

УДК 535.8

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-500-506

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОВОЛОКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО АНЕМОМЕТРА

В.А. Новикова, С.В. Варжель

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

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.06.20, принята к печати 01.07.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Новикова В.А., Варжель С.В. Исследование методов создания горячей проволоки волоконно-оптического теплового анемометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 500–506. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-500-506

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы различные методы выведения оптического излучения из сердцевины световода в его оболочку с целью создания горячей проволоки волоконно-оптического анемометра, а также проведена оценка эффективности описанных методов путем анализа построенных зависимостей. **Метод.** Рассмотрены структуры из двух оптических волокон, одно из которых использовалось для передачи информационного сигнала, а второе — для создания горячей проволоки. В сердцевине первого волокна формировалась волоконная решетка Брэгга, а во втором волокне создавалась область выведения излучения; указанные участки волокон совмещались друг с другом и фиксировались с помощью оловянно-свинцового сплава. Измерение температуры осуществлялось путем мониторинга спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток, записанных методом фазовой маски. Области выведения излучения формировались либо за счет изменения геометрии волокна путем использования настраиваемых режимов сварочного аппарата, либо созданием перехода SMF-MMF-SMF. **Основные результаты.** Разработаны структуры с возможностью их использования в качестве горячей проволоки чувствительного элемента волоконно-оптического анемометра. Получены зависимости сдвига длины волны брэгговского резонанса от мощности лазера накачки: в результате создания горячей проволоки сдвиг длины волны Брэгга варьировался в диапазоне 0,15–3 нм. Построены результирующие кривые по трем экспериментам для каждого вида структуры с учетом среднего квадратичного отклонения, позволяющие судить об эффективности различных методов выведения излучения, также представлен сравнительный анализ исследуемых методов между собой. **Практическая значимость.** Исследование отражает возможности волоконно-оптической анемометрии при создании точечных и распределенных сенсоров. Результаты данной работы могут быть использованы в областях, в которых необходимо создание квази-распределенных и точечных рассеивателей, а также частичное или полное выведение излучения из световода.

### Ключевые слова

анемометр, метод горячей проволоки, тепловая анемометрия, волоконная брэгговская решетка, волоконно-оптические датчики

### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО в рамках темы НИР № 619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-500-506

## METHODS OF HOT WIRE CREATION FOR FIBER-OPTICAL THERMAL ANEMOMETER

V.A. Novikova, S.V. Varzhel

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: novivial@mail.ru

### Article info

Received 05.06.20, accepted 01.07.20  
 Article in Russian

**For citation:** Novikova V.A., Varzhel S.V. Methods of hot wire creation for fiber-optical thermal anemometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 500–506 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-500-506

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper presents the study of various methods of optical radiation coupling from the fiber core into its cladding with the aim of creating a fiber-optic anemometer hot wire. The effectiveness of the described methods is evaluated by analyzing the obtained dependencies. **Method.** The structures of two optical fibers were studied, one of which was used to transmit an information signal, and the other — to create a hot wire. A Bragg grating was formed in the core of the first fiber, and a radiation coupling region was created in the second fiber. These fiber sections were aligned with each other and fixed by a tin-lead alloy. The temperature was measured by monitoring the spectral characteristics of fiber Bragg gratings inscribed by the phase mask method. The areas of radiation coupling were formed either by changing the fiber geometry using custom modes of the arc fusion splicer, or by creating a SMF-MMF-SMF transition. **Main Results.** Structures are developed which can be used as a hot wire of a fiber-optic anemometer sensitive element. The dependencies of the Bragg resonance wavelength shift on the pump laser power are obtained; the Bragg wavelength shift varies in the range from 0.15 nm to 3 nm as a result of a hot wire creation. The resulting curves are constructed after three experiments for each type of structure, taking into account the standard deviation. They make it possible to judge the effectiveness of various methods of radiation coupling. Comparative analysis of the studied methods is presented. **Practical Relevance.** The study describes the capabilities of fiber-optic anemometry when creating point and distributed sensors. The results of this work can be used in the areas where the creation of quasi-distributed and point diffusers is necessary, as well as partial or complete coupling of radiation from a fiber core.

**Keywords**

anemometer, hot wire method, thermal anemometry, fiber Bragg grating, fiber optic sensors

**Acknowledgements**

This study has been performed at ITMO University in the framework of research work No. 619297 “Development of methods and facilities for solving applied problems of photonics”.

