

## 5. Голографические методы записи адресных волоконных брэгговских структур

О. Г. Морозов<sup>1</sup>, А. Ж. Сахабутдинов<sup>1</sup>, И. И. Нуреев<sup>1</sup>, А. А. Кузнецов<sup>1</sup>, Р. Ш. Мисбахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Конкретные применения адресных волоконных брэгговских структур налагают определенные требования на форму их спектра отражения/пропускания, которая определяется профилем показателя преломления входящих в их структуру брэгговских решеток. Общими требованиями к указанным структурам является ширина полосы пропускания отражающих/пропускающих адресных элементов в 0,5–1 пм и частотный разнос между ними в 10–40 ГГц, обеспечивающие высокую разрешающую способность измерений различных физических величин. В работе рассмотрены голографические методы записи на основе фазовых масок, интерферометров Тальбота и Ллойда и их комбинаций для реализации симметричных и несимметричных адресных волоконных брэгговских структур, позволяющие выполнить указанные выше требования.

*Ключевые слова:* Голографические методы записи брэгговских структур, Адресные волоконные брэгговские решетки, Фазовая маска, Интерферометр Тальбота, Интерферометр Ллойда.

*Цитирование:* Морозов, О. Г. Голографические методы записи адресных волоконных брэгговских структур / О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов, И. И. Нуреев, А. А. Кузнецов, Р. Ш. Мисбахов // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 30–39.

### Введение

Адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС) — квазипериодические структуры в оптическом волокне, которые при направлении на них широкополосного лазерного излучения с равномерной амплитудно-частотной характеристикой формируют в оптическом диапазоне двухчастотное излучение, разность между частотами которого много меньше несущих оптических частот и находится в радиочастотной области спектра [1–3]. Разностная частота между двумя частотными составляющими называется адресной частотой. Такая частота инвариантна к воздействию внешних физических полей и не меняется при смещении центральной частоты АВБС [4]. Таким образом, АВБС одновременно являются и формирователем несущего информацию двухчастотного излучения и чувствительным элементом измерительных систем, на основе которых могут быть построены распределенные радиофотонные сенсорные системы с большим количеством датчиков на единой брэгговской длине волны в каждом канале и без сложных оптико-электронных схем интеррогации [5, 6].

Закономерным является переход от АВБС к многоадресной волоконной брэгговской структуре (МАВБС), в спектральном отклике которой сформированы три (и более) оптических

