

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.42>

УДК: 535.324.1; 535.325; 53.082.5; 681.785.223

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК,
ЗАПИСАННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ,
ДЛЯ ЗАДАЧ РЕФРАКТОМЕТРИИ**

К.А. Томышев, Е.И. Долженко, О.В. Бутов

**ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7**

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2025 г.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования спектральных особенностей волоконных брэгговских решеток, записанных при помощи импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности. Было показано, что такие решетки эффективно перенаправляют энергию излучения основной моды в оболочку световода благодаря особенностям внутренней структуры решетки, обусловленным физикой процесса записи. Это приводит к возникновению мод оболочки волоконного световода, параметры которых зависят от показателя преломления внешней среды, что составляет основу измерительного принципа волоконных рефрактометров. В результате исследования были обнаружены уникальные свойства спектральных характеристик таких решеток, выгодно отличающие их от существующих решений, таких как наклонные брэгговские решетки. Наибольший интерес представляет значительное увеличение ширины спектральной картины, что приводит к расширению диапазона измеряемых значений показателя преломления внешней среды (от 1 до 1,4). Отдельного

внимания заслуживает высокая степень линейности отклика сенсора, продемонстрированная на всем диапазоне, и возможность измерения показателя преломления газов под большим давлением, показанная на примере азота. Полученные результаты наглядно демонстрируют преимущества таких решеток для задач волоконной рефрактометрии.

Ключевые слова: фемтосекундная запись, брэгговская решетка, волоконный рефрактометр.

Финансирование: Работа была выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Автор для переписки: Долженко Егор Игоревич, dolzhenko@phystech.edu

Введение

Волоконно-оптические технологии – область современной науки и техники, стремительно развивающаяся благодаря своей универсальности и значительным преимуществам перед классическими электронными устройствами. Одним из наиболее перспективных направлений в рамках волоконной оптики выступает волоконная сенсорика, характеризующаяся многообразием методов и подходов. Широко используемым семейством волоконных сенсоров являются устройства, основанные на эффекте вытекающего поля, подразумевающим, что часть распространяющегося по волокну электромагнитного излучения, взаимодействует с внешним окружением. В случае стандартного телекоммуникационного оптического волокна сигнал локализован в сердцевине световода, что исключает взаимодействие с внешней средой. По этой причине конструкции большинства волоконно-оптических датчиков на основе вытекающего поля требуют изменения геометрической формы волокна или внедрения специальных внутриволоконных элементов. Один из способов заключается в уменьшении толщины оболочки волокна или удалении участка оболочки для сокращения расстояния между сердцевиной и внешней средой. Примерами таких решений служат сварные волоконные вставки (со смещением относительно оси волокна

или сердцевинами различного диаметра [1]), термические конусообразные перетяжки [2], а также удаление оболочки световода химическими или механическими методами [3]. Для оптимизации характеристик и увеличения чувствительности таких сенсоров применяют дополнительное покрытие тонким слоем металла, позволяющее наблюдать явление поверхностного плазмонного резонанса, частота которого зависит от показателя преломления (ПП) внешней среды [4, 5]. Другие подходы включают применение полупроводниковых или диэлектрических покрытий, создающих условия возникновения резонанса затухающей моды [6]. Недостатком указанных методик является ухудшение прочности волокна из-за нарушения структуры волокна, что вызывает необходимость дополнительной защиты чувствительных зон. Кроме того, изготовление таких сенсоров технологически сложно, а их разрешающая способность ограничена. Альтернативой служит использование внутриволоконных структур, возбуждающих оболочечные моды [7, 8]. Как правило, в качестве таких структур выступают наклонные волоконные брэгговские решетки, представляющие собой периодические модуляции показателя преломления сердцевины световода, ориентированные под заданным углом относительно сечения волокна [9-11].

Преобладающим методом создания волоконных брэгговских решеток является интерферометрическая запись. В сердцевине оптического волокна формируется периодическая интерференционная картина при помощи интерференционных схем или фазовых масок. Процедуру экспонирования осуществляют преимущественно ультрафиолетовым лазерным излучением в волокне с фоточувствительной сердцевиной. Облученные участки испытывают долговременное фотоиндуцированное изменение эффективного показателя преломления, приводящее к формированию искомой брэгговской структуры [12, 13]. При создании наклонных брэгговских решеток интерференционную картину проецируют на сердцевину волокна под определенным углом. Отличием таких решеток от классических является возбуждение дискретного набора мод

оболочки, обуславливающее появление в спектре пропускания характерных спектральных минимумов и максимумов.

