

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.3>

УДК: 535.325, 53.082.5, 681.785.223.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОДОРОДА, АЗОТА И КРИПТОНА ПРИ РАЗЛИЧНОМ ДАВЛЕНИИ ПРИ ПОМОЩИ ВОЛОКОННОГО РЕФРАКТОМЕТРА

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

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

Статья поступила в редакцию 21 октября 2025 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты измерения показателей преломления водорода, азота и криптона при различном давлении в ближнем ИК-диапазоне (1.35 мкм). Измерения проводились при помощи волоконно-оптического рефрактометра на основе брэгговской решетки, записанной фемтосекундным лазерным излучением. Результаты продемонстрировали монотонный рост показателя преломления с увеличением давления газа с высокой степенью линейности, при этом для более крупных молекул скорость роста была выше. Полученные экспериментальные результаты заполняют энциклопедические пробелы в данных о показателях преломления газов для ближнего инфракрасного диапазона, а также подтверждают перспективность применения фемтосекундных волоконных брэгговских решеток в газовой рефрактометрии.

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, фемтосекундная запись, волоконный рефрактометр, газовая среда.

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

**Автор для переписки:** Долженко Егор Игоревич, [dolzhenko@phystech.edu](mailto:dolzhenko@phystech.edu)

## Введение

Волоконно-оптические технологии – постоянно расширяющаяся область науки и техники, претерпевающая активный рост в последнее время. Наряду с телекоммуникацией, серьезные успехи достигаются в области волоконной сенсорики. Волоконная сенсорика представлена многообразием подходов и физических принципов, что выражается в широком разнообразии устройств на их основе. Отдельную группу волоконных устройств составляют волоконные сенсоры на основе вытекающего (эванесцентного) оптического поля.

Базовый принцип работы подобных устройств основан на особенности поля распространяющегося по волноводу оптического сигнала, которое выходит за границу световода, взаимодействуя при этом со внешней средой. В результате этого взаимодействия спектр пропускания сигнала претерпевает определенные изменения, интерпретируя которые возможно с высокой точностью определить параметры внешней среды и протекающих в ней процессов [1-7]. Из множества устройств на основе вытекающего поля наибольшее распространение получили сенсоры для измерения показателя преломления – волоконные рефрактометры.

Среди широкого разнообразия конструкций и подходов к реализации эффекта вытекающего поля наиболее многообещающим выглядит применение в качестве чувствительного элемента периодических внутриволоконных структур – волоконных брэгговских решеток. Возможность взаимодействия распространяющегося по волокну оптического сигнала с внешней средой в общем случае обеспечивается расположением штрихов (структурных элементов) решетки под углом к плоскости сечения оптического волокна. Такая структура получила название наклонной волоконной брэгговской решетки (НВБР) [8]. НВБР возбуждает оболочечные моды, взаимодействующие с внешней средой, что проявляется на спектре пропускания такой структуры. Однако ее существенным недостатком с точки зрения анализа газов является ограниченный динамический диапазон работы, не позволяющий проводить измерения показателей преломления газов. Альтернативой такой структуре являются брэгговские решетки, сформированные методом прямой поточечной записи при

помощи импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности (далее ФС-ВБР) [9,10]. Принцип прямой поточечной фемтосекундной записи заключается в том, что при фокусировании записывающего излучения в сердцевине волоконного световода в фокальной точке за счет процесса многофотонного поглощения формируется локализованное изменение структуры материала сердцевины, внося изменения показателя преломления [11-13]. ФС-ВБР, получаемая в результате записи множества таких точечных дефектов вдоль сердцевины волокна с определенным заданным периодом (Рис. 1а), обладает характерным для всех ВБР свойством – отражением распространяющегося по волокну излучения в узком спектральном диапазоне, определяемом периодом брэгговской структуры.