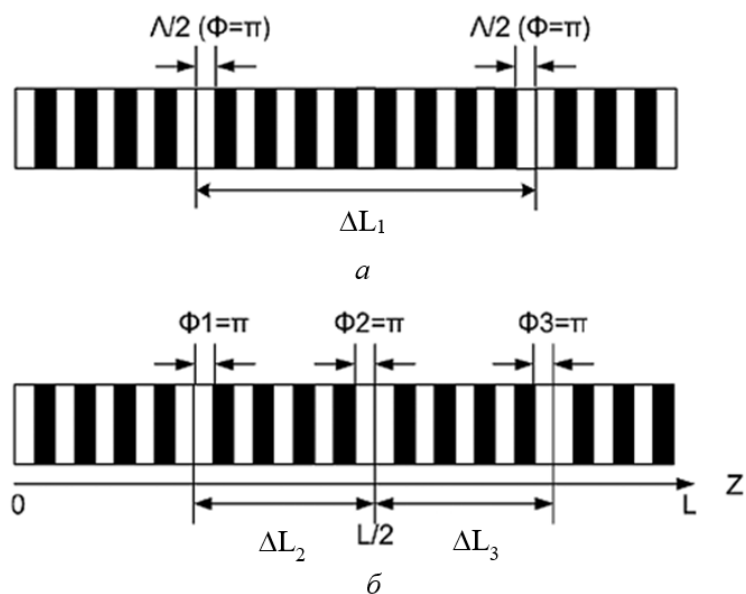


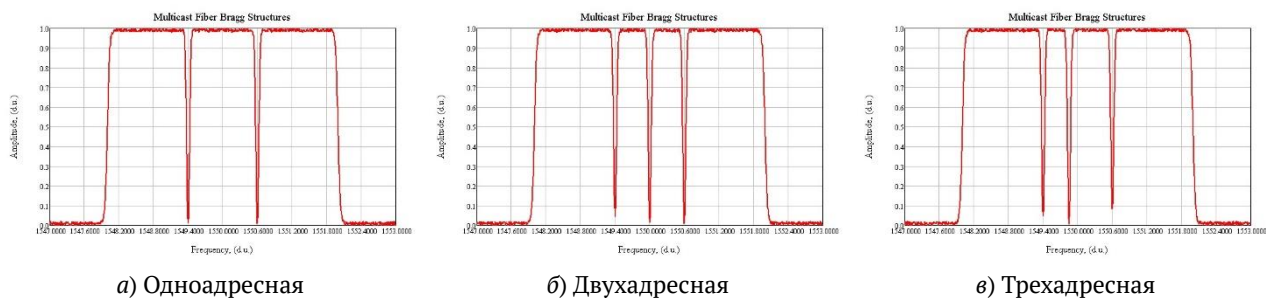
Рис. 1. Структура 2π-АВБС (а) и 3π-АВБС (б)

частотных компоненты, перекрестные биения которых на фотоприемнике формируют сложный, комбинированный адрес, состоящий из двух, трех (и более) адресных частот. Такая комбинация позволяет не только расширить адресную емкость измерительной системы, но и повысить точность определения центральной брэгговской длины волны отдельной МАВБС, а также избежать коллизий, связанных с совпадением адреса одной АВБС с различными комбинационными составляющими взаимодействия других структур в едином канале измерений [7, 8].

Относительная погрешность определения смещения центральной брэгговской длины волны МАВБС, выполненная для погрешности определения соответствующей ей амплитуды в 0,01% и 0,001% от полного диапазона измерений, не превышает  $10^{-4}$  почти во всем диапазоне измерений [7, 8]. Основными элементами АВБС и МАВБС, определяющими относительную погрешность измерений являются ширина полосы пропускания отражающих/пропускающих адресных элементов в 0,5–1 пм и частотный разнос между ними в 10–40 ГГц. Данные характеристики в свою очередь определяются технологией записи требуемых спектров адресных элементов отражения/пропускания АВБС и МАВБС и структур в целом. В данной работе рассмотрены голографические методы записи на основе фазовых масок, интерферометров Тальбота и Ллойда, и их комбинаций для реализации симметричных и несимметричных адресных волоконных брэгговских структур, позволяющие выполнить указанные выше требования.

### 1. Структура пропускающих АВБС и МАВБС

В [9] показана возможность введения множества фазовых сдвигов для формирования узкополосных окон прозрачности внутри запретной зоны волоконной брэгговской решетки (ВБР). Однако связь между центральной длиной волны каждого окна, расстояние между ними и положение внутри запретной зоны не были детально рассмотрены. В [10, 11] представлены ВБР,



**Рис. 2.** Спектры отражения/пропускания разноадресных пропускающих структур

содержащие два и три фазовых окна прозрачности, разнесенные на 50 пм, включенные в структуру волоконного лазера. Показано, что с увеличением их длины расстояние между окнами прозрачности может быть уменьшено, и наоборот. Перспективные приложения, использующие ВБР с двумя фазовыми сдвигами (рисунок 1а), как  $2\pi$ -АВБС, был продемонстрирован нами впервые в [4]. В данной работе мы рассматриваем как двух- и трехадресную  $3\pi$ -АВБС ВБР с тремя фазовыми  $\pi$ -сдвигами (рисунок 1б).

При этом, если  $\Delta L_2 = \Delta L_3$ ,  $3\pi$ -АВБС считается двухадресной (первая адресная частота, первый адрес — частота, соответствующая расстоянию между крайними фазовыми сдвигами  $\Phi_1(\Phi_3)$  и центральным  $\Phi_2$ , они равны; вторая адресная частота, второй адрес — частота, соответствующая расстоянию между крайними фазовыми сдвигами  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$ ).