В современной научной литературе значительное внимание уделяется технологиям поточечной записи волоконных брэгговских решеток путем непосредственного воздействия фемтосекундных лазерных импульсов. Причина повышенного интереса обусловлена универсальностью метода, обеспечивающего формирование структур разнообразной геометрии практически в любых типах волокон, включая образцы с низким уровнем или полным отсутствием естественной фоточувствительности. Помимо этого, решетки, созданные с использованием импульсов фемтосекундной длительности, характеризуются особыми спектральными характеристиками, перспективными для создания широкого круга сенсоров различного назначения.

В отличие от интерференционных методов формирования брэгговских решеток, направленная запись предполагает создание структур в сердцевине волокна путем фокусировки записывающего излучения в одну точку и последующего перемещения фокуса вдоль траектории записи. В облучаемой области сердцевины формируется искусственный дефект (локализованное анизотропное изменение показателя преломления материала сердцевины) [14–16]. Каждый дефект выступает в качестве отдельного структурного элемента решетки. Период решетки определяется частотой следования импульсов и скоростью перемещения волокна относительно фокуса излучения. При фемтосекундной записи формирование структуры происходит не за счет эффекта фоточувствительности, а за счет процессов многофотонного поглощения [17–19]. По сравнению с интерференционными методами, направленная запись обеспечивает большую вариативность, поскольку изменение структуры не требует перестройки установки (замены фазовой маски или изменения плеч интерферометра), а все управление прецизионными приводами перемещения осуществляется посредством программного кода.

В литературе упоминается, что волоконные брэгговские решетки, получаемые методами направленной записи фемтосекундными импульсами

(ФС-ВБР), проявляют значительное рассеяние излучения в оболочку [20]. Такие решетки, в отличие от структур, записанных интерференционными методами, не имеют четко выраженной плоской симметрии и состоят из регулярно расположенных асимметричных точечных дефектов (рисунок 1). Как правило, такая структура вызывает рассеяние излучения, распространяющегося по волокну, преимущественно для длин волн меньше брэгговской (рисунок 2).

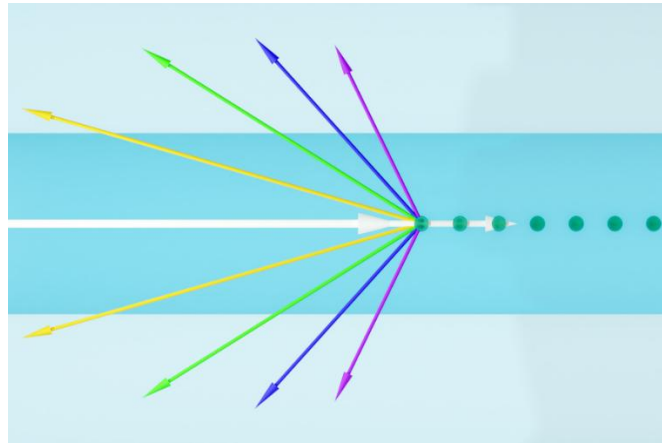


Рис. 1. Схематическое изображение рассеяния излучения на ФС-ВБР.

