

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ НАКЛОННЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

^{1,2}Вуйцик В., ^{1,2}Кисала П., ^{1,3}Калижанова А.У., ^{1,3}Козбакова А.Х.,
^{1,3}Айткулов Ж.С., ^{1,4}Оразбеков Ж., ⁵Кашаганова Г.Б.,
¹Арсланова С.З.,
e-mail: kalizhanova_aliya@mail.ru

¹Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК,
Казахстан

²Люблинский технический университет, Польша

³Алматинский университет энергетики и связи, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет Абая, Казахстан

⁵Казахско-Американский университет, Казахстан

Аннотация. В работе представлены возможности измерения угла изгиба оптического волокна с помощью наклонной волоконной решетки Брэгга (НВРБ). Кроме того, показано, что один и тот же элемент НВРБ может использоваться для одновременного измерения угла поворота. Приведены лабораторные результаты измерений этих физических величин с помощью оптических волокон с записанными на них наклонными решетками. Также представлен метод, который позволяет сенсорной системе быть независимой от температуры.

Введение. Реакция НВРБ на изменения температуры. Чтобы представить возможности использования одного элемента НВРБ для параллельных измерений углов изгиба и вращения, дополнительно делая всю измерительную систему независимой от изменений температуры, рассмотрим реакцию НВРБ на изменения температуры на основе представленных результатов лабораторных измерений. НВРБ, изготовленная на одномодовом волокне SMF-28 с углом отражения 5° , была подвергнута воздействию переменной температуры в климатической камере. Температуру изменяли в диапазоне от -30°C до 80°C путем измерения оптической мощности излучения после прохождения через структуру. Результаты измерений показаны на рисунке 1. Как видно, уровень оптической мощности для всего рассматриваемого спектрального диапазона определяется спектральными характеристиками источника в виде SLD- суперлюминесцентного диода (eng.: superluminescent diode). На рисунке 1 показано смещение спектра в сторону более длинных волн из-за повышения температуры. Это явление вызвано, как и в случае простых брэгговских решеток, тепловым расширением оптического волокна, на котором записана решетка, и изменением фотоэластической постоянной с доминирующим эффектом теплового расширения волокна. Для дальнейшего изучения этого явления и использования знаний о нем для разработки метода, нечувствительного к изменениям температуры, были проанализированы несколько областей спектральных характеристик. Эти области расположены вблизи длин волн,

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

соответствующих основному брэгговскому резонансу и выбранным пикам, связанными с существованием оболочечных мод.

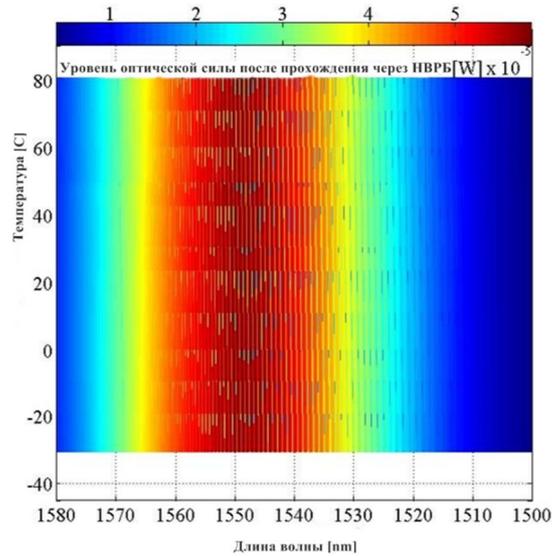


Рис. 1. Спектр пропускания НВРБ, измеренный при переменной температуре

Красная область, соответствующая мощности передачи $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Вт и встречающаяся около 1550 нм, связана с наличием характерного максимума на кривой излучения SLD [1]. В измерениях использовался полупроводниковый фотоприемник компании Thorlabs из галлия-индия типа PDA10CF. Результаты, полученные при первых измерениях температуры и показанные на рис. 1, в значительной степени определяются спектральными характеристиками источника света. На рисунке 2 показаны изменения коэффициента передачи НВРБ при различных температурах.

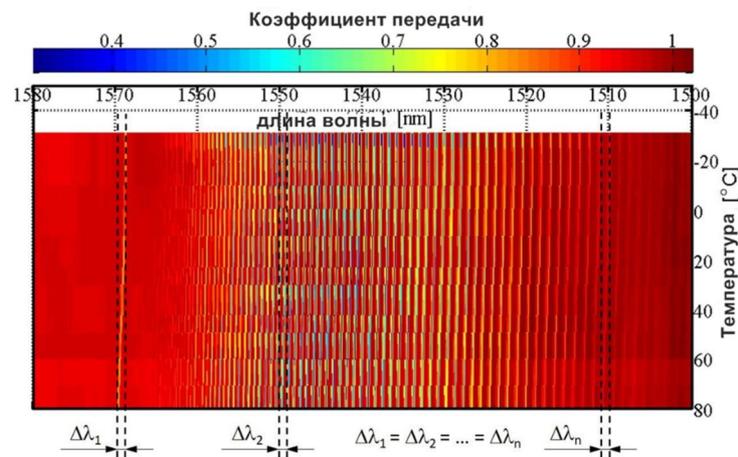


Рис. 2. Нормализованные спектры пропускания НВРБ, измеренные при различных температурах

На рисунке 2 показан характерный сдвиг отдельных частей спектральных характеристик НВРБ под воздействием температуры. По мере повышения температуры отдельные участки спектра НВРБ сдвигаются в сторону более длинных волн. Это в основном связано с температурным расширением волокна, на котором записана решетка. Спектральные сдвиги отдельных частей характеристики для всех длин волн $\Delta\lambda_i$ (где $i = 1, 2, \dots, n$) по спектральным характеристикам одинаковы. Это свойство более точно представлено на рисунке 3, который показывает, что как основной сдвиг брэгговского резонанса (ряд минимумов на правой стороне фигуры между длинами волн от 1568 до 1570 нм), так и выбранные пики, соответствующие оболочечным модам, имеют одинаковое значение. Для измерения температуры с помощью датчика с использованием элементов НВРБ следует использовать это свойство, заключающееся в смещении отдельных частей спектральной характеристики. Парадокс в том, что эта особенность также связана с основным ограничением, когда речь заходит о возможности использования НВРБ при измерении физических величин. Влияние температуры вызывает изменение спектральных характеристик НВРБ, которое, если этот эффект не принимается во внимание, не позволяет корректным измерениям других физических величин измерять изменение положения отдельных частей спектральных характеристик.

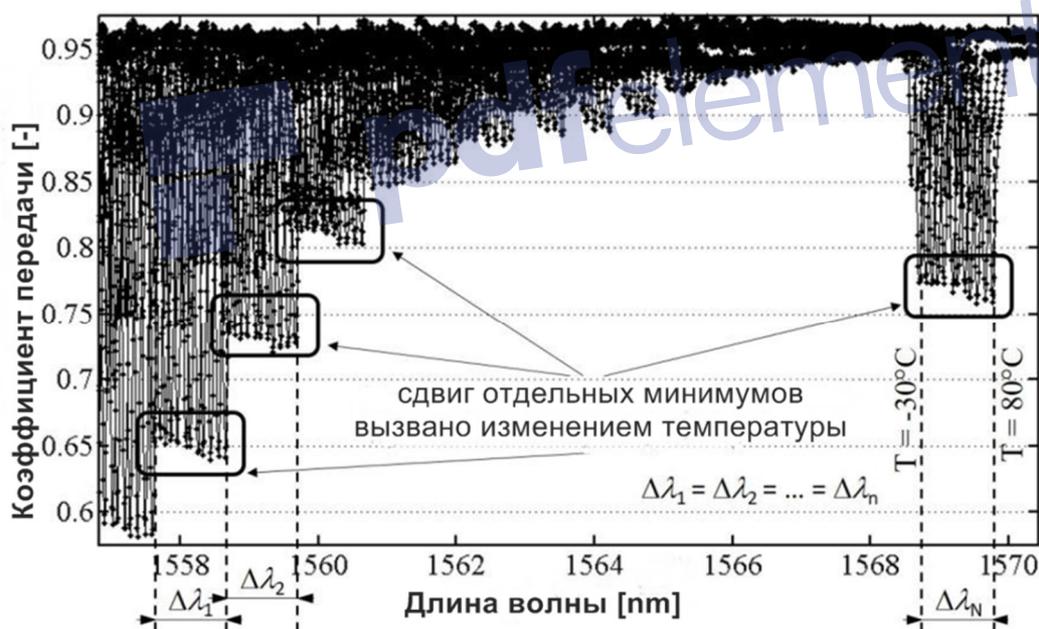


Рис.3 Сдвиг выделенной части характеристик передачи НВРБ, вызванный изменением температуры от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

