

ДАТЧИК 3D-ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ВОЛОКНА С ЗАПИСАННЫМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ОТРАЖАТЕЛЯМИ*

✉ Ж. Э. Мункуева^{1,2}, К. А. Бронников¹, А. В. Достовалов¹, С. А. Бабин¹

¹ *Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

✉ z. e.munkueva@gmail.com

Явление рэлеевского рассеяния на естественных неоднородностях в сердцевине оптического волокна широко применяется в современных схемах волоконных лазеров со случайной распределенной обратной связью (СРОС) [1] и в распределенных волоконных датчиках [2]. Для стандартных телекоммуникационных волокон уровень обратного рэлеевского рассеяния (естественный уровень) составляет 100–105 дБ/мм на длине волны 1550 нм. Такой низкий уровень ограничивает пространственное разрешение и отношение сигнал / шум в распределенных датчиках, а также вынуждает использовать относительно длинные участки волокна (~1–100 км) и высокую мощность накачки в схеме СРОС-лазера. В связи с этим возникает интерес к задаче увеличения концентрации неоднородностей путем создания распределенных случайных отражателей в сердцевине волокна для усиления обратного рассеяния Рэлея и получения вышеуказанных систем с передовыми характеристиками.

Наиболее перспективным и гибким методом повышения уровня обратного рассеяния является метод фемтосекундной лазерной модификации материала [3], позволяющий локально изменять показатель преломления с высоким пространственным разрешением (до 1 мкм³).

В работе представлены результаты по записи точечных случайных отражателей в 7-сердцевинном волокне с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. При записи точечного отражателя длиной 10 см каждая неоднородность формировалась путем поглощения одного фемтосекундного импульса с энергией 480 нДж, сфокусированного в область нужной сердцевины. С использованием метода оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR) записанные отражатели охарактеризованы во временной и частотной области с высокими спектральным и пространственным разрешениями до 0,02 пм и 10 мкм соответственно. В процессе записи облучались центральная и три боковые сердцевины, в каждой из которой прирост уровня обратного рассеяния относительно естественного составил + 47 дБ/мм (рис. 1, а). Период отражателя в среднем был равен 50 мкм со случайной вариацией ± 5 мкм, что позволило избежать появления выделенных брэгговских резонансов в спектре отражения (рис. 1, б). Наблюдалось однородное отражение в широком спектральном диапазоне.

На основе 7-сердцевинного волокна с записанными случайными отражателями реализован датчик 3D-формы. Для восстановления кривой применялся алгоритм определения радиусов кривизны и направления изгибов волокна [4] на основе данных, полученных с помощью оптического частотного рефлектометра. В таком случае погрешность измерения трехмерных форм составила 1 мм. Помимо этого, исследовано влияние величины вносимых в оптический

* Работа выполнена при поддержке РФФ (№ 21-72-30024).

© Ж. Э. Мункуева, К. А. Бронников, А. В. Достовалов, С. А. Бабин, 2023

канал потерь на восстановление формы волокна. С помощью аттенуатора зондирующий сигнал ослаблялся на 6, 13 и 18 дБ/мм.

