

## ОПТОАКУСТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С ГАРМОНИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД\*

✉ В. А. Рибенек<sup>1</sup>, Д. А. Коробко<sup>1</sup>, А. А. Фотиади<sup>1,2</sup>, П. А. Итрин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ribl98@mail.ru

На сегодняшний день лазерные источники высокочастотных импульсных последовательностей становятся все более актуальны для применения в широком ряду приложений современной фотоники, в частности, в задачах оптической связи, спектроскопии, метрологии, высокоточной обработки и т. д. Волоконные солитонные лазеры с пассивной синхронизацией мод наиболее привлекательны для подобных приложений благодаря сочетанию таких своих свойств, как субпикосекундная импульсная генерация, возможность подстройки длины волны, простота конструкции и надежность в эксплуатации. Так как фундаментальная частота следования импульсов (ЧСИ) стандартного волоконного лазера не превышает десятков МГц, для получения ГГц импульсных последовательностей применяется методика гармонической синхронизации мод (ГСМ) [1]. Однако существенным недостатком ГСМ-лазеров являются значительные шумовые отклонения амплитуды импульса и межимпульсного расстояния от среднего значения — амплитудный и временной джиттер [2].

Предметом работы является исследование возможной стабилизации высокочастотной последовательности импульсов ГСМ-лазера (10 ГГц и выше) при помощи оптоакустического эффекта. Для исследования данного вопроса нами рассмотрена стандартная схема кольцевого волоконного лазера солитонного типа с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации (НВП) (рис. 1, а). Общая длина резонатора составляет ~15 м и соответствует фундаментальной частоте  $f_0 = 13$  МГц. Лазер накачивается двумя диодами с длиной волны 980 нм, каждый из которых обладает максимальной мощностью 550 мВт. При достижении накачки уровня ~80 мВт и корректной настройке контроллеров поляризации в лазере происходит син-

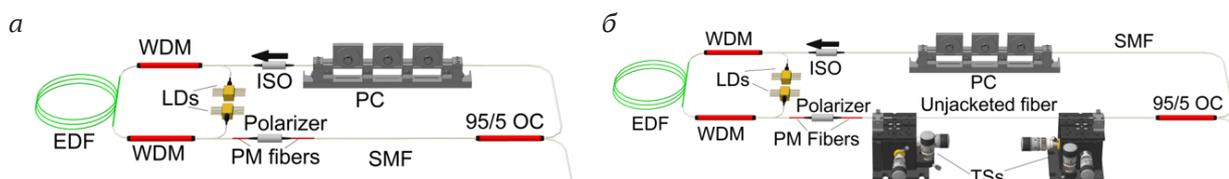


Рис. 1. Экспериментальная схема кольцевого волоконного лазера (а): EDF — волокно, легированное Er; WDM — мультиплексор с разделением по длине волны; LD — диод накачки, SMF — одномодовое волокно; PM fiber — волокно с сохранением поляризации; ISO — волоконный изолятор; OC — волоконный ответвитель; PC — контроллер поляризации; вариант схемы, включающий отрезок натянутого волокна (б)

\* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-581) и Российским научным фондом (проект № 23-79-30017).

© В. А. Рибенек, Д. А. Коробко, А. А. Фотиади, П. А. Итрин, 2023

хронизация мод на фундаментальной частоте. При повышении накачки лазер переходит в режим многоимпульсной генерации с частотой следования импульсов, кратной фундаментальной. Повышение уровня накачки приводит к увеличению ЧСИ. Максимальное значение ЧСИ в данной конфигурации достигало 7 ГГц.

В продолжение эксперимента часть волоконного резонатора длиной  $\sim 1$  м была зачищена от оболочки и при помощи держателей закреплена на координатных столиках, растягивающих волокно на несколько миллиметров (рис. 1, б). Такая конструкция позволяет осуществить подстройку частоты одной из акустических мод к гармонике фундаментальной частоты. В данном случае наиболее подходящей оказалась мода  $TR_{29}$  с частотой 198,79 МГц, близкая к 15 гармонике  $f_0: f_{res} = 15 f_0 \approx 199$  МГц. Точные значения частот для акустических мод были определены с помощью спектров компонент GAWBS (guided acoustic-wave Brillouin scattering) [3], измеренных нами для волокна SMF28 ULL.