**Введение**

Исследование оптических волокон (ОВ) в качестве чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков обусловлено рядом причин, связанных с их нечувствительностью к электромагнитным помехам, отсутствием металлических элементов, подверженных окислению и коррозии, высокой степенью устойчивости и стабильностью работы в условиях агрессивных сред. Одним из наиболее перспективных, а также уже имеющих значительное распространение вариантов создания волоконно-оптических измерительных устройств является использование дифракционных структур, записанных в сердцевине ОВ.

Формирование в световоде таких элементов, называемых волоконными брэгговскими решетками (ВБР), приводит к возникновению в спектре полосы отражения, ширина которой варьируется в пределах от единиц пикометров до единиц нанометров в зависимости от условий решаемой задачи [1, 2]. Спектральные характеристики данных структур зависят от внешних параметров, что позволяет осуществлять мониторинг значений измеряемой величины в реальном времени. Широкое использование указанных дифракционных структур объясняется множеством преимуществ, таких как стабильность их работы во времени и в условиях изменяющихся сред, быстрый отклик на изменение исследуемой величины, возможность подстройки характеристик для решения конкретной задачи, а также высокие значения точности и чувствительности устройств на их основе.

Одним из существующих и совершенствующихся направлений развития измерительных устройств на основе волоконных дифракционных структур является анемометрия. Анемометр представляет собой прибор, предназначенный для измерения скоростей движения потоков газов и жидкостей и находящий широкое применение в различных областях промышленности (химическая, аэрокосмическая отрасли, а также энергетика, строительство, метеорология т. д.). В литературе

выделяют три основных вида анемометров: механические, ультразвуковые и тепловые. Приборы первого вида подразумевают использование механического движения частей, второй вид построен на принципе наблюдения за изменением скорости звуковой волны. Третий вид устройств основан на исследовании скорости охлаждения металлической проволоки при различных скоростях движущихся потоков, при этом наиболее значимыми преимуществами такого вида анемометров являются отсутствие вращающихся частей (как в механических) и необходимости расположения передатчика и приемника на расстоянии (как в звуковых).

Таким образом, несмотря на ряд существующих методик, анемометрия с горячей проволокой (Hot-Wire Anemometry, HWA) не теряет актуальности и на сегодняшний день ввиду ряда перечисленных достоинств. При этом необходимо отметить, что принцип работы таких устройств основан на применении охлаждающейся металлической нити, подверженной коррозии и окислению и накладывающей ограничения на использование в условиях электромагнитных помех. Замена металлической нити ОВ позволяет усовершенствовать метод горячей проволоки и исключить существенные недостатки, сдерживающие его использование в определенных областях.

Одной из наиболее сложных задач в вопросе волоконно-оптической анемометрии является исследование метода создания нагретой области. В большинстве случаев нагрев происходит за счет точечного выведения излучения из сердцевины в оболочку, покрытую веществом с относительно высоким значением теплопроводности (в основном металлом), в результате чего оптическое излучение преобразуется в тепло, создавая нагретый элемент.

В литературе описаны различные способы создания горячей проволоки: за счет легирования волокна кобальтом или неодимом, что приводит к безызлучательному поглощению и нагреву области с ВБР [3, 4], запись наклонных дифракционных структур [5, 6],

использование фотонно-кристаллических волокон с областями, заполненными металлом [7], а также установкой на торце волокна кремниевой пленки для создания резонатора Фабри–Перо, непрозрачного для длины волны лазера накачки [8]. Также в различных работах приведены методы с изменением геометрии волокна: со смещением осей волокон относительно друг друга и их последующей сваркой [9] и с увеличением диаметра волокна путем создания «пузырька» [10]. Все изученные технологии имеют ряд недостатков, связанных с использованием дорогостоящего оборудования, специальных ОВ, особых типов покрытий волокна и потерей значительных мощностей информационного сигнала. При этом представленные методы имеют разные данные по нагреву, и отсутствует единое исследование по сравнению эффективностей различных методов. Также необходимо отметить, что большинство способов работает в условиях измерения потока газов и не применимо к анализу потоков жидкости ввиду небольших значений температур, до которых происходит нагревание.

Исходя из вышесперечисленного, целью данной работы является проведение исследований способов вывода из сердцевины в оболочку и сравнение их эффективностей при вариации значений мощности накачки. При этом выполнен анализ изменения температуры путем мониторинга сдвига длины волны брэгговского резонанса.

