

УДК 535.36

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-780-785

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАКЛОННОЙ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ ПРИ ЕЕ ХИМИЧЕСКОМ ТРАВЛЕНИИ

Д.О. Гагарина, С.А. Плясов, Л.Л. Лесных, А.А. Дмитриев, Я.Д. Токарева, С.Д. Бочкова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: dogagarinova@itmo.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 12.09.20, принята к печати 10.10.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Гагарина Д.О., Плясов С.А., Лесных Л.Л., Дмитриев А.А., Токарева Я.Д., Бочкова С.Д. Исследование изменения чувствительности наклонной волоконной брэгговской решетки при ее химическом травлении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 780–785. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-780-785

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты экспериментального исследования влияния длительности химического травления на спектр пропускания наклонной волоконной брэгговской решетки с целью повышению ее чувствительности для применения в качестве элемента в волоконно-оптическом измерителе показателя преломления жидкостей. **Метод.** Химическое травление наклонной брэгговской решетки осуществлялось в 50 % растворе плавиковой кислоты. Химическое травление выполнялось длительностью в течение 5, 10, 15, 20 и 30 мин с перерывами для измерений. На каждом этапе исследования проводились измерения спектра волоконной решетки в средах с разным показателем преломления. **Основные результаты.** Произведена оценка чувствительности наклонной волоконной брэгговской решетки к изменению показателя преломления после каждого этапа травления. Показано, что при уменьшении толщины оптического волокна за счет химического травления происходит снижение чувствительности. **Практическая значимость.** Экспериментальное исследование показало, что химическое травление не позволяет увеличить чувствительность наклонной брэгговской решетки к изменению показателя преломления исследуемой среды. Анализ результатов измерений может найти применение при проектировании и разработке волоконно-оптических измерителей концентрации или показателя преломления раствора исследуемого вещества.

### Ключевые слова

химическое травление, наклонная волоконная брэгговская решетка, волоконно-оптический измеритель, длина волны отсечки, чувствительность, показатель преломления

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-780-785

## SENSITIVITY VARIATION RESEARCH OF TILTED FIBER BRAGG GRATING DURING CHEMICAL ETCHING

D.O. Gagarinova, S.A. Plyastsov, L.L. Lesnykh, A.A. Dmitriev, Ia.D. Tokareva, S.D. Bochkova

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: dogagarinova@itmo.ru

### Article info

Received 12.09.20, accepted 10.10.20  
 Article in Russian

**For citation:** Gagarinova D.O., Plyastsov S.A., Lesnykh L.L., Dmitriev A.A., Tokareva Ia.D., Bochkova S.D. Sensitivity variation research of tilted fiber Bragg grating during chemical etching. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 780–785 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-780-785

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents experimental results of the chemical etching duration impact on the tilted fiber Bragg grating transmission spectrum. The goal of this research is the sensitivity growth of the tilted fiber Bragg grating aimed at its application as an element of fiber optical sensor for refractive index of liquids measurements. **Method.** The chemical etching was performed in the 50 % hydrofluoric acid solution. The chemical etching duration was 5, 10, 15, 20 and 30 minutes with pauses for spectra measurements. The spectrum of the tilted fiber Bragg grating was measured

at every research step in the media with various refractive index. **Main Results.** The sensitivity estimation of the tilted fiber Bragg grating to the variation of refractive index is performed. The decrease of the optic fiber thickness as a result of chemical etching leads to lower responsivity of the sensor. **Practical Relevance.** Experimental research shows that chemical etching decreases the sensitivity of tilted fiber Bragg grating to the refractive index variation for the medium under study. Analysis of measurement results is applicable in the design and development of concentration optic fiber sensors or solution refractive index of the researched material.