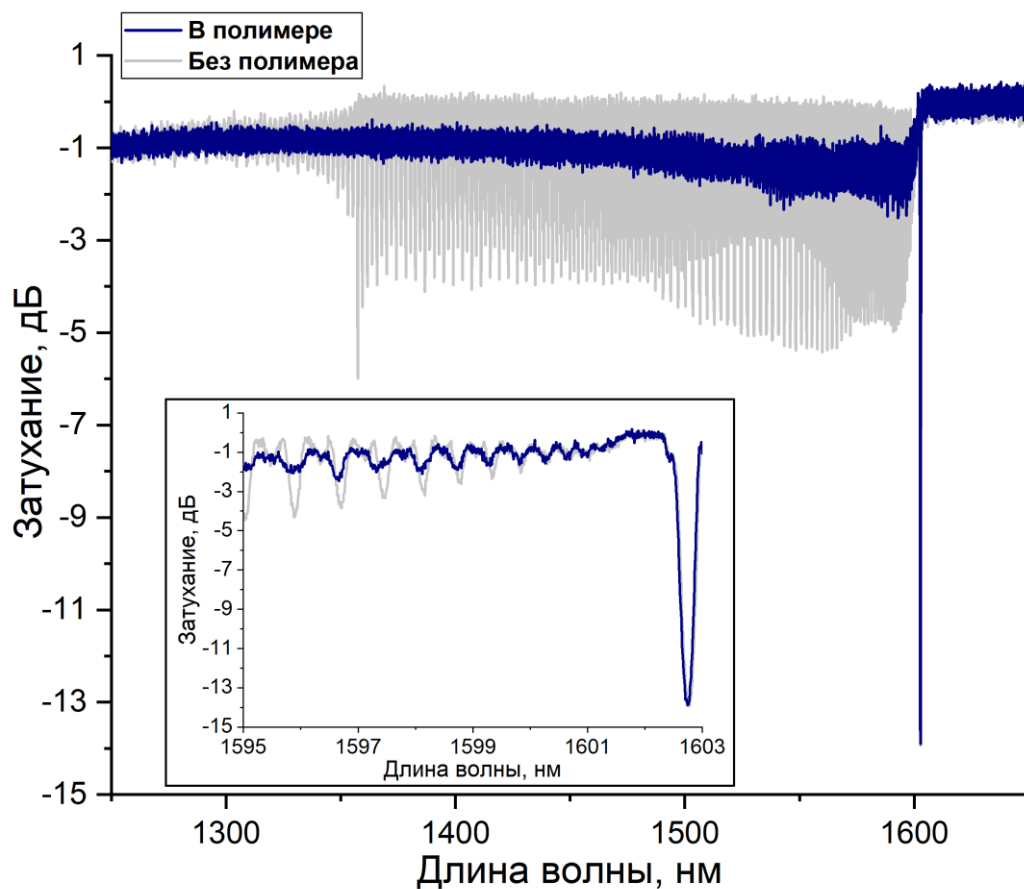


Рис. 2. Спектр пропускания ФС-ВБР на воздухе до (синий) и после (серый) удаления полимерного покрытия.

В отличие от традиционных квазиплоских структурных элементов обычных решеток, точечные неоднородности показателя преломления, характерные для ФС-ВБР, естественным образом способствуют эффективному возбуждению оболочных мод без дополнительной необходимости записи наклонных структур. Возбуждение мод оболочки проявляется особенно ярко, когда волокно с такой решеткой погружено в вещество с меньшим показателем преломления. Спектры пропускания ФС-ВБР в такой ситуации похожи на спектры наклонных решеток, записанных классическими методами – они представляют собой последовательность отчетливых максимумов и минимумов, обусловленных взаимодействием мод оболочки с основной модой сердцевины.

Спектральные характеристики ФС-ВБР существенно зависят от показателя преломления внешней среды. При его увеличении отдельные моды оболочки вытекают из волокна, поскольку условие полного внутреннего отражения на границе оболочка-внешняя среда перестает выполняться. Вследствие этого резко снижается интенсивность соответствующих спектральных пиков в коротковолновой области. Граница спектрального диапазона, при которой наблюдается такое изменение интенсивности, становится чувствительным индикатором изменения показателя преломления среды вокруг датчика. Данный эффект лежит в основе принципа работы целого класса волоконных сенсоров. Стоит отметить, что диапазон длин волн, в котором амплитуда спектральных пиков достаточно велика для эффективного наблюдения, значительно шире в случае ФС-ВБР, чем в случае наклонных решеток, и простирается в сторону более коротких длин волн [21]. Благодаря этому обстоятельству, датчики на основе ФС-ВБР перспективны для измерения веществ с низким показателем преломления, включая различные газы. Настоящая работа посвящена исследованию спектральных характеристик ФС-ВБР в зависимости от показателя преломления внешней среды. Для исследования возможностей применения полученных решеток для измерения показателей преломления газов впервые проведены и представлены измерения абсолютных значений показателя преломления азота в зависимости от давления газа.