Одной из фундаментальных особенностей ФС-ВБР, отличающей их от классических ВБР, записываемых интерференционными методами, является рассеяние части энергии излучения фундаментальной моды световода в оболочку, что наблюдается и в случае НВБР, рассмотренных выше [14-17]. В результате этого рассеяния возбуждается дискретный набор оболочечных мод, что отражается на спектре пропускания в виде периодической последовательности максимумов и минимумов, соответствующей модовому составу оболочки. Параметры мод оболочки напрямую связаны с показателем преломления внешней среды. При определенных параметрах внешней среды могут нарушаться условия полного внутреннего отражения на границе «оболочка-внешняя среда» для части оболочечных мод из более коротковолнового участка спектра, что приводит к вытеканию сигнала из оболочки световода во внешнюю среду. При этом наблюдается резкое уменьшение амплитуды спектральных пиков в коротковолновой части спектра, начиная с определенной длины волны, называемой длиной волны отсечки мод оболочки. Так как длина волны отсечки напрямую зависит от показателя преломления внешней среды, то смещение спектрального положения отсечки может быть использована в роли индикатора изменения параметров внешней среды [14,17].

ФС-ВБР обладают рядом фундаментальных преимуществ над наклонными волоконными брэгговскими решетками (НВБР), также используемыми для возбуждения мод оболочки волоконных световодов [18-20]. Среди них относительная простота записи и широчайшая вариативность параметров получаемых структур, и возможность записи в различных типах волокон (в том числе с крайне низкой фоточувствительностью). Наибольшую значимость с практической точки зрения представляет многократное увеличение диапазона показателей преломления внешней среды, доступных для измерения, а также близкая к линейной характеристика отклика на всем рабочем диапазоне [14]. Сенсорные возможности ФС-ВБР позволяют измерять показатель преломления не только жидких и твердых сред с характерными значениями показателя преломления  $>1.2$ , но и газов, чьи типичные показатели преломления лежат в диапазоне  $1.000035-1.0007$  [21,22]. В представленной работе волоконный рефрактометр на основе ФС-ВБР был использован для измерения показателей преломления водорода, азота и криптона при различных давлениях. Помимо демонстрации возможностей сенсора, целью исследования было поставлено получение практически значимых численных значений показателей преломления, так как соответствующая информация для ближнего ИК-диапазона в литературе ранее не встречалась.

## 1. Эксперимент

В качестве чувствительного элемента волоконного рефрактометра в исследовании была использована ФС-ВБР длиной 5мм, записанная в стандартном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28. Запись образца производилась по методике поточечной записи, подразумевающей, что единичным структурным элементом ВБР является одиночный фотоиндуцированный точечный дефект. Схема использованной для записи установки представлена на Рисунке 1а. Методика записи и установка, использованная для создания опытного образца, детально описаны в [23]. В качестве записывающего излучения использовалась вторая гармоника иттербиевого волоконного лазера ( $\lambda_{\text{зап}} = 532 \text{ нм}$ )

с длительностью импульса 280 фс, частотой следования импульсов 2 кГц и средней энергией импульса 100 нДж. Фокальная точка перемещалась вдоль сердцевины волокна со скоростью около 1,17 нм/с, результирующая длина волны Брэгга составила 1601,8 нм, глубина брэгговского пика – 12 дБ. Фотография участка сердцевины волокна с записанной ВБР приведен на рисунке 1б.