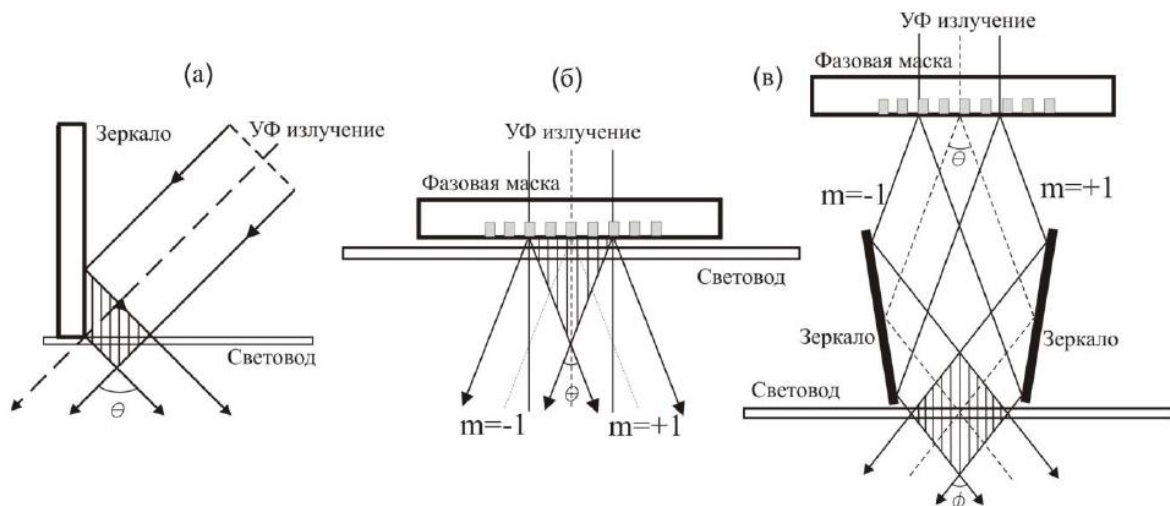
Если  $\Delta L_2 \neq \Delta L_3$  не равны  $3\pi$ -АВБС считается трехадресной (первая адресная частота, первый адрес — частота, соответствующая расстоянию между фазовыми сдвигами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ; второй адрес — частота, соответствующая расстоянию между фазовыми сдвигами  $\Phi_2$  и центральным  $\Phi_3$ ; третья адресная частота, третий адрес — частота, соответствующая расстоянию между крайними фазовыми сдвигами  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$ , что более детально видно на спектрах отражения/пропускания всех трех типов структур, представленных на рисунках 2а–2в соответственно).

Адресная частота между двумя фазовыми сдвигами (окнами прозрачности) в общем случае определяется как:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{8n\Delta L}, \quad \Delta f = \frac{8f^2 n \Delta L}{c}, \tag{1}$$

где  $n$  — эффективный показатель преломления волокна,  $\lambda$  и  $f$  — центральная брэгговская длина волны и частота  $2\pi$ -АВБС. В [11] отмечается возможность получения разносов до 30 ГГц при  $\Delta L = 8$  мм и общей длине структуры 24 мм.

$2\pi$ -АВБС (одноадресная) была изготовлена нами в лаборатории НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ с помощью фазовой маски и прецизионной подвижки Standa с разрешающим шагом в 1 мкм и пьезоэлектрическим преобразователем с разрешением в единицы нм. Для синтеза трех узких окон прозрачности с равным межволновым интервалом в запретную зону ВБР вводятся три фазовых  $\pi$ -сдвига, расположенных на одинаковом расстоянии. При тех же параметрах решетки, что и раньше, возможно получения разносов до 15 ГГц при  $\Delta L_{2,3} = 4$  мм и общей длине структуры 24 мм. Таким образом формируется двухадресная  $3\pi$ -АВБС.



**Рис. 3.** Интерференционные схемы записи ВБР: интерферометр Ллойда (а), схема с фазовой маской (б), схема с фазовой маской и интерферометром Тальбота (в) [15]

Основные проблемы записи МАВБС возникли при формировании трехадресных структур. Во-первых, возникла задача записи фазовых неэквидистантных  $\pi$ -сдвигов. Во-вторых, возникла задача сверхузких окон прозрачности. В [10, 11] достижимые окна прозрачности составляли около 1 пм (120 МГц), что соответствует верхней границе требований. Однако, в [1] показано, что чем уже полоса пропускания окон прозрачности, тем выше точность и разрешающая способность измерительного преобразования АВБС.

