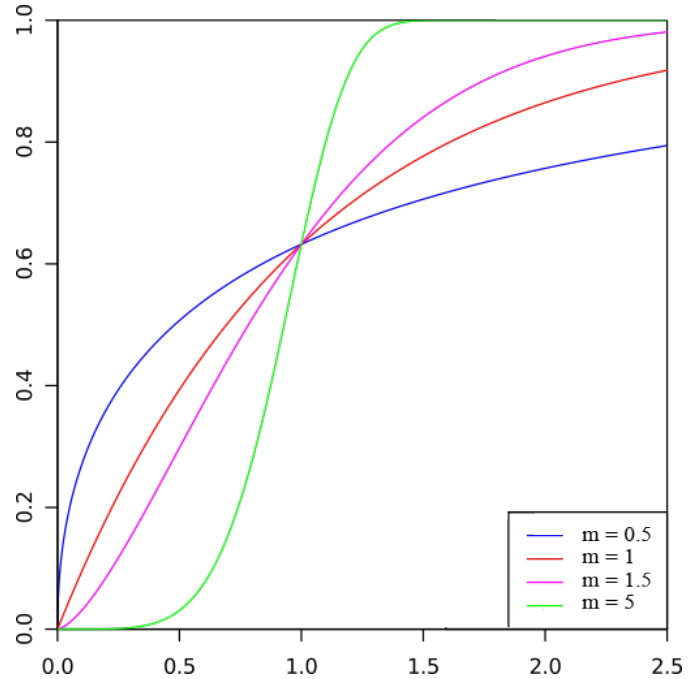


Рис. 4. Кумулятивная вероятность для различных параметров m

2.3 Создание волоконных брэгговских решеток и их применение в качестве датчиков физических величин

Методы изготовления волоконных брэгговских решеток

Существует несколько различных способов изготовления ВБР, дающих на выходе отличающиеся по своим характеристикам решетки. Методы изготовления фотоиндуцируемых ВБР классифицируют по используемому для записи типу лазерных излучателей (УФ и фс лазеры), по распределению показателя преломления в объеме сердцевины (метод поточечной записи и метод непрерывного сканирования волокна). Различия параметров ВБР, изготовленных различными способами, кратко описаны ниже.

По типу излучения, используемого для записи.

Решетки, записанные с помощью лазерного УФ-излучения, имеют ряд недостатков по сравнению с решетками, записанными фемтосекундным лазером. Во-первых, второй тип ВБР имеет более высокую температурную стабильность. Это обусловлено тем, что при фс записи материал испытывает более сильные структурные изменения.

Во вторых, для записи ультрафиолетом от материала требуется высокая фоточувствительность, не обязательная при записи фемтосекундным лазером. Поскольку ширина запрещенной зоны прозрачного материала (диэлектрика) превышает энергию фотона, поглощение лазерного излучения имеет нелинейный характер. Это возможно лишь при достижении пороговой интенсивности многофотонного поглощения $\sim 20 \text{ ТВт/см}^2$ [6]. Условие сильной фокусировки, а также нелинейная природа поглощения позволяют локализовать поглощение в фокальном объеме не разрушая поверхность материала. Таким образом, поглощение происходит вне зависимости от фоточувствительности. Это расширяет выбор видов волокна, используемых для изготовления ВБР.

При выполнении данной работы использовались преимущественно решетки, записанные фс лазером.

По распределению решетки в объеме сердцевины волокна.

Качественное изображение распределения показателя преломления по объ-

ему волокна представлено на рис. 5.

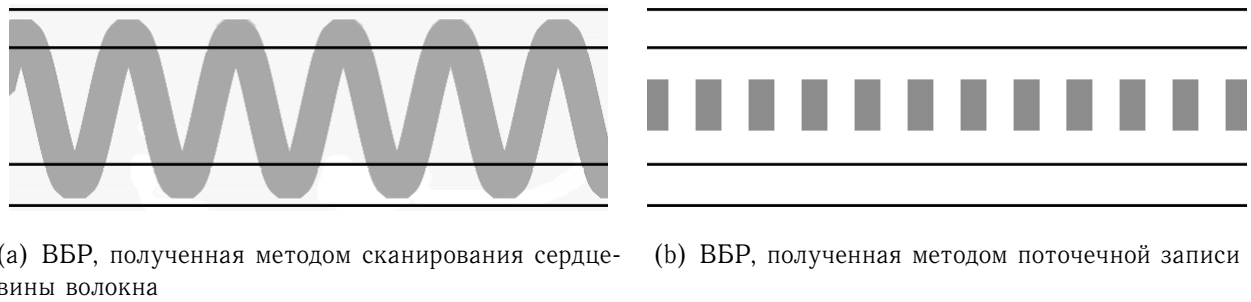


Рис. 5. Схематическое распределение показателя преломления в центре объема волокна для ВБР с различным перекрытием сердцевин (вид сверху)

Поточечный метод записи ВБР имеет существенный недостаток — относительно высокое рассеяние проходящего через ВБР излучения (5-20%). Это накладывает ограничения на количество решеток, записанных в одном волокне, что снижает потребительскую ценность ВБР, записанных таким методом.

Метод записи со сканированием сердцевины волокна позволяет значительно снизить потери (до 1%) за счет более эффективного перекрытия сердцевин фс модификацией.

В данной работе было проведено исследование и сравнение температурной чувствительности и чувствительности к растяжению решеток, записанных обоими методами.