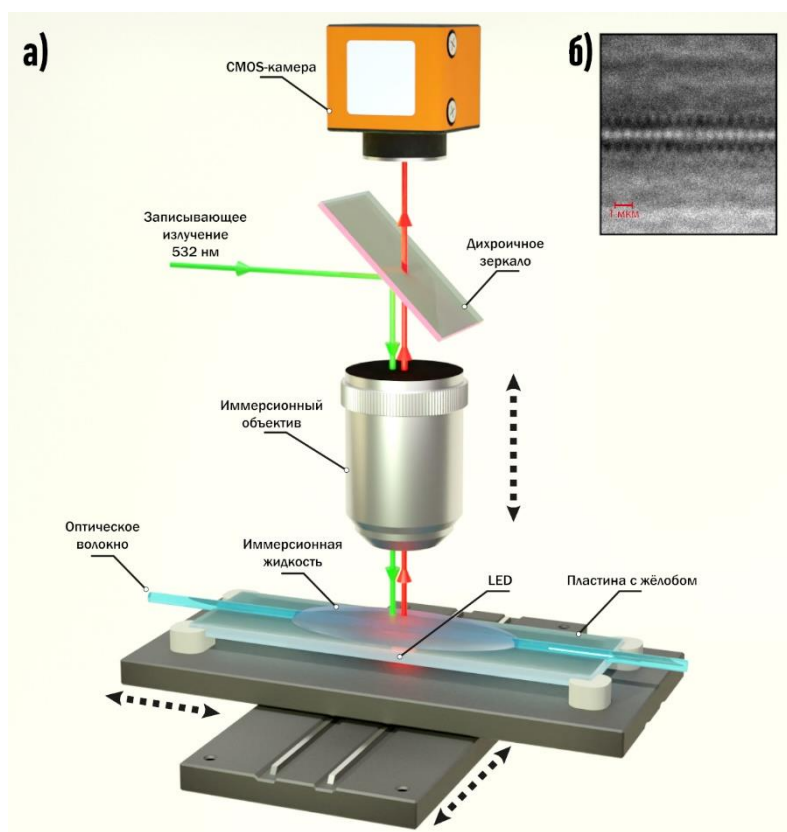


Рис. 1. а) Схема установки для записи ФС-ВБР;  
б) Снимок участка сердцевины волоконного световода с записанной в ней ФС-ВБР.

Для измерения показателей преломления газов использовалась камера высокого давления (Рисунок 2а). Схема экспериментальной установки проиллюстрирована Рисунком 2б – оптический сигнал, генерируемый источником суперконтинуума, проходил через помещенное в камеру волокно с записанной в нем ФС-ВБР и регистрировался анализатором оптического спектра Yokogawa AQ6370D. Камера заполнялась исследуемым газом, и после каждого измерения давление ступенчато снижалось. Температура окружающей среды поддерживалась на уровне 21 °С. Показатели преломления исследованных газов при нормальных условиях представлены в Таблице 1 и были взяты из научной литературы.

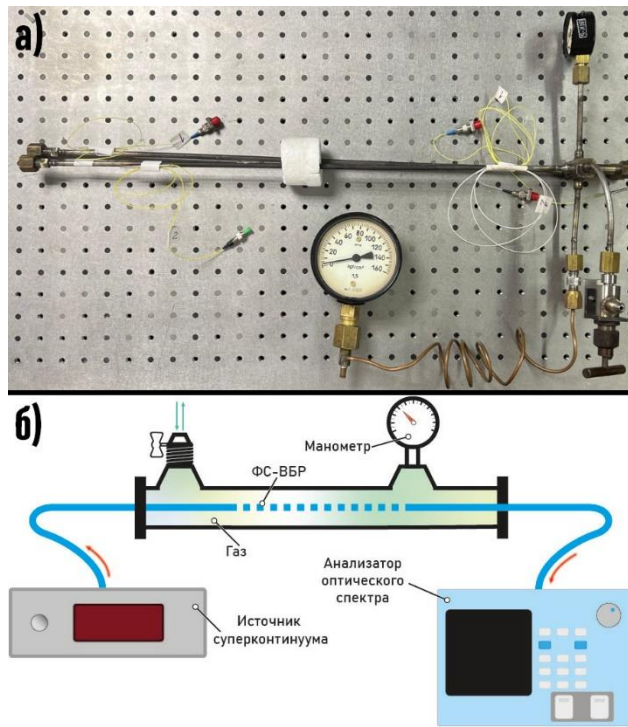


Рис. 2. а) Камера высокого давления;  
 б) Схема экспериментальной установки  
 для измерения показателей преломления газов.

Таблица 1. Показатели преломления исследованных газов  
 при нормальных условиях.

Вещество	Показатель преломления на 1350 нм
Водород, H <sub>2</sub>	1.00013617 [22]
Азот, N <sub>2</sub>	1.00027906 [24]
Криптон, Kr	1.000416439

Для криптона данные по показателю преломления на длине волны 1550 нм не фигурируют в литературе. Для приближенного расчета использовалась четырехпараметрическая формула Зельмейера [25]:

$$n_{\lambda}^2 = 1 + \left( \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} \right), \quad (1)$$

коэффициенты  $B_1, B_2, C_1, C_2$  для криптона были взяты из [25].

## 2. Результаты и обсуждение

Рисунок 3 демонстрирует типичные спектры пропускания ФС-ВБР, полученные в ходе экспериментов, на примере азота с двумя различными значениями давления. Невооруженным глазом видно заметное смещение длины

волны отсечки, однако точное определение отсечки без специализированного математического аппарата невозможно. Для вычисления положения отсечки на спектре пропускания решетки использовался автоматизированный алгоритм, описанный в работе [26].