1. Эксперимент

Экспериментальные образцы волоконных брэгговских решеток длиной 5 мм были изготовлены в стандартном телекоммуникационном оптическом волокне Corning SMF-28 методом поточечной записи. Данный метод предполагает, что структурные элементы решетки представлены единичными точечными фотоиндуцированными дефектами. Подробности процесса записи описаны в публикации [22]. Запись осуществлялась с использованием второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) иттербиевого волоконного лазера, характеризующегося импульсами длительностью 280 фс, средней энергией около 100 нДж и частотой следования 2 кГц. Перемещение точки фокуса лазера по сердцевине волокна производилось со скоростью примерно 1,17 мм/с, что приводило к формированию длины волны Брэгга в районе 1602 нм. Для точного позиционирования волокна относительно лазерного пучка применялся высокоточные трехкоординатные моторизованные подвижки Aerotech ABL1000. Конструкция экспериментальной установки обеспечивала стабильность фиксации волокна, исключая искривления и смещения. Размеры формируемых искусственно созданных точечных дефектов определялись путем анализа изображений сердцевины волокна, полученных с помощью видеокамеры. Дефекты обладали формой, приближенной к эллипсоиду вращения, с длиной малой полуоси 0,15 мкм и длиной большой полуоси 1,5 мкм. Глубина брэгговского пика на спектре пропускания составила 12 дБ.

Для исследования спектральных характеристик полученных образцов на первом этапе эксперимента волокно с решеткой очищалось от полимерного покрытия и погружалось в среды с различными показателями преломления, указанными в таблице 1. Все вещества, за исключением жидкого азота, имели комнатную температуру около 21°C. Поскольку показатель преломления жидкого азота в ближнем ИК диапазоне не представлен в литературе, его значение было получено методом экстраполяции согласно данным, имеющимся в источнике [23].

Таблица 1. Показатели преломления веществ, использованных в эксперименте.

Вещество	Показатель преломления на 1550 нм
Воздух	1,0003 [24]
Жидкий азот	1,2
Перфторгексан	1,2515 [25]
Дистиллированная вода	1,3164 [26]
Изопропанол	1,3661 [26]

Спектры пропускания экспериментальных образцов регистрировались с использованием оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370D. В качестве источника оптического сигнала использовался лабораторный источник суперконтинуума. Ключевыми характеристиками изучаемых спектров были: предельная длина волны, при которой оболочечные моды становятся вытекающими, амплитуда спектральных пиков, соответствующих оболочечным модам, а также потенциальный сдвиг длины волны Брэгга.

Данные по жидкому азоту носят приблизительный характер ввиду давности публикаций, а также существенной зависимости от температуры. Однако этой точности вполне достаточно для оценки диапазона измерений и степени линейности отклика. По результатам обработки данных выявлена зависимость длины волны отсечки от показателя преломления, т.е. проведена калибровка датчика.

На втором этапе эксперимента измерялась зависимость спектрального отклика сенсора от давления азота при комнатной температуре. Для этого волокно, содержащее исследуемую брэгговскую решетку, помещалось в камеру высокого давления. Камера заполнялась азотом под давлением 150 атмосфер. Измерения проводились как во всем спектре пропускания решетки, так и в узком спектральном диапазоне в области длины волны Брэгга для точного отслеживания механических и температурных флуктуаций. Измерения проводились при постепенном снижении давления в камере с шагом 10 атм. Показатель преломления рассчитывался по изменению длины волны отсечки с учетом рассчитанной ранее калибровочной зависимости.

2. Результаты и обсуждение

На Рисунке 3а изображены спектры пропускания образца ФС-ВБР, помещавшегося в среды с различными показателями преломления. В каждом случае положение отсечки на спектре выражено достаточно явно для высокоточного анализа автоматическими методами, такими как описанные в работах [27-29].