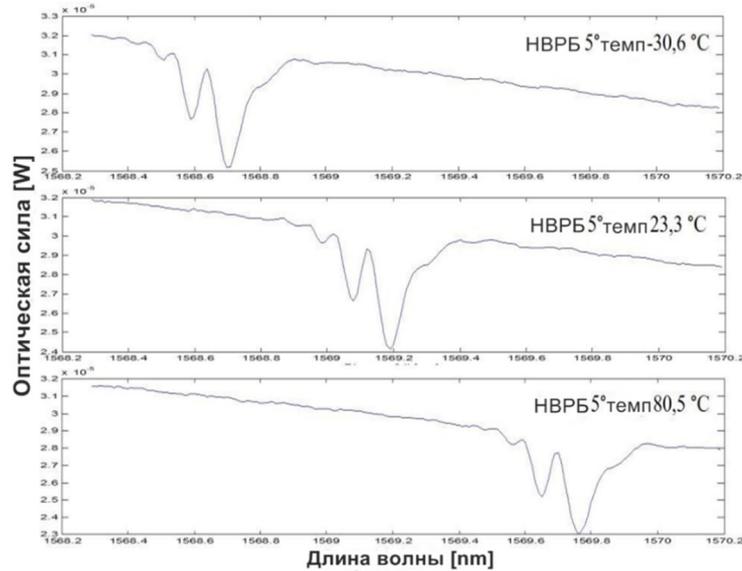


Рис.4 Сдвиг основного брэгговского резонанса НВРБ из-за изменений температуры

Форма спектральной части на характеристиках передачи НВРБ, связанных с брэгговским резонансом, не изменяется (рис. 4). Изменяется только длина волны, для которой происходит минимальная передача. Спектральные характеристики смещены, а форма характеристик преобразования температуры такой структуры для изменения длины волны показана на рисунке 5.

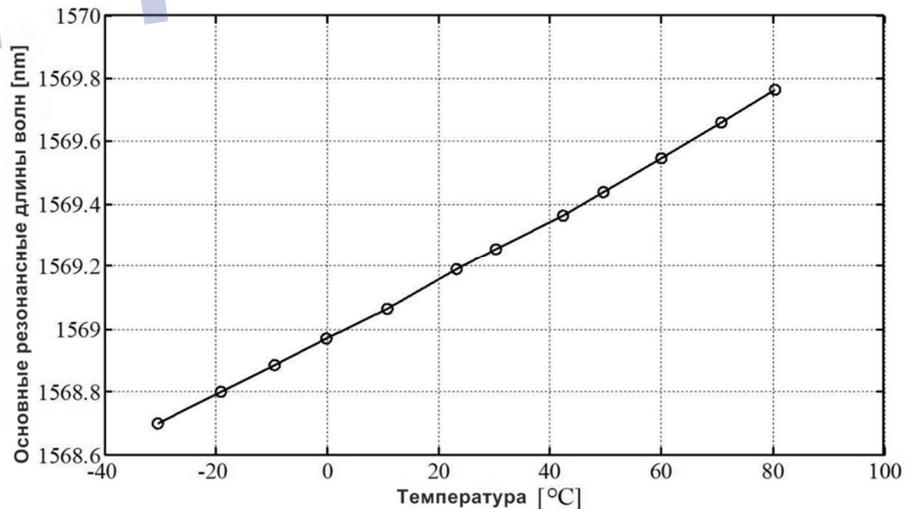


Рис. 5. Изменения основной длины волны резонанса НВРБ 6 °, используемые при измерениях температуры (брэгговский резонанс)

Основная мода НВРБ имеет наибольшую длину волны, и соответствующий пик на спектральных характеристиках является самым узким. Основная длина волны резонанса характеризуется той же температурной чувствительностью (~ 10

пм / ° С), что и стандартная прямая решетка Брэгга, а также такой же чувствительностью волоконной решетки Брэгга (ВРБ) к осевому напряжению (~1пм/με) [2]. В тестируемом диапазоне, то есть для температур от -30,5 ° С до 80,5 ° С, коэффициент чувствительности по длине волны основного режима структуры НВРБ к температуре составляет 10 мкм/° С. Температурная зависимость длины волны брэгговского резонанса является линейной и соответствует теоретической чувствительности структуры волоконной решетки Брэгга (ВРБ).

На рисунке 6 описаны характеристики изменения длины волны при изменении температуры в диапазоне от -30,5 ° С до 80,5 ° С, а также анализ резонанса спектральных характеристик оболочечных мод. Эта мода обозначена здесь как оболочечная мода 1. На рисунке 7 показаны аналогичные результаты, но для оболочечных мод более высокого порядка, обозначенных в работе как оболочечная мода 2. Существует много работ, в которых авторы обозначают оболочечные моды с последовательными номерами. Из множества разметок чаще всего используются разметки, предложенные в работах [3,5], в которых моды помечаются двумя индексами.

Первый индекс означает, является ли данная мода четным или нечетным (обозначение: 0 - четный, 1 - нечетный), в то время как второй индекс означает порядковый номер данной моды, четный или нечетный, соответственно.

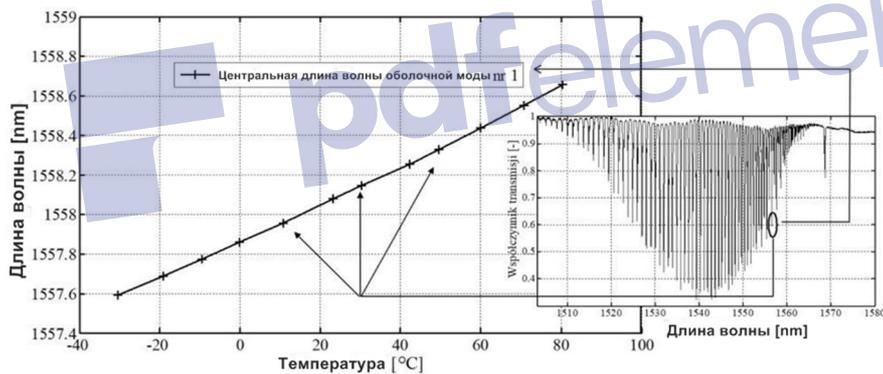


Рис. 6 Изменения длины волны от температуры оболочечной моды 1 (НВРБ 6°)

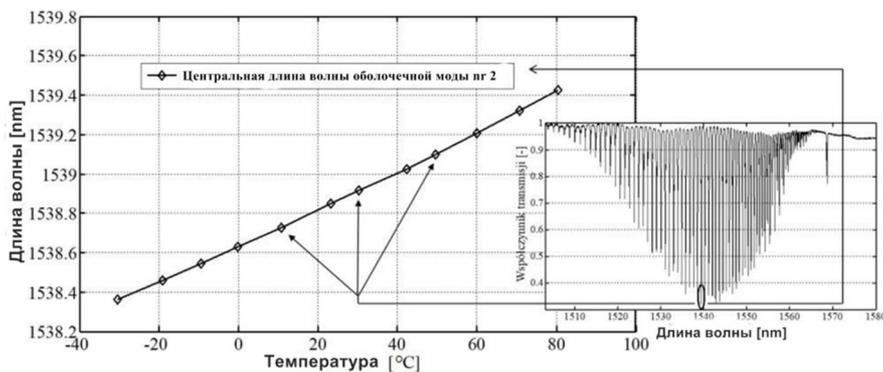


Рис. 5 Изменения длины волны от температуры для оболочечной моды № 2 (НВРБ 6 °)

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

В работе представлены результаты спектральных испытаний, которые показывают, что температурная чувствительность всех резонансов НВРБ одинакова и не зависит, например, от порядка оболочечной моды. Поэтому три выбранных резонанса по спектральным характеристикам пропускания были обозначены как: основной резонанс (полученный из основной моды - так называемый брэгговский резонанс, рис. 5), резонанс оболочечной моды №1 (полученный из выбранной моды распространения в оболочке, обозначенный как 1 в соответствии с рис. 6) и резонанс оболочечной моды №2 (полученный из выбранной моды распространения в оболочке, обозначенный как 2 в соответствии с рисунком 7). Для сравнения на рисунке 8 обобщены характеристики влияния температуры на сдвиг минимумов для трех выбранных резонансов.

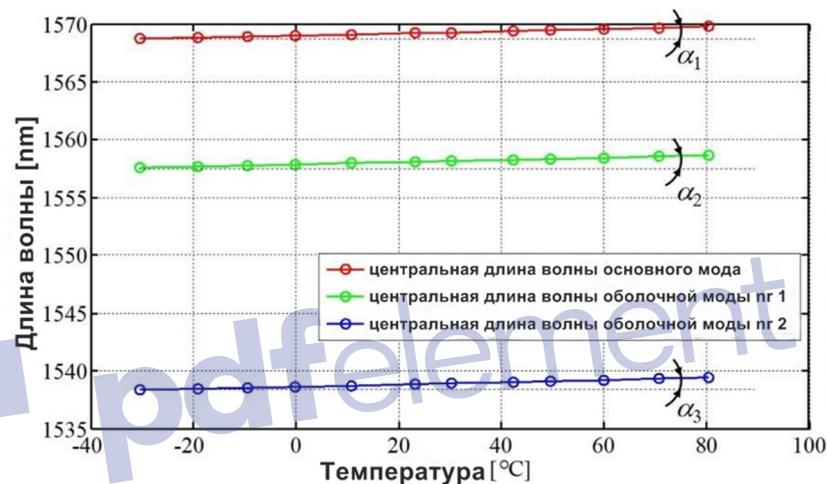


Рис. 8 Характеристики влияния температуры на длину волны для трех выбранных резонансов

Чувствительность длины волны, соответствующей минимальному пропусканию для данного резонанса, может быть определена как:

$$K_T^{\lambda_{min}} = \frac{\Delta\lambda_{min}}{\Delta T} \quad (1)$$

где $\Delta\lambda_{min}$ является изменением (понимаемым как сдвиг) минимальной длины волны выбранной моды, в то время как ΔT это изменение температуры, вызывающее такой сдвиг.