## 2. Голографические методы записи неэквидистантных пропускающих МАВБС со сверхузкими окнами прозрачности

Для поиска оптимальных технологий записи неэквидистантных МАВБС со сверхузкими окнами прозрачности был проведен анализ научно-технической и патентной литературы, посвященной состоянию развития науки и техники в данной области. По результатам анализа были выбраны технологии с перекрытием спектров двух идентичных ВБР [12], с использованием ступенчатой фазовой маски [13] и с изменением геометрии оптического волокна (ОВ) с помощью электрической дуги сварочного аппарата [14].

Все три технологии используют фазовые маски для записи классических ВБР, при этом в [13] сформирована специальная маска с разностью по толщине в 2300 нм. В месте ступеньки перехода толщин формируется фазовый сдвиг.

Технологии являются комбинированными и используют фазовую маску совместно с интерферометром Тальбота [12, 14] и Ллойда [13]. В методе с фазовой маской реализуется интерференция между +1 и -1 порядками дифракции излучения, прошедшего через фазовую маску (рисунок 3б). Перестройку резонансной длины волны ВБР в относительно широких пределах можно осуществить в интерферометре Тальбота одновременным поворотом дополнительных зеркал, расположенных на угловых подвижках, при этом волокно необходимо поместить на линейную подвижку (рисунок 3в). Интерферометры с пространственным разделением пучка (интерферометр Ллойда) имеют меньшее количество оптических элементов и,

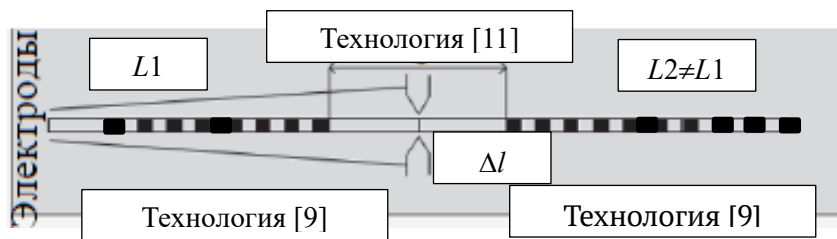


Рис. 4. Структура неэквидистантной  $3\pi$ -АВБС, записанная на основе комбинации технологий [12] и [14]

следовательно, лучшую стабильность, обладают высокой гибкостью в выборе таких параметров решеток, как период и длина (рисунок 3а).

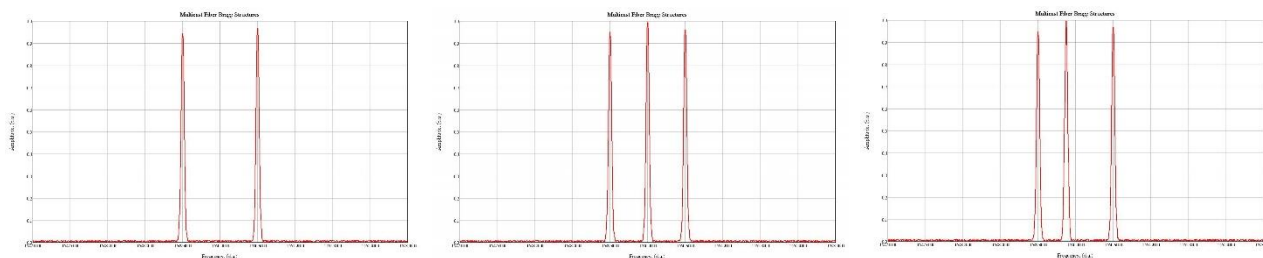
Другие методы, такие как дополнительное облучение ультрафиолетом и локальная термообработка, не обладают достаточной точностью для изготовления  $2\pi$ -АВБС и  $3\pi$ -АВБС с заданными параметрами.

В результате исследований был выбран комбинированный метод основанный на результатах работ [12, 14].