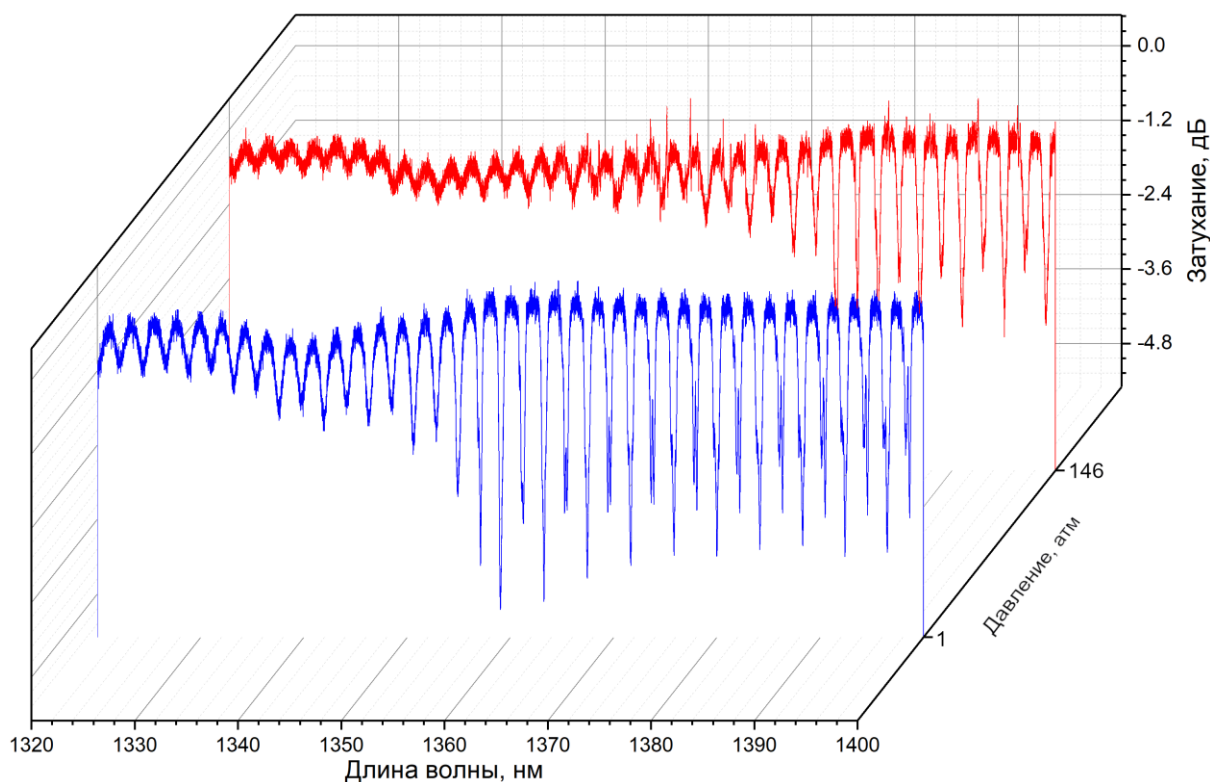


Рис. 3. Спектры пропускания ФС-ВБР в диапазоне 1320-1400 нм, помещенной в азот, при различных значениях давления газа.

Показатель преломления определялся на длине волны отсечки – 1.35-1.38 мкм. С учетом малой величины дисперсии в газе начальное значение показателя преломления было приравнено к данным, представленным в таблице 1.

Длина волны отсечки напрямую связана с показателем преломления следующим образом:

$$n_p = n_0 + \frac{\lambda_p - \lambda_0}{S}, \quad (2)$$

где  $n_p$  и  $n_0$  – показатели преломления газа при давлении  $P$  и нормальных условиях соответственно,  $\lambda_p$  и  $\lambda_0$  – длины волн отсечки при давлении  $P$  и атмосферном давлении,  $S = \frac{d\lambda_{\text{отсечки}}}{dn}$  – характеристика чувствительности сенсора.

