

Оптические волокна с массивами волоконных брэгговских решёток записанные в процессе вытяжки оптического волокна

**С.М. Попов^{1*}, Д.В. Ряховский¹, А.О. Колосовский¹, В.В. Волошин¹, И.Л. Воробьёв¹,
В.А. Исаев¹, М.Ю. Вяткин¹, А.А. Рыбалтовский², Д.С. Липатов³, А.А. Фотиади⁴,
Ю.К. Чаморовский¹ и О. В. Бутов⁵**

¹Фрязинский филиал института Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

²Институт общей физики им. Прохорова РАН

³Институт Химии Высокочистых Веществ РАН

⁴Ульяновский Государственный университет

⁵Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

*E-mail: sergei@popov.eu.org

DOI:10.31868/RFL.2024.113-114

Данный материал является описанием результатов работ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в области записи массивов волоконных брэгговских решёток (ВБР) в процессе вытяжки оптического волокна (ОВ). ОВ в данное время используются как в качестве линий передачи информации, так и в лазерных и сенсорных системах. В последнем случае для создания распределённых сенсорных систем часто требуются оптические волокна, которые должны иметь обратный сигнал, значительно превышающий уровень обратного рассеяния Рэлея. Актуальность задачи создания ОВ с повышенным обратным сигналом вызвано активным развитием таких новых направлений прикладной фотоники как когерентная рефлектометрия, случайные лазеры и 3-х мерный датчик формы [1-3]. Обычно для увеличения интенсивности обратного сигнала используются массивы ВБР. При записи таких структур УФ-излучением производится в несколько итераций: сначала с участка ОВ длиной ~ 10 мм снимается полимерное покрытие, затем в нём формируется ВБР с помощью лазерного УФ-излучения, после чего осуществляется перепокрывание участка ОВ, с записанной в нём ВБР, полимером, и вся процедура повторяется на следующем участке ОВ. Хотя использование описанной техники способствует значительному увеличению обратного сигнала, оно также вызывает ухудшение механической прочности ОВ в местах записи ВБР. Это значительно сужает возможности и область применения массивов ВБР. Кроме того, количество ВБР в таком массиве ограничено. Данного недостатка лишен метод фемтосекундной записи лазерным излучением видимого или ИК диапазона. При этом снятие покрытия не требуется, что отмечено в работах [2, 4-5]. Однако оба метода изготовления длинных массивов отражателей требуют значительных, часто неоправданных, трудозатрат. Альтернативным решением задачи записи массивов ВБР стала методика записи во время процесса вытяжки ОВ [6]. Формирование массива ВБР в таком ОВ выполняется с помощью импульсного излучения эксимерного УФ-лазера, проходящего через фазовую маску. Количество ВБР на 100 метрах такого ОВ может достигать 10000 штук. Увеличение обратного сигнала по сравнению с уровнем рассеяния Рэлея (т.н. контраст записи) достигает величины 50 дБ на $\lambda=1550$ нм [7]. В качестве покрытий ОВ с массивами ВБР может использоваться не только обычный полимер, но и алюминий. Это позволяет расширить верхнюю границу рабочих температур массивов ВБР до 500⁰С [8]. Величина дополнительных оптических потерь вызванных процессом записи массивов ВБР (для заготовок соответствующих спецификации ITU-T G.652) не превышает величину 0,8 дБ на $\lambda=1550$ нм для

образцов $L=1$ км состоящим из более 2000 ВБР [7]. С помощью данного метода запись массивов ВБР возможно выполнять не только в заготовках ОВ типа ITU-T G.652, но и в многосердцевинных заготовках ОВ [7], а также в заготовках легированных ионами редкоземельных материалов. Последнее позволяет использовать данные ОВ с массивами ВБР в качестве компактных резонаторов (длиной до 100 метров) т.н. «случайных» волоконных лазеров. В ходе экспериментов была получена узкополосная непрерывная лазерная генерация в ОВ легированных ионами эрбия, иттербия, висмута в диапазоне (976-1700 нм) т.е. включая т.н. «расширенный» телекоммуникационный диапазон (более 1570 нм) [9-12]. Эффективность лазерной генерации - 33% на $\lambda=1548$ нм при накачке на $\lambda=976$ нм [12] (массив из 700 ВБР ОВ $L=7$ м легированного Er^{3+}). Конструкция лазера обеспечивает преобладание отражательной способности создаваемой динамической решёткой инверсной населенности над стационарными центрами отражения, что позволяет эффективно осуществлять нелинейную фильтрацию непосредственно в резонаторе ОВ [9]. При этом ширина лазерной линии сужается до частотного диапазона ~ 550 Гц. Типичная ширина спектра отражения массивов ВБР при использовании фазовой маски с постоянным периодом составляет величину 0,3 нм [7]. При использовании chirпированной фазовой маски ширина спектра отражения ОВ с массивом ВБР достигает величины до 4 нм (рис. 1).