Применение волоконных брэгговских решеток в качестве датчиков физических величин

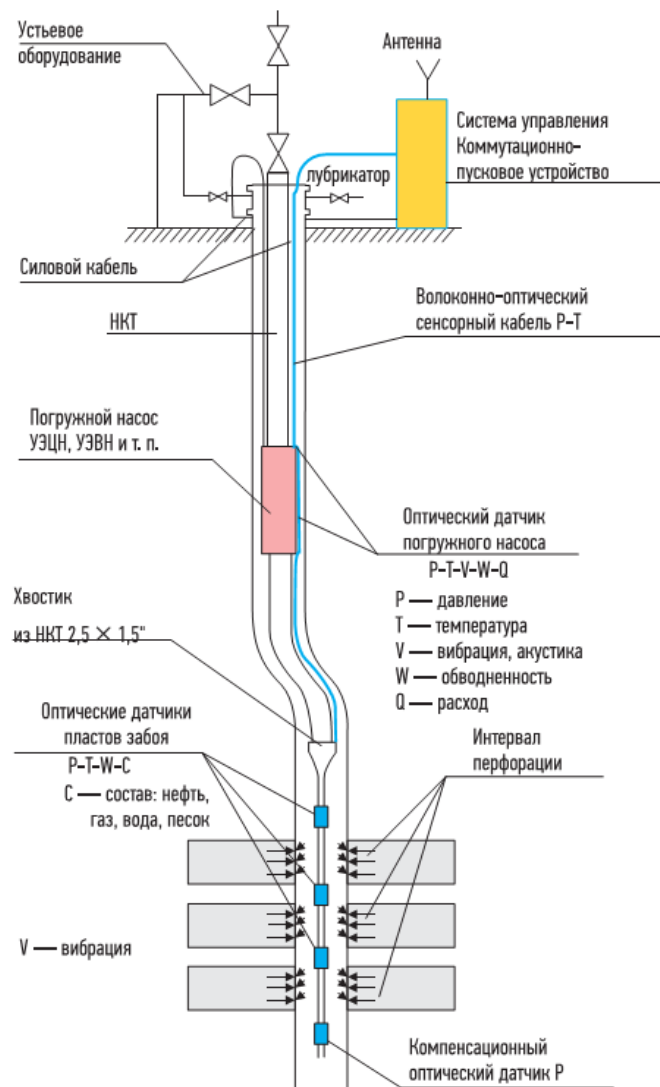


Рис. 6. Схема устройства нефтедобывающей скважины с использованием ВБР в качестве сенсоров

Одно из основных применений волоконных решеток заключается в использовании их в качестве сенсоров. По сравнению с электрическими датчиками, ВБР имеют ряд существенных преимуществ, таких как нечувствительность к электромагнитному излучению, стойкость к радиации, высокой температуре и давлению и т. д [7]. Одним из ярких примеров области, где ВБР используются в качестве датчика, является нефтедобывающая отрасль – волокно с решетками опускается в скважину, где находится под большим давлением, информация поступает в систему управления, находящуюся в комфортных для электроники условиях (рис. 6).

В параграфах 3.2 и 3.3 показано, что ВБР, записанные с помощью фс излучения методом сканирования сердцевины волокна, имеют высокую механическую прочность и

температурную устойчивость — это позволяет использовать их в качестве датчиков для экстремальных условий.

3 Эксперименты

При растяжении и/или изменении температуры резонансная длина волны ВБР изменяется в соответствии с формулой (5). В ходе экспериментов была измерена зависимость $\lambda(T, \Delta l)$ для ВБР, имеющих различную отражательную способность и изготовленных различными методами: поточечной записью или сканированием сердцевины волокна, записанные УФ-излучением или фемтосекундным лазером. Также для таких решеток были исследованы температурная стойкость и механическая предельная прочность.

Было проведено сравнение предельной прочности с волокном, не содержащим ВБР. Дополнительно были проведены тесты на разрыв для волокна из различных материалов без нанесенных в него решеток для оценки изменения прочности волокна при записи в него ВБР.

Так как в работе использовались ВБР длиной 3 мм, изгиб волокна не оказывал существенного влияния на спектры решеток и соответствующие тесты не проводились.

3.1 Автоматизация получения и обработки данных

Пользовательский интерфейс оптического анализатора спектров Yokogawa Optical Spectrum Analyzer AQ6370 (OSA), использованного в данной работе, не предусматривает режима автоматического сохранения и обработки спектров через заданный интервал времени, как это было нужно для правильного проведения эксперимента. Однако существует возможность производить управление и передачу данных посредством протокола HTTP с помощью специальных управляющих команд, посылаемых с компьютера через интерфейс Ethernet, что позволило реализовать необходимый функционал.

В ходе данной работы была написанна программа на языке Python 3 с использованием библиотек NumPy и Matplotlib, реализующая доступ к управлению OSA, автоматическую запись, а также обработку спектров. Программа с заданным интервалом времени опрашивает анализатор, сохраняет данные и в реальном времени строит полученный спектр на экране ноутбука. Вме-

сте со спектром в отдельный файл для последующего анализа записываются координаты главных максимумов решеток, вычисленные с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов.

В ходе экспериментов, описанных в текущей главе, было получено несколько тысяч спектров для различных моментов времени. Для анализа этих данных был написан скрипт, который построил графики зависимостей $\Delta\lambda(t)$ и $\Delta R(t)$, изображенные на рис. 9 и рис. 10.

Так же, с помощью библиотеки Matplotlib было нарисовано большинство графиков для данной работы, изображающих полученные данные.