Рассмотрим метод формирования  $3\pi$ -АВБС с помощью записи нескольких брэгговских решеток. Суть метода заключается в следующем. В ОВ SMF-28 с использованием традиционных голографических схем записи (на основе интерферометра Ллойда) записывается ВБР [12], далее с использованием прецизионного позиционера волокно смещается перпендикулярно записываемому пучку и записывается вторая ВБР. Величина сдвига и размер пучка (длина ВБР) подобраны таким образом, что происходит их наложение — формируется фазовый сдвиг и структура типа  $2\pi$ -АВБС с длиной  $L_1$ . Для более точного контроля величины смещения в схеме используется интерферометр Майкельсона на объемных оптических элементах [12]. Далее по технологии [14] волокно смещается на расстояние, равное сумме длины первой  $2\pi$ -АВБС ( $L_1$ ) и расстояния между решетками ( $\Delta l$ ), после чего осуществляется запись второй  $2\pi$ -АВБС по технологии [12] с длиной  $L_2 \neq L_1$  (условия записи, а следовательно, и характеристики обеих  $2\pi$ -АВБС будут в основном одинаковы, кроме незначительной разности в полосе пропускания окна прозрачности). После записи обеих  $2\pi$ -АВБС волокно укладывается в сварочный аппарат, и воздействием электрической дуги наводится разность фаз между излучениями, отраженными от обеих структур. По указанной методике были сформированы волоконные дифракционные брэгговские структуры  $3\pi$ -АВБС (рисунок 2в) с тремя фазовыми  $\pi$ -сдвигами, длины которых (с учетом расстояния между структурами 4 мм) менялись от 24 до 52 мм.

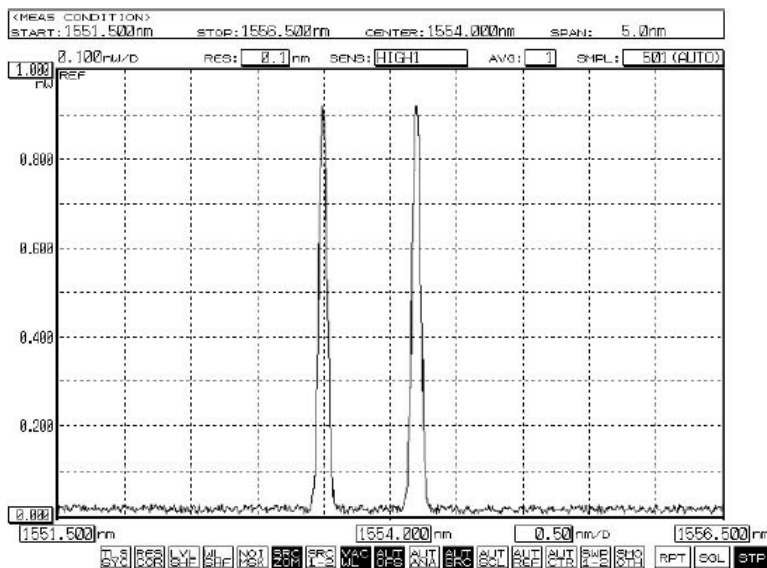
Структура неэквидистантной  $3\pi$ -АВБС представлена на рисунке 4. Крайние решетки с фазовыми  $\pi$ -сдвигами получены по технологии [12]. Центральный фазовый  $\pi$ -сдвиг получен по технологии [14]. Полоса пропускания окон прозрачности составила 30–35 МГц.

Применение таких решеток может быть осуществлено в точечных системах мониторинга температуры токопроводящих шин и контактов комплектных распределительных устройств



а) Одноадресная                      б) Двухадресная                      в) Трехадресная

**Рис. 5.** Спектры отражения/пропускания разноадресных отражающих структур



**Рис. 6.** Спектр отражения/пропускания 2λ-АВБС, записанной голографическими методами на оборудовании НИИ ПРЭФЖС КНИТУ–КАИ

[16], интенсивности частичных разрядов внутри них [17], а также распределенных системах мониторинга температуры кабельных подземных и воздушных сетей [18] энергетических подстанций, выполненных в рамках концепции «Smart Grid Plus» [19].