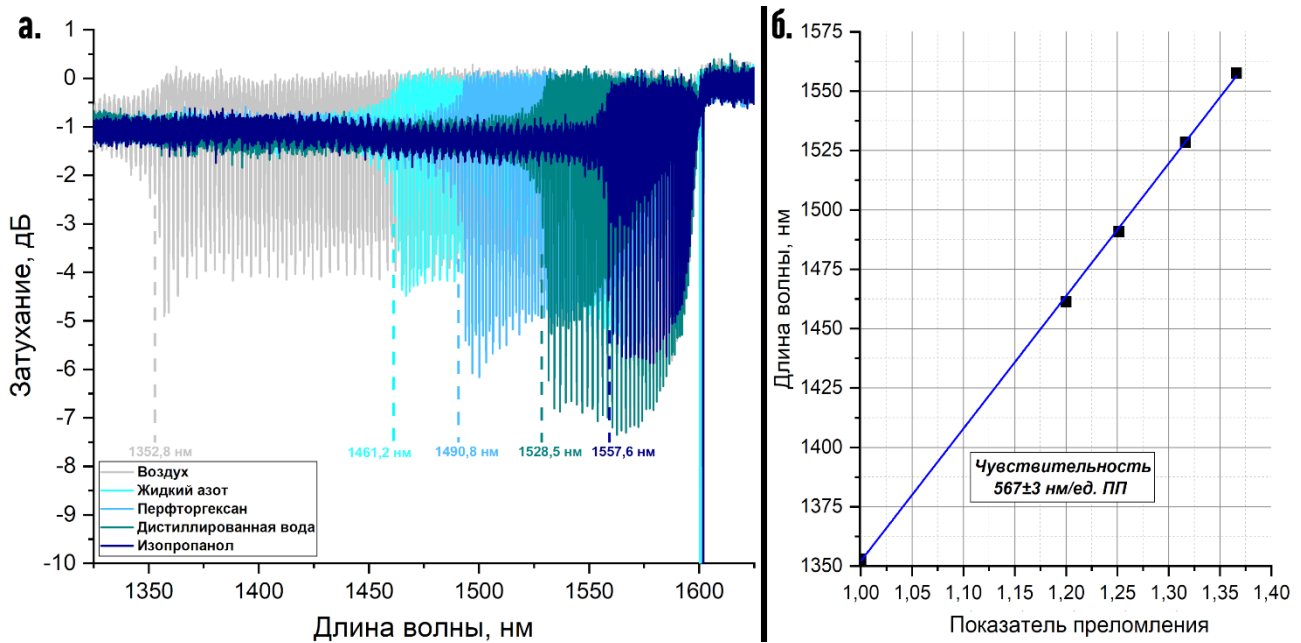


Рис. 3. а) Спектры пропускания ФС-ВБР в различных средах,
б) Зависимость длины волны отсечки от показателя преломления.

Обработка экспериментальных данных выявила несколько особенностей ФС-ВБР, важных для рефрактометрических применений. Во-первых, эффективная спектральная ширина составила около 250 нм (от ~ 1350 до ~ 1600 нм), на пол-порядка превышая соответствующий параметр УФ-НВБР, записанных при помощи фазовой маски. Эти данные дополняют выдвинутые ранее выводы касательно ВБР и НВБР, формируемых фемтосекундными методами записи [20,21]. Однако наиболее интересным феноменом оказалось то, что на всем диапазоне исследованных показателей преломления отсечка явно наблюдалась. Это позволяет отслеживать состояние сред с низкими показателями преломления (1-1,2) – для устройств на основе ВБР такая задача обычно является проблематичной.

Второй важный результат – соответствие формы огибающих спектров пропускания исследованных образцов, выдвинутой нами ранее гипотезой о двухкомпонентном механизме возбуждения оболочечных мод фемтосекундными ВБР [21]. Она гласит, что взаимодействие моды сердцевины с такой внутриволоконной структурой состоит из направленной и ненаправленной компонент. Направленная компонента связана с рассеиванием на периодической структуре, составляемой массивом точечных дефектов, а ненаправленная – с рассеянием на одиночных точечных дефектах. В случае описанных в настоящей статье ВБР, записанных по методике поточечной записи, направленная компонента отсутствует, поэтому спектральная огибающая, формируемая лишь ненаправленной компонентой, представляет собой квази-прямую.