3.2 Температурное воздействие

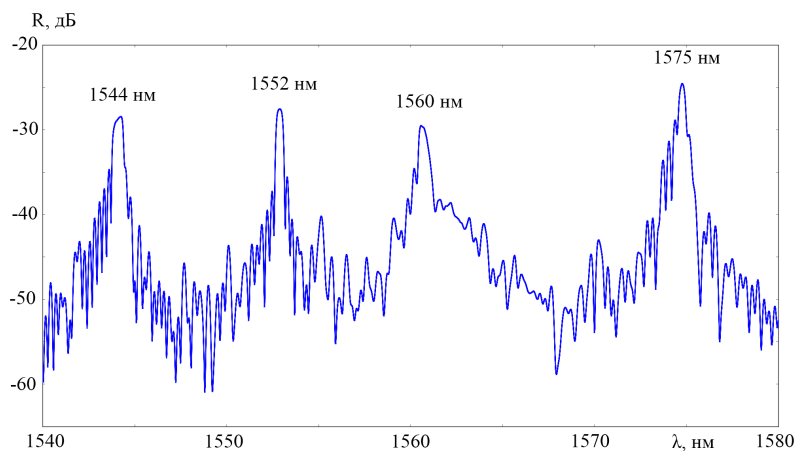


Рис. 7. Спектры решеток до помещения в печь

Для проведения эксперимента были использованы: электропечь, оптическое волокно (Fibercore SM1500, $2a = 5.3$ мкм, $2b = 80$ мкм, 10 мкм – толщина полиимидного покрытия) с ВБР, полученными различными методами (таблица 1 – описание, рис. 7 – спектр группы решеток, сваренных в одну ли-

нию), оптический циркулятор, широкополосный источник излучения (суперлюминесцентный лазерный диод), оптический анализатор спектра Yokogawa OSA AQ6370.

Таблица 1. Решетки, использованные в эксперименте

N	Эффективность	Метод записи	$\approx \lambda_B$, нм
I	>90% (сильная)	фс, поточечной записи	1544
II	$\sim 50\%$ (средняя)	фс, поточечной записи	1552
III	95% (сильная)	УФ, поточечной записи	1560
IV	$\sim 30\text{-}40\%$ (средняя)	фс, сканирования волокна	1575

Схема эксперимента изображена на рис.5. В печь были помещены последовательно сваренные участки волокна с ВБР, через циркулятор подключенные к источнику и анализатору. Чем "сильнее" решетка, тем выше потери при рассеивании, поэтому для минимизации потерь в эксперименте решетки были расположены по убыванию амплитуды отражения.

В течение всего эксперимента (~ 20 часов) непрерывно через равные интервалы времени (~ 60 секунд) анализатором записывались спектры отраженного сигнала.

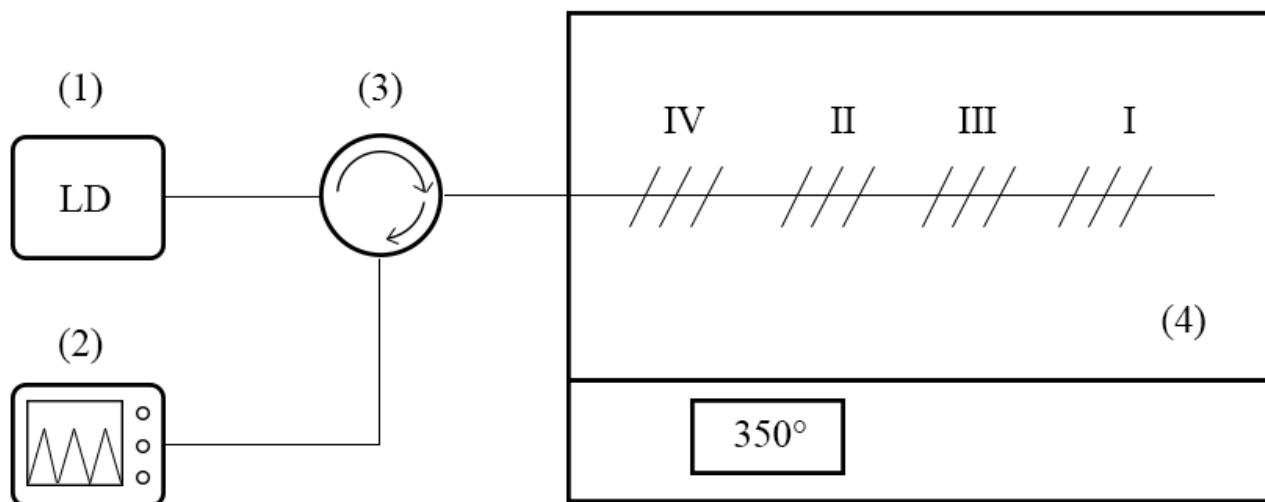


Рис. 8. Схема эксперимента. (1) – лазерный диод, (2) – оптический анализатор спектра, (3) – циркулятор, (4) – печь, (I)–(IV) – соответствующие решетки

Температурная зависимость

По полученным данным была построена зависимость изменения резонансной длины волны от времени нагрева, изображенная на рис. 9. Долгий период установления равновесия и колебания $\Delta\lambda$ в течение этих периодов обусловлены особенностями терморегулятора печи.