### **3. Голографические методы записи неэквидистантных отражающих МАВБС со сверхузкими окнами прозрачности**

Отражающие АВБС и двух-, трехадресные МАВБС строятся аналогично пропускающим с единственным отличием — вместо полного пропускания окон прозрачности используются сверхузкополосные ВБР с максимальным отражением, сдвинутые по длине волны на величину, лежащую по частоте в радиодиапазоне. Им в [1–3] дано название 2λ-АВБС и 3λ-АВБС, а их спектры отражения пропускания показаны на рисунках 5а–5в.

Как можно видеть из работ [20–22], отражающие 2λ-АВБС и 3λ-АВБС могут быть получены с использованием стандартной установки на основе ультрафиолетового лазера 244 нм и применения нанометровых подвижек, типа STANDA-8MT173. При этом может быть использована как фазовая маска, так и другие голографические схемы.

В работе [21] представлен метод записи отражающих  $2\lambda$ -АВБС с помощью механического натяжения оптического волокна.

Запись  $2\lambda$ -АВБС ведется с использованием фазовой маски. Для подстройки положения фазового сдвига используется моторизованная подвижка, осуществляющая перемещение фазовой маски и пружина, наводящая механическое натяжение на ОВ. Авторы технологии получили две идентичные ВБР с разносом в 1 нм и шириной полосы пропускания 0,3 нм [21].

Записанная нами решетка по данной технологии показана на рисунке 6. Нами были получены более узкие полосы пропускания решеток за счет увеличения их длин, которые составили 110 пм. Как было показано в [1–3] такая ширина полосы пропускания также слишком велика и приводит к существенным погрешностям в оценке измерений.

Ширину полосы пропускания можно уменьшить если еще увеличить длину решетки. В рассматриваемом случае длина  $2\lambda$ -АВБС составила 15 мм. Ее увеличение до 30 мм позволило получить решетки с шириной 45 пм.

В работах [23] представлен способ записи  $2\lambda$ -АВБС с использованием технологии структурированных решеток посредством чередования участков с наведенной решеткой и «пустых» участков волокна. Запись производилась с помощью закрепленной фазовой маски вдоль которой перемещалось на заданную длину волокно (с точностью 10 нм). В определенные моменты времени производилось отключение ультрафиолетового пучка. Параметры  $2\lambda$ -АВБС могут быть легко перестроены изменением шага подвижки. В развитие данных работ авторы предложили каскадное включение структурированных ВБР и получили оценочную ширину полосы пропускания 1 пм, что вполне удовлетворяет требованиям к АВБС и МАВБС для решения прецизионных задач. Однако длина такой решетки достигала 80 мм.

В данном разделе практически не упоминаются  $3\lambda$ -АВБС, поскольку их получение возможно путем увеличения шагов записи, представленных в технологиях [21, 23] для формирования третьего адресного элемента на произвольном расстоянии от первых двух, принадлежащих  $2\lambda$ -АВБС.

Таким образом, использование  $2\lambda$ -АВБС и  $3\lambda$ -АВБС отражающих структур, полученных с помощью классических фазовых масок, может быть ограничено применением в одно- или малосенсорных приложениях, в которых важным является не собственно измерение величины, а ее резкое изменение [24, 25]. Для использования  $2\lambda$ -АВБС и  $3\lambda$ -АВБС структур в прецизионных системах измерений необходимо использовать технологию записи структурированных ВБР, в которых ширина полосы пропускания решетки может достигать 1 пм и меньше, особенно при каскадном включении.

### **Заключение**

Были представлены комбинированные голографические технологии записи пропускающих и отражающих АВБС и МАВБС, учитывающие особенности их структур и применения в радиофотонных сенсорных системах. Для пропускающих структур  $2\pi$ -АВБС и  $3\pi$ -АВБС были полу-



чены сверхузкие симметричные и неэквидистантные фазовые  $\pi$ -сдвиги с полосой пропускания до единиц и десятков МГц при каскадированной записи одинаковых по длине волны отдельных ВБР. Используемая комбинированная технология позволяет произвольно выбирать центральную длину волны и местоположения центрального фазового сдвига, демонстрируя гибкость технологий.