**Методика проведения экспериментов**

Общий принцип работы волоконно-оптического теплового анемометра, в котором в качестве чувствительного элемента выступает ВБР представлен на рис. 1 [11]. В сердцевине ОВ сформированы две ВБР, одна из

которых фиксирует температуру (ВБР2), а другая — температуру и скорость движения потока (ВБР1). В области чувствительной к измерению движения потока ВБР1 происходит выведение оптического излучения из сердцевины в оболочку, при этом данная область покрыта веществом с высоким показателем теплопроводности. Таким образом вещество нагревается и, следовательно, нагревает область с ВБР1. В нижней части рис. 1 схематично представлены спектры отражения на каждом этапе. После нагрева длина волны Брэгга  $\lambda_1$  смещается в длинноволновую область из-за изменения температуры (что связано с термооптическим эффектом и эффектом теплового расширения) [12]. При возникновении движения потока происходит охлаждение нагретой области, и длина волны Брэгга  $\lambda_1^*$  смещается в коротковолновую область  $\lambda_3$  — анализ такого смещения ( $\lambda_1^* - \lambda_3$ ) позволяет оценивать скорость потоков. Формирование ВБР2 необходимо для того, чтобы компенсировать влияние температуры потока на измерение скорости.

Для решения цели, поставленной в работе, были записаны одиночные ВБР с фиксированным периодом длиной 1 мм. Длина волны брэгговского резонанса решеток составила 1546,5 нм. Запись осуществлялась методом фазовой маски, описанным в работах [13, 14]. В качестве источника излучения в схеме записи использовался эксимерный лазер (Coherent COMPex Pro 102), генерирующий излучение на длине волны 248 нм. Параметры записи: частота следования лазерных импульсов 10 Гц; плотность энергии в импульсе на поверхности ОВ около 200 мДж/см<sup>2</sup>; среднее время записи каждой ВБР — 1,5 мин. Решетки были записаны в стандартном одномодовом телекоммуникационном ОВ SMF-28 (диаметр сердцевины — 8,2 мкм), подвергнутом водородной обработке, при таких же условиях,

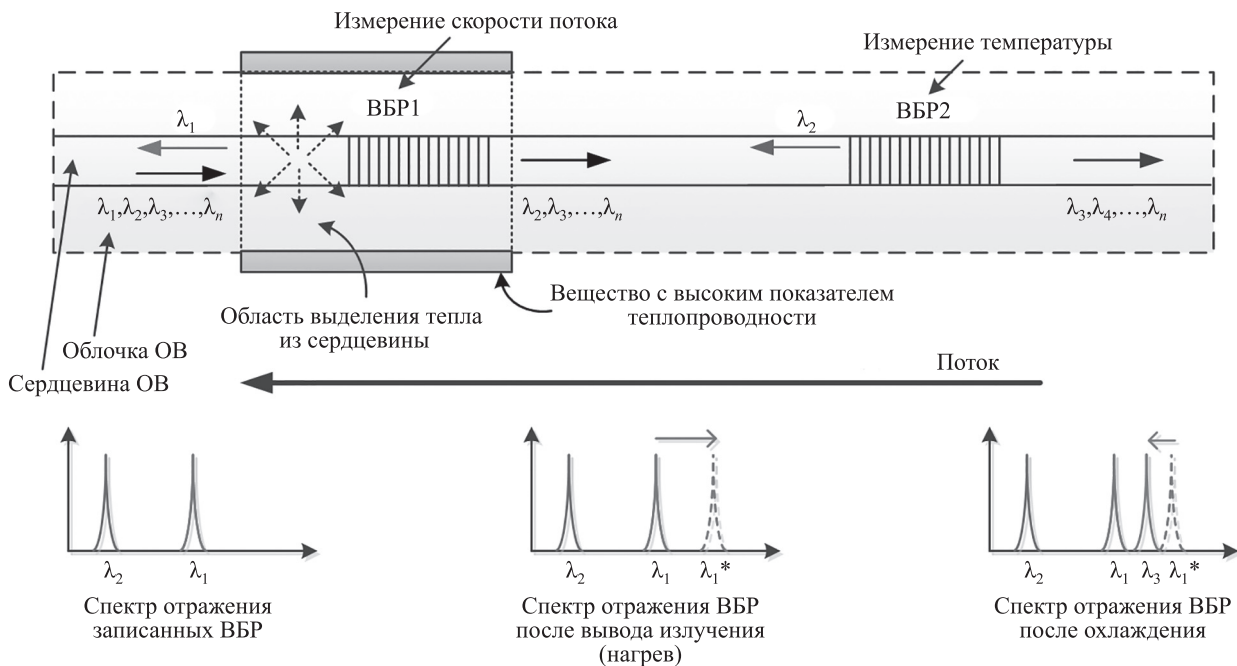


Рис. 1. Общий принцип работы волоконно-оптического анемометра с решетками Брэгга (соотношение диаметров сердцевины и оболочки на рисунке произвольны и показаны именно таким образом для большей наглядности)