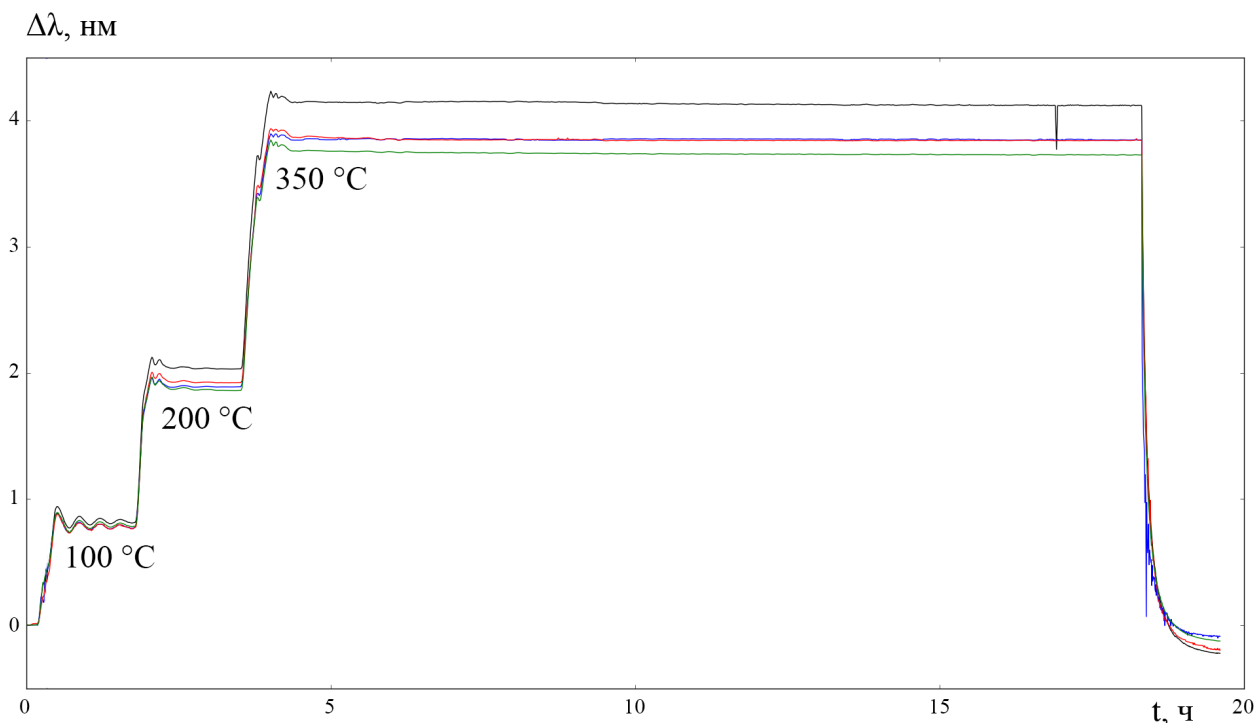


Рис. 9. Изменение резонансной длины волны от времени нагрева. Синим цветом обозначена решетка (I), красным – решетка (II), черным – решетка (III), зеленым – решетка (IV)

В течение эксперимента кроме изменения резонансных длин волн также наблюдалось и изменение интенсивностей пиков отражения, изображенная на рис. 10.

Чувствительность решеток и их максимальные средние отклонения длины волны записаны в таблице 2.

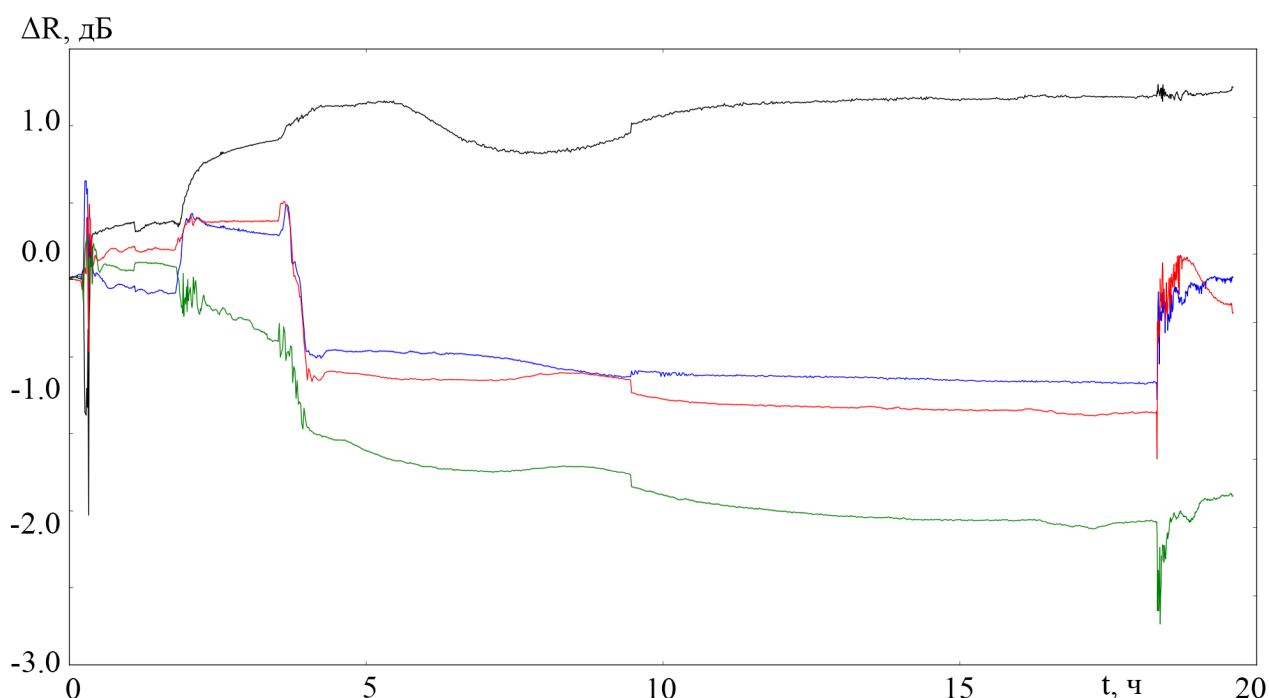


Рис. 10. Изменение интенсивности отражения в резонансе от времени нагрева. Синим цветом обозначена решетка (I), красным – решетка (II), черным – решетка (III), зеленым – решетка (IV)

Таблица 2. Чувствительности решеток и максимальные отклонения их резонансной длины волны

N	I	II	III	IV
$\Delta\lambda_{max}$, нм	3.96	3.90	4.20	3.80
$\Delta\lambda/\Delta T$, пм/град	11.93	11.75	12.65	11.45

Эти результаты позволяют сделать предварительный вывод о пригодности решеток к сенсорным приложениям. Для более основательного представления об эффективности ВБР в качестве датчика температуры необходимо так же проверить устойчивость решетки к экстремальным температурам.