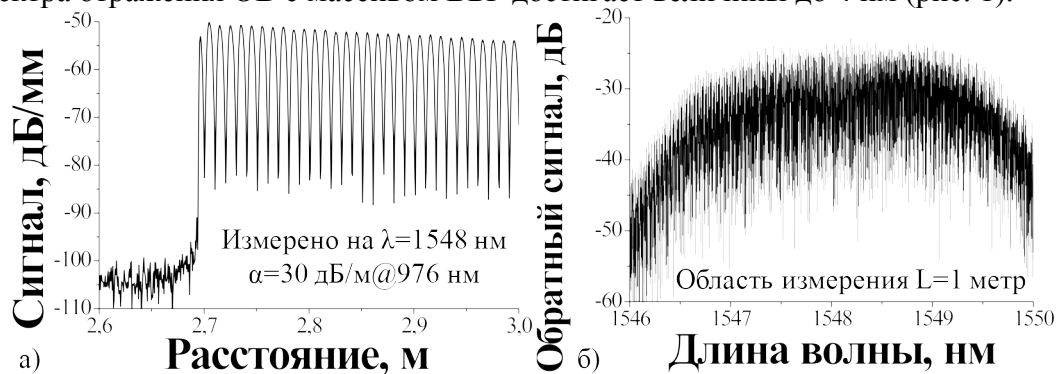


Рис. 1. Частотная рефлектограмма (а) ОВ с массивом ВБР, легированного ионами эрбия, и спектр отражения массива (б). Измерено методом частотной рефлектометрии (Luna 4600).

Данные ОВ с массивами ВБР актуальны для применения в сенсорных, лазерных и телекоммуникационных системах. Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А Котельникова РАН. Работа А.А.Р. и Д.С.Л. поддержана проектом РНФ №22-19-00511 (изготовление ряда экспериментальных заготовок). Работа А.А.Ф. поддержана проектом РНФ № 23-79-30017 (математическая характеристика полученной лазерной генерации).

Литература

- [1] S. Turitsyn, S. Babin, A. El-Taher et al, *Nature Photonics* **4**, 231–235 (2010)
- [2] K. Bronnikov, A. Wolf et al, *Optical Express* **27**, 38421-38434 (2019)
- [3] D. R. Kharasov, D.M. Bengalskii et al, *Quantum Electronics* **50**, 510–513 (2020)
- [4] A. Dostovalov, A. Wolf, Parygin et al, *Optical Express* **24**, 16232-16237 (2016)
- [5] D. Przhiiakovskii, O. Butov, *Results in Physics* **30**, 104902 (2021)
- [6] C. Askins, T. Tsai et al, *Optics Letters* **17**, 833-835 (1992)
- [7] S.M. Popov, D.V. Ryakhovskii et al, *Bulletin of the Lebedev Ph. Inst.* **50**, S1464-S1475 (2023)
- [8] Y. Chamorovskiy, O. Butov et al, *Optical Fiber Technology* **34**, 30-35 (2017)
- [9] S. M. Popov, O.V. Butov et al, *Results in Physics* **16**, 102868 (2020)
- [10] A. Rybaltovsky, S. Popov, D. Ryakhovskiy et al, *Photonics* **9**, 840 (2022)
- [11] A. Kharakhordin, A. Rybaltovsky, S. Popov et al, *J. of Lightwave Technology*. **41**, 6362 (2023)
- [12] S. Popov, A. Rybaltovsky et al, *Photonics*, **10**, 748. (2023)