Поскольку углы обработки кривых для выбранных мод равны (рис. 8), можно записать, что:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_n \quad (2)$$

Поскольку уравнение (1) соблюдается, касательные угла обработки в этом случае также равны, поэтому чувствительность $K_T^{\lambda_{min}}$ одинакова для всех оболочечных мод и моды ядра.

Так как все резонансы основной моды и оболочечных мод характеризуются одинаковой температурной зависимостью, температурный сдвиг пиков по спектральным характеристикам можно компенсировать путем измерения относительных сдвигов длин волн (например, относительно пика, соответствующего основному резонансу). В дальнейших исследованиях используем это свойство, чтобы сделать работу датчика на основе НВРБ независимой от температурных эффектов. Вместо того, чтобы измерять абсолютный сдвиг длины волны отдельных оболочечных мод, можно определить смещение этих мод относительно основной моды.

Спектральные измерения оптических волокон с применением структуры НВРБ, изгиб для разных углов поворота поляризации входного света.

Датчики смещения используются во многих отраслях промышленности, таких как авиационная промышленность или строительство. Основными типами датчиков измерения смещения являются индуктивные, импульсные, потенциометрические и емкостные датчики. Примером волоконно-оптических датчиков для измерения изгиба является длиннопериодная волоконная решетка Брэгга (ДПВР) (LPFG- long-period fiber gratings). Известны методы измерения изгиба, при которых ДПВР регистрируется на стандартном одномодовом волокне и помещается в композит из углеродных волокон [6]. Однако изменения температуры оказывают очень большое влияние на работу датчиков на основе ДПВР. Волоконные решетки Брэгга (ВРБ) также используются для измерения механических параметров. Использование этих элементов в качестве датчиков изгиба требует, например, их размещения в фотонных волокнах с PBGFs (photonic bandgap fibers) с фотонным зазором (твердотельные волокна с фотонной запрещенной зоной) [7]. Однако это решение очень чувствительно к влиянию неточности геометрии микроструктурированных волокон. Измерительные системы изгиба, использующие как ДПВР, так и ВРБ, также исследуются в [8]. Снижение перекрестной чувствительности к температуре часто осуществляется с помощью гибридных структур, также состоящих из двух типов волоконно-оптических решеток: ДПВР и НВРБ. Таким образом, изменения радиуса изгиба могут быть рассмотрены как в [9]. Некоторые датчики, использующие элементы НВРБ, также можно рассматривать как независимые от температуры [10], вставляя многомодовый сегмент волокна между одномодовым волокном и элементом НВРБ. Также известны конструкции, используемые в качестве датчиков изгиба [11], в которых решетка ВРБ хранится в том же месте, что и НВРБ (структура с наклонной решеткой). В таких системах сигнал, отраженный от решетки ВРБ FBG, модулируется НВРБ, который чувствителен к изгибу [12]. Для датчиков, использующих решетки Брэгга для измерения смещения, обычно требуется конструкция дополнительного кронштейна или механического элемента, передающего смещение от тестируемого объекта к оптическому волокну [13]. Основной проблемой в этих решениях является чувствительность брэгговских решеток как к осевому удлинению, так и к температуре. Поэтому измерительные системы, использующие этот тип датчика, требуют температурной компенсации при измерении других физических величин. К сожалению, часто методы снижения перекрестной чувствительности к температуре уменьшают диапазон измерения системы с решетками НВРБ и ВРБ. Известны решения, которые очень

чувствительны к деформации, но имеют узкий диапазон измерения, например, порядка 1 нм [14]. Диапазон измерения также изменяется в результате покрытия волокна решеткой НВРБ, например, дополнительным защитным слоем [15].

Среди существующих методов измерения изгиба с использованием элементов НВРБ следует упомянуть те, которые допускают измерения макроизгиба [16] с очень низкими значениями. Например, в [17] был предложен очень многообещающий метод, но он позволяет измерять только радиус изгиба, кроме того, можно измерить только несколько дискретных значений изгиба. Анализируя существующие сенсорные решения на основе НВРБ для измерения изгиба, можно увидеть, что существует тенденция к развитию исследований, которые нечувствительны к изменениям температуры, несмотря на то, что измерительный преобразователь представляет собой волокно с решеткой Брэгга [18]. Желательной особенностью также является возможность измерять другие физические величины с помощью того же измерительного элемента. Поэтому в работе представлены теоретические основы и концепция датчиков на основе НВРБ для одновременного измерения изгиба и угла поляризации входного света. Было показано, как сделать систему независимой от изменений температуры окружающей среды. Для измерения выбранных параметров датчиков НВРБ была предложена измерительная система, которая позволяет устанавливать непрерывно измеряемые величины. Такой подход позволяет полностью определить свойства разрабатываемой системы и метод измерения не только для конкретных и дискретных значений заданных измеренных значений, но и в полном и непрерывном диапазоне их изменений. Представленный метод измерения нечувствителен к направлению изгиба.

Предложенная измерительная система использует как явление связи света с оболочечными модами, так и основной брэгговский резонанс, который в структурах НВРБ уменьшается с увеличением угла наклона плоскостей решетки. Его даже можно полностью устранить, если угол решетки превышает определенное предельное значение. Предел, при котором он исчезает, зависит от геометрии волокна, на котором записана НВРБ [4].

Положение основного резонанса может быть использовано в методах независимо от влияния температуры.

Для испытаний была изготовлена конструкция с углом наклона 2° и длиной 15 мм. Решетка изготавливалась на одномодовом гидрированном волокне SMF-28 в течение 10 дней. Запись проводилась с использованием эксимерного лазера, работающего при 248 нм. Использование фазовой маски 1080 нм позволило сформировать структуру с длиной волны Брэгга 1564,5 нм. Лазер работал с мощностью 100 мДж и частотой повторения 15 Гц. Чтобы стабилизировать работу системы регистрации решетки, в помещении поддерживалась постоянная температура, а эксимерный лазер имел дополнительное водяное охлаждение (рис. 9).

IV Международная научно-практическая конференция
 "Информатика и прикладная математика",
 посвященная 70-летию юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйцика
 и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н. 25-29 сентября 2019, Алматы, Казахстан

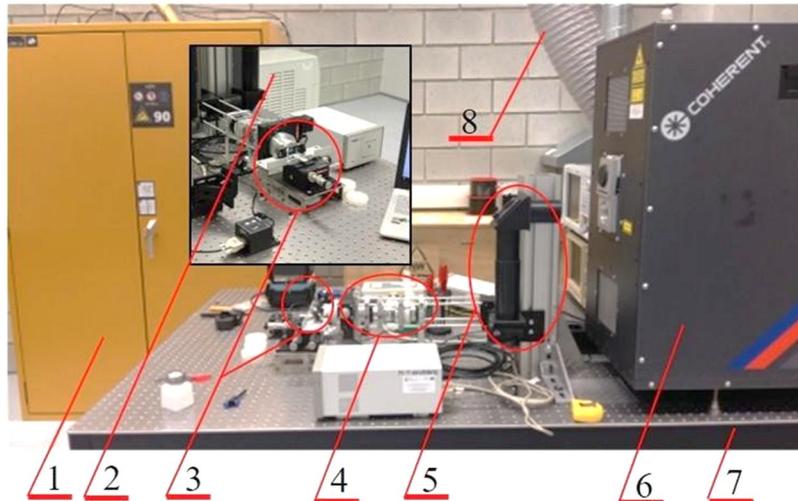


Рис. 9 Стенд записи НВРБ:

1 - газовая установка для эксимерного лазера, 2 - кулер для воды для стабилизации параметров лазера при регистрации структур, 3 - поворотный стол для фазовой маски с приводом от шагового двигателя, 4 - система позиционирования клетки и формирования УФ-луча, 5 - система оптического перископа, 6 - эксимерный лазер, 7 - оптический стол с активным подавлением вибраций, 8 - извлечение газа из лазера

Улучшение повторяемости получаемых конструкций было также достигнуто за счет устранения вибрации всей системы, благодаря использованию оптических столов с активным подавлением вибраций. Элементы, изготовленные таким образом, затем были подвергнуты спектральным испытаниям на стенде, что позволило изгибать оптическое волокно с помощью НВРБ. Плавная регулировка угла изгиба конструкции была реализована путем правильного формирования участка волокна, на котором была записана НВРБ. Схема измерительной системы показана на рисунке 10.