Эксперименты показали, что после проведения описанной выше подстройки гармоническая синхронизация мод реализуется только для ЧСИ, кратных резонансной частоте, при этом происходит значительное снижение супермодового шума (рис. 2, а) и повышение максимальной ЧСИ до 12 ГГц (рис. 2, б).

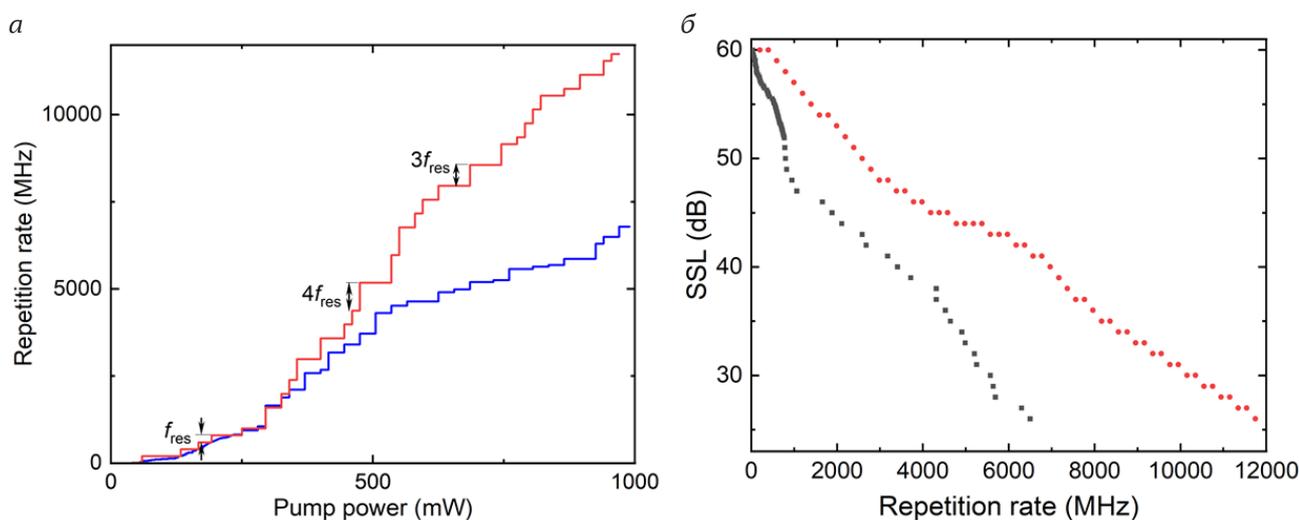


Рис. 2. Зависимость ЧСИ (синяя линия) кольцевого волоконного лазера в режиме ГСМ при повышении мощности накачки, красная линия — та же зависимость для кольцевого волоконного лазера с участком натянутого волокна (а). Изменение уровня супермодового шума в зависимости от ЧСИ. Черные символы — лазер без подстройки частоты акустической моды, красные — лазер с отрезком натянутого волокна (б)

Таким образом, искусственно реализуя резонанс между одной из высших акустических мод волокна и частотой, кратной фундаментальной частоте резонатора, возможно использовать совместное действие оптоакустического резонансного процесса с межимпульсным отталкиванием, добиться значительного повышения максимальной частоты следования и существенно снизить супермодовый шум в ГСМ-лазере. Как мы полагаем, эти наблюдения позволяют в значительной мере углубить понимание физики процессов, происходящих в волоконных лазерах с синхронизацией мод.

## Список литературы

1. Grudinin A. B., Gray S. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers // JOSA B. 1997. Vol. 14(1). P. 144–154.
2. Gray S. Femtosecond harmonically mode-locked fiber laser with time jitter below 1 ps // Opt. Lett. 1995. Vol. 20 (2). P. 189–191.
3. Yaman F., Nakamura K., Mateo E. et al. Guided acoustic Brillouin scattering measurements in optical communication fibers // Optics Express. 2021. Vol. 29(11). P. 17628–17668.