Кроме того, большую значимость имеет обнаруженная на всем диапазоне показателей преломления зависимость длины волны отсечки от показателя преломления внешней среды. Рисунок 3б демонстрирует характер этой зависимости, близкий к линейному. Строго говоря, зависимость имеет вид полинома, однако нелинейность была оценена и оказалась пренебрежимо мала, что позволяет с высокой степенью точности пользоваться линейным приближением. Чувствительность к изменению показателя преломления была оценена как 567 ± 3 нм/ед.ПП. Для оценки был использован алгоритм расчета длины волны отсечки, описанный в [29]. Следует заметить, что температурный фактор также был принят во внимание, так как изменение температуры ведет к смещению всей спектральной картины вследствие термооптического коэффициента и температурной деформации материала.

Следующий эксперимент был проведен в качестве демонстрации возможностей ФС-ВБР по измерению сред с низкими показателями преломления, а также для изучения влияния давления газа на его показатель преломления. В качестве исследуемого вещества использовался азот. Помимо длины волны отсечки отслеживалось также положение брэгговского пика, использованного для компенсации влияния температуры и механических

деформаций на сдвиг длины волны отсечки. Результаты обработки данных представлены на Рисунке 4.

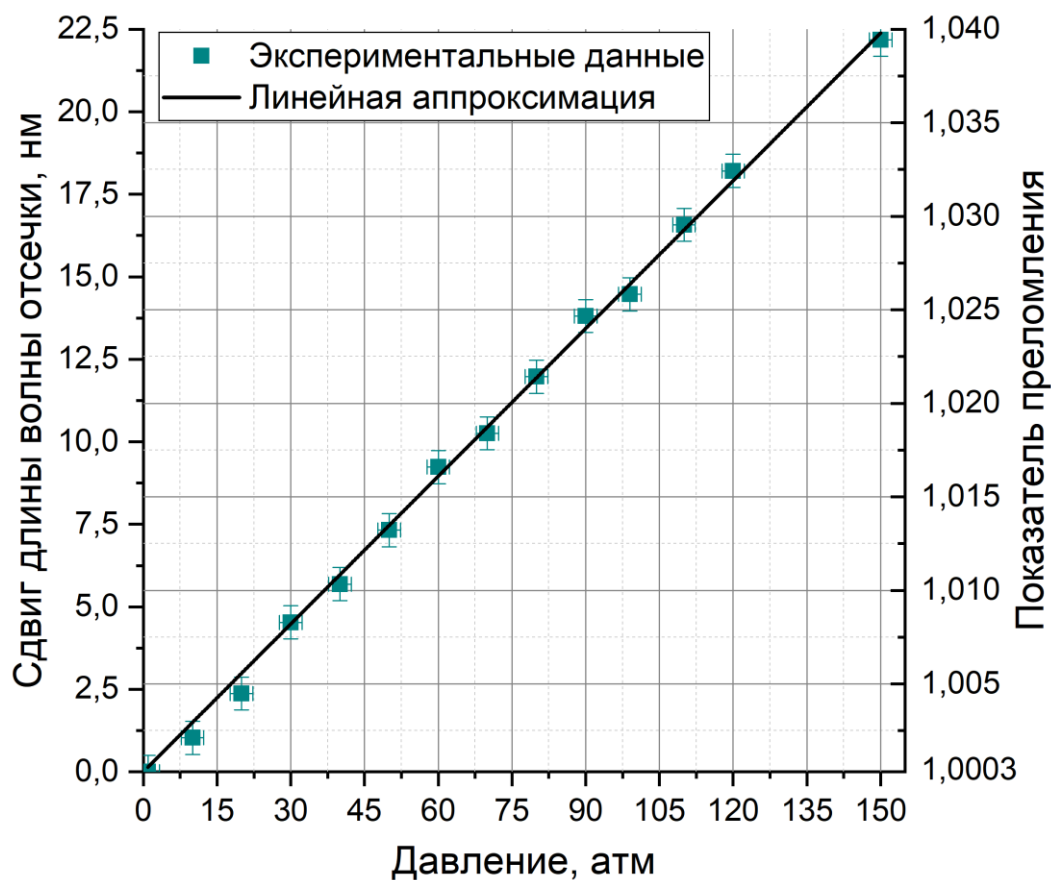


Рис. 4. Зависимость сдвига длины волны отсечки и показателя преломления азота от давления.