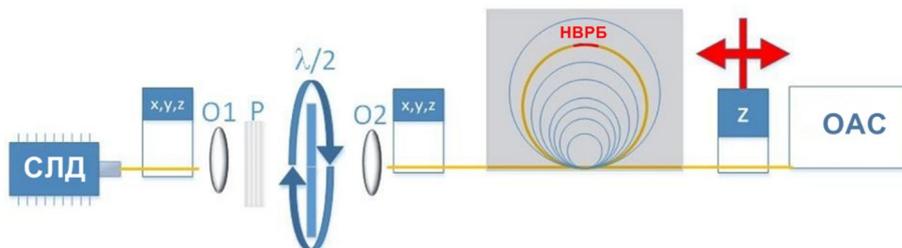


Рис. 10 Схема системы измерения радиуса изгиба оптического волокна и угла поляризации входного света

Поляризация света, вводимого в оптическое волокно с сохраненной структурой НВРБ, контролируется системой линз (O1 и O2), поляризатором (P) и полуволновой пластиной ($\lambda/2$). Радиус изгиба конструкции контролируется и обусловлен движением стола по оси z (рис. 11). Перемещение стола (z) заставляет

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

волоконно-оптическую петлю затягивать и уменьшать радиус изгиба волокна при помощи НВРБ. С другой стороны, перемещение стола влево (приближается к контейнеру с петлей волокна) увеличивает радиус изгиба волокна с помощью НВРБ. Этот подход также позволяет вам контролировать диапазон измерения, выбирая диаметр петли.

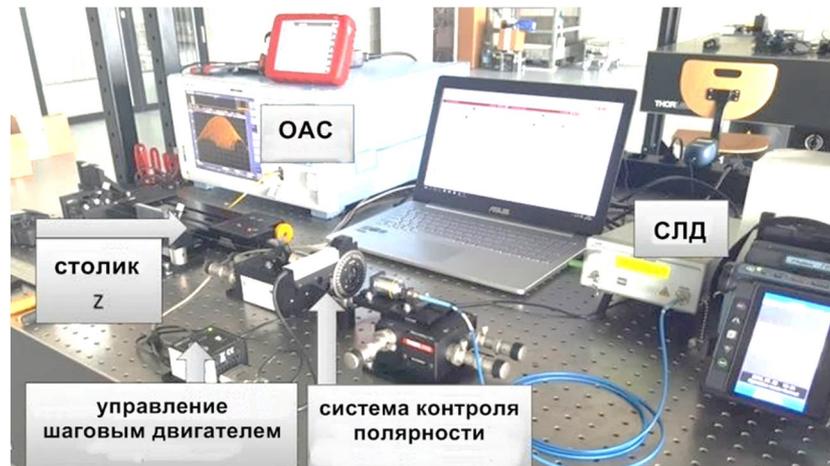


Рис. 11 Фотография системы измерения радиуса изгиба и угла поляризации входного света

Увеличение начального диаметра волокна увеличивает диапазон измерения за счет точности измерения. Таким образом, изменение геометрии системы позволяет контролировать точность измерения и диапазон измерений. Изгиб волокна с НВРБ и вращение плоскости поляризации входного света вызывает изменение спектральных характеристик НВРБ.

Напряжения, возникающие в волокне, изменяют значения показателей преломления для отдельных оболочечных мод. Длина волны, на которой возникает брэгговский резонанс, определяется согласно уравнению [4] в следующем виде:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}^{rdzen} \Lambda / \cos\theta, \quad (3)$$

где: n_{eff}^{rdzen} — эффективный показатель преломления сердцевины волокна, на котором записана НВРБ.

Аналогичное уравнение, но описывающее длину волны, для которой существуют резонансы от отдельных оболочечных мод, будет записано в следующем виде:

$$\Delta\lambda_i^{mod} = [(n_{eff}^{rdzen} + n_{i\,eff}^{plaszcz}) \Lambda] / \cos\theta \quad (4)$$

Величины, встречающиеся в уравнении (4) $n_{i\,eff}^{plaszcz}$, обозначают эффективный показатель преломления света в оболочке для i -ой оболочечной моды.

Анализируя уравнения (3) и (4), можно заметить, что длина основной резонансной волны зависит только от эффективного показателя преломления света в ядре, а длины волн резонанса, возникающие из оболочечных мод, являются

функцией суммы эффективных показателей преломления моды ядра и i -й оболочечной моды. Это означает, что изменение эффективных показателей преломления в оболочке будет влиять на расположение отдельных пиков на спектральных характеристиках, полученных из оболочечных мод. Вторым важным выводом является в том, что любые изменения в значении эффективного показателя преломления оболочечных мод не изменят длину волны Брэгговской структуры. Это означает, что если структура НВРБ подвергается изгибу в пределах упругости волокна, на котором она записана, и мы влияем на изменение показателей преломления для отдельных оболочечных мод, то такой изгиб не должен влиять на длину волны резонанса ядра. Коэффициент отражения каждой резонансной моды зависит от функции модуляции показателя преломления согласно соотношению [4]:

$$R_i^{mod} = \tanh^2 \left[LC \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{F}^{rdzen} * \vec{F}^{plaszcz} \Delta_n \cdot \cos z \cos(\theta) + y \sin(\theta) dx dy \right] \quad (5)$$

L – длина решетки, C – постоянная, связанная с нормализацией полей поперечных мод, Δn – это функция, описывающая изменения показателя преломления света в результате существования НВРБ в оптическом волокне.

Изменение радиуса изгиба волокна с сохраненной структурой НВРБ и изменение угла поворота плоскости поляризации входного света влияют на значения изменения показателей преломления, длину самой структуры НВРБ и ее период. Следовательно, можно ожидать сдвигов и изменений интенсивности резонансов, возникающих от отдельных оболочечных мод. В этой работе описывается использование этих свойств структур НВРБ, а также предлагается метод измерения двух физических величин, нечувствительных к изменениям температуры. Для этого был использован стенд для характеристики НВРБ (рис. 11) путем проведения лабораторных испытаний ранее изготовленных конструкций с углом наклона 2° . Линейно-поляризованный свет был соединен через линзы $O1$, $O2$ и полуволновую пластину с оптическим волокном НВРБ. Сегмент волокна, на котором была записана НВРБ, был сформирован в петлю, которая была согнута посредством движения одного конца волокна.

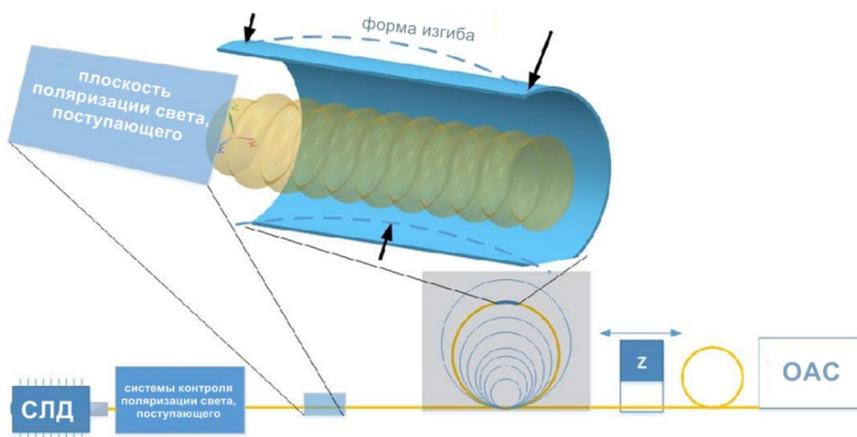


Рис. 12 Схема системы изгиба волоконно-оптического сечения с НВРБ

Разработанная таким образом измерительная система позволяет измерять радиус изгиба волокна, но может также использоваться для измерения смещения одного конца волокна. Увеличение величины смещения подвижного конца волокна уменьшает радиус изгиба, что вызывает изменение спектральных характеристик НВРБ. Этот спектр регистрируется с использованием оптического анализатора спектра ОАС с разрешением 0,02 нм. Представленная измерительная система также позволяет контролировать угол поляризации плоскости входного света, вращая полуволновую пластину, которая пропускает падающий на нее свет SLD, изменяя его состояние поляризации. Установка полуволновой пластины на поворотном столе с электронным управлением позволяет контролировать его положение.

На рисунке 12 схематически показан изгиб секции волокна от НВРБ с указанным направлением изгибающих сил. В этом случае НВРБ был согнут в направлении, параллельном его плоскостям. В дальнейшей части исследования также представлены результаты измерений на изгиб в направлении, перпендикулярном плоскостям НВРБ.

