

Фемтосекундная лазерная запись искусственных неоднородностей показателя преломления в оптическом волокне для лазерных и сенсорных применений

Ж.Э. Мункуева, А.Д. Достовалов, А.Г. Кузнецов, К.А. Бронников, Е.В. Голиков, П.А. Елизарова, И.Н. Немов, А.А. Ревякин, Д.С. Харенко, С.А. Бабин

Продemonстрирован способ увеличения обратного рэлеевского рассеяния в сердцевине оптического волокна при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов за счет увеличения концентрации неоднородностей показателя преломления и их случайного расположения вдоль волокна. Исследованы режимы записи массивов искусственных неоднородностей с различной поперечной геометрией, с приростом уровня обратного рассеяния >50 дБ (Рис. 1а) и широкополосным спектром отражения в диапазоне >80 нм. Записанные массивы искусственных неоднородностей применялись в схеме волоконного ВКР-лазера, что позволило получить низкий порог генерации ≈ 165 Вт и генерацию выходного излучения на поперечных модах резонатора более высокого порядка. Также продемонстрирован распределенный волоконный датчик 3D формы на основе записанных массивов неоднородностей с точностью восстановления $<4\%$ (Рис. 1б). За счет повышенного уровня обратного рассеяния наблюдалась высокая точность восстановления при внесении в оптический канал потерь вплоть до 20 дБ.

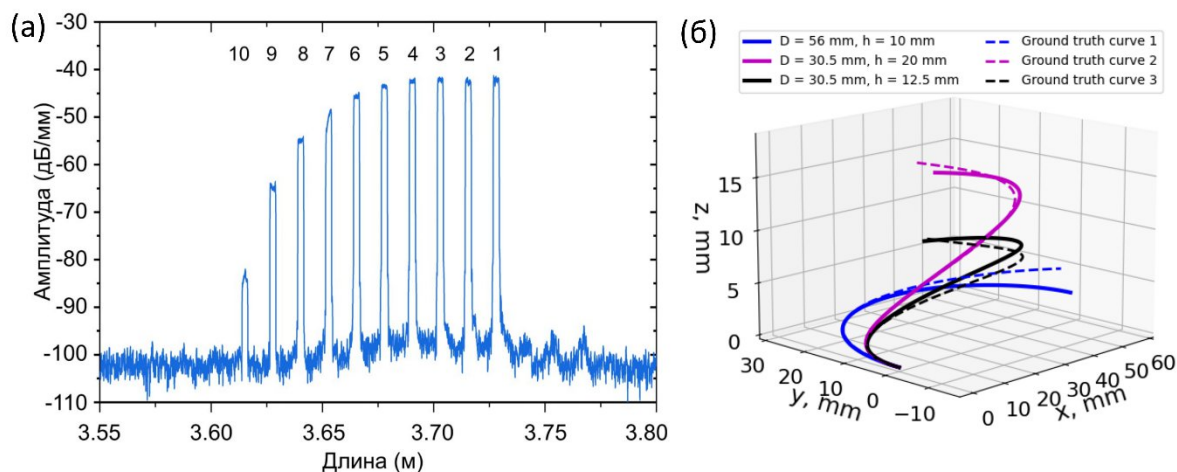


Рис. 1 (а) Изменение прироста уровня обратного рассеяния в зависимости от энергии импульсов. (б) Восстановленные 3D формы волокна с помощью распределенного волоконного датчика на основе волокна с записанными неоднородностями.

1. A. Dostovalov, A. Wolf, Z. Munkueva, et al., "Continuous and discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femtosecond pulses in singlemode and multimode fibers," **Opt. Laser Technol.** 167, 109692 (2023)

2. Z. Munkueva, et al., "3D shape sensor based on discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femtosecond pulses in multicore fibers," **Sens. actuators. A Phys.** 379, 115946 (2024)
3. A. G. Kuznetsov, Z. E. Munkueva, et al., "Random Raman Lasing in Diode-Pumped Multi-Mode Graded-Index Fiber with Femtosecond Laser-Inscribed Random Refractive Index Structures of Various Shapes," **Photonics** 11, 981 (2024)
4. Zhibzema E. Munkueva, et al. "Ring-shaped random structures inscription in multimode fibers assisted by a spatial light modulator," **Advanced Laser Processing and Manufacturing VIII**, Vol. 13234. SPIE, 2024.