Сопоставление длины волны отсечки и показателя преломления производилось по результатам калибровки, проведенной в ходе первого эксперимента. Из Рисунка 5 видно, что зависимость показателя преломления азота от давления носит линейный характер с коэффициентом наклона $2,67 \times 10^{-4}$ ед.ПП/атм, а ошибка оценки чувствительности составила $0,03 \times 10^{-4}$. Общий сдвиг длины волны отсечки на измеряемом диапазоне давлений равен около 22,68 нм, при этом сдвиг брэгговского пика составляет 2,2 % от этого значения, что пренебрежимо мало. Поэтому можно с уверенностью считать, что наблюдаемый сдвиг длины волны отсечки приписывается изменению показателя преломления.

Результаты исследования наглядно показывают потенциал ФС-ВБР в роли чувствительного элемента волоконного рефрактометра. Помимо простоты изготовления (по сравнению с наклонными решетками), такие структуры обладают высокой воспроизводимостью спектральных характеристик, обладают сверхшироким диапазоном измеряемых показателей преломления (от 1 до показателя преломления оболочки волокна, т.е. около 1,45), а также близкой к линейной характеристикой чувствительности на рабочем диапазоне.

Заключение

В статье описывается экспериментальное исследование ФС-ВБР, записанных поточечным методом, и их спектральных характеристик. Главной целью работы было изучение потенциала применения таких структур в роли чувствительных элементов волоконного рефрактометра. Результаты продемонстрировали ряд важных преимуществ ФС-ВБР для задач рефрактометрии, а именно сверхширокий рабочий диапазон и линейность отклика на всем диапазоне. Кроме того, на примере азота впервые была продемонстрирована возможность измерения показателей преломления газов при помощи волоконного рефрактометра на основе ВБР без трансдьюсерного покрытия. По результатам исследования можно вынести обоснованное суждение о том, что относительная простота изготовления и выдающиеся характеристики делают ФС-ВБР одним из лучших решений для волоконной рефрактометрии.

Финансирование: Работа была выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Литература

1. Urrutia A. et al. A comprehensive review of optical fiber refractometers: Toward a standard comparative criterion // *Laser & Photonics Reviews*. – 2019. – Т. 13. – №. 11. – С. 1900094. <https://doi.org/10.1002/lpor.201900094>
2. Ahsani V. et al. Tapered fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for ultra-high sensitivity measurement of refractive index // *Sensors*. – 2019. – Т. 19. – №. 7. – С. 1652. <https://doi.org/10.3390/s19071652>
3. de Barros T.H. C. et al. D-shaped optical fiber-based refractometer for olive oil adulteration detection // *Food Control*. – 2024. – Т. 166. – С. 110741. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110741>
4. Tomyshev K.A. et al. High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – Т. 124. – №. 11. <https://doi.org/10.1063/1.5045180>
5. Dogan Y., Erdogan I. Highly sensitive MoS₂/graphene based D-shaped optical fiber SPR refractive index sensor with Ag/Au grated structure // *Optical and Quantum Electronics*. – 2023. – Т. 55. – №. 12. – С. 1066. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05315-5>
6. Sudas D.P., Kuznetsov P.I. Tin (IV) Oxide Coatings with Different Morphologies on the Surface of a Thinned Quartz Fiber for Sensor Application // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2023. – Т. 66. – №. 5. – С. 875-880. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050226>
7. Fasseaux H., Caucheteur C., Loyez M. Unraveling Plasmonic Tilted Fiber Bragg Gratings (TFBG): A Journey From “Anomalous Resonances” to Refined Refractometry // *Laser & Photonics Reviews*. – 2025. – Т. 19. – №. 4. – С. 2400833. <https://doi.org/10.1002/lpor.202400833>
8. Chiavaioli F. et al. Towards a uniform metrological assessment of grating-based optical fiber sensors: From refractometers to biosensors // *Biosensors*. – 2017. – Т. 7. – №. 2. – С. 23. <https://doi.org/10.3390/bios7020023>