#### Keywords

chemical etching, tilted fiber Bragg grating, optic fiber sensor, cut-off wavelength, sensitivity, refractive index

### Введение

Современные волоконно-оптические измерители в последнее время все больше используются в качестве датчиков концентрации белков в растворах [1–4]. В частности, одним из потенциальных применений является измерение концентрации белка цистатина С в моче. Данный белок является наиболее актуальным биомаркером почечных повреждений, так как его концентрация не зависит от пола, массы, роста и возраста человека. В моче здорового человека белок цистатин С не должен обнаруживаться [5–9]. При остром повреждении почек концентрация белка в моче резко возрастает. Существующие методы выявления острого повреждения почек позволяют обнаружить болезнь только на поздней стадии [5, 6, 10], поэтому задача разработки методики, позволяющей обнаружить болезнь на более ранних стадиях, является предельно актуальной.

Разработка волоконно-оптического измерителя концентрации белков является перспективной, благодаря свойствам сенсора, таким как биологическая совместимость, малый размер, способность использования в режиме реального времени, возможность удаленного и мультиплексированного измерения белковых молекул, нечувствительность к электромагнитным помехам, стабильность и долговечность [1].

Волоконно-оптические измерители реализуются на различных физических принципах, среди которых можно выделить [1]: измерители, основанные на создании брэгговской решетки внутри сердцевины оптического волокна; интерферометры, изготовленные путем сварки волокон различных типов; измерители, основанные на резонаторе Фабри–Перо на конце оптического волокна; измерители, основанные на взаимодействии затухающего модового поля с окружающей средой путем уменьшения толщины оптического волокна (химическое травление, полировка, сужение); измерители на основе нанесенной тонкой металлической пленки на поверхность оптического волокна для генерации плазмонного резонанса.

В настоящей работе для измерения концентрации белка цистатина С выбрано технологическое решение на основе наклонной волоконной брэгговской решетки (НВБР). НВБР обладает рядом преимуществ: ее свойства широко изучены; отработана технология записи брэгговских решеток с высокими параметрами; относительная механическая прочность; малый размер; простота конструкции; удобство в применении, чувствительность к изменению показателя преломления внешней среды; отсутствие влияния состава среды [2, 11, 12]. Повысить чувствительность НВБР для измерения малых концентраций можно при помощи нанесе-

ния металлического покрытия для возбуждения поверхностного плазмонного резонанса. Обзор литературы показал, что типичная чувствительность измерителей на основе НВБР с металлическим покрытием составляет порядка 500 нм/RIU (refractive index unit, единица показателя преломления) [13–15]. Данной чувствительности может быть недостаточно для измерения малых концентраций белка цистатина С.

Авторами предпринята попытка повысить чувствительность НВБР при помощи химического травления. При этом учитывались положительные результаты, полученные в работе [4], где НВБР, длиной 10 мм и углом наклона 10°, записанную в стандартное одномодовое оптическое волокно, травил в 40 % растворе плавиковой кислоты. Оценка чувствительности протравленной НВБР проводилась при помощи погружения ее в растворы сахарозы разной концентрации с известными значениями показателей преломления в диапазоне 1,3418–1,4419, которые были предварительно измерены при помощи автоматического цифрового рефрактометра. После химического травления авторы работы [4] проанализировали сдвиг длины волны оболочечной моды решетки, расположенной около 1569 нм, на изменение показателя преломления раствора сахарозы. По сдвигу длины волны оценивалась чувствительность НВБР, которая составила 1,25 нм/RIU для непротравленной решетки диаметром 125 мкм, и 23,38 нм/RIU для протравленной решетки диаметром 13 мкм [4]. В случае получения положительных результатов, аналогично [4], планировалось нанести на решетку металлическое покрытие с целью получения чувствительности более 500 нм/RIU.

### Методика эксперимента

НВБР была записана в одномодовое оптическое волокно SMF-28 по методике, описанной в работах [16, 17]. Полученная НВБР имеет следующие параметры: длина решетки 14 мм, угол наклона 3°, центральная длина волны 1580 нм. Для химического травления был взят 50 % раствор плавиковой кислоты. Химическое травление повторялась пять раз: первые четыре длительностью 5 мин и последняя длительностью 10 мин.

