

# Оптические волокна с массивом волоконных брэгговских решеток для сенсорных систем и случайных лазеров

С.М.Попов, О.В.Бутов, А.О.Колосовский, В.В.Волошин, И.Л.Воробьёв,  
В.А.Исаев, Д.В.Ряховский, М.Ю.Вяткин, А.А.Рыбалтовский,  
А.А.Фотиади, Ли Ся, Чжоин Ван, Д.С.Липатов, Ю.К.Чаморовский

*Представлены последние результаты работы коллектива Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН по записи протяжённых массивов волоконных брэгговских решёток (ВБР) в процессе вытяжки световода. Рассмотрены свойства таких структур, а также приведены примеры их применения в сенсорной системе СВЧ мультиплексирования сигнала высокой плотности и в качестве основы для изготовления одночастотных волоконных лазеров. Исследованы оптические и лазерные характеристики массивов ВБР, записанных с помощью лазерного УФ излучения с длиной волны 248 нм как в стандартных одномодовых телекоммуникационных световодах типа SMF-28, так и в активных световодах с сердцевинной, легированной ионами эрбия.*

**Ключевые слова:** массивы волоконных брэгговских решёток, оптические сенсоры, СВЧ демодуляция, активные оптические волокна, волоконные лазеры.

## 1. Введение

Оптические волокна (ОВ) широко используются как в качестве линий передачи информации, так и в сенсорных системах. В последнем случае для создания распределённых сенсорных систем часто требуются ОВ, обратный сигнал в которых значительно превышает уровень обратного рассеяния Рэлея. Актуальность создания ОВ с повышенным обратным сигналом вызвана активным развитием таких новых направлений прикладной фотоники, как случайные лазеры, когерентная рефлектометрия и трёхмерный датчик формы [1–7].

Обычно для увеличения интенсивности обратного сигнала используются массивы волоконных брэгговских решеток (ВБР). Запись таких структур УФ излучением осуществляется в несколько этапов: сначала с участка ОВ длиной  $\sim 10$  мм снимается полимерное покрытие, затем с помощью лазерного УФ излучения в нём формируется ВБР, после чего этот участок ОВ с записанной в нём ВБР вновь покрывается полимером, и вся процедура повторяется на следующем участке ОВ. Хотя использование описанной методики способствует значительному увеличению обратного сигнала, оно приводит также к ухудше-

нию механической прочности ОВ в местах записи ВБР, что значительно сужает возможности и область применения массивов ВБР. Кроме того, число ВБР в таком массиве ограничено. Этих недостатков лишен метод фемтосекундной записи лазерным излучением видимого или ИК диапазона, поскольку в этом случае снимать покрытие не требуется [5, 8]. Однако оба описанных метода изготовления больших массивов ВБР требуют значительных, часто неоправданных затрат.

Решением проблемы стала разработка специальных ОВ с протяжёнными массивами ВБР, запись которых УФ излучением производится непосредственно во время процесса вытяжки ОВ [9–15]. Запись ВБР в таком ОВ осуществляется с помощью импульсного излучения эксимерного УФ лазера и фазовой маски. Число ВБР на 100 м длины такого ОВ может достигать 10000, при этом отношение обратного сигнала к уровню сигнала рэлеевского рассеяния (контраст) может достигать 50 дБ на брэгговской длине волны  $\lambda_B$ . Типичная ширина спектра отражения протяжённого массива ВБР при записи во время процесса вытяжки при 100%-ном заполнении решётками ОВ составляет 0.3 нм. Используя chirpированную фазовую маску для записи массива ВБР, можно получить массивы с суммарной шириной спектра отражения 4 нм, необходимой для их применения в системах когерентной рефлектометрии, работающих в широком диапазоне температур [15, 16]. Однако в таком массиве уровень отражённого сигнала может уменьшаться.

Протяжённые массивы ВБР можно также изготовить в активных ОВ, легированных ионами редкоземельных элементов. Это позволяет создать ОВ, обладающие как повышенной отражательной способностью, так и возможностью формирования в них динамических решёток, важных для спектральной селекции лазерного излучения [17, 18].