Устойчивость к высокой температуре, релаксация параметров при длительном нагреве

В результате нагрева индуцированный показатель преломления волокна релаксирует со временем. Во время записи решетки в волокне создаются нерав-

новесные термодинамические конфигурации, для возврата которых в исходное состояние требуется преодоление некоторого потенциального барьера с определенной энергией E , зависящей от конкретного метода записи решетки [8]. При помещении решеток под долговременное воздействие высоких температур происходит возврат индуцированных неоднородностей показателя преломления волокна в начальное состояние. При этом, закономерно, чем выше потенциальная энергия E , тем выше температура начала деградации. Согласно формуле (5), зависимость можно считать линейной, что подтверждает рис. 9.

Остаточные значения сдвига резонансной длины волны и сдвига интенсивности пика для каждой из решеток представлены в таблице 3 (для увеличения точности вычислялись разницы в значениях у средних величин по двадцати первым и двадцати последним спектрам).

Таблица 3. Остаточные значения параметров резонанса

	I	II	III	IV
$\Delta\lambda_{\text{ост}}, \text{ нм}$	0.091	0.191	0.221	0.125
$\Delta P_{\text{ост}}, \text{ дБ}$	-0.208	0.912	-1.229	1.814

Таблица 3 дает поверхностное понятие о температурной устойчивости решеток (I)–(IV). Для более полного представления ситуации необходимо провести аппроксимацию и вычислить $\partial\lambda/\partial t$ – величину, характеризующую температурную релаксацию сдвига резонансной длины волны.

При использовании для аппроксимации последних ~ 6 часов нагрева при температуре $T \approx 350^\circ$, для резонансной длины волны решеток были получены коэффициенты релаксации, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициенты релаксации резонансной длины волны при продолжительном нагреве на температуре $T \approx 350^\circ$

N	I	II	III	IV
$\partial\lambda/\partial t, \text{ нм/час.} \cdot 10^{-2}$	-5.44	-2.93	-3.66	-3.40

Величина $\partial\lambda/\partial t$ для данных условий характеризует устойчивость ВБР к долговременным высокотемпературным воздействиям. Более отрицательные

значения означают большую релаксацию, а значит более быстрый выход сенсора из строя.

Сравнение спектров системы до и после помещения в печь представлено на рис. 11 и рис. 12. По этим графикам можно заметить, что, в соответствии с формулой (2), для каждой из рассмотренных решеток наблюдается уменьшение эффективного показателя преломления.

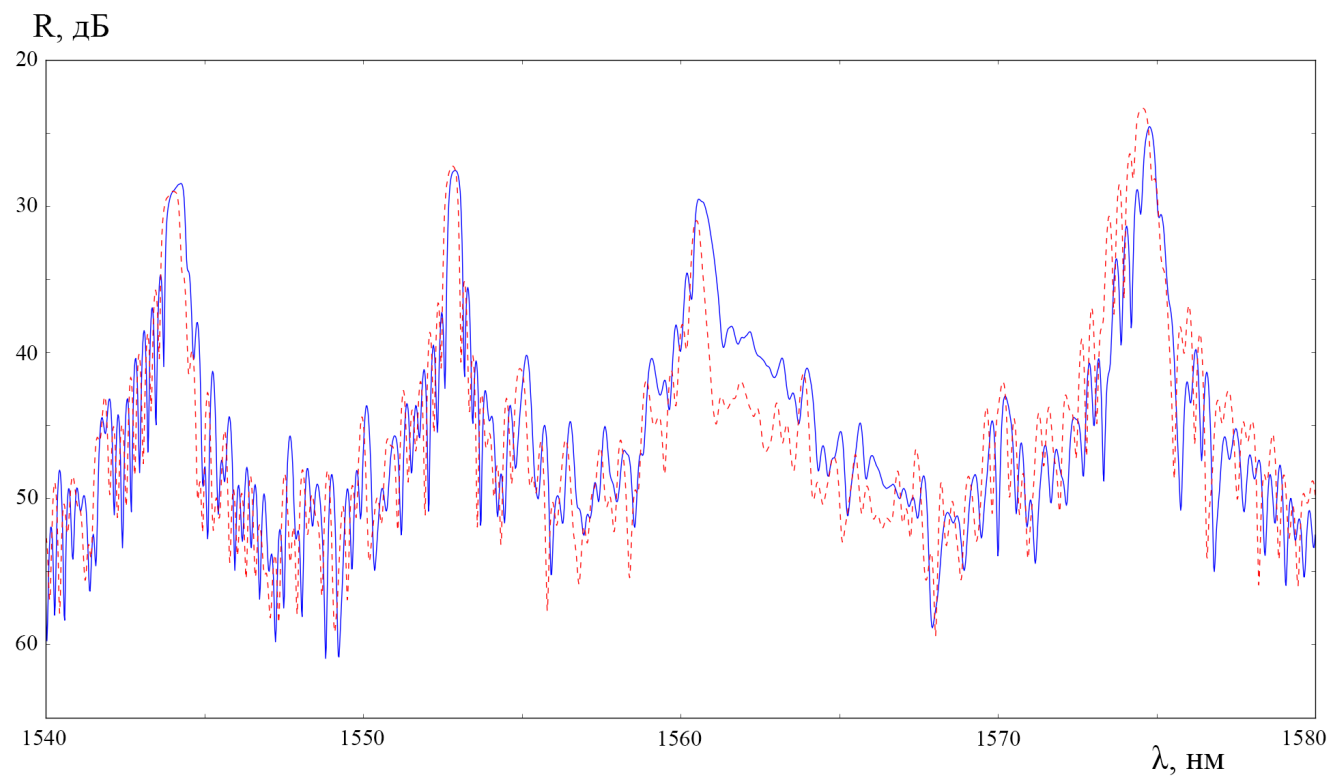


Рис. 11. Спектры системы до (сплошная синяя линия) и после (пунктирная красная линия) эксперимента