Для анализа чувствительности полученной протравленной НВБР проведены экспериментальные исследования зависимости спектров пропускания решетки от показателя преломления внешней среды. В качестве анализируемых сред с разными показателями преломления для проведения эксперимента взяты: дистиллированная вода ( $n = 1,33$ ), этанол ( $n = 1,36$ ), изопропанол ( $n = 1,37$ ) и этиленгликоль ( $n = 1,43$ ).



Рис. 1. Схема подключения волоконно-оптического измерителя на основе наклонной волоконной брэгговской решетки (НВБР) для проведения экспериментальных исследований

Для проведения исследований использована схема подключения волоконно-оптического измерителя с использованием оптических пигтейлов (рис. 1).

**Результаты эксперимента**

Спектр источника имеет специфическую форму. По этой причине выполнено сглаживание измеренных спектров НВБР по методу Савицкого–Голея по 100 точкам в программе OriginPro. Результат функции сглаживания представлен на рис. 2, а. Для каждой длины волны взято отношение значений интенсивности измеренного и сглаженного спектров. Результаты обработанных измерений приведены на рис. 2, б, где спектры для наглядности сдвинуты относительно друг друга с некоторой константой. Видно, что химическое травление уменьшает число оболочечных мод в спектре пропускания решетки. Амплитуда резонансных пиков оболочечных мод тоже уменьшается. Это свидетельствует об ухудшении взаимодействия затухающего модового поля НВБР с внешней средой.

Для оценки изменения характеристики решетки в процессе травления проведены экспериментальные исследования по взаимодействию с жидкостями с известным показателем преломления. На рис. 3 представлены результаты измерений спектров пропускания после каждого этапа химического травления.

С увеличением длительности химического травления диапазон длин волн между модами оболочки увеличивался. Значение показателя преломления на рис. 3, а этиленгликоля ( $n = 1,43$ ) выходит за пределы динамического диапазона НВБР.

В спектре пропускания, помимо оболочечных мод, присутствуют моды утечки, которые имеют резонансные пики, не сдвигаемые по длине волны в ответ на изменение показателя преломления в окружающей среде. Граница между направляемыми оболочечными модами высокого порядка и модами утечки называется «точкой отсечки» [2]. В спектре пропускания НВБР до химического травления она расположена на длине волны около 1520 нм. Последняя направляемая мода оболочки высокого порядка до этой точки имеет максимальную степень проникновения затухающего модового поля во внешнюю среду. Значения длин волн отсечки в спектре пропускания НВБР после каждой процедуры травления представлены в таблице. С увеличением показателя преломления внешней среды длины волны отсечки сдвигаются в область больших длин.

На рис. 4 можно наблюдать линейный характер зависимости чувствительности измерителя от значения времени химического травления.