как и в работе [15]. В качестве материала с высокой теплопроводностью использовался оловянно-свинцовый сплав (олово 63 %, свинец 37 %) производства Felder ISO-Core, масса которого во всех экспериментах равнялась  $151 \pm 4$  мг.

На рис. 2 представлены методы вывода излучения из сердцевины световода в его оболочку, исследованные в данной работе. В ходе проведения экспериментов анализировался нагрев олова при различных изменениях геометрии ОВ: «перетяжка» световода (taper) на длине, не превышающей 15 мм (рис. 2, а), смещение осей волокон относительно друг друга с величиной рассогласования 50 мкм с последующей их сваркой (offset) (рис. 2, б), увеличение диаметра волокна путем создания «пузырька» (bubble) (рис. 2, в), создание области перехода SMF-MMF-SMF (одномодовое-многомодовое-одномодовое волокно) (рис. 2, г). Диаметр сердцевины многомодового световода — 50 мкм. Все стрелки на рис. 2 представляют собой схематичное изображение, но не отражают реальный ход лучей с точки зрения геометрической оптики, показывая лишь область вывода излучения.

Формирование структур, представленных на рис. 2, а–в, осуществлялось с помощью настраиваемых режимов сварочного аппарата Fujikura FSM-100P.

В свою очередь, структура на рис. 2, г формировалась по следующему алгоритму: сначала осуществлялась сварка одномодового ОВ с многомодовым, далее данная структура помещалась в скальватель, и на расстоянии 2 мм от места сварки производился скол ОВ, после чего со стороны многомодового волокна подваривалось одномодовое ОВ.

В большинстве литературных источников область вывода излучения и дифракционная структура были сформированы в одном волокне, что приводило к потере мощности информационного сигнала и могло влиять на ограничения мощности накачки. В настоящей работе для создания горячей проволоки использовалось дополнительное волокно, соединенное с волокном с записанной решеткой Брэгга. На рис. 3 представлена схема, собранная для анализа эффективности различных способов вывода излучения путем исследования спектральных характеристик ВБР.

Принцип работы такой схемы: излучение от широкополосного источника (Thorlabs S5FC1005S (суперлюминесцентный диод) с центральной длиной волны 1560 нм и шириной спектра 70 нм) распространяется по ОВ и, проходя через Y-ответвитель, достигает

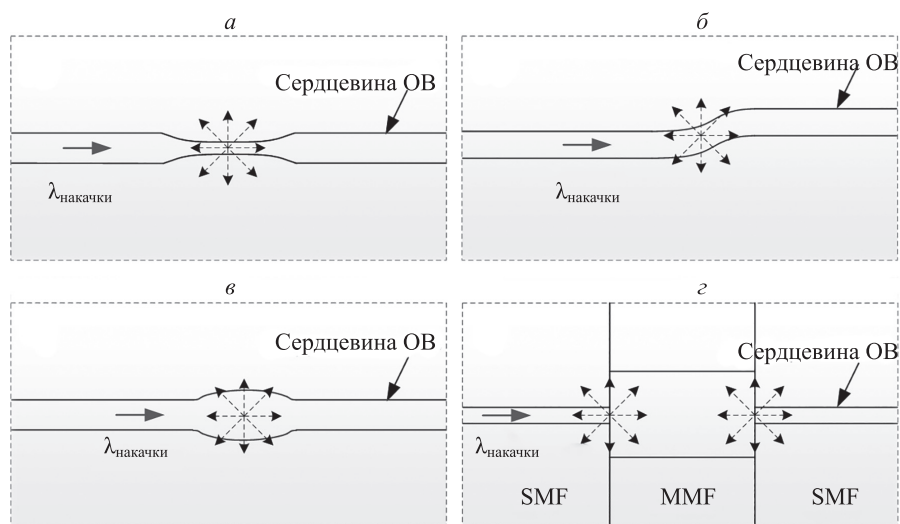


Рис. 2. Выведение излучения из сердцевины в оболочку путем создания: области с «перетяжкой» световода (taper) (а); области со смещением осей волокон относительно друг друга (offset) (б); области с увеличенным диаметром световода (bubble) (в); перехода SMF-MMF-SMF (одномодовое-многомодовое-одномодовое волокно) (г)