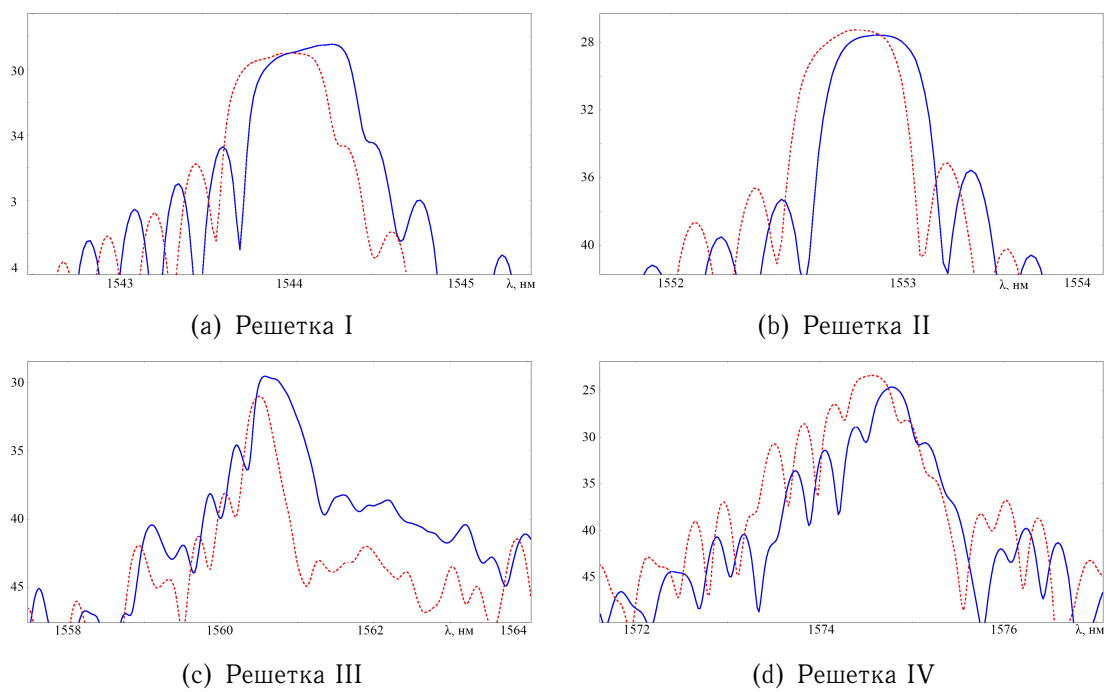


Рис. 12. Более детальное изображение пиков

3.3 Механическое воздействие

Было проведено две серии экспериментов: исследование зависимости резонансной длины волны от растяжения ВБР, а также статистическое определение предельной прочности волокна без решеток и с решетками, записанными различными методами (фиксировались только длины, на которых происходил разрыв). Целью данных исследований было:

1. Сравнение прочности пустого волокна и волокна с нанесенной решеткой.
2. Получение коэффициента линейной связи между сдвигом резонансной длины волны и растяжением решетки.
3. Получение распределения длин разрывов как случайной величины.

Для проведения экспериментов было задействовано следующее оборудование и расходные материалы: оптическое волокно (Fibercore SM1500, $2a = 5.3$ мкм, $2b = 80$ мкм, 10 мкм – толщина полиимидного покрытия) без решеток, оптическое волокно с решетками, керамические ферулы, клей, нагревательный фен, подвижный столик с 100-миллиметровой шкалой, крепления для ферул, циркулятор, источник излучения (лазерный диод), оптический анализатор спектра Yokogawa OSA AQ6370.

Ввиду отсутствия (на момент проведения экспериментов) достаточного количества образцов ВБР записанных методом непрерывного сканирования сердцевины волокна, исследование предельной прочности для данного типа решеток не представлялось возможным. Поэтому в экспериментах были задействованы только решетки, записанные методом поточечной записи.

Схема установки показана на рис. 13. В течение эксперимента сила на единицу площади сечения волокна достигала нескольких десятков ГПа, поэтому для крепления волокна было решено использовать специальный клей ($T_{\text{плав.}} \sim 100^\circ$, при комнатной температуре находится в твердом состоянии). Клей плавился с помощью нагревательного фена и заливался внутрь керамических ферул. Следом в ферулы помещалось волокно, клей затвердевал

и конструкция крепилась к подвижным столикам с помощью специальных креплений для ферул. Растяжение волокна достигалось путем передвижения столика.