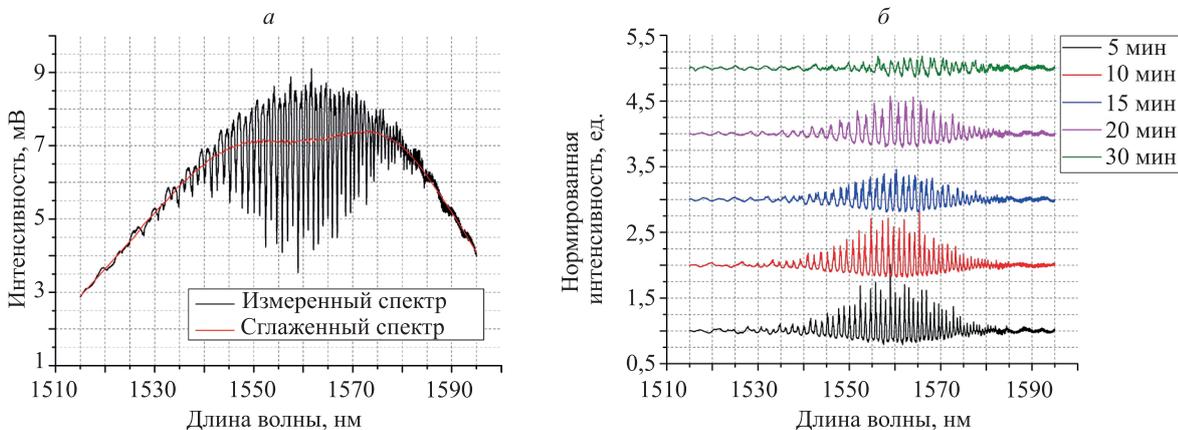


Рис. 2. Измеренный и сглаженный по методу Савицкого–Голея спектры протравленной наклонной волоконной брэгговской решетки после химического травления длительностью 5 мин (а), спектры наклонной волоконной брэгговской решетки, полученные после каждого этапа химического травления (5, 10, 15, 20 и 30 мин) (б)

Таблица. Значения длины волны отсечки, нм, после каждой процедуры химического травления

Общая длительность химического травления, мин	Внешняя среда		
	дистиллированная вода $n = 1,33$	этанол $n = 1,36$	изопропанол $n = 1,37$
5	1525	1536	1540
10	1530	1540	1545
15	1533	1541	1547
20	1533	1540	1543
30	1538	1540	1546