По сравнению с обратным рэлеевским рассеянием в оптических волокнах обратное рассеяние в ОВ с массивом ВБР характеризуется достаточно малой шириной спектра отражения, которая определяется шириной спек-

С.М.Попов, А.О.Колосовский, В.В.Волошин, И.Л.Воробьёв, В.А.Исаев, Д.В.Ряховский, М.Ю.Вяткин, Ю.К.Чаморовский. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: sergei@popov.eu.org

О.В.Бутов, А.А.Рыбалтовский. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

А.А.Фотиади. University of Mons, 31 Boulevard Dolez, Mons 7000, Belgium; Ульяновский государственный университет, Россия, 432700 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42

Li Xia, Zhuoying Wang. Huazhong University, 1037 Road LuoYu, Wuhan 430074, China

Д.С.Липатов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

тра отражения отдельных ВБР. Однако внутри самой линии отражения спектры отражения ОВ с массивом ВБР подобны спектрам рэлеевского рассеяния. Они характеризуются случайным (рэлеевским) распределением амплитудного коэффициента отражения по частоте и представляют собой чередование максимумов и минимумов в типичном масштабе, определяемом обратным временем пробега света по всей длине волокна. Таким образом, если рабочая область частот находится внутри спектра отражения решёток, ОВ с массивом ВБР являются хорошей альтернативой традиционным рэлеевским волокнам и могут эффективно использоваться, в частности, в таких приложениях, как когерентная рефлектометрия [15, 16] и случайные лазеры [17, 18].

## 2. Материалы и методы

Для записи массивов ВБР использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.1. На участке башни для вытяжки волокна, который предшествует участку нанесения защитного покрытия, установлена система записи ВБР. Источником УФ излучения служил импульсный эксимерный KrF-лазер Opto-systems CL-5100 [19] с длиной волны генерации 248 нм. Плотность энергии импульса при записи каждой ВБР составляла 400 мДж/см<sup>2</sup> (длительность импульса 10 нс). Такая высокая плотность обеспечивалась фокусирующей

лазерного излучения цилиндрической линзой с фокусным расстоянием  $f' = 95$  мм. Фазовая маска находилась на расстоянии 117 мм от линзы. Оптическая схема также включала в себя диафрагму для управления размером пучка, проходящего через фазовую маску. В работе использовалась фазовая маска производства Ibsen Photonics с рабочей длиной 10 мм и периодом  $\Lambda = 1070$  нм. Скорость вытяжки ОВ составляла  $\sim 6$  м/мин.

Запись единичных ВБР в массиве выполняется за один импульс. Фазовая маска устанавливается в непосредственной близости от вытягиваемого волокна. Типичная длина единичной ВБР определяется шириной лазерного пучка и рабочей длиной фазовой маски и составляет 10 мм. Управление скважностью следования ВБР по длине световода (плотностью записи) достигается путём синхронизации скорости вытяжки и частоты следования импульсов УФ лазера. Так, полное 100%-ное заполнение ОВ единичными ВБР достигалось при частоте следования импульсов 10 Гц и скорости вытяжки 6 м/мин. Уменьшение частоты следования импульсов до 5 Гц при той же скорости вытяжки приводит к 50%-ному заполнению ОВ единичными ВБР. В этом случае расстояние между единичными ВБР равно их длине и составляет 10 мм. В случае вытяжки тейперных ОВ изменение их диаметра определяется изменением скорости подачи заготовки ОВ.

Для записи массивов ВБР использовались преформы с малым содержанием оксида германия в сердцевине (германосиликатное стекло). Волноводные параметры световодов, вытянутых из таких преформ, соответствовали спецификации G.652.

В эксперименте по записи протяжённого массива ВБР в активном ОВ использовалась специально синтезированная преформа с сердцевинной из герmanoфосфоросиликатного стекла, дополнительно легированной ионами эрбия ( $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ). При малых концентрациях ионов эрбия фосфоросиликатная матрица обеспечивает достаточно равномерное их распределение по сетке стекла (без образования крупных кластерных элементов), а добавка оксида германия повышает фоточувствительность материала сердцевины к лазерному УФ излучению. Преформа эрбиевого световода была изготовлена полностью газофазным MCVD-методом с использованием малолетучего хелата  $\text{Er}(\text{thd})_3$ , термостатируемого при 157 °С. Для получения заготовки использовалась тонкостенная кварцевая труба Heraeus ( $15 \times 12.4$ ) марки F300. Сначала осаждалось несколько слоёв  $\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ -стекла отражающей оболочки с показателем преломления чуть ниже, чем у кварцевого стекла. Следующим шагом, после предварительного сжатия трубы до внутреннего диаметра 5–6 мм, было осаждение сердцевины. Нанесение отражающей оболочки и предварительное сжатие опорной трубы позволило снизить потерю летучих компонентов ( $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{GeO}_2$ ) на испарение и уменьшить ширину центрального провала на профиле показателя преломления сердцевины.