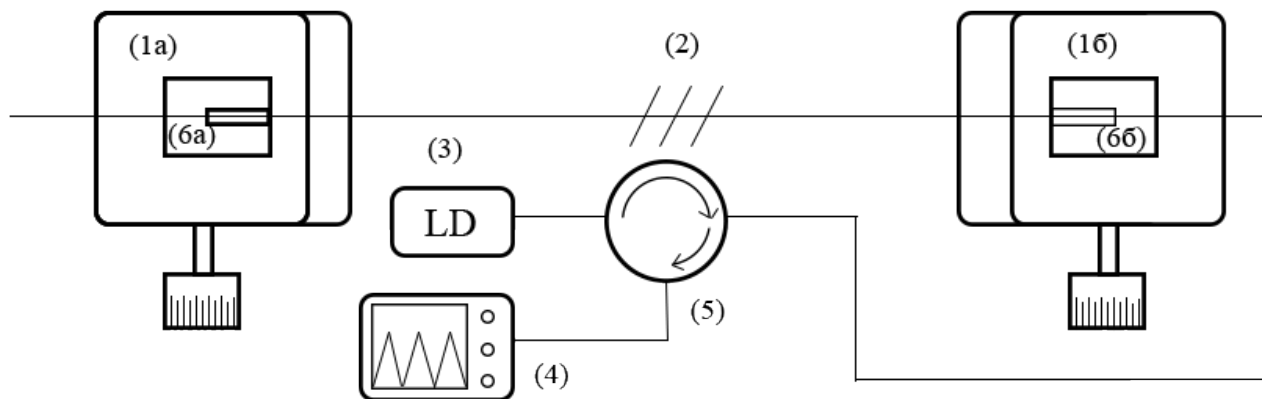


Рис. 13. Схема эксперимента. (1а), (1б) – подвижные столики с линейкой, (2) – волокно (с решеткой), (3) – источник, (4) – анализатор, (5) – циркулятор

Зависимость от растяжения

Характеристики решеток, использованных в эксперименте, указаны в таблице 5.

Таблица 5. Решетки, использованные в эксперименте

N	п, шт	Эффективность	Метод записи	λ_B , нм
I	1	~ 50 % (средняя)	фс, поточечной записи	1543.43
II	1	90% (сильная)	фс, поточечной записи	1572.76

Полученная в ходе эксперимента зависимость (рис. 14), в соответствии с формулой 5, укладывается на прямую с коэффициентом 11.87 нм / 1% для решетки I и 12.19 нм / 1% для решетки II. Коэффициент детерминации показал отличие от единицы в пятом знаке после запятой для обеих решеток. Это означает, что на всем интервале допустимых растяжений зависимость продолжает оставаться линейной.

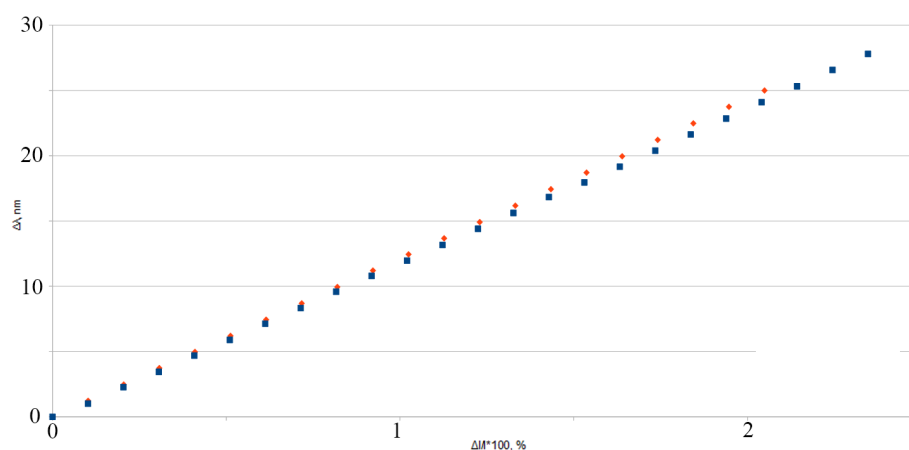


Рис. 14. Зависимость изменения резонансной длины волны от растяжения для решетки (I) – синим, для решетки (II) – оранжевым

Механическая прочность

Сравнение прочности волокна с решетками и без решеток

Для проведения эксперимента с волокном без нанесенных на него ВБР было выбрано пять отрезков волокна одного типа длиной ~ 30 см, в следствие ошибки эксперимента достоверными оказались только результаты для трех из них.

Таблица 6. Значения растяжений, при которых происходил разрыв, для волокна без решеток

N	l , мм	$\Delta l_{\text{разр}}$, мм	$\Delta l_{\text{разр}} / l$, %
1	244	13.57	5.56
2	243	13.32	5.48
3	243	14.30	5.88

Длины разрыва для решеток, зависимость приращения резонансной длины волны которых была рассмотрена в предыдущем параграфе, указаны в таблице 7.

Таблица 7. Значения растяжений, при которых происходил разрыв, для волокна с ВБР

N	l , мм	$\Delta l_{\text{разр}}$, мм	$\Delta l_{\text{разр}} / l$, %
I	245	5.90	2.41
II	244	5.25	2.15

Данные таблиц 6 и 7 позволяют судить о характерной длине разрыва для волокна и ВБР соответственно. Видно, что нанесение решетки снижает предел прочности волокна более чем в два раза.

Прочность волокна с решетками

Для получения распределения длин разрывов решеток было выбрано два по 13 решеток двух видов — записанные методом поточечной записи сильные и слабые решетки. Их характеристики указаны в таблице 8.

Таблица 8. Решетки, использованные в эксперименте

N	n, шт	Эффективность	Метод записи
I	13	50%-70% (средняя)	фс, поточечной записи
II	13	>90% (сильная)	фс, поточечной записи

Полученную в ходе эксперимента зависимость кумулятивной вероятности от силы в единицу площади (рис. 15) описывает распределение Вейбулла (6).