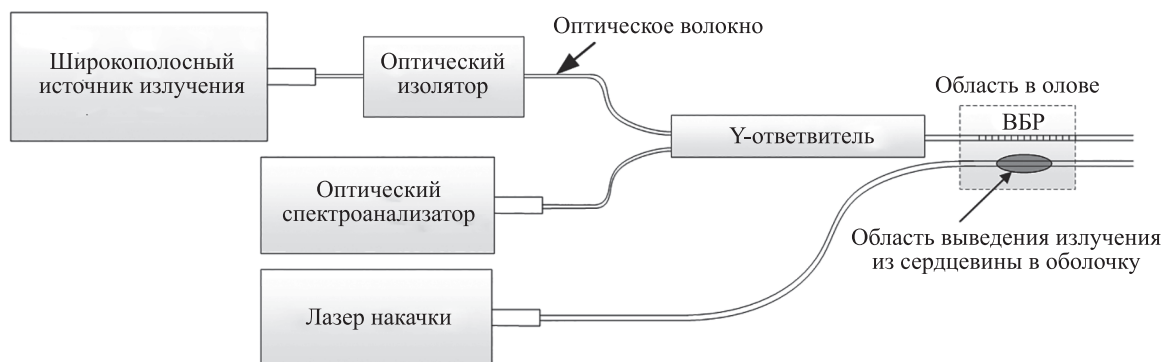


Рис. 3. Схема снятия спектров отражения и нагрева чувствительного элемента волоконно-оптического анемометра

дифракционной структуры, отражаясь от которой направляется через Y-ответвитель на спектроанализатор (Yokogawa AQ6370C, диапазон измерений которого 600–1700 нм, разрешающая способность — 20 пм). Второе волокно, подключенное к лазеру накачки (узкополосный лазер Fitel FOL1404QQO-317, излучающий на длине волны 1480 нм), соединено с чувствительным элементом с помощью олова. Расстояние между осями волокон было сравнимо с диаметром кварцевой части ОВ (около 125 мкм). Форма сформированных чувствительных элементов была близка к цилиндрической, диаметр основания составлял  $1,64 \pm 0,22$  мм, а длина  $8,19 \pm 0,56$  мм. Использование такой схемы, во-первых, позволяет достигать мощности накачки, ограниченной лишь порогом разрушения волокна (или выходом из строя пассивных оптических компонентов), во-вторых, исключает возможное влияние обратного сигнала от различных изменений геометрии световода на измерительный тракт. Еще одним преимуществом является возможность близкого расположения области выведения излучения относительно ВБР, что исключает сложности на этапе создания таких структур в случае использования одного волокна для информационного сигнала и сигнала накачки.

**Результаты**

Во всех проведенных экспериментах перед началом исследования образца производился отжиг решетки при мощности накачки около 130 мВт с целью фиксации волокон внутри олова после нагрева и остывания. Эксперименты проводились при шести значениях мощности накачки, время между началом запуска излучения в оптическое волокно и снятием спектров отражения составляло 30 с, что позволяло прогреть чувствительный элемент. Волокна закреплялись на балках таким образом, чтобы чувствительные элементы находились на воздухе и не касались рабочей поверхности (рис. 4).

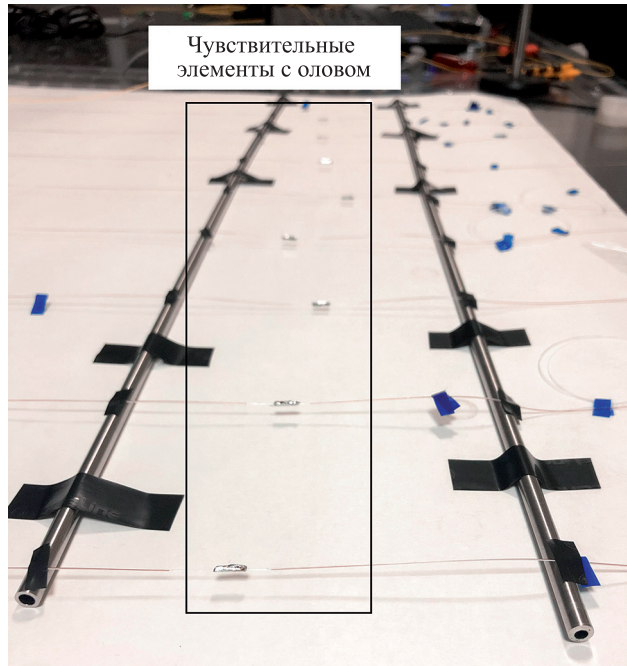


Рис. 4. Фотография чувствительных к выведению излучения элементов в лабораторных условиях