Стекло сердцевины было синтезировано по оригинальной методике отдельного осаждения его компонентов [20, 21]. Вначале при пониженной температуре (1400 °С) осаждался пористый слой матрицы  $\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , затем в трубу поступали пары  $\text{Er}(\text{thd})_3$  в смеси с кислородом, и образующиеся в зоне нагрева (1300 °С) частицы  $\text{Er}_2\text{O}_3$  осаждались на поверхности слоя матрицы. Далее слой  $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  сплавлялся (1950 °С) в прозрачное стекло в атмосфере  $\text{CCl}_4$  для удаления воды,

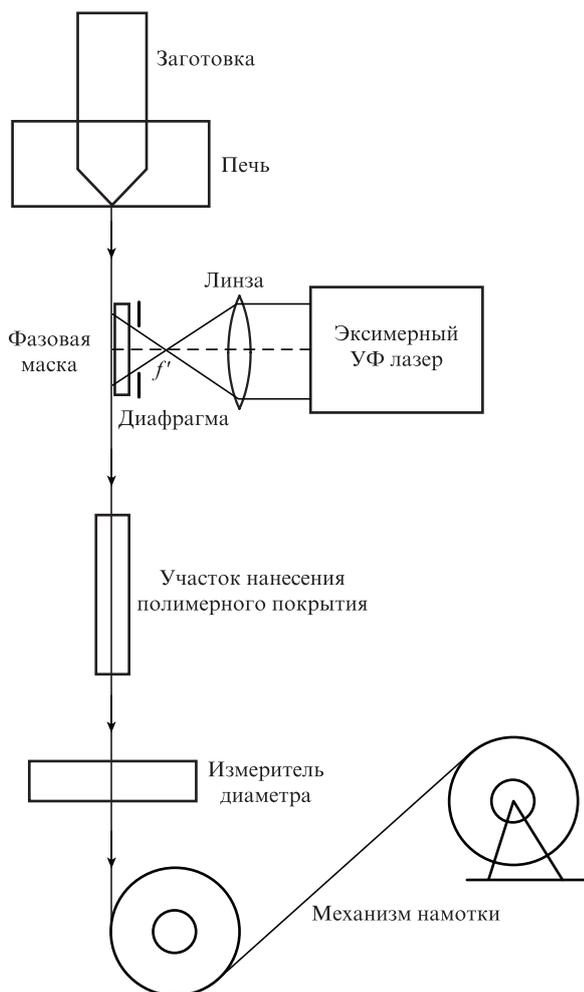


Рис.1. Схема экспериментальной установки для записи массивов ВБР.

образующейся на стадии пропитки. Для изготовления сердцевинки проводилось осаждение пяти слоев матрицы с последующей пропиткой и сплавлением каждого слоя. И наконец, трубчатая преформа окончательно консолидировалась в сплошной стержень при относительно низкой температуре (1950 °С). Преформа перетягивалась и жакетировалась под длину волны отсечки первой моды 0.94 мкм. Разность показателей преломления сердцевинки и оболочки в жакетированной преформе составила 0.009.

Из преформы был вытянут пробный одномодовый световод стандартного диаметра 125 мкм. Уровень «серых» оптических потерь в нём составил ~2 дБ/км, что является признаком гомогенности структуры стекла сердцевинки и отсутствия в нём примесей металлов переходных групп. Интенсивности пиков поглощения ионов  $Eg^{3+}$  в максимумах на длинах волн 980, 1490 и 1535 нм в световоде составили 1.4, 1.2 и 2.8 дБ/м соответственно. По результатам исследования элементного состава стекла сердцевинки световода с помощью рентгеновского анализатора (JEOL 5910LV) средняя концентрация  $P_2O_5$  составила 6.5 мол. %, а  $GeO_2$  – 2.5 мол. %. Концентрация эрбия оказалась ниже предела обнаружения анализатора (менее 0.1 ат. %).

Для измерения параметров получаемых ОВ с массивом ВБР использовался как метод частотной рефлектометрии [22] с помощью прибора Luna 4400, так и спектральный метод с использованием анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370D, имеющего максимальное оптическое разрешение 0.02 нм. Источником излучения для спектральных измерений служил суперлюминесцентный диод с волоконным выходом или галогенная лампа.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

#### 3.1. Сенсорная рефлектометрия на массивах ВБР

Одним из новых направлений использования световодов с массивом ВБР является применение последних в системах СВЧ демодуляции сигнала высокой пропускной способности [23–27] для измерения температуры или механического натяжения ОВ. Среди достоинств данного метода следует отметить его пространственное разрешение (менее 0.5 м) и точность определения натяжения ОВ до 0.0001% [25] при относительной схемотехнической простоте реализации по сравнению с методами частотной рефлектометрии [22], системами на основе рассеяния Мандельштама – Бриллюэна BOTDA [28, 29], а также рефлектометрами, использующими эффект комбинационного рассеяния света [29]. В настоящее время в системах СВЧ демодуляции в качестве чувствительных элементов используются ОВ с отдельными ВБР в массиве, изготовленном с помощью ручной последовательной записи [25].