Интересным явлением, которое характеризуется наклонными структурами, является изменение минимальной высоты на характеристиках передачи, соответствующих так называемым минимальный побочный эффект (ghost peak) с изменением угла наклона плоскостей решетки [4]. Это связано с тем, что с увеличением угла наклона структуры НВРБ все больше и больше энергии входного света связывается с модами более высокого порядка, и в то же время все меньше и меньше энергии задействуется в основной (брэгговской) моде. Это «переполнение» энергии при увеличении угла решетки от основной моды к оболочечным модам приводит к тому, что призрачная мода между ними также участвует в этом процессе, поскольку призрачная мода состоит из нескольких оболочечных мод низкого порядка [4]. Таким образом, это явление может быть использовано таким образом, например, чтобы максимизировать высоту пика спектральных характеристик НВРБ, соответствующих моде типа призрака, что в графическом переводе означает так называемая "Брэгговская резонансная тень". Далее описано как использовать эту моду, чтобы измерение с использованием НВРБ не зависело от температуры. Такой подход, в свою очередь, возможен, если вы используете информацию об относительном сдвиге призрачной моды относительно моды ядра. Это, в свою очередь, требует, чтобы минимальная высота, полученная из призрачной моды, была достаточно большой, например, сравнимой с минимумом, полученным из брэгговского резонанса. Если сравним высоты этих двух пиков для решетки 4^0 , то заметим, что высота пика призрачной моды примерно в 10 раз меньше высоты пика Брэгга. Такие различия могут затруднить измерение смещения обоих минимумов в измерительной системе. Чтобы минимизировать эту проблему, была создана решетка НВРБ с меньшим углом наклона плоскостей ($\theta = 2^0$), и ее спектральные характеристики представлены на рис. 13. Для сравнения тот же график также включает спектральные характеристики 4^0 НВРБ, используемые для измерений, описанных в [1].

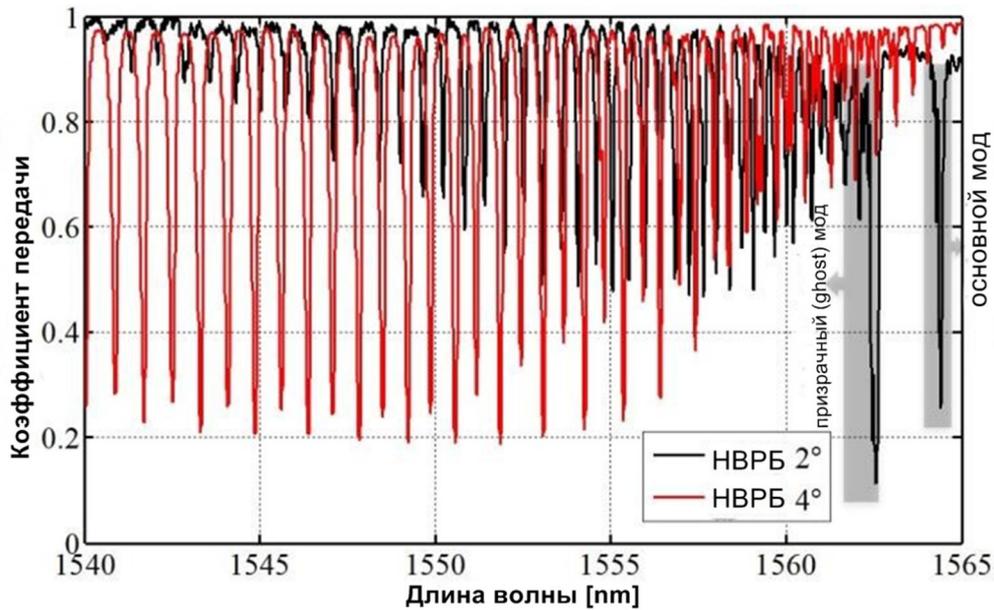


Рис. 13 Измеренные спектры пропускания НВРБ, полученные для разных углов θ .

Анализируя рисунок 13, мы видим явное увеличение минимальной высоты, соответствующее существованию призрачной моды (ghost mode) относительно структуры с наклоном 4° . Другим явлением, связанным с увеличением угла наклона сетки от 2° до 4° , является также увеличение спектральной ширины минимальной гребенки, получаемой из оболочечных мод. Это связано с тем, что для структуры с наклоном 4° число оболочечных мод, с которыми она распространяет свет, больше, чем в случае НВРБ 2° . В результате этого явления спектральный диапазон, охватывающий спектральные характеристики НВРБ 2° (в данном случае между 1540 и 1565 нм), слишком узок, чтобы представлять весь спектр НВРБ 4° . На рисунке 14 суммированы спектры НВРБ для диапазона, который позволяет сравнивать высоты минимумов от моды двух структур с разными углами. Как видите, уменьшение угла с 4° до 2° приводит к почти 100% увеличению высоты пика, связанного с брэгговским отражением. Тем не менее, самое большое изменение призрачной моды. Коэффициент пропускания, соответствующий длине волны этой моды, уменьшается даже на 1800%, что наблюдается на спектральных характеристиках как увеличение высоты минимума, соответствующего призрачной моде (рис. 14 - маркировка, выполненная зеленым цветом). Как видно, для структуры с углом $\theta = 2^\circ$ высота пика-призрака даже превышает пик брэгговского резонанса. Объяснение этого явления чрезвычайно интересно, например, из-за возможностей его использования в измерительных системах. Ну, на самом деле минимум, соответствующий типу призрака, представляет несколько мод, которые «составляют» эти моды. выражение

«Сгиб» означает, что соответствующие длины волн одинаковы, и по спектральным характеристикам минимумы, возникающие из таких мод, видны как один минимум.

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

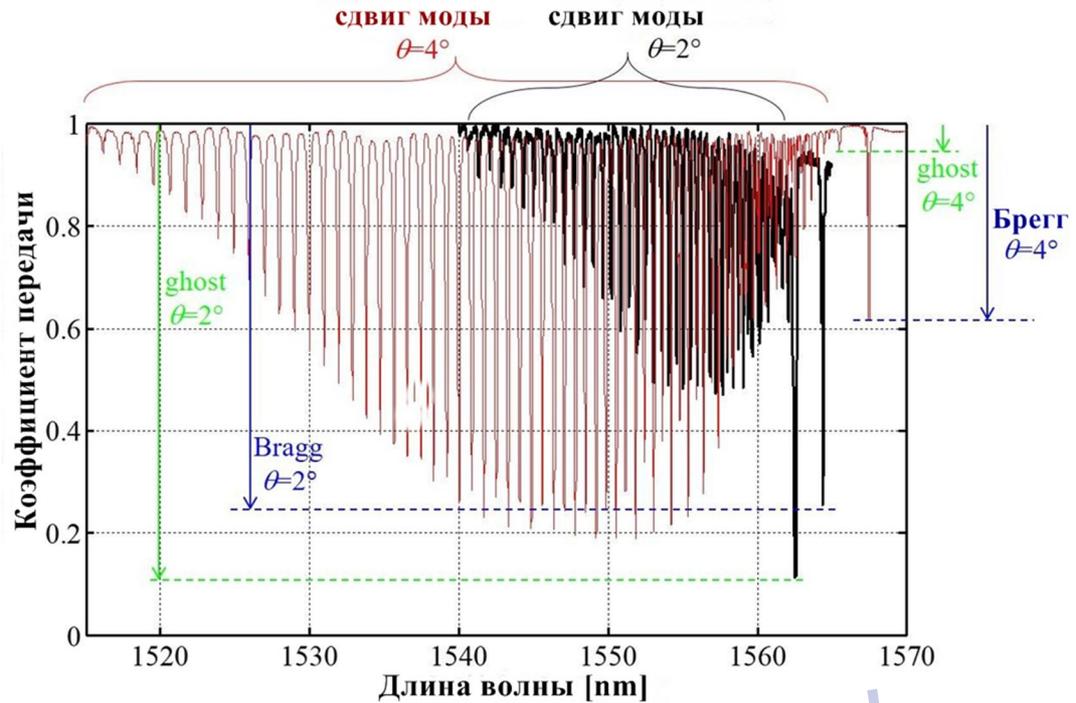


Рис. 14. Сравнение спектральных характеристик НВРБ с углами: $\theta = 2^\circ$ (красная линия) и $\theta = 4^\circ$ (черная линия)

Призрачные моды являются модами самого низкого порядка, и они составляют группу так называемых сильно управляемых оболочечных мод (strongly guided cladding modes). На моды этого типа в основном влияет изменение параметров волокна (например, постоянных распространения) на границе оболочки ядра. С другой стороны, изменение параметров волокна вблизи внешнего диаметра оболочки (на границе оптического волокна) практически не влияет на расположение и форму пиков (и в принципе один пик - призрак), полученных из этих мод, обнаруженных по спектральным характеристикам [19]. Это связано с тем, что резонансы, полученные из этих мод, всегда (независимо от угла структуры) вблизи длин волн, соответствующих резонансу ядра. Обычно это расстояние до нескольких нм от брэгговского резонанса (более короткая длина волны). Эти моды, как упоминалось ранее, создают единый резонанс, который спектрально похож на моду ядра и находится близко к моде ядра.

Рисунок 15 суммирует характеристики передачи НВРБ: не согнут и согнут с другим радиусом согласно диаграмме на рисунке 12.