Пояснительная записка

В основе распределенных волоконных датчиков и волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью (СРОС) используется эффект обратного рэлеевского рассеяния, возникающий из-за наличия в сердцевине оптического волокна естественных неоднородностей показателя преломления. Однако стандартное телекоммуникационное волокно имеет низкий естественный уровень обратного рассеяния, что ограничивает пространственное разрешение и отношение сигнал/шум распределенного датчика, а также в случае ВКР-лазеров со СРОС вынуждает использовать относительно длинные участки волокна (~1-100 км) для создания резонатора и высокую мощность накачки для достижения порога генерации излучения. В связи с этим для получения лазерных и сенсорных систем с передовыми характеристиками стоит перспективная задача по увеличению обратного рэлеевского рассеяния внутри сердцевины оптоволокна за счет создания искусственных неоднородностей показателя преломления.

Наиболее гибким и многообещающим является метод фемтосекундной (фс) лазерной записи, который из-за нелинейного характера поглощения фс импульсов позволяет изменять показатель преломления в строго заданной области нефоточувствительного волокна через прозрачную защитную оболочку. Воздействие фс импульсов на волокно дает возможность создавать неоднородности показателя преломления, стабильные при высоких температурах (до 1000 °C), что позволяет использовать волокно с записанными неоднородностями в экстремальных условиях. В зависимости от параметров записи (энергия импульсов, условия фокусировки), а также состава сердцевины оптоволокна существуют различные режимы записи, которые влияют на характеристики массива искусственных неоднородностей (прирост уровня обратного рассеяния, вносимые потери и спектр отражения).

Традиционно используется методика поточечной фс записи с помощью высокоточной линейной платформы позиционирования, которая перемещает волокно относительно статичного положения фокусного пятна. Данной методикой в одномодовом волокне был записан 1D массив неоднородностей со случайной вариацией расстояния между неоднородностями вдоль волокна [1]. Найденные оптимальные параметры записи позволили получить прирост уровня обратного рассеяния до 50 дБ при минимальных вносимых потерях 0,086 дБ/см. На основе многосердцевинного волокна с искусственными неоднородностями реализован распределенный волоконный датчик 3D формы с точностью восстановления <4 % [2]. За счет повышенного уровня обратного рассеяния наблюдалась высокая точность восстановления при внесении в оптический канал потерь вплоть до 20 дБ, при которых в случае датчика на основе волокна с естественными неоднородностями восстановить форму волокна было невозможно. Кроме того, продемонстрирована запись

1D, 2D и 3D массивов неоднородностей со сложной поперечной геометрией в многомодовом GRIN волокне [1]. В данных массивах случайным образом варьировалось расстояние между неоднородностями как в продольном, так и в поперечном направлениях. Данная вариация приводила к широкополосному отражению в диапазон >80 нм с коэффициентом отражения $\approx 0,02-0,1$ %. Показано применение многомодового GRIN волокна с записанными 1D, 2D и 3D массивами неоднородностей в схеме ВКР-лазера в качестве выходного зеркала [3]. Впервые наблюдалась случайная генерация в многомодовом GRIN волокне длиной 1 км при пороговой мощности накачки ≈ 150 Вт, что значительно ниже порога случайной генерации в многомодовом GRIN волокне с естественным обратным рэлеевским рассеянием.

Однако использование линейной платформы позиционирования в вышеупомянутой методике является дорогостоящим и имеет ограниченную повторяемость (>50 нм). Применение пространственного модулятора света, обеспечивающего модуляцию фазы фс излучения, может помочь преодолеть сложности вышеупомянутой методики. Путем сканирования фокусного пятна внутри статичного оптоволокна с помощью пространственного модулятора света продемонстрирована поточечная фс запись 3D массивов неоднородностей с поперечной кольцеобразной геометрией в многомодовом GRIN волокне [4]. В данном случае расстояние между кольцами вдоль волокна и диаметр колец варьировались случайным образом. Кольцеобразные массивы, записанные при оптимальных параметрах, имеют прирост обратного рассеяния >60 дБ и широкополосный (>80 нм) спектр отражения с коэффициентом $\approx 0,01$ %. Впервые продемонстрировано, что на основе многомодового GRIN волокна с записанным кольцеобразным массивом неоднородностей волоконный ВКР-лазер имеет кольцеобразное выходное излучение и обладает низким порогом генерации ≈ 165 Вт [3]. Предлагаемая методика поточечной фс записи делает возможным создание массивов неоднородностей произвольной 3D формы для селектирования различных поперечных мод более высокого порядка, тем самым это позволяет структурировать выходное излучение ВКР-лазера.