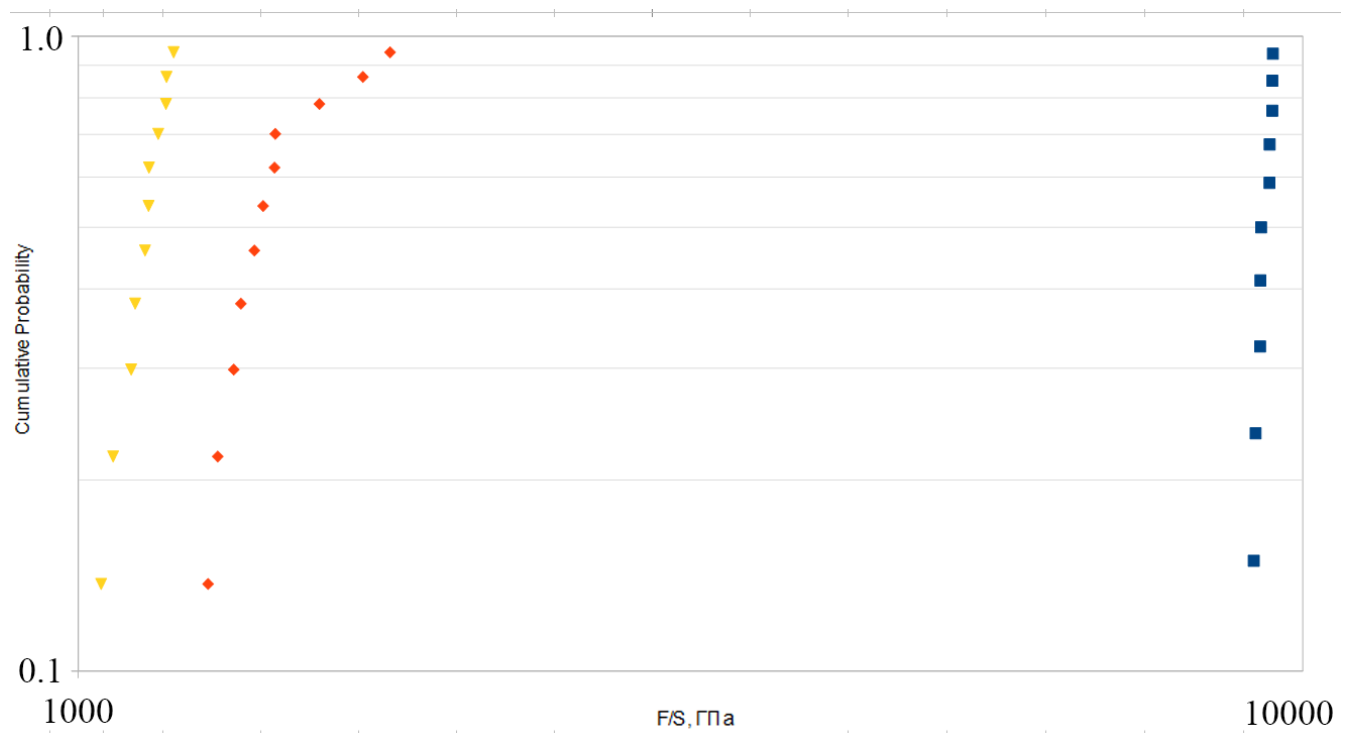


Рис. 15. Кумулятивная вероятность от силы в единицу площади в логарифмическом масштабе по оси X. Синим — для чистого волокна, оранжевым — для решетки (I), желтым — для решетки (II)

График, изображенный на рис. 15, позволяет выдвинуть следующую гипотезу: чем выше отражательная способность решетки (чем она "сильнее"), тем ниже ее механическая прочность. Это закономерно – потери в отражении обусловлены неоднородностями в веществе, которые способствуют образованию микротрещин, ведущих к разрыву волокна при растяжении.

4 Заключение

В данной работе были проведены исследования и сравнения чувствительности к температурным и механическим воздействиям волоконных брэгговских решеток, записанных методом поточечной записи и методом сканирования сердцевины волокна. Также были проведены испытания на температурную устойчивость и механическую прочность.

Испытания показали, что решетки, записанные вторым методом, не имеют существенных отличий по характеристикам от решеток, записанных первым методом. Однако, в силу меньших потерь мощности волны на решетках, записанных вторым методом, при их использовании в качестве сенсоров может быть увеличено число решеток в одном волокне и, соответственно, увеличена производительность.

5 Список литературы

- [1] Martinez A. et al. Direct writing of fibre bragg gratings by femtosecond laser. *Electronics Letters*, 40(19):1170–1172, 2004.
- [2] Robert J. Williams, Ria G. Krämer, Stefan Nolte, and Michael J. Withford. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber bragg gratings using a continuous core-scanning technique. *Optics Letters*, 38(11):1918–1920, 2013.
- [3] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. Academic Press, USA, 2001.
- [4] Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, and Francis T.S. Yu. *Fiber Optic Sensors*. CRC Pressc, USA, 2002.
- [5] Raymond M. Measures. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. John Wiley & Sons, Inc, USA, 2001.
- [6] Vladimir Mezentsev, Jovana S. Petrovic, Mykhaylo Dubov, Ian Bennion, Jurgen Dreher, Holger Schmitz, and Rainer Grauerb. Femtosecond laser microfabrication of subwavelength structures in photonics. In Wilhelm Pflöging, Yongfeng Lu, Kunihiko Washio, Friedrich G. Bachmann, and Willem Hoving, editors, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineerin*, volume 6459. SPIE, March 2007.
- [7] Буймистрюк Г. Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. *Control Engineering*, 3(45):34–40, 2013.
- [8] С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, and Е. М. Дианов. Волоконные решетки показателя преломления и их применения. *Квантовая электроника*, 35(12):1085–1103, 2005.