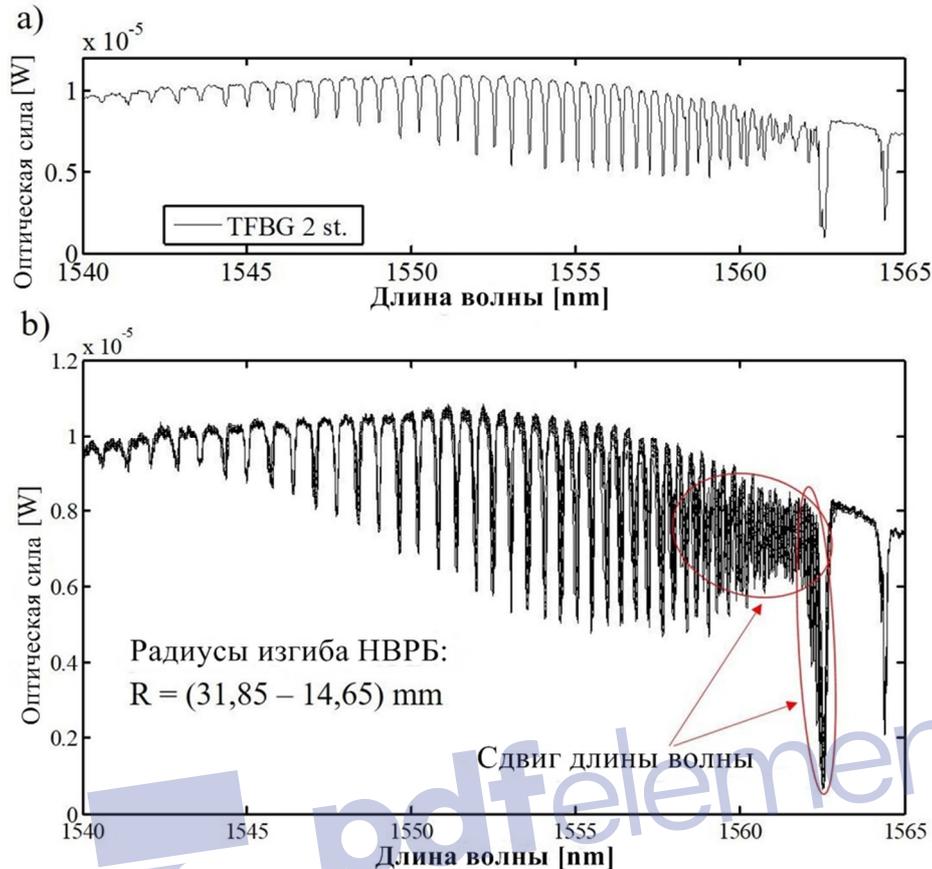


Рис. 15 Зависимость оптической мощности, передаваемой через структуру НВРБ $\theta = 2^\circ$: а) несгибаемая конструкция, б) структура НВРБ с различными радиусами изгиба

Индивидуальные спектральные характеристики для различных радиусов изгиба анализируемого волокна, приводящего к изгибу НВРБ, были специально нарисованы линиями одного и того же цвета. В рассматриваемом случае изгиба в плоскости, параллельной плоскостям НВРБ, видно размытие спектральных характеристик для длин волн-призраков и мод низшего порядка, расположенных на стороне более коротких волн относительно прозрачных мод. Это размытие указывает на сдвиг отдельных пиков, который связан с изменением длины волны мод из-за изгиба структуры НВРБ. На рисунке 15 области наибольшего смещения спектральных характеристик отмечены красными линиями. Более детальный анализ этой спектральной области позволяет выбрать оболочечные моды НВРБ, которые наиболее сильно реагируют на изгиб структуры. Измерения, представленные на рис. 15, относятся к случаю, когда изгибающая сила параллельна оси u согласно рис. 16 а).

Учитывая взаимные направления изгибающей силы F и оси u структуры НВРБ, были определены два типа изгиба: параллельный изгиб (сила F , действующая параллельно оси u) и перпендикулярный изгиб (сила F , действующая перпендикулярно оси u), как показано на рисунке 16.

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

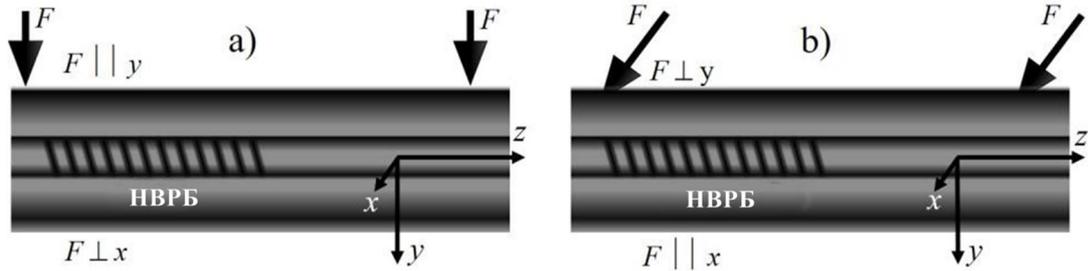


Рис. 16 Изгиб волокна с помощью НВРБ: а) сила F , параллельная оси y , б) сила F , перпендикулярная оси y

Изменения спектральных характеристик НВРБ для случая параллельного изгиба (рис. 16а) обобщены на рисунке 17. Красная линия указывает характеристики, соответствующие конструкции без каких-либо изгибающих сил. Синие линии отмечают спектральные характеристики для изменения значений радиусов изгиба. Такая спектральная идентификация позволяет показать характер изменений оптических свойств НВРБ из-за его изгиба.

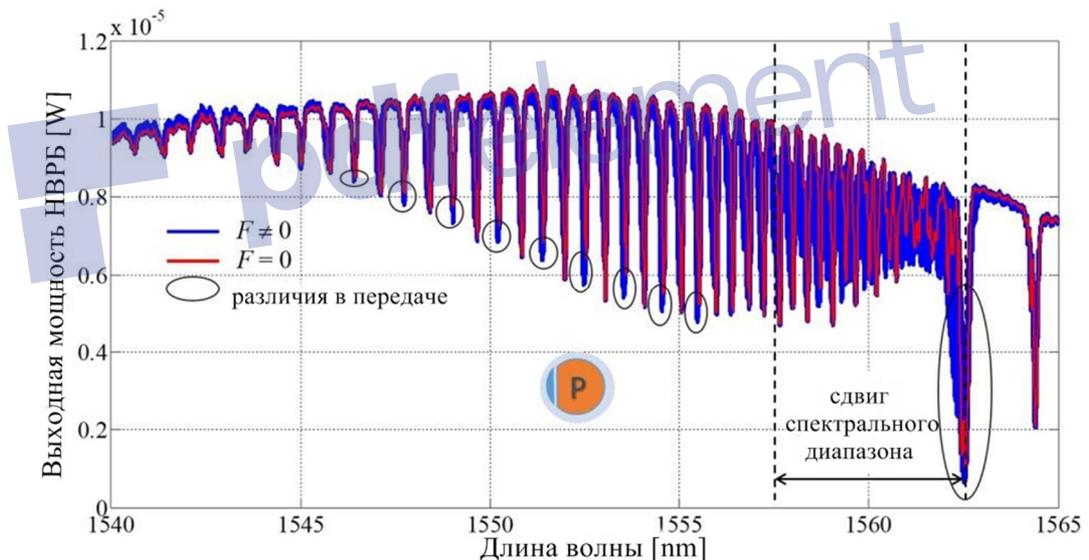


Рис. 17 Изменения спектральных характеристик из-за силы, параллельной оси y ($F||y$) НВРБ для поляризации входного света Р-типа ($\alpha = 0^0$)

На рисунке 17 показана спектральная область, в которой происходит сдвиг длины волны из-за изгиба структуры НВРБ. Как вы можете видеть, изменение длины волны, вызванное изгибом НВРБ, имеет место для мод низкого порядка, включая моды, принадлежащие к призрачной моде. Только часть спектральных характеристик смещена. Интересным явлением также является изменение мощности некоторых пиков, полученных из оболочечных мод высшего порядка. Места, где разница в количестве минимумов, соответствующих стилям оболочек, превышает 10%, отмечены сплошными эллиптическими линиями на рисунке 17. Существует

определенная область спектра, в которой каждый второй пик в спектральных характеристиках меняет свою высоту. Это связано с изменением затухания только определенных типов мод.

Чтобы проиллюстрировать взаимное пространственное положение плоскостей поляризации входного света относительно оси системы координат и плоскостей НВРБ, вся система для трех рассмотренных случаев показана на рисунке 18. Угол, который для каждого рассматриваемого случая создает плоскость поляризации входного света (отмечена на рис. 18 синим цветом) с плоскостью, определяемой осями y - z (отмечен на рис. 18 красным), также отмечен. Этот угол обозначен как α , но для трех рассмотренных случаев (рис. 18а-18с) он имеет другое значение. На рисунке 18а показан случай, когда обе плоскости находятся под одним и тем же углом ($\alpha = 0^\circ$), что соответствует поляризации входного света типа Р, плоскость которого параллельна оси Y . Где эти плоскости находятся под углом $\alpha = 45^\circ$ мы имеем дело с непрямой поляризацией между Р и S.