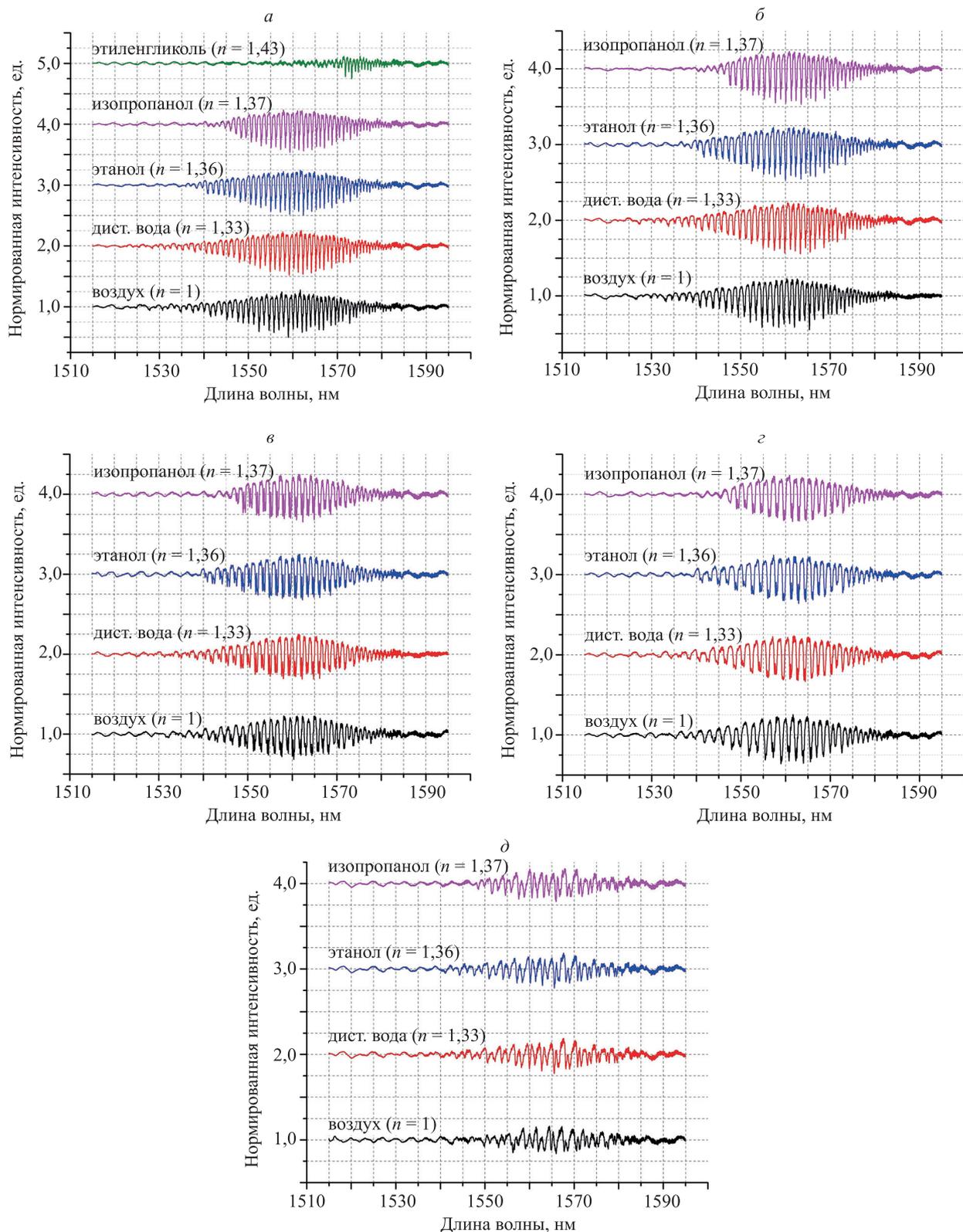


Рис. 3. Спектры пропускания наклонной волоконной брэгговской решетки, помещенной в жидкости с разными показателями преломления после химического травления: длительностью 5 мин после первого этапа (а); общей длительностью 10 мин после двух этапов (б); общей длительностью 15 мин после трех этапов (в); общей длительностью 20 мин после четырех этапов (г); общей длительностью 30 мин после пятого этапа (д)

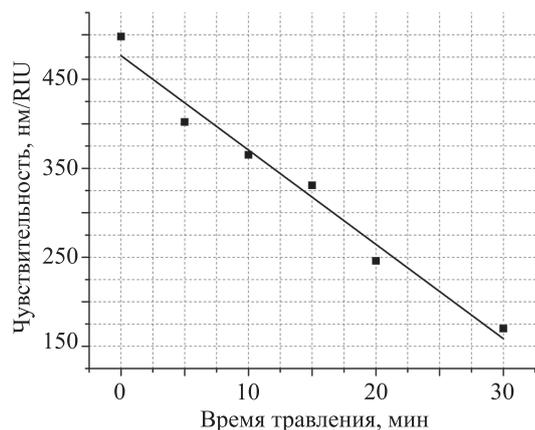


Рис. 4. Зависимость чувствительности волоконно-оптического измерителя на основе наклонной волоконной брэгговской решетки от длительности химического травления

### Обсуждение результатов

В работе представлены результаты исследования по увеличению чувствительности НВБР при помощи химического травления. Экспериментальное исследование показало, что химическое травление снижает чувствительность НВБР на изменение показателя преломления внешней среды. В работе [4] проводятся экспериментальные исследования на изменение показателя преломления внешней среды по спектру отражения. Один конец оптического волокна с НВБР при помощи оптического пигтейла соединяли с оптическим рефлектометром обратного рассеяния (OBR 4600, Luna Inc), а другой конец соединяли с золотым отражателем (Luna Inc). В данном экспериментальном исследовании измерялся спектр пропускания НВБР. В работе [4] угол наклона решетки составляет  $10^\circ$ , а угол наклона решетки авторов —  $3^\circ$ . Выбор угла наклона брэгговской решетки влияет на динамический диапазон измеряемых показателей преломления различных веществ. Согласно [18], где в стандартное одномодовое оптическое волокно были записаны две решетки с углами наклона  $3,8^\circ$  и  $7,4^\circ$ , оценка чувствительности каждой решетки на изменение показателя преломления водных растворов глице-

