

# Мультиплексирование частоты повторения волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод через оптоакустический резонанс

**В.А. Рибенек<sup>1\*</sup>, П.А.Итрин<sup>1</sup>, Д.А. Коробко<sup>1</sup>, А.А. Фотиади<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск

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

<sup>3</sup> University of Mons, Mons, B-7000, Belgium

\*E-mail: ribl98@mail.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.49-50

Пассивная гармоническая синхронизация мод (Harmonic Mode-Locking, HML) солитонного волоконного лазера и его пассивная стабилизация оптоакустическим резонансом (ОАР) в оптическом волокне лазерного резонатора обеспечивают работу лазера на высокой частоте следования импульсов (ЧСИ) с хорошей амплитудной стабильностью и малым временным джиттером [1]. Однако ЧСИ в таких лазерах ограничена ~1 ГГц из-за отсутствия доступных акустических мод в стандартных волокнах на более высоких частотах [1-4]. В данной работе мы обходим это ограничение, демонстрируя солитонный волоконный лазер, собранный из стандартных волоконных компонентов, но работающий в режиме двойной гармонической синхронизации мод (Double HML, DHML) [5].

В нашем эксперименте лазер, настроенный на работу на 15-й гармонике волоконного резонатора, синхронизированного с модой  $TR_{2,9}$  (Guided Acoustic Wave Brillouin Scattering, GAWBS) на частоте ~199 МГц (рис. 1), продемонстрировал способность работать на высокой гармонике этой акустической моды, достигая ЧСИ ~12 ГГц (рис. 2а). Прорыв стал возможен благодаря контролируемому оптоакустическому взаимодействию в коротком, 50-см сегменте волокна резонатора со снятой полимерной оболочкой (рис. 1). Анализ показал, что наличие или отсутствие полимерной оболочки волокна не изменяло частоты мод GAWBS, но существенно влияло на характеристики пиков резонанса. Демпфирующее воздействие полимерной оболочки на акустические вибрации, индуцированные в волокне импульсной последовательностью, значительно уширяет резонансы GAWBS. В результате вклад 50-см сегмента волокна без оболочки в спектр GAWBS оказывается в десять раз больше, чем вклад остальных ~15 м волокна с оболочкой. Дискретные, чётко разделенные пики резонансов от акустических мод волокна резонатора показаны на рис. 1б.

Для селективного возбуждения одного пика оптоакустического резонанса (ОАР) в волокне лазерного резонатора необходимо согласовать одну акустическую моду ( $R_{0m}$  или  $TR_{2m}$ ) с гармоникой лазера. Для этого длина лазерного резонатора подбирается так, чтобы их частоты совпадали. Для точной настройки этого резонанса в эксперименте сегмент оголенного волокна резонатора закреплялся между двумя механическими подвижками, обеспечивающими его растяжение до достижения желаемого эффекта. Такой подход позволял точно настраивать резонанс, перестраивая резонансную частоту GAWBS (мода  $TR_{2,9}$ ) ~199 МГц в диапазоне примерно 400 кГц. Без такой настройки лазер работал в режиме HML, а режим DHML не достигался. Мы экспериментально подтвердили, что узкая ширина линии акустической моды (~80 кГц) играет решающую роль в реализации режима DHML. Аналогичное растяжение 50-см участка волокна резонатора,

покрытого полимерной оболочкой, не приводит к изменению режима работы лазера.

Переход лазера в режим DHML обусловлен тем, что вибрация, вызванная последовательностью импульсов на участке волокна без оболочки, задает частоту следования импульсов, циркулирующих в лазерном резонаторе, подавляя моды, которые не соответствуют принципу Вернье. Выжившие моды, равноудаленные по частоте с интервалом, равным частоте ОАР, в сочетании с механизмом истощения и восстановления усиления в лазерном резонаторе, приводят к формированию стабильных высокочастотных последовательностей импульсов на частотах, кратных частоте ОАР, обеспечивая режим DHML. Таким образом, в этом процессе частота ОАР, а не фундаментальная частота лазера, определяет элементарный шаг перестройки ЧСИ в диапазоне до 12 ГГц при увеличении или уменьшении мощности накачки (рис. 2а).