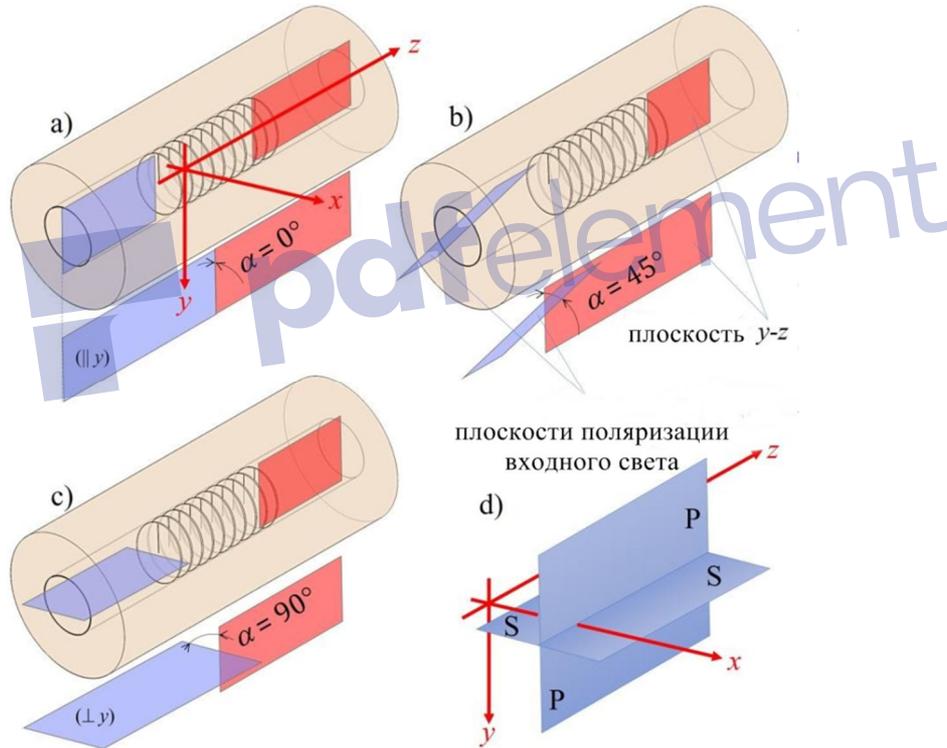


Рис. 18 Расположение входных плоскостей поляризации света: а) поляризация в соответствии с состоянием Р, б) промежуточная поляризация между состоянием Р и S, с) поляризация в соответствии с состоянием S, d) взаимное расположение плоскостей поляризации Р и S в системе координат x, y, z .

Поэтому - согласно ранее введенной маркировке - это место поляризации входного света было названо S|P (рис. 19). Однако если обе плоскости находятся под углом $\alpha = 90^\circ$, это будет означать, что плоскость поляризации входного света имеет ориентацию S-типа относительно волокна из НВРБ (рис. 18с). Для ясности на

Секция 3. Технологии искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы управления.

Речевые технологии и компьютерная лингвистика. Распознавание образов и обработка изображений. Биоинформатика и биометрические системы. Человеко-машинное взаимодействие. Машинное обучение. Интеллектуальные робототехнические системы

рисунке 18d показана взаимная ориентация обеих плоскостей поляризации в декартовой пространственной системе x, y, z . Характеристики, показанные на рис. 17, были измерены для первого рассматриваемого случая - рис. 18a (положение поляризационного типа P, изгибающая сила F , действующая по оси y - так называемый параллельный изгиб $F \parallel y$).

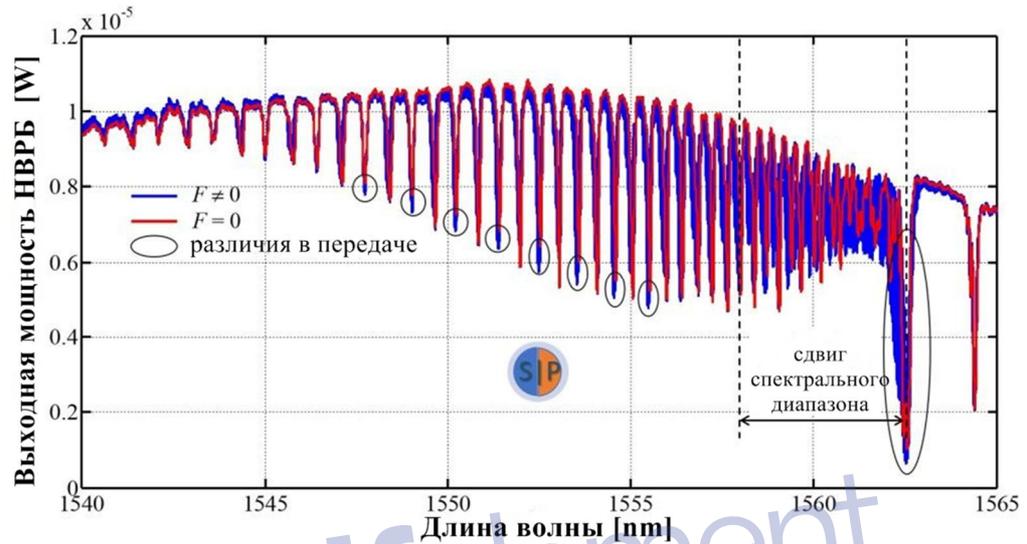


Рис. 19 Изменения спектральных характеристик из-за силы, параллельной оси y ($F \parallel y$) НВРБ для поляризации входного света в соответствии с состоянием S/P ($\alpha = 45^\circ$)

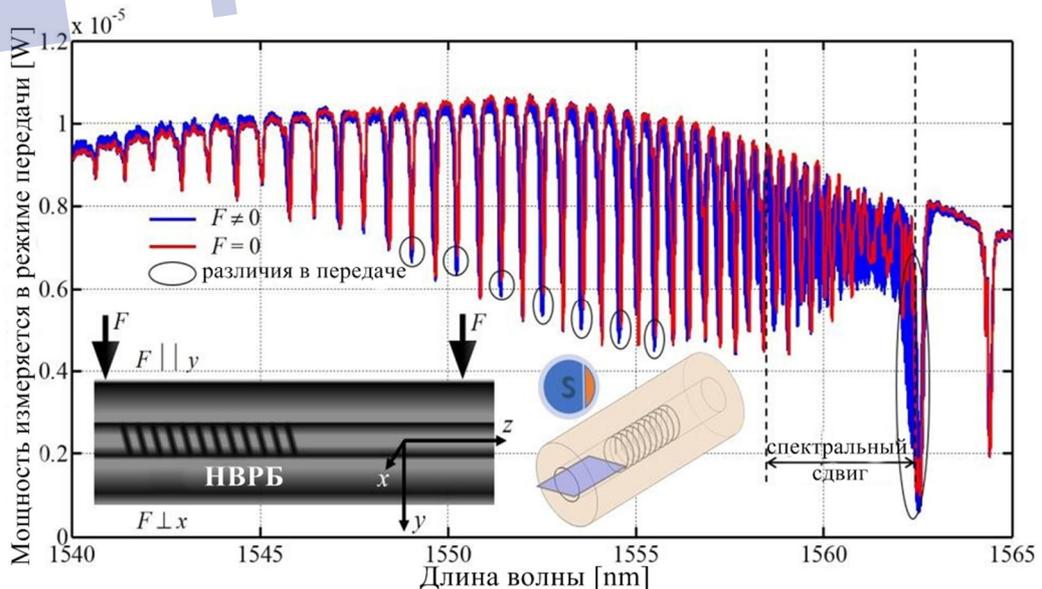


Рис. 20 Изменения спектральных характеристик из-за параллельного изгиба структуры ($F \parallel y$) НВРБ для поляризации входного света в соответствии с состоянием S ($\alpha = 90^\circ$)

Анализ результатов, представленных на рисунках 17, 19 и 20, позволяет наблюдать сходство изменений передачи НВРБ из-за изгиба конструкции. Для всех случаев угла наклона плоскости поляризации входного света (поляризации типа P, S|P и S) отчетливо наблюдается сдвиг длины волны мод НВРБ, расположенных в окрестности призрачной моды. Область наибольшего сдвига по спектральным характеристикам относится ко всем рассмотренным случаям между 1557 нм и призрачным модам, которая для структуры с углом $\theta = 2^0$ лежит на длине волны 1562,5 нм. Эта область длины волны смещается наиболее сильно в ответ на изгиб волокна. Анализ различий в значениях этого сдвига возможен путем выполнения спектральных измерений вокруг призрачных мод. На рисунках 17, 19 и 20 также показано изменение амплитуды выбранных оболочечных мод из-за изгиба волокна для трех различных положений плоскостей поляризации входного света (P, S|P и S). На чертежах показаны эллиптические линии с различиями в прохождении этих оболочечных мод, изменение которых из-за изгиба превышает 10%. Оказывается, что в зависимости от положения плоскости поляризации входного света количество мод, для которых происходит такое изменение, варьируется. Анализируемая область изменения этих режимов была ограничена диапазоном от 1540 нм до 1557 нм. Нижний предел определяется шириной полосы пропускания, создаваемой НВРБ ($\theta = 2^0$), поскольку ниже длины волны, равной 1540 нм, больше нет минимумов, возникающих из мантийных мод более высокого порядка. А верхний предел диапазона определяется возникающим и описываемым явлением спектрального сдвига, который начинается как раз на длине волны 1557 нм. Для прикладных целей эти две области изменения спектра НРБ под воздействием изгиба были выделены. В первой области (1540–1557 нм) анализируется изменение амплитуды отдельных мантийных мод, а во второй области (1557–1562,5 нм) - сдвиг длины волны отдельных оболочечных мод. По практическим причинам легче измерить отдельно смещение и изменение амплитуды отдельных пиков НВРБ. Такие измерения затруднены, если в результате изменения измеряемой величины (в анализируемом случае - радиуса изгиба) оба эти оптических параметра мод НВРБ изменяются.