Для максимальной интеграции оптических волокон с массивом ВБР в уже существующие линии связи необходимо, чтобы их геометрические параметры совпадали с параметрами стандартных одномодовых ОВ (типа SMF-28). Отклонение параметров от стандартных значений может приводить к нежелательным потерям в месте стыковки ОВ, что особенно актуально для сенсорных систем, работающих по рефлектометрическому принципу, поскольку происходит ослабление как проходящего, так и рассеянного сигнала. Например, при использовании массива ВБР, записанного в фоточувствительном ОВ [11] с диаметром сердцевинки 6 мкм, его стыковка со стандарт-

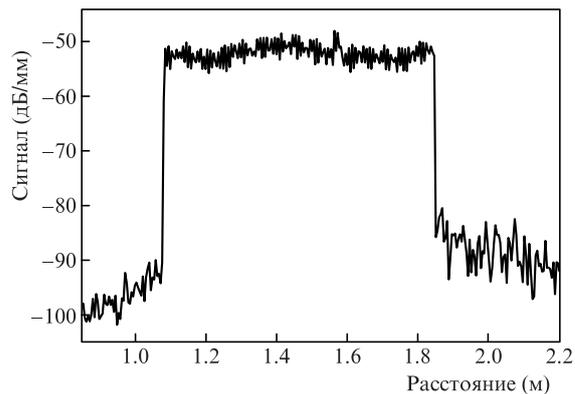


Рис.2. Частотная рефлектограмма массива ВБР, записанных при вытяжке одномодового ОВ типа SMF-28.

ным одномодовым ОВ типа SMF-28 (диаметр сердцевинки 9 мкм) приводит к ослаблению сигнала, составляющему ~50% при однократном проходе и ~75% при двойном. Столь высокий уровень потерь сигнала неприемлем для практических применений таких ОВ и ограничивает возможность функционирования систем СВЧ демодуляции.

На рис.2 показана частотная рефлектограмма массива ВБР, записанного во время процесса вытяжки с использованием заготовки для получения ОВ типа SMF-28 по схеме, показанной на рис.1. Плотность заполнения массива ВБР составляет 100% (100 ВБР на 1 м длины ОВ). Контраст записи достигает 50 дБ на длине волны 1548.2 нм, что на 20–25 дБ превышает ранее полученный контраст записи [15] в ОВ данного типа. Спектр отражения показан на рис. 3. Ширина спектра отражения не превышает 0.4 нм.

Полученные образцы характеризуются значительным коэффициентом отражения: образец длиной 10 м имеет коэффициент отражения до 15%. Достигнутый уровень отражённого сигнала массива ВБР более чем достаточен для использования в системах распределённого мониторинга, поскольку сильное локальное отражение приводит к быстрому ослаблению проходящего далее по ОВ сигнала и к значительному сокращению зоны мониторинга.

На рис.4. показана оптическая схема экспериментальной установки СВЧ демодуляции сигнала [25]. Источником широкополосного излучения установки являлся источник усиленного спонтанного излучения (УСИ), работающий в С-диапазоне длин волн. Контроллер поляризации (КП) использовался для поддержания поляриза-

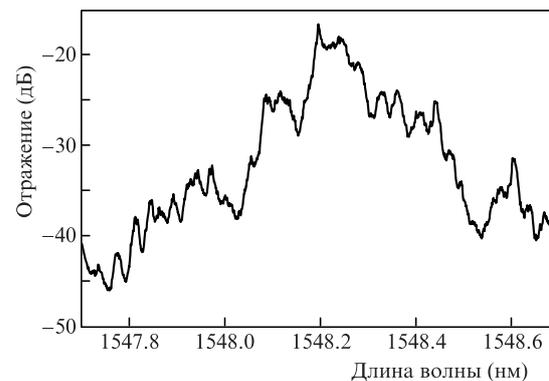


Рис.3. Спектр отражения массива ВБР, записанных при вытяжке одномодового ОВ (длина отрезка ОВ 1 м).