Кроме того, во всем диапазоне перестройки ЧСИ солитонный волоконный лазер, работающий в режиме DHML, демонстрирует повышенную стабильность с уровнем подавления супермодов примерно на 40 дБ выше, чем в режиме HML, а также значительно более низкими временным джиттером импульсов и уровнем амплитудного шума (RIN) (рис. 2b-d).

Таким образом, нами продемонстрирован новый режим гармонической синхронизации мод, который позволил достичь работы лазера на 12-ГГц ЧСИ, что соответствует 900-й гармонике фундаментальной частоты, определяемой длиной резонатора лазера. Синхронизация высших гармоник фундаментальной частоты лазера с ОАР обеспечивает высокую стабильность следования импульсов во всем диапазоне перестройки ЧСИ. Эти результаты имеют важное значение для проектирования и оптимизации HML-лазеров.

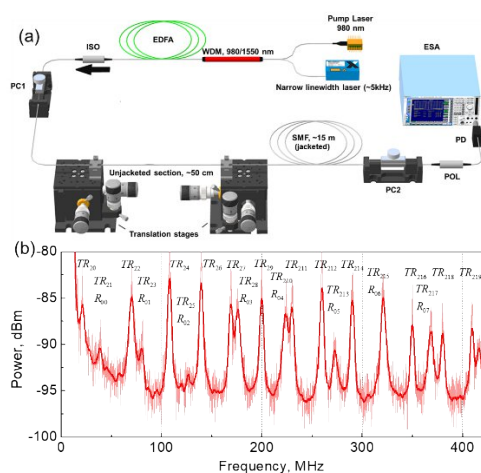


Рис. 1. Экспериментальная конфигурация солитонного лазера (а); спектры попутного бриллюэновского рассеяния (GAWBS) в 1-км отрезке волокна G.652.D (Fujikura), подобное которому использовано в резонаторе лазера (b).

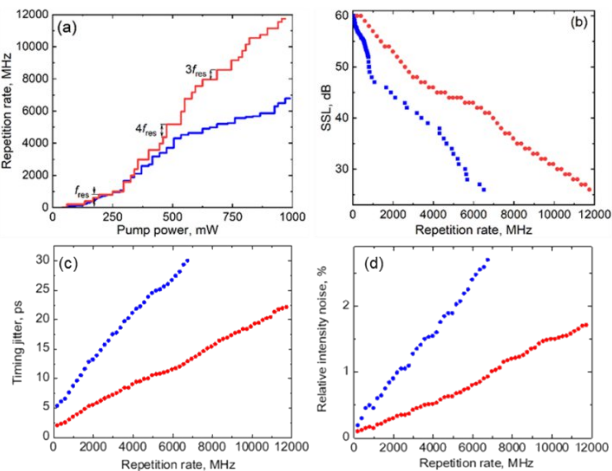


Рис. 2. Зависимости ЧСИ от увеличения мощности накачки (а), уровня подавления супермодового шума (b), временного джиттера (c) и амплитудного шума (RIN) (d) от ЧСИ, измеренные в режимах HML (синий) и DHML (красный).

Работа поддержана Российским научным фондом (23-79-30017).

## Литература

- [1] A. N. Pilipetskii, E. A. Golovchenko, and C. R. Menyuk, *Optics Letters* **20**, 907-909 (1995).
- [2] E. M. Dianov, A. V. Luchnikov, et al, *Applied Physics B* **54**, 175-180 (1992).
- [3] W. He, M. Pang, et al, *26th Microoptics Conference (MOC)*, **1-2** (2021).
- [4] V.A Ribenek, P.A Itrin, et al, *APL Photonics* **9(5)**, 056105 (2024).