Для отражающих структур была разработана комбинированная технология на основе голографической записи структурированных ВБР и показана эффективность получения трех сдвинутых по длине волны с шириной полосы пропускания до 50–100 пм. Возможно получение и более узких решеток, однако в этом случае их длина до 100 мм ограничивает точечный характер их применения в радиофотонной сенсорной системе. Предпочтительно использование  $2\lambda$ -АВБС и  $3\lambda$ -АВБС структур в пороговых системах, где точность прохождения порога может составлять единицы или десятые доли процента.

В обоих случаях формирования волновых (частотных) разнесов между адресными компонентами АВБС и МАВБС не вызывало проблем с достижением их величин, соответствующих радиочастотному диапазону 10–100 ГГц.

### Благодарность

А. А. К. выполнял данную работу при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-3421.2019.8; О. Г. М. выполнял работу при поддержке гранта РФФИ 19-57-80006 BRICS\_t.

Все авторы благодарят команды НГУ и ИАЭ СО РАН, руководимую С. А. Бабиным, за полезные консультации и разработку установки на базе аргонового лазера, на которой проводились исследования и эксперименты в НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ.

### Список источников

- [1] **Morozov, O. G.** [Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems](#) / O. G. Morozov, A. J. Sakhabutdinov // Computer Optics. — 2019. — Vol. 43. — №4. — P. 535–543. — DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
- [2] **Morozov, O. G.** [Modelling and record technologies of address fibre Bragg structures based on two identical ultra-narrow gratings with different central wavelengths](#) / O. G. Morozov, A. Zh. Sakhabutdinov, I. I. Nureev, R. Sh. Misbakhov // Journal of Physics : Conference Series. — 2019. — Vol. 1368. — P. 022049. — DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022049.
- [3] **Morozov, O. G.** [Modelling and record technologies of address fibre Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts](#) / O. G. Morozov, A. Zh. Sakhabutdinov, I. I. Nureev, R. Sh. Misbakhov // Journal of Physics : Conference Series. — 2019. — Vol. 1368. — P. 022048. — DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022048.
- [4] **Мисбахов, Рус. Ш.** [Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей](#) / Рус. Ш. Мисбахов, Рин. Ш. Мисбахов, О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, А. А. Кузнецов, А. Ж. Сахабутдинов, В. И. Артемьев, В. В. Куревин, В. В. Пуртов // Инженерный вестник Дона. — 2017. — №3.



- [5] **Сахабутдинов, А. Ж.** [Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур](#) / А. Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3.
- [6] **Сахабутдинов, А. Ж.** Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А. Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3.
- [7] **Morozov, O.** [Multi-addressed fiber bragg structures for microwave-photonic sensor systems](#) / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov, R. Misbakhov, A. Kuznetsov, T. Agliullin // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — №9. — P. 2693. — DOI: 10.3390/s20092693.
- [8] **Аглиуллин, Т. А.** [Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах](#) / Т. А. Аглиуллин, В. И. Анфиногентов, Р. Ш. Мисбахов, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов // Труды учебных заведений связи. — 2020. — Том 6. — №1. — С. 6–13. — DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13.
- [9] **Agrawal, G. P.** [Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing](#) / G. P. Agrawal, S. Radic // IEEE Photonics Technology Letters. — 1994. — Vol. 6. — №8. — P. 995–997. — DOI: 10.1109/68.313074.
- [10] **Chen, X.** [Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser](#) / X. Chen, Z. Deng, J. Yao // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics. — 2006. — Vol. 54. — №2. — P. 804–809. — DOI: 10.1109/TMTT.2005.863064.
- [11] **Xia, L.** [Stable triple-wavelength fiber ring laser with ultranarrow wavelength spacing using a triple-transmission-band fiber Bragg grating filter](#) / Li Xia, P. Shum, Yi Xin Wang, Tee Hiang Cheng // IEEE Photonics Technology Letters. — 2006. — Vol. 18. — №20. — P. 2162–2164. — DOI: 10.1109/LPT.2006.883183.
- [12] **Chehura, E.** [A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength](#) / E. Chehura, S. W. James, R. P. Tatam // Proc. of SPIE. — 2009. — Vol. 7503. — P. 750379. — DOI: 10.1117/12.835466.
- [13] **Martinez, C.** [Analysis of phase-shifted fiber Bragg gratings written with phase plates](#) / C. Martinez, P. Ferdinand // Applied Optics. — 1999. — Vol. 38. — №15. — P. 3223–3228. — DOI: 10.1364/AO.38.003223.
- [14] **Новикова, В. А.** [Исследование спектральных характеристик волоконных Брэгговских решеток с фазовым сдвигом при воздействии давления, направленного перпендикулярно оси оптического волокна](#) / В. А. Новикова, С. В. Варжель, А. А. Дмитриев, Ю. К. Залеская, Р. Ф. Идрисов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2018. — Том 18. — №5. — С. 751–757. — DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757.
- [15] **Васильев, С. А.** Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. — 2005. — Том 35. — №12. — С. 1085–1103.
- [16] **Maskevich, K. V.** [Point and quasi-distributed monitoring of digital electric power grids based on addressable fiber optic technologies](#) / K. V. Maskevich, R. S. Misbakhov, O. G. Morozov, A. Z. Sakhabutdinov, I. I. Nureev, A. A. Kuznetsov, L. M. Faskhutdinov, K. A. Lipatnikov, G. A. Morozov, L. M. Sarvarova, A. A. Tyazhelova // Proc. of SPIE. — 2019. — Vol. 11146. — P. 111461R. — DOI: 10.1117/12.2527561.
- [17] **Мисбахов, Р. Ш.** [Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах](#) / Р. Ш. Мисбахов, А. Н. Васёв, А. Ж. Сахабутдинов, И. И. Нуреев, О. Г. Морозов, К. А. Липатников // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2019. — Том 15. — №3. — С. 101–110. — DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-101-110.