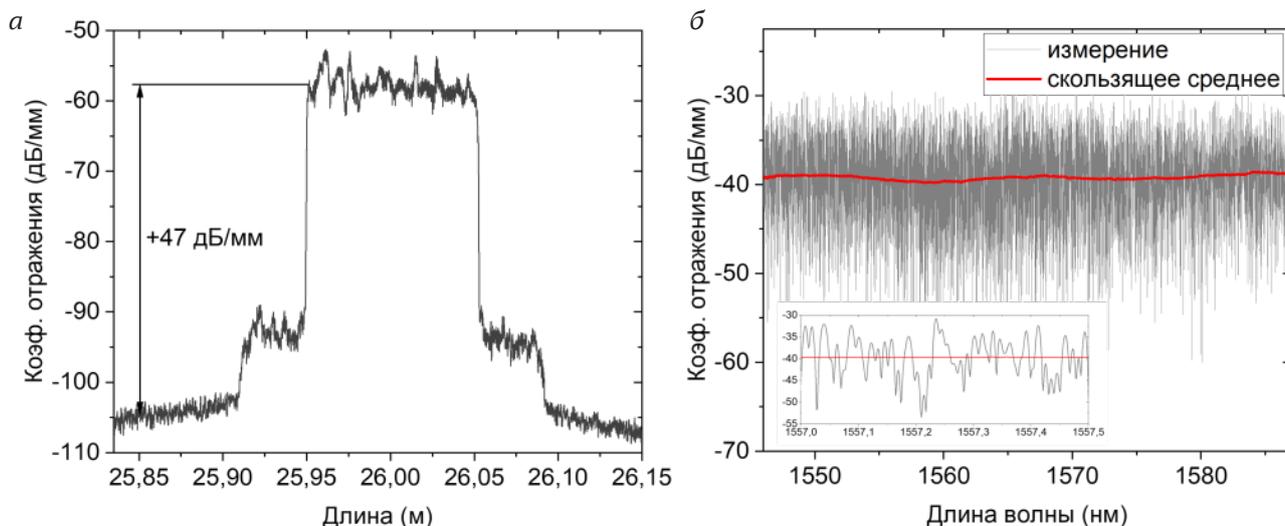


Рис. 1. Уровень обратного рассеяния во временной (а) и спектральной (б) областях точечного отражателя длиной 10 см. На вставке увеличенный фрагмент спектра отражения

На рис. 2 приведены результаты по восстановлению кривых S-образной формы с помощью датчиков на основе трех боковых сердцевин с естественным обратным рассеянием (рис. 2, а) и трех боковых сердцевин с усиленным обратным рассеянием (рис. 2, б). Центральная сердцевина использовалась в качестве нормировки для учета растяжения волокна и изменения температуры. Видно, что датчик на основе сердцевин с записанными точечными отражателями является более устойчивым к внесению потерь в оптический канал. При этом погрешность измерения кривой составляет ~1 мм в зависимости от разных величин оптических потерь (см. вставку на рис. 2, б).

Таким образом, показано, что усиление рэлеевского рассеяния в сердцевине волокна позволяет повысить отношение сигнал / шум в волоконных датчиках формы, а также делает датчики более устойчивыми к внешним оптическим потерям по сравнению с датчиками на основе естественного рэлеевского рассеяния.

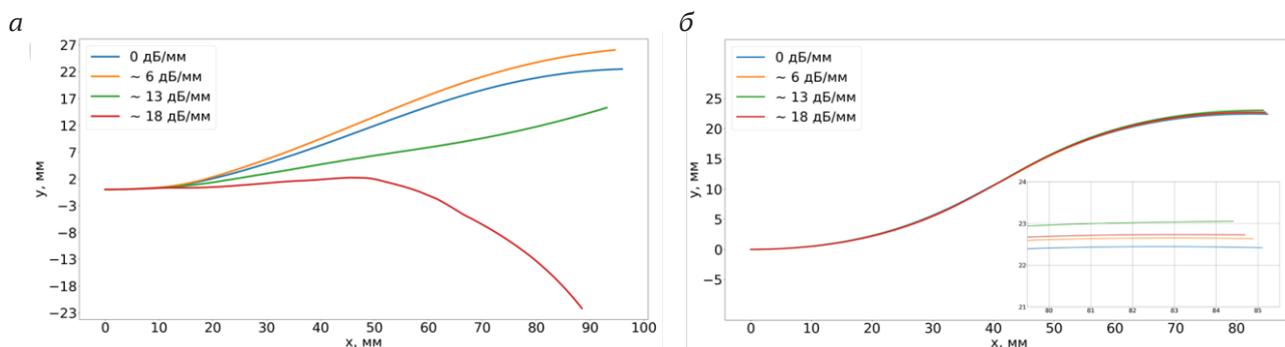


Рис. 2. Восстановление S-образной формы 7-сердцевинного волокна в случае датчика на основе естественного (а) и усиленного (б) рассеяния при внесении разной величины потерь в оптический канал. На вставке увеличенный фрагмент восстановленной кривой

Список литературы

1. Turitsyn S. K. et al. Random distributed feedback fibre lasers // *Phys. Rep.* 2004. Vol. 542. P. 133–193.
2. Hartog A. H. *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press, Boca Raton, 2017.
3. Dostovalov A. V. et al. Continuous and discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femto-second pulses in singlemode and multimode fibers // *Opt. Laser Technol.* 2023. Vol. 167. P. 109692.
4. Paloschi D. et al. 3D Shape Sensing with Multicore Optical Fibers: Transformation Matrices Versus Frenet-Serret Equations for Real-Time Application // *IEEE Sens. J.* 2021. Vol. 21. P. 4599–4609.