При рассмотрении расположения плоскости поляризации P-типа в анализируемом спектральном диапазоне (1540–1557 нм) можно выделить 9 различных мод, изменение амплитуды которых превышает 10% (рис. 17). Если мы изменим угол поляризации, при котором поляризованный свет будет вводиться НВРБ, в положение S|P, то число оболочек, для которых изменение амплитуды превышает предполагаемый порог, будет равно 8. Если, с другой стороны, положение плоскости поляризации света установлено в соответствии с состоянием S-типа, количество минимумов на спектральных характеристиках, амплитуда которого изменится на 10%, составит всего 7. Уменьшение количества изменяющихся минимумов также уменьшает амплитуду изменений в отдельных модах. Это важный вывод с точки зрения возможности проведения практических изгибных измерений с использованием структуры НВРБ. Как вы можете видеть, изгиб конструкции до радиуса изгиба 14,65 мм не влияет на скорость передачи оболочечных мод, вызывая только смещение пиков из оболочечных мод в сторону более длинных волн.

Заключение. В статье представлен метод и система для параллельного измерения угла поляризации входного света и изгиба оптического волокна с помощью наклонной волоконной решетки Брэгга, анализируется какие спектральные параметры датчика следует выбирать и как получить минимальную температурную чувствительность и в то же время чувствительность к поляризации света и изгибу волокна. Помимо нечувствительности к температуре, основным преимуществом предлагаемого решения является его универсальность. Диапазон измерения и разрешение можно регулировать в зависимости от конкретного применения.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Оптоэлектроники факультета электротехники и компьютерных наук Люблинского технического университета в рамках проекта ГФ №АР05132778 «Исследование и разработка системы интеррогации сигналов с оптоволоконным рефрактометром с использованием телекоммуникационных сетей» ИИВТ КН МОН РК.

Литература

1. P. Kisała. Światłowodowe struktury periodyczne o pochylonej modulacji współczynnika załamania: właściwości i zastosowania. Monografie – Politechnika Lubelska, pp. 81 . Lublin 2019.
2. Chen Ch., Laronche A., Bouwmans G., Bigot L., Quiquempois Y., Albert J., Sensitivity of photonic crystal fiber modes to temperature, strain and external refractive index, *Optics Express* 16(13), 9645-9653 (2008). doi: 10.1364/OE.16.009645.
3. Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y., Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications, *Photonic Sensors* 1(1), 6-30 (2011). doi: 10.1007/s13320-010-0016-x.
4. Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C., Tilted fiber Bragg grating sensors, *Laser & Photonics Reviews* 7(1), 83-108 (2013). doi: 10.1002/lpor.201100039.
5. Guo T., Liu F., Guan B.-O., Albert J., Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors, *Optics & Laser Technology* 78, 19-33 (2016). doi: dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.10.007.
6. Laffont G., Ferdinand P., Tilt short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry, *Meas. Sci. Technol.* 12, 765-770 (2001). doi: 10.1088/0957-0233/12/7/302.
7. Tan D., Sharafudeen K. N., Yue Y., Qiu J., Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science* 76, 154-228 (2016). doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.09.002.
8. Jin L., Wang Z., Fang Q., Liu Y., Liu B., Kai G., Dong X., Spectral characteristics and bend response of Bragg gratings inscribed in all-solid bandgap fibers, *Optics Express* 15(23), 15555-15565 (2007). doi:10.1364/OE.15.015555.
9. Swanson A. J., Raymond S. G., Janssens S., Breukers R. D., Bhuiyan M. D. H., Lovell-Smith J. W., Waterland M. R., Development of novel polymer coating for FBG based relative humidity sensing. *Sensors and Actuators A* 249, 217-224 (2016). doi: 10.1016/j.sna.2016.08.034.
10. Shao L. Y., Albert J., Compact fiber-optic vector inclinometer. *Optics Letters* 35(7), 1034-1036 (2010). doi: 10.1364/OL.35.001034.

11. Jin Y. X., Chan C. C., Dong X. Y., Zhang Y. F., Temperature-independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber, *Optics Communications* 282(19), 3905-3907 (2009). doi: 10.1016/j.optcom.2009.06.058.
12. Amanzadeh M., Aminossadati S. M., Kizil M. S., Rakić A. D., *Measurement* 128, 119-137 (2018). doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.034.
13. Dong X., Liu Y., Shao L. Y., Kang J., Zhao Ch. L., Temperature-Independent Fiber Bending Sensor Based on a Superimposed Grating, *IEEE Sens. J.* 11(11), 3019-3022 (2011). doi: 10.1109/JSEN.2011.2157124.
14. An J. L., Liu T., Ji Y. G., Fiber optic vibration sensor based on the tilted fiber bragg grating. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013, 346-349 (2013). doi: 10.1155/2013/545013.
15. Shen C., Lou W., Shentu F., Wang Y., Tong L., Tilted fiber Bragg gratings and its fiber humidity and twist sensing applications, 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Hangzhou, 1-3 (2016). doi: 10.1109/ICOON.2016.7875786.
16. Jiang Q., Hu D., Microdisplacement sensor based on tilted fiber Bragg grating transversal load effect, *IEEE Sens. J.* 11(9), 1776-1779 (2011). doi: 10.1109/JSEN.2010.2103399.
17. Baek S., Jeong Y., Lee B., Characteristics of short-period blazed fiber Bragg gratings for use as macrobending sensors, *Applied Optics* 41(4), 631-636 (2002). doi: 10.1364/AO.41.000631.
18. Liu B., Miao Y., Zhou H., Zhao Q., Research on Pure Bending characteristic of tilted fiber Bragg grating, in *IEEE Optical Fiber Sensors Conference*, 1-4 (2008). doi: 10.1109/APOS.2008.5226323.
19. Guo T., Chen Ch., Laronche A., Albert J., Power-Referenced and Temperature-Calibrated Optical Fiber Refractometer. *IEEE Photonics Technology Letters* 20(8), 635-637 (2008). doi: 10.1109/LPT.2008.919457.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ НОВОГО BIO-INSPIRED КОНТИНУУМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С РАЗЛИЧНЫМ ДИЗАЙНОМ

Ешмухаметов А.^{1,2}, Бурибаев Ж.^{3,4}, Амиргалиев Е.^{3,4}
yeshmukhametov.coba@gmail.com, zholdas_87@mail.ru, amir_ed@mail.ru

¹Университет Токай, Высшая школа науки и технологий, Япония

²Сатбаев Университет, Казахстан

³Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан

⁴Институт информационно-вычислительных технологий КН МОН РК,
 Казахстан

Аннотация. Стремительный рост робототехники в индустрии требует роботов с исключительными рабочими возможностями, такими как работа в

Бакиева А.М., Батура Т.В.	ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИТОРИЧЕСКИХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ “TEXTSUMMARIZER”	192
Барахнин В.Б., Кожемякина О.Ю., Пастушков И.С.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕНЕНИЯ ПОРЯДКА СЛОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТОВ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ	198
Барахнин В.Б., Мухамедиев Р.И., Мусабаев Р.Р., Кожемякина О.Ю., Исаева А., Кучин Я.И., Мурзахметов С.Б., Якунин К.О.	МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ НОВОСТЕЙ В МЕДИАПРОСТРАНСТВЕ	205
Бектуған Б.И., Нурахов Е.С., Иманкулов Т.С., Ахмед-Заки Д.Ж.	РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ В ПОМЕЩЕНИИ	219
Бобров Л.К., Медянкина И.П., Родионова З.В., Буранбаева А.И., Утепбергенов И.Т.	ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КАЗАХСТАНЕ	227
Бобров Л.К., Медянкина И.П., Родионова З.В., Михайленко Н.А., Утепбергенов И.Т.	ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ИННОВАЦИЙ: РЕСУРСЫ БИЗНЕС-ИНФОРМАЦИИ	238
Бостанбеков К.А., Нурсейтов Д.Б., Курманходжаев Д.Б., Алимова А.Н.	ГЕНЕРАЦИЯ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ ТЕКСТОВ	247
Вуйцик В., Кисала П., Калижанова А.У., Козбакова А.Х., Айткулов Ж.С., Оразбеков Ж., Кашаганова Г.Б., Арсланова С.З.,	СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ НАКЛОННЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА	253
Ешмухаметов А., Бурибаев Ж., Амиргалиев Е.	МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ НОВОГО BIO- INSPIRED КОНТИНУУМ РОБОТА- МАНИПУЛЯТОРА С РАЗЛИЧНЫМ ДИЗАЙНОМ	273