рина разной концентрации составила:  $545,918 \text{ нм/RIU}$  для НВБР с углом наклона  $3,8^\circ$  и  $574,229 \text{ нм/RIU}$  для НВБР с углом наклона  $7,4^\circ$ . Это говорит о том, что угол наклона решетки не оказывает существенного влияния на значение чувствительности. Главная причина в разнице полученных результатов авторов данной работы заключается в том, что в [4] запись наклонной волоконной брэгговской решетки осуществлялась с использованием техники фазовой маски. В результате авторы [4] получили решетку с чувствительностью к изменению показателя преломления внешней среды порядка  $1,25 \text{ нм/RIU}$ . НВБР, изготовленная в настоящей работе записана с использованием интерферометра Тальбота и эксимерной KrF-лазерной системы, методика более подробно описана в [16]. Чувствительность полученной решетки до химического травления составила порядка  $498 \text{ нм/RIU}$ , что на два порядка превосходит чувствительность решетки до химического травления в работе [4]. Для НВБР, записанной по методике [16], коэффициент отражения составляет до 95 %, в работе [4] коэффициент отражения НВБР не приведен. Авторы полагают, что отрицательный результат может быть обусловлен существенным различием структуры записанных волоконных брэгговских решеток.

### Заключение

В работе представлены результаты исследования изменения чувствительности наклонной волоконной брэгговской решетки в результате химического травления оптического волокна. Показано, что химическое травление не позволяет увеличить чувствительность наклонной волоконной брэгговской решетки к изменению показателя преломления внешней среды. Применение химического травления наклонной волоконной брэгговской решетки приводит к снижению чувствительности элемента в волоконно-оптическом измерителе концентрации белка цистатина С. Анализ результатов измерений может быть полезен при проектировании волоконно-оптических измерителей концентрации или показателя преломления раствора исследуемого вещества, в том числе белковых молекул.

### Литература

1. Socorro-Lerános A.B., Santano D., Del Villar I., Matias I.R. Trends in the design of wavelength-based optical fibre biosensors (2008–2018) // *Biosensors and Bioelectronics*: X. 2019. V. 1. P. 100015. doi: 10.1016/j.biosx.2019.100015
2. Guo T., Liu F., Guan B.-O., Albert J. Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors // *Optics and Laser Technology*. 2016. V. 78. Part B. P. 19–33. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.10.007
3. Guo T., Liu F., Liang X., Qiu X., Huang Y., Xie C., Xu P., Mao W., Guan B.-O., Albert J. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings // *Biosensors and Bioelectronics*. 2016. V. 78. P. 221–228. doi: 10.1016/j.bios.2015.11.047
4. Syabekova M., Korganbayev S., González-Vila Á., Caucheteur C., Shaimerdenova M., Ayupova T., Bekmurzayeva A., Vangelista L., Tosi D. Functionalized etched tilted fiber Bragg grating aptasensor for label-free protein detection // *Biosensors and Bioelectronics*. 2019. V. 146. P. 111765. doi: 10.1016/j.bios.2019.111765

### References

1. Socorro-Lerános A.B., Santano D., Del Villar I., Matias I.R. Trends in the design of wavelength-based optical fibre biosensors (2008–2018). *Biosensors and Bioelectronics*: X, 2019, vol. 1, pp. 100015. doi: 10.1016/j.biosx.2019.100015
2. Guo T., Liu F., Guan B.-O., Albert J. Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 78, part B, pp. 19–33. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.10.007
3. Guo T., Liu F., Liang X., Qiu X., Huang Y., Xie C., Xu P., Mao W., Guan B.-O., Albert J. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, vol. 78, pp. 221–228. doi: 10.1016/j.bios.2015.11.047
4. Syabekova M., Korganbayev S., González-Vila Á., Caucheteur C., Shaimerdenova M., Ayupova T., Bekmurzayeva A., Vangelista L., Tosi D. Functionalized etched tilted fiber Bragg grating aptasensor for label-free protein detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, vol. 146, pp. 111765. doi: 10.1016/j.bios.2019.111765