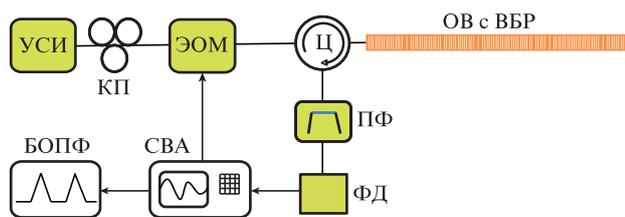


Рис.4. Оптическая схема экспериментальной установки СВЧ демодуляции сигнала.

ции излучения внутри электрооптического модулятора (ЭОМ), полоса пропускания которого составляла 2.5 ГГц по уровню 3 дБ. Для ввода и вывода излучения из оптического волокна с массивом ВБР использовался оптический циркулятор (Ц). Выделение сигнала осуществлялось с помощью программируемого полосового фильтра (ПФ) марки Finisar WS-AA-4000S-ZZ-H. Для детектирования сигнала служил фотоприемник (ФД) Newport 1647 с полосой пропускания 1.1 ГГц. Запись спектров СВЧ сигнала производилась с помощью сетевого векторного анализатора (СВА) Rohde&Schwarz ZVL6 с полосой пропускания 6 ГГц. В эксперименте использовались ОВ с массивом ВБР (ОВ с ВБР) длиной 6 м.

При работе установки СВЧ демодуляции сигнала волотно с массивом ВБР засвечивается источником широкополосного излучения. При этом частота излучения дополнительно сканируется в пределах до 2.5 ГГц с помощью ЭОМ. Отражённый от массива ВБР сигнал выделяется с помощью ПФ и фиксируется для каждой частоты (в пределах полосы сканирования ЭОМ) фотоприёмником ФД. Демодуляция (преобразование) спектра СВЧ сигнала в пространственное распределение (рефлектограмму) выполняется с помощью быстрого обратного преобразования Фурье (БОПФ). Определение величины воздействия (например, нагрева или растяжения) проводится путём вычитания СВЧ спектров, измеренных до и после воздействия на ОВ с массивом ВБР.

Для проведения эксперимента ОВ с массивом ВБР было предварительно зафиксировано на металлической полосе длиной около 1 м, центральная часть которой была приподнята на высоту 10 см, что привело к её изгибу и растяжению закреплённого на ней ОВ с массивом ВБР. ОВ растягивалось в двух местах, что достигалось за счёт его двукратного протягивания через металлическую полосу (слева направо и справа налево). На рис.5 показана рефлектограмма, полученная методом СВЧ демодуляции, на которой видны два одинаковых пика на расстоя-

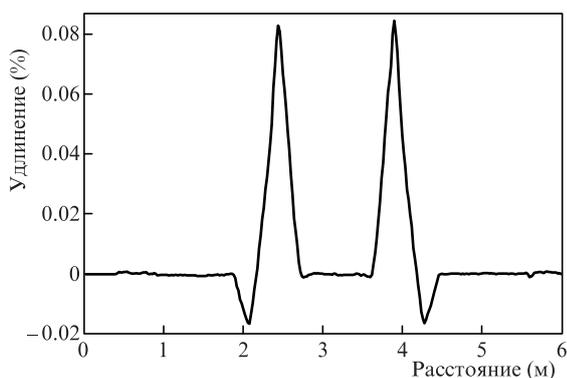


Рис.5. Пространственный профиль растяжения ОВ с массивом ВБР, полученный методом СВЧ демодуляции.

нии около 1.5 м, соответствующие двум участкам растяжения ОВ с массивом ВБР.

### 3.2. Массивы ВБР с расширенным спектром отражения

В ходе работы осуществлялся поиск дальнейших путей расширения спектра отражения массива ВБР. Необходимость этого вызвана потребностью обеспечения надёжного соответствия длины волны источника когерентного рефлектометра и длины волны отражения массива ВБР. Очевидно, что при изготовлении и укладке волоконного кабеля могут возникать дополнительные напряжения, изменяющие длину волны отражения отдельных ВБР или целого массива. Кроме того, расширение спектра отражения ВБР позволяет увеличить диапазон как измеряемых деформаций, так и рабочих температур сенсорных систем, поскольку изменение температуры окружающей среды на 1 °С вызывает сдвиг длины волны на 10–17 пм в зависимости от типа световода, брэгговской длины волны и температурного диапазона [30, 31]. Ранее было отмечено, что использование chirpированной фазовой маски позволяет получить ОВ с массивами ВБР с шириной спектра отражения до 4 нм [15, 16]. Однако chirpированная фазовая маска не всегда может быть доступна при разовой записи ОВ с массивом ВБР.