Чувствительность сенсора определяется параметрами решетки, и составляет величину  $567 \pm 3$  нм/ед.ПП [14]. Положение отсечки в азоте при нормальном давлении определено экспериментально и составило 1353.03 нм. Показатель преломления воздуха для длины волны 1350 нм был взят из литературы и составил 1.00028 [24]. На Рисунке 4 представлены экспериментальные результаты зависимости длины волны отсечки мод оболочки ФС-ВБР от давления трех различных газов – водорода, азота и криптона, а также соответствующие значения показателей преломления. Экспериментальные точки получены с шагом 10 атм.

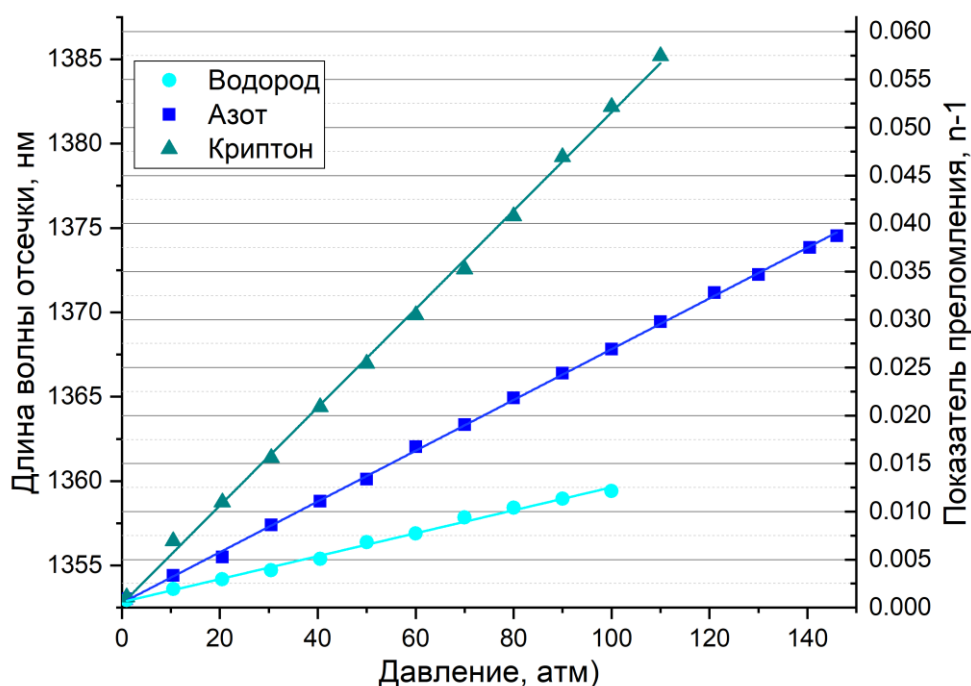


Рис. 4. Зависимость длины волны отсечки и показателя преломления от давления для водорода, азота и криптона.

Рисунок 4 наглядно демонстрирует монотонный характер зависимости показателя преломления от давления для всех трех газов. При этом отдельного внимания заслуживает высокая степень линейности. Среднеквадратичное отклонение от аппроксимационной прямой для каждого из газов не превысила значение  $0.03 \times 10^{-4}$  ед.ПП/атм. Коэффициент наклона аппроксимационной прямой для водорода составил  $1.19 \times 10^{-4}$  ед.ПП/атм, для азота –  $2.65 \times 10^{-4}$  ед.ПП/атм, для криптона –  $5.13 \times 10^{-4}$  ед.ПП/атм. Следует отметить, что коэффициент наклона

значительно отличается для изученных газов, и для более тяжелого криптона многократно выше, чем для водорода. Оценка точности определения показателей преломления составила не хуже  $5 \times 10^{-4}$  ед.ПП. Данные по показателям преломления изученных газов для ближнего ИК-диапазона получены с такой точностью впервые. Согласованность линейного характера зависимости для различных газов позволяет заявить, что подход к измерению сред с низким ( $<1.1$ ) показателем преломления при помощи волоконных рефрактометров на основе ФС-ВБР является перспективным и может быть распространен на другие моногазовые среды.