По результатам экспериментальных данных, полученных при анализе спектральных характеристик сформированных структур, были построены зависимости, продемонстрированные на рис. 5, для:

- волокна с перетяжкой (диаметр перетяжки составлял приблизительно 15 мкм в наиболее узкой области);
- структуры со смещением осей волокон относительно друг друга (смещение составляло приблизительно 50 мкм);
- волокна с областью увеличенного диаметра (около 150 мкм);

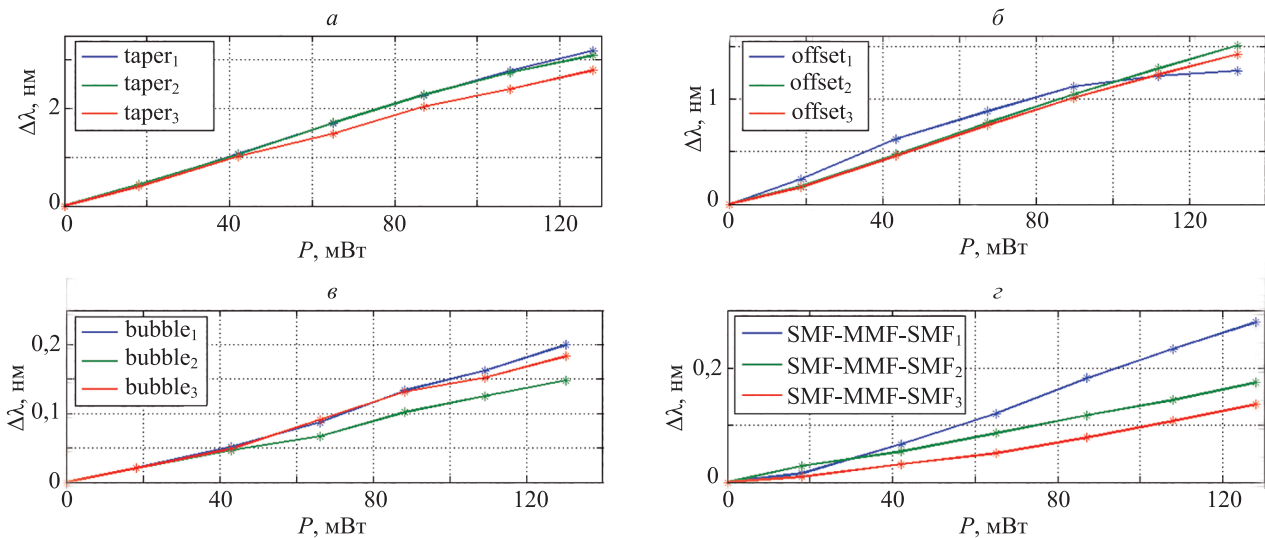


Рис. 5. Экспериментальные данные по нагреву участка оптического волокна посредством использования: области с «перетяжкой» световода (taper) (а); области со смещением осей волокон относительно друг друга (offset) (б); области с увеличенным диаметром световода (bubble) (в); перехода SMF-MMF-SMF (одномодовое-многомодовое-одномодовое волокно) (г)

— волокна с областью перехода SMF-MMF-SMF (длина области MMF составляла приблизительно 2 мм).

В качестве основного параметра анализировалось значение сдвига длины волны брэгговского резонанса при известных значениях мощности ( $P$ ) в милливаттах. Для каждого метода формировалось и исследовалось три образца, что дает представление о повторяемости и воспроизводимости проведенных экспериментов.

Для проведения сравнительного анализа эффективности построены зависимости по средним значениям для каждого вида выведения излучения с учетом среднего квадратичного отклонения — результаты представлены на рис. 6.