5. Алексеев А.В., Гильманов А.Ж., Гатиятуллина Р.С., Ракипов И.Г. Современные биомаркеры острого повреждения почек // Практическая медицина. 2014. № 3(79). С. 22–27.
6. Пролетов Я.Ю., Саганова Е.С., Смирнов А.В. Биомаркеры в диагностике острого повреждения почек. Сообщение I // Нефрология. 2014. Т. 18. № 4. С. 25–35.
7. Вельков В.В. Цистатин С: новые возможности и новые задачи для лабораторной диагностики (Часть 1) // Клинико-лабораторный консилиум. 2010. № 5(36). С. 23–31.
8. Вельков В.В. Цистатин С: новые возможности и новые задачи для лабораторной диагностики (Часть 2) // Клинико-лабораторный консилиум. 2011. № 1(37). С. 27–38.
9. Вельков В.В. Цистатин С: новые возможности и новые задачи для лабораторной диагностики (Часть 3) // Клинико-лабораторный консилиум. 2011. № 3(39). С. 31–37.
10. Мухин Н.А., Тарева И.Е., Шилов Е.М., Козловская Л.В. Диагностика и лечение болезней почек: руководство для врачей. М.: ГЭТОАР-Медиа, 2011. 384 с.
11. Albert J., Shao L.-Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors // *Laser and Photonics Reviews*. 2013. V. 7. N 1. P. 83–108. doi: 10.1002/lpor.201100039
12. Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications // *Photonic Sensors*. 2011. V. 1. N 1. P. 6–30. doi: 10.1007/s13320-010-0016-x
13. Zhang X., Xu J., Cai S., Zhang Z., Chen X., Guan B.-O., Guo T. Surface plasmon resonance based on multi-angle tilted fiber Bragg grating for highly sensitive and wide range refractive index measurement // *Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. 2016. P. 7875770. doi: 10.1109/ICOON.2016.7875770
14. Márquez-Cruz V., Albert J. High resolution NIR TFBG-assisted biochemical sensors // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. N 16. P. 3363–3373. doi: 10.1109/jlt.2015.2431912
15. Zhang Y., Wang F., Qian S., Liu Z., Wang Q., Gu Y., Wu Z., Jing Z., Sun C., Peng W. A novel fiber optic surface plasmon resonance biosensors with special boronic acid derivative to detect glycoprotein // *Sensors*. 2017. V. 17. N 10. P. 2259. doi: 10.3390/s17102259
16. Стам А.М., Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Варжель С.В., Коннов К.А., Сложеникина Ю.И. Запись волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и эксимерной KrF-лазерной системы // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 5. С. 466–473. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
17. Коннов К.А., Фролов Е.А., Грибаев А.И., Захаров В.В., Михнева А.А., Новикова В.А., Варжель С.В. Запись и визуализация волоконных решеток показателя преломления с наклонными штрихами // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 1. С. 51–56. doi: 10.21883/OS.2018.07.46266.2-18
18. Wang T., Liu K., Jiang J., Xue M., Chang P., Liu T. Temperature-insensitive refractive index sensor based on tilted moiré FBG with high resolution // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 13. P. 14900–14909. doi: 10.1364/OE.25.014900
5. Alekseev A.V., Gilmanov A.G., Gatiyatullina R.S., Rakipov I.G. Recent biomarkers of acute renal injury. *Practical medicine*, 2014, no. 3(79), pp. 22–27. (in Russian)
6. Proletov Ia.Iu., Saganova E.S., Smirnov A.V. Biomarkers in the diagnosis of acute kidney injury. Communication I. *Nephrology*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 25–35. (in Russian)
7. Velkov V.V. Cystatin C: The new opportunities and new goals for laboratory diagnostics (Part 1). *Kliniko-laboratornyj konsilium*, 2010, no. 5(36), pp. 23–31. (in Russian)
8. Velkov V.V. Cystatin C: The new opportunities and new goals for laboratory diagnostics (Part 2). *Kliniko-laboratornyj konsilium*, 2011, no. 1(37), pp. 27–38. (in Russian)
9. Velkov V.V. Cystatin C: The new opportunities and new goals for laboratory diagnostics (Part 3). *Kliniko-laboratornyj konsilium*, 2011, no. 3(39), pp. 31–37. (in Russian)
10. Mukhin N.A., Tareeva I.E., Shilov E.M., Kozlovskaja L.V. Diagnostics and Kidney Disease Outcomes: Guidelines for Physicians. Moscow, GETOAR-Media Publ., 2011, 384 p. (in Russian)
11. Albert J., Shao L.-Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors. *Laser and Photonics Reviews*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 83–108. doi: 10.1002/lpor.201100039
12. Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications. *Photonic Sensors*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 6–30. doi: 10.1007/s13320-010-0016-x
13. Zhang X., Xu J., Cai S., Zhang Z., Chen X., Guan B.-O., Guo T. Surface plasmon resonance based on multi-angle tilted fiber Bragg grating for highly sensitive and wide range refractive index measurement. *Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2016, pp. 7875770. doi: 10.1109/ICOON.2016.7875770
14. Márquez-Cruz V., Albert J. High resolution NIR TFBG-assisted biochemical sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 16, pp. 3363–3373. doi: 10.1109/jlt.2015.2431912
15. Zhang Y., Wang F., Qian S., Liu Z., Wang Q., Gu Y., Wu Z., Jing Z., Sun C., Peng W. A novel fiber optic surface plasmon resonance biosensors with special boronic acid derivative to detect glycoprotein. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 10, pp. 2259. doi: 10.3390/s17102259
16. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I. Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 466–473. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
17. Konnov K.A., Frolov E.A., Gribaev A.I., Zakharov V.V., Mikhneva A.A., Novikova V.A., Varzhel S.V. Inscription and visualization of tilted fiber Bragg gratings. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 125, no. 1, pp. 54–59. doi: 10.1134/S0030400X18070172
18. Wang T., Liu K., Jiang J., Xue M., Chang P., Liu T. Temperature-insensitive refractive index sensor based on tilted moiré FBG with high resolution. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 13, pp. 14900–14909. doi: 10.1364/OE.25.014900