## Заключение

В работе исследовалась возможность использования волоконного рефрактометра на основе ФС-ВБР для измерения показателей преломления газов при различных давлениях. Результаты исследования продемонстрировали эффективность такого подхода для измерения моногазовых сред, высокую точность измерений и линейность отклика в широком диапазоне давлений. При этом впервые проведены прямые измерения показателей преломления азота, водорода и криптона на длине волны  $\sim 1,35$  мкм при давлениях до 150 атм.

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

## Литература

1. Долженко Е.И., Томышев К.А., Бутов О.В. Рефрактометрический детектор белков плазмы крови на основе наклонной волоконной брэгговской решетки с функциональным покрытием из антителей // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.27>
2. Долженко Е. И., Томышев К. А., Бутов О. В. СЕЛЕКТИВНЫЙ БИОСЕНСОР НА ОСНОВЕ НАКЛОННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ // Фотон-экспресс. – 2023. – №. 6 (190). – С. 294-295. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-294-295>

3. 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>
4. Marquez-Cruz V., Albert J. High resolution NIR TFBG-assisted biochemical sensors //Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Т. 33. – №. 16. – С. 3363-3373. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2431912>
5. Kim K. T. et al. Hydrogen sensor based on palladium coated side-polished single-mode fiber //IEEE Sensors Journal. – 2007. – Т. 7. – №. 12. – С. 1767-1771. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.909924>
6. Goya K. et al. A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-IR spectroscopy based on a side-polished structure //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2022. – Т. 351. – С. 130904. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130904>
7. Polynkin P. et al. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels //Optics letters. – 2005. – Т. 30. – №. 11. – С. 1273-1275. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001273>
8. 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>
9. Пржиялковский Д. В., Бутов О. В. Высокоточная запись волоконных брэгговских решеток поточечным методом //Прикладная Фотоника Applied Photonics. – 2022. – С. 50.
10. 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>
11. 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>

12. Nishii J. et al. Ultraviolet-radiation-induced chemical reactions through one-and two-photon absorption processes in GeO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> glasses //Optics Letters. – 1995. – Т. 20. – №. 10. – С. 1184-1186. <https://doi.org/10.1364/OL.20.001184>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. Liu C. et al. Highly localized fiber Bragg gratings with strong cladding mode inscribed by femtosecond laser //IEEE Photonics Technology Letters. – 2022. – Т. 34. – №. 11. – С. 587-590. <https://doi.org/10.1364/OL.424581>
17. Долженко Е.И., Томышев К.А., Бутов О.В. Волоконные рефрактометры для газовых сред на основе волоконных брэгговских решеток // Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025). – Пермь: Техносфера, 2025. – С. 319-320. <https://doi.org/10.22184/9785948367361.319.321>
18. 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>
19. Dolzhenko E. I., Tomyshev K., Butov O. V. A Poly (vinyl alcohol) Coating Method for a Tilted-Fiber Bragg-Grating-Assisted Fiber Hygrometer //physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters. – 2020. – Т. 14. – №. 12. – С. 2000435. <https://doi.org/10.1002/pssr.202000435>

20. Guo T. et al. Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors //Optics & Laser Technology. – 2016. – Т. 78. – С. 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.10.007>
21. Vukovic D., Woolsey G. A., Scelsi G. B. Refractivities of SF6 and SOF2 at wavelengths of 632.99 and 1300 nm //Journal of Physics D: Applied Physics. – 1996. – Т. 29. – №. 3. – С. 634. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/3/023>
22. Peck E. R., Huang S. Refractivity and dispersion of hydrogen in the visible and near infrared //Journal of the Optical Society of America. – 1977. – Т. 67. – №. 11. – С. 1550-1554. <https://doi.org/10.1364/JOSA.67.001550>
23. Przhiialkovskii 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>
24. Peck E. R., Khanna B. N. Dispersion of nitrogen //Journal of the Optical Society of America. – 1966. – Т. 56. – №. 8. – С. 1059-1063. <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001059>
25. Börzsönyi A. et al. Dispersion measurement of inert gases and gas mixtures at 800 nm //Applied optics. – 2008. – Т. 47. – №. 27. – С. 4856-4863. <https://doi.org/10.1364/AO.47.004856>
26. 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:**

Долженко Е.И., Томышев К.А., Бутов О.В. Измерение показателей преломления водорода, азота и криптона при различном давлении при помощи волоконного рефрактометра. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.3>