Как видно из графика (рис. 6), наиболее эффективным методом выведения излучения является использование волокна с перетяжкой, такой способ позволяет нагревать структуру на 232 °С (при условии, что температурный сдвиг решетки Брэгга в одномодовом ОВ составляет приблизительно 13,7 пм/°С [12, 16]). Следующим по эффективности является использование волокна со смещением осей относительно друг друга — при данном способе нагрев происходил на 110 °С. В свою очередь, наименее эффективными (для точечной анемометрии) являются включение перехода SMF-MMF-SMF и увеличенного диаметра волокна (bubble) — нагрев на 20 °С и 14 °С соответственно. При этом необходимо отметить, что диаметр перетяжки составлял не более 15 мкм, что приводило к сложностям создания чувствительных элементов ввиду заметной «хрупкости» используемой структуры. Применение таких методов, как пузырьки и переход SMF-MMF-SMF возможно в распределенной волоконно-оптической анемометрии, где необходимо постепенное выведение излучения из сердцевины волокна в его оболочку и запись массивов ВБР.

### Заключение

В работе исследованы способы создания горячей проволоки волоконно-оптического анемометра, имею-

### Литература

- Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // *Applied Physics Letters*. 1978. V. 32. N 10. P. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
- Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Optics Letters*. 1989. V. 14. N 15. P. 823–825. doi: 10.1364/OL.14.000823
- Gao S., Zhang A.P., Tam H.-Y., Cho L.H., Lu C. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings // *Optics Express*. 2011. V. 19. N 11. P. 10124–10130. doi: 10.1364/OE.19.010124
- Zhou B., Jiang H., Lu C., He S. Hot cavity optical fiber fabry-perot interferometer as a flow sensor with temperature self-calibrated // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 21. P. 5044–5048. doi: 10.1109/JLT.2016.2612657
- Zhang Y., Wang F., Liu Z., Duan Z., Cui W., Han J., Gu Y., Wu Z., Jing Z., Sun C., Peng W. Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 20. P. 24521–24530. doi: 10.1364/OE.25.024521
- Liu Y., Liang B., Zhang X., Hu N., Li K., Baldini F., Gui X., Chiaivaioli F., Guo T. Photothermal anemometer based on carbon nanotube-coated highly tilted fiber Bragg grating-assisted SPR sensor // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11199. P. 1119918. doi: 10.1117/12.2540040

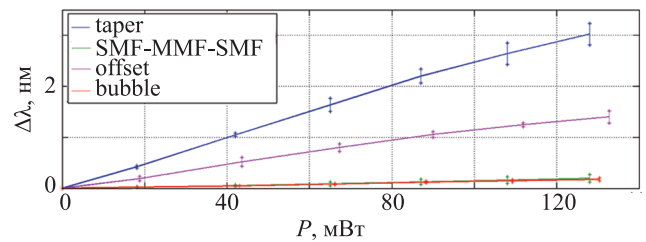


Рис. 6. Экспериментальные данные по сравнению эффективностей исследуемых методов выведения излучения: с «перетяжкой» световода (taper); со смещением осей волокон относительно друг друга (offset); с увеличенным диаметром световода (bubble); перехода SMF-MMF-SMF (одномодовое-многомодовое-одномодовое волокно) для создания горячей проволоки волоконно-оптического анемометра

щего ряд преимуществ перед аналогами, где в качестве чувствительного элемента используется металлическая нить. В большинстве изученных работ методы нагрева области волокна подразумевают применение дорогостоящих технологий, специальных видов волокон и т. д. Выполнен анализ различных способов создания нагретой проволоки, при этом описанные методы можно использовать для точечной и распределенной анемометрии.

При проведении литературного обзора по данной тематике выявлено, что волоконная анемометрия на решетках Брэгга в большей степени анализирует потоки газов, что связано с быстрым рассеянием тепла в жидкостях. Исследования, проведенные в работе, позволяют нагревать участки волокна более, чем на 230 °С, что, при достаточной изоляции, позволит использовать такие элементы для измерения потоков жидкостей.

Продемонстрированные зависимости имеют высокую практическую значимость, как для разработчиков сенсорных систем в области анемометрии, так и для научных исследований, имеющих необходимость в анализе выведения оптического излучения из волоконного световода на различных структурах.

### References

- Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 1978, vol. 32, no. 10, pp. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
- Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 1989, vol. 14, no. 15, pp. 823–825. doi: 10.1364/OL.14.000823
- Gao S., Zhang A.P., Tam H.-Y., Cho L.H., Lu C. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 11, pp. 10124–10130. doi: 10.1364/OE.19.010124
- Zhou B., Jiang H., Lu C., He S. Hot cavity optical fiber fabry-perot interferometer as a flow sensor with temperature self-calibrated. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 21, pp. 5044–5048. doi: 10.1109/JLT.2016.2612657
- Zhang Y., Wang F., Liu Z., Duan Z., Cui W., Han J., Gu Y., Wu Z., Jing Z., Sun C., Peng W. Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 20, pp. 24521–24530. doi: 10.1364/OE.25.024521
- Liu Y., Liang B., Zhang X., Hu N., Li K., Baldini F., Gui X., Chiaivaioli F., Guo T. Photothermal anemometer based on carbon nanotube-coated highly tilted fiber Bragg grating-assisted SPR sensor.