#### Авторы

**Гагаринова Диана Олеговна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-1320-6553, dogagarinova@itmo.ru

**Плясцов Семён Алексеевич** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195587476, ORCID: 0000-0002-5764-0960, s.plyastsov@gmail.com

**Лесных Лариса Львовна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0918-6350, lesnyhlara@gmail.com

**Дмитриев Андрей Анатольевич** — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-0674-8381, dmitrievaa1994@yandex.ru

**Токарева Янина Дмитриевна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57214998978, ORCID: 0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru

**Бочкова Софья Дмитриевна** — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57209362819, ORCID: 0000-0001-6614-3790, sooyfar@gmail.com

#### Authors

**Diana O. Gagarinova** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1320-6553, dogagarinova@itmo.ru

**Semyon A. Plyastsov** — PhD, Laboratory Head, Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195587476, ORCID: 0000-0002-5764-0960, s.plyastsov@gmail.com

**Larisa L. Lesnykh** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0918-6350, lesnyhlara@gmail.com

**Andrey A. Dmitriev** — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-0674-8381, dmitrievaa1994@yandex.ru

**Ianina D. Tokareva** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57214998978, ORCID: 0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru

**Sofya D. Bochkova** — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57209362819, ORCID: 0000-0001-6614-3790, sooyfar@gmail.com