Для расширения спектра отражения массива ВБР исходная стандартная (с постоянным периодом 1070 нм) длина фазовой маски 10 мм уменьшалась с помощью диафрагмы до 1.5 мм. При этом диафрагма находилась на минимально близком расстоянии от фазовой маски. Это позволило увеличить ширину спектра отражения массива ВБР до 0.8 нм (рис.6) против 0,2 нм, получаемых при использовании фазовой маски длиной 10 мм. При этом уровень отражённого сигнала уменьшился на 4–6 дБ по сравнению с сигналом, получаемым при записи ВБР фазовой маской без диафрагмирования (ср. рис.6 и рис.3). Расширение спектра отражённого сигнала до 0.8 нм позволяет, например, увеличить диапазон рабочих температур ОВ с массивом ВБР примерно до 70 °С, что значительно расширяет область применения последних.

### 3.3. Случайные лазеры на массиве ВБР

Одним из новых направлений использования массивов ВБР является применение такой структуры в качестве резонаторов случайных лазеров [32–35]. Сфокусирован-

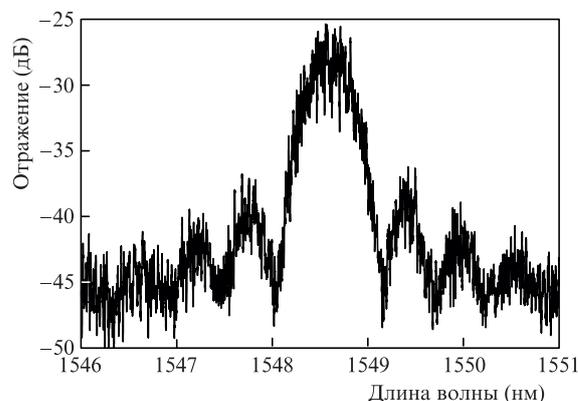


Рис.6. Спектр отражения массива ВБР, записанного при вытяжке одномодового ОВ (длина отрезка ОВ 1 м) с использованием фазовой маски длиной 1.5 мм, полученной с помощью диафрагмы.

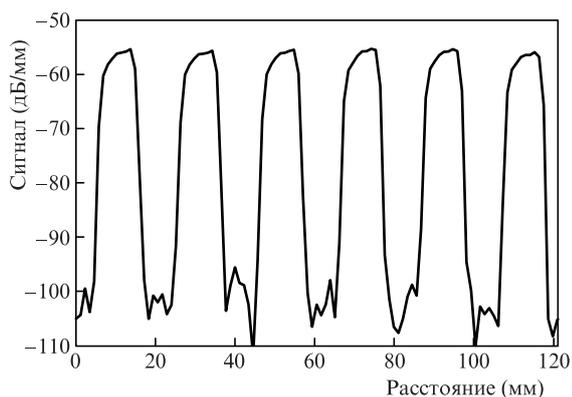


Рис.7. Частотная рефлектограмма массива ВБР, записанного во время вытяжки ОВ из заготовки с сердцевинной из фосфорогерманосиликатного стекла, легированного ионами эрбия.

ное УФ излучение импульсного эксимерного лазера во время вытяжки ОВ способно обеспечить приемлемый уровень контраста отдельных ВБР, поэтому создавать протяжённые массивы ВБР можно не только в фоточувствительных световодах с сердцевинной из германосиликатного стекла, но и в ОВ с невысокой начальной фоточувствительностью, например в активных ОВ с сердцевинной из алюмосиликатного стекла, дополнительно легированной ионами редкоземельных элементов [17, 18]. Однако недавние наши эксперименты показали, что в активных ОВ с дополнительной добавкой  $GeO_2$  в сердцевине контраст записанных при вытяжке ВБР получается как минимум на порядок более высоким, чем в активных ОВ с алюмосиликатной сердцевинной, что позволяет существенно увеличить добротность резонатора случайного лазера [36].

В ходе эксперимента из преформы с германофосфоросиликатным составом стекла сердцевинной, дополнительно легированного ионами эрбия, были вытянуты два образца ОВ с плотностью записи ВБР в них 50% и 100% соответственно (образцы 1 и 2). На рис.7 показана рефлектограмма образца 1. Контраст записи ВБР достигал 50 дБ на длине волны 1547.5 нм. Спектр отражения массива ВБР для отрезка образца 1 длиной 1 м показан на рис.8.