7. Wang J., Liu Z.-Y., Gao S., Zhang A.P., Shen Y.-H., Tam H.-Y. Fiber-optic anemometer based on Bragg grating inscribed in metal-filled microstructured optical fiber // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 21. P. 4884–4889. doi: 10.1109/JLT.2016.2612299
8. Liu G., Hou W., Qiao W., Han M. Fast-response fiber-optic anemometer with temperature self-compensation // *Optics Express*. 2015. V. 23. N 10. P. 13562–13570. doi: 10.1364/OE.23.013562
9. Cheng J., Zhu W., Huang Z., Hu P. Experimental and simulation study on thermal gas flowmeter based on fiber Bragg grating coated with silver film // *Sensors & Actuators A: Physical*. 2015. V. 228. P. 23–27. doi: 10.1016/j.sna.2015.02.033
10. Wang X., Dong X., Zhou Y., Li Y., Cheng J., Chen Z. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper // *Sensors & Actuators A: Physical*. 2014. V. 214. P. 230–233. doi: 10.1016/j.sna.2014.04.013
11. Novikova V.A., Varzhel S.V., Tokareva I.D., Dmitriev A.A. Liquid flow motion rate measuring method, based on the fiber Bragg gratings // *Optical and Quantum Electronics*. 2020. V. 52. N 3. P. 132. doi: 10.1007/s11082-020-2257-2
12. Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341. doi: 10.1063/1.1148392
13. Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., Брунов В.С., Калько В.Г., Артеев В.А. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2011. № 5 (75). С. 27–30.
14. Варжель С.В., Куликов А.В., Мешковский И.К., Стригалева В.Е. Запись брэгговских решеток в двулучепреломляющем оптическом волокне одиночным 20-нс импульсом эксимерного лазера // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 4. С. 85–88.
15. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решёток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 10. С. 74–78.
16. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
7. Wang J., Liu Z.-Y., Gao S., Zhang A.P., Shen Y.-H., Tam H.-Y. Fiber-optic anemometer based on Bragg grating inscribed in metal-filled microstructured optical fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 21, pp. 4884–4889. doi: 10.1109/JLT.2016.2612299
8. Liu G., Hou W., Qiao W., Han M. Fast-response fiber-optic anemometer with temperature self-compensation. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 10, pp. 13562–13570. doi: 10.1364/OE.23.013562
9. Cheng J., Zhu W., Huang Z., Hu P. Experimental and simulation study on thermal gas flowmeter based on fiber Bragg grating coated with silver film. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2015, vol. 228, pp. 23–27. doi: 10.1016/j.sna.2015.02.033
10. Wang X., Dong X., Zhou Y., Li Y., Cheng J., Chen Z. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 230–233. doi: 10.1016/j.sna.2014.04.013
11. Novikova V.A., Varzhel S.V., Tokareva I.D., Dmitriev A.A. Liquid flow motion rate measuring method, based on the fiber Bragg gratings. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, vol. 52, no. 3, pp. 132. doi: 10.1007/s11082-020-2257-2
12. Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341. doi: 10.1063/1.1148392
13. Varzhel S., Kulikov A., Aseev V., Brunov V., Kal'ko V., Arteev V. single excimer laser pulse writing of narrow-band fiber Bragg reflectors by phase mask method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 5 (75), pp. 27–30. (in Russian)
14. Varzhel S.V., Kulikov A.V., Meshkovskii I.K., Strigalev V.E. Recording Bragg gratings in a birefringent optical fiber with a single 20-ns pulse of an excimer laser. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 4, pp. 257–259. doi: 10.1364/JOT.79.000257
15. Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 638–641. doi: 10.1364/JOT.83.000638
16. Varzhel S.V. *Fiber Bragg Gratings*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2015, 65 p. (in Russian)

#### Авторы

**Новикова Виктория Александровна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5254-2133, novivial@mail.ru

**Варжель Сергей Владимирович** — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.com

#### Authors

**Victoria A. Novikova** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5254-2133, novivial@mail.ru

**Sergey V. Varzhel** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.com