9. Бутов О.В. и др. Волоконные брэгговские решетки с наклонными штрихами и сенсоры на их основе // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192. – №. 12. – С. 1385-1398. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.09.039070>
10. Albert J., Shao L.Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors // Laser & Photonics Reviews. – 2013. – Т. 7. – №. 1. – С. 83-108. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100039>
11. Долженко Е.И., Томышев К.А., Бутов О.В. Рефрактометрический детектор белков плазмы крови на основе наклонной волоконной брэгговской решетки с функциональным покрытием из антител // Журнал Радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.27>
12. Kashyap R. Fiber bragg gratings. – Academic press, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/C2009-0-16830-7>
13. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // Sensors. – 2012. – Т. 12. – №. 2. – С. 1898-1918. <https://doi.org/10.3390/s120201898>
14. Przhiiialkovskii D.V., Plyuskova N.A., Butov O.V. Formation Dynamics and Possible Nature of Regenerated Fiber Bragg Gratings Inscribed by Femtosecond Laser Radiation // IEEE Sensors Journal. – 2025. – Т. 25. – №. 1. – С. 538-544. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3494261>
15. Пржиялковский Д.В., Бутов О.В. Высокоточная запись волоконных брэгговских решеток поточечным методом // Прикладная Фотоника Applied Photonics. – 2022. – С. 50.
16. Taylor R., Hnatovsky C., Simova E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass // Laser & Photonics Reviews. – 2008. – Т. 2. – №. 1-2. – С. 26-46. <https://doi.org/10.1002/lpor.200710031>
17. Martinez A. et al. Photoinduced modifications in fiber gratings inscribed directly by infrared femtosecond irradiation // IEEE photonics technology letters. – 2006. – Т. 18. – №. 21. – С. 2266-2268. <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.884883>

18. Nishii J. et al. Ultraviolet-radiation-induced chemical reactions through one-and two-photon absorption processes in GeO₂–SiO₂ glasses // Optics Letters. – 1995. – Т. 20. – №. 10. – С. 1184-1186. <https://doi.org/10.1364/OL.20.001184>
19. Saito K., Ikushima A.J. Absorption edge in silica glass // Physical Review B. – 2000. – Т. 62. – №. 13. – С. 8584. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.8584>
20. Abdukerim N. et al. High-temperature stable fiber Bragg gratings with ultrastrong cladding modes written using the phase mask technique and an infrared femtosecond laser // Optics Letters. – 2020. – Т. 45. – №. 2. – С. 443-446. <https://doi.org/10.1364/OL.381111>
21. Tomyshev K. et al. Spectral Features of Tilted Fiber Bragg Gratings Inscribed With Femtosecond-Pulse Laser Radiation // IEEE Sensors Journal. – 2024. – Т. 24. – №. 23. – С. 38996-39001. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3473019>
22. Przhiiialkovskii D.V., Butov O.V. High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription // Results in Physics. – 2021. – Т. 30. – С. 104902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104902>
23. Johns H.E., Wilhelm J.O. The refractive indices of liquid oxygen, nitrogen, and hydrogen // Canadian Journal of Research. – 1937. – Т. 15. – №. 7. – С. 101-108. <https://doi.org/10.1139/cjr37a-013>
24. Mathar R.J. Refractive index of humid air in the infrared: model fits // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2007. – Т. 9. – №. 5. – С. 470. <http://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/9/5/008>
25. Haynes W.M. CRC Handbook of Chemistry and Physics. – 2016. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315380476>
26. Saunders J.E. et al. Refractive indices of common solvents and solutions at 1550 nm // Applied optics. – 2016. – Т. 55. – №. 4. – С. 947-953. <http://dx.doi.org/10.1364/ao.55.000947>
27. Leal-Junior A. et al. Machine learning approach for automated data analysis in tilted FBGs // Optical Fiber Technology. – 2024. – Т. 84. – С. 103756. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103756>

28. Tomyshev K. et al. Selective fiber optic TFBG-assisted biosensors featuring functional coatings // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2023. – Т. 384. – С. 133618. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133618>
29. Tomyshev K.A. et al. High-precision data analysis for TFBG-assisted refractometer // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Т. 308. – С. 112016. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112016>

Для цитирования:

Томышев К.А., Долженко Е.И., Бутов О.В. Использование брэгговских решеток, записанных импульсным лазерным излучением фемтосекундной длительности, для задач рефрактометрии // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.42>