Лазерные характеристики образца 2 длиной ~50 м исследовались в схеме «встречной накачки», детально рассмотренной ранее в работах [15, 17]. Накачка осуществлялась на длине волны 1490 нм с помощью диодного лазера

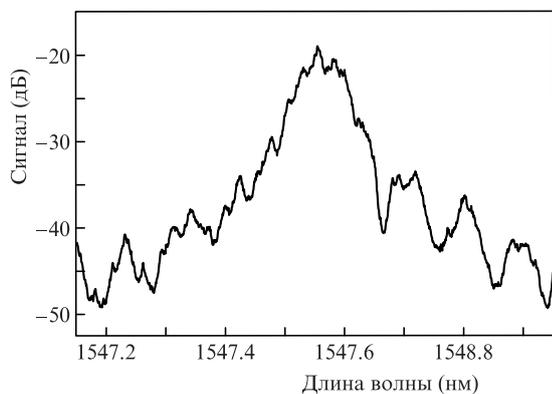


Рис.8. Спектр отражения отрезка ОВ длиной 1 м с массивом ВБР, записанным во время вытяжки ОВ из заготовки с сердцевинной из фосфорогерманосиликатного стекла, легированного ионами эрбия.

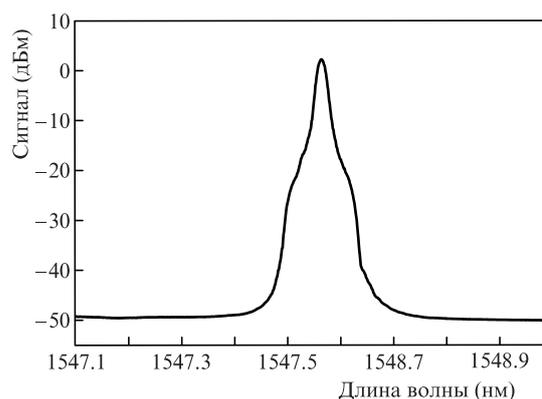


Рис.9. Спектр лазерной генерации эрбиевого ОВ с массивом ВБР при накачке на длине волны 1490 нм.

Alcatel A1948FBG. Спектр излучения волоконного лазера на основе образца 2 представлен на рис.9. Максимум интенсивности излучения лазера (1547.55 нм) совпадает с максимумом отражения массива ВБР. Максимальная выходная мощность исследованного лазера составила 6 мВт при мощности излучения накачки 90 мВт, причём дальнейшее увеличение мощности накачки не приводит к изменению выходной мощности лазера.

В заключение ещё раз отметим, что в настоящей работе исследованы основные оптические и лазерные характеристики протяжённых массивов ВБР, изготовленных в процессе вытяжки световодов. Продемонстрирована возможность создания одночастотных волоконных лазеров на основе массивов ВБР, в том числе записанных в сердцевине активных световодов.

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной поддержке гранта РФФИ и ГФЕН Китая № 20-57-53013. Работа Р.А.А. и Л.Д.С. поддержана грантом РФФИ № 20-08-00822 А, работа Ф.А.А. – грантами Министерства образования и науки РФ (программа Мегагрант № 2020–220-08–1369) и грантом РНФ № 18-12-00457.

1. Turitsyn S., Babin S., El-Taher A., Harper P., Churkin D., Kablukov S., Ania-Castañón J., Karalekas V., Podivilov E. *Nature Photon.*, **4**, 231 (2010).
2. Fotiadi A. *Nature Photon.*, **4**, 204 (2010).
3. Shatalin S., Treschikov V., Rogers A. *Appl. Opt.*, **37**, 5600 (1998).
4. Moore J., Rogge M. *Opt. Express*, **20**, 2967 (2012).
5. Bronnikov K., Wolf A., Yakushin S., Dostovalov A., Egorova O., Zhuravlev S., Semjonov S., Wabnitz S., Babin S. *Opt. Express*, **27**, 38421 (2019).
6. Yatsev V., Zotov A., Butov O. *Results Phys.*, **19**, 103485 (2020).
7. Stepanov K., Zhirnov A., Chernutsky A., Koshelev K., Pnev A., Lopunov A., Butov O. *Sensors*, **22**, 6431 (2020).
8. Przhiiakovskii D., Butov O. *Results Phys.*, **30**, 104902 (2021).
9. Askins C., Tsai T., Williams G., Putnam M., Bashkansky M., Friebele E. *Opt. Lett.*, **17**, 833 (1992).
10. Guo H., Tang J., Li X., Zheng Yu., Yu Hu., Yu Ha. *Chinese Opt. Lett.*, **11**, 030602 (2013).
11. Zaitsev I., Butov O., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M., Kolosovskii A., Popov S., Chamorovskii Yu. *J. Comm. Technol. Elec.*, **61**, 639 (2016).
12. Popov S., Butov O., Kolosovski A., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M., Fotiadi A., Chamorovski Y. *Proc. PIERS, IEEE Xplore* (St. Petersburg, Russia, 2017, p. 1568).
13. Chamorovskiy Y., Butov O., Kolosovskiy A., Popov S., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M. *Opt. Fiber Technol.*, **34**, 30 (2017).
14. Chamorovskiy Yu., Butov O., Kolosovskiy A., Popov S., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M., Odnobludov M. *Opt. Fiber Technol.*, **50**, 95 (2019).