- [18] **Misbakhov, R. S.** [Combined Brillouin OFDA and address FBG sensor system for distributed and point temperature measurements](#) / R. S. Misbakhov // Proc. of International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. — 2019. — P. 69–74. — DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877685.
- [19] **Maskevich, K. V.** [Fiber optic technologies for diagnostic monitoring of digital energy grids based on 'Smart Grids Plus' concept](#) / K. V. Maskevich, R. S. Misbakhov, O. G. Morozov // Proc. of International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. — 2018. — P. 8501617. — DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501617.
- [20] **Tremblay, G.** [Optimizing fiber Bragg gratings using a genetic algorithm with fabrication constraint encoding](#) / G. Tremblay, J.-N. Gillet, Y. Sheng, M. Bernier, G. Paul-Hus // Journal of Lightwave Technologies. — 2005. — Vol. 23. — № 12. — P. 4382–4386. — DOI: 10.1109/JLT.2005.858228.
- [21] **Jiang, L.** [Fabrication of dual-wavelength fiber Bragg grating with a longitudinal stretch](#) / L. Jiang, D. Zhang, W. Zhang, G. Kai, X. Dong // Frontiers of Physics in China. — 2006. — Vol. 1. — № 1. — P. 108–111. — DOI: 10.1007/s11467-005-0003-7.
- [22] **Kashyap, R.** [UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibers using phase-shifted phase-masks](#) / R. Kashyap, P. F. McKee, D. Armes // Electronics Letters. — 1994. — Vol. 30. — № 23. — P. 1977–1979. — DOI: 10.1049/el:19941357.
- [23] **Pisco, M.** [Micro-structured chirped fiber Bragg gratings: towards new spatial encoded fiber optic sensors](#) / M. Pisco, A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo, A. Cusano // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6619. — P. 66192T. — DOI: 10.1117/12.738547.
- [24] **Morozov, O. G.** [Fiber-optic Bragg sensors with special spectrum shapes for climatic test systems](#) / O. G. Morozov, P. E. Denisenko, E. P. Denisenko, A. A. Kuznetsov, V. Y. Kazarov, M. Y. Zastela // Proc. of SPIE. — 2017. — Vol. 10342. — P. 1034217. — DOI: 10.1117/12.2270750.
- [25] **Kuznetsov, A. A.** [Fiber-optic sensors for complex monitoring of traction motors](#) // A. A. Kuznetsov, K. A. Lipatnikov, I. I. Nureev, O. G. Morozov, A. J. Sakhabutdinov // Journal of Physics : Conference Series. — 2019. — Vol. 1327. — P. 012034. — DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012034.