15. Попов С.М., Бутов О.В., Колосовский А.О., Волошин В.В., Воробьев И.Л., Исаев В.А., Вяткин М.Ю., Фотиади А.А., Чаморовский Ю.К. *Квантовая электроника*, **49** (12), 1127 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (12), 1127, (2019)].
16. Харасов Д.Р., Бенгальский Д.М., Вяткин М.Ю., Наний О.Е., Фомиряков Э.А., Никитин С.П., Попов С.М., Чаморовский Ю.К., Трещиков В.Н. *Квантовая электроника*, **50** (5), 510 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (5), 510, (2020)].
17. Popov S., Butov O., Bazakutsa A., Vyatkin M., Chamorovskii Yu., Fotiadi A. *Results Phys.*, **16**, 102868 (2020).
18. Popov S., Butov O., Bazakutsa A., Vyatkin M., Chamorovskii Yu., Fotiadi A. *Proc. SPIE*, **113571Q** (1 April 2020). DOI: 10.1117/12.2557818.
19. <https://optosystems.ru/product/cl-5000/>.
20. Lipatov D., Guryanov A., Yashkov M., Bubnov M., Likhachev M. *Inorg. Mater.*, **54**, 276 (2018).
21. Khudyakov M., Lobanov A., Lipatov D., Abramov A., Vechkanov N., Guryanov A., Melkumov M., Bobkov K., Aleshkina S., Kochergina T., Iskhakova L., Milovich F., Bubnov M., Likhachev M. *Laser Phys. Lett.*, **16**, 025105 (2019).
22. Soller B., Gifford D., Wolfe M., Froggatt M. *Opt. Express*, **13**, 666 (2005).
23. Wang Y., Gong J., Wang D., Dong B., Bi W., Wang A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23**, 70 (2011).
24. Zhang M., Sun Q., Wang Z., Li X., Liu H., Liu D. *Opt. Commun.*, **285**, 3082 (2012).
25. Xia Li, Cheng Rui, Li Wei, Liu D. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **27**, 323 (2015).
26. Cheng R., Xia Li., Sima C., Ran Ya., Rohollahnejad Ja., Zhou Ji, Wen Yo., Yu Can. *Opt. Express*, **24**, 2466 (2016).
27. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. *Opt. Express*, **21**, 22799 (2013).
28. Bao X., Chen L. *Sensors*, **11**, 4152 (2011).
29. Schenato L. *Appl. Sci.*, **7**, 896 (2017).
30. Hirayama, N., Sano Y. *ISA Transact.*, **2**, 169 (2000).
31. Butov O., Golant K., Nikolin I. *Electron. Lett.*, **11**, 523 (2002).
32. Popov S., Chamorovsky Yu., Mégret P., Zolotovskii I., Fotiadi A. *Proc. ECOC, IEEE Xplore* (Valencia, Spain, 2015m p. 1). DOI: 10.1109/ECOC.2015.7341709.
33. Popov S., Butov O., Chamorovskiy Y., Isaev V., Kolosovskiy A., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M., Mégret P., Odnoblyudov M., Korobko D., Zolotovskii I., Fotiadi A. *Results Phys.*, **9**, 625 (2018).
34. Popov S., Butov O., Chamorovski Y., Isaev V., Mégret P., Korobko D., Zolotovskii I., Fotiadi A. *Results Phys.*, **9**, 806 (2018).
35. Skvortsov M., Wolf A., Dostovalov A., Egorova O., Semjonov S., Babin S. *J. Lightwave Technol.*, **1** (2021). DOI: 10.1109/JLT.2021.3116758.
36. Rybaltovsky A., Popov S., Lipatov D., Umnikov A., Abramov A., Morozov O., Ryakhovskiy D., Voloshin V., Kolosovskii A., Vorob'ev I., Butov O., Chamorovskiy Yu. *Fibers*, **9**, 53 (2021).