

# ДВУХЧАСТОТНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАДИОФОТОНИКИ

Спирин В.В.<sup>1</sup>, Фотиади А.А.<sup>2-4</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research and Advanced Studies Center of Ensenada (CICESE), 22860 Ensenada, B.C., México

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет, ул. Льва Толстого, Ульяновск, 432970

<sup>3</sup>University of Mons, Electromagnetism and Telecommunication Department, B-7000 Mons, Belgium

<sup>4</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, 194021

<sup>\*</sup>E-mail: Andrei.Fotiadi@gmail.com

Простые, но эффективные методы сужения линии генерации полупроводникового лазера представляют большой исследовательский интерес, обусловленный огромным спросом на недорогие компактные узкополосные лазерные источники, востребованные для многих практических приложений. Хотя в большинстве приложений узкополосных лазеров используются такие их качества как компактность, надежность, простота конструкции и низкий уровень фазового шума, для приложений, связанных с задачами радиофотоники [1], в частности, для целей генерации радиочастотных сигналов, важна также возможность работы лазера одновременно на двух строго привязанных друг к другу частотах. Смещение выходных излучений такого лазера на одном быстром фотодиоде позволяет получать спектрально чистый радиочастотный сигнал на частоте равной разности частот лазера. В 2012 году мы продемонстрировали простой лазерный источник с шириной линии генерации в несколько кГц, лишь соединив в одной волоконной конфигурации лазерный диод и несколько стандартных телекоммуникационных компонентов [2]. За последние годы развитие этого направления привело к созданию семейства простых двухчастотных узкополосных волоконных лазерных источников, пригодных для применений в радиофотонике [3-5].

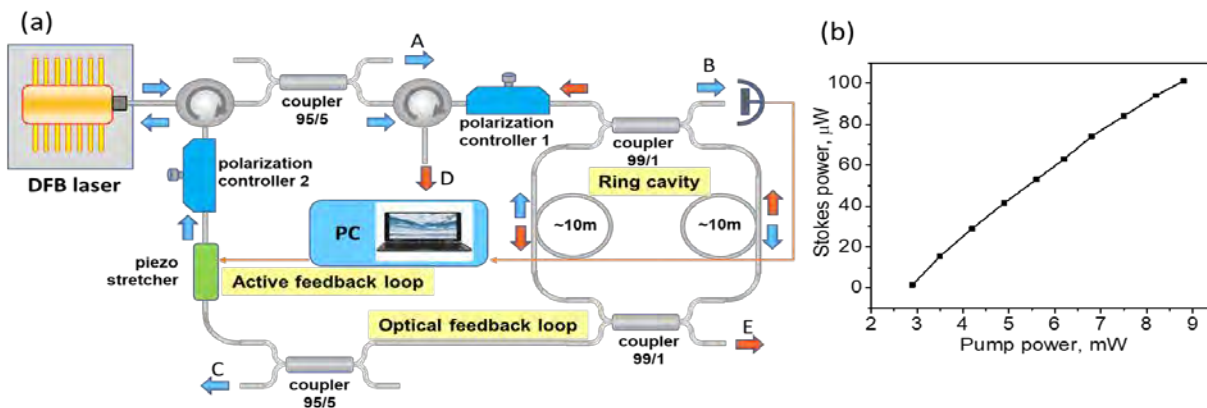
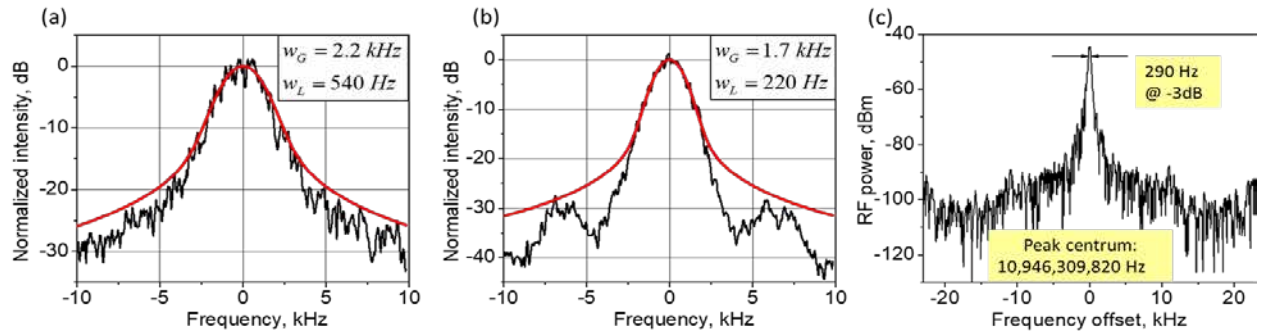


Рис. 1. (а) Экспериментальная конфигурация двухчастотного лазера; (б) Зависимость выходной мощности на Бриллюэновской частоте от выходной мощности на основной частоте (выходы D и A, соответственно)

На Рис.1, в качестве примера, показана конфигурация двухчастотного лазера [4], производящего узкополосное излучение на двух фиксированных частотах в непрерывном режиме. Разница частот  $\sim 11$  ГГц соответствует частоте Бриллюэновского сдвига в оптическом волокне. Принцип работы основан на механизмах захвата полупроводниковым DFB-лазером собственной частоты внешнего волоконного резонатора и генерации вынужденного Бриллюэновского рассеяния в самом резонаторе. Для реализации эффекта самозахвата частоты излучение полупроводникового лазера пропускается через внешний высокочастотный кольцевой резонатор, а затем через волокно обратной связи попадает обратно в резонатор полупроводникового лазера, навязывая ему генерацию на собственной частоте внешнего резонатора. Это приводит к сужению ширины линии генерации полупроводникового лазера на несколько порядков (с десятков МГц до суб кГц значений). Особенностью применения механизма захвата частоты в данном случае является высокая чувствительность эффекта к изменениям параметров конфигурации под действием внешних условий (например, температуры), приводящая к перескакиванию мод. Для подавления этой нестабильности в наших конфигурациях используется

активная обратная связь через управляемую фазовую задержку в волокне обратной связи. Работа цепи обратной связи контролируется недорогой USB-DAQ картой через пьезоактиватор, прикрепленный к волокну. Таким образом, сужение ширины линии полупроводникового лазера обеспечивается механизмом самозахвата частоты при помощи пассивной оптической обратной связи, в то время как активная оптоэлектронная связь обеспечивает устойчивую работу лазера в режиме узкополосной генерации. Для достижения узкополосной генерации на Бриллюэновской частоте тот же кольцевой резонатор используется в качестве нелинейной среды. При этом механизм самозахвата частоты поддерживает постоянный резонанс между полупроводниковым лазером и внешним резонатором, обеспечивая идеальную накачку для генерации Бриллюэновского излучения.



**Рис. 2.** Самогетеродинные лазерные спектры, измеренные для двух лазерных выходов на основной (выход А, а) и Бриллюэновской (выход D, б) частоте (черная линия) и их аппроксимация функциями Фойгта (красная линия) для определения Гауссовой  $w_G$  и Лоренцевской  $w_L$  ширины линии. (с) Спектр радиочастотного сигнала, полученного путем смешения излучения с двух лазерных выходов на быстром фотодетекторе

На Рис.2 представлены характеристики двухчастотного лазера. Выходная мощность лазера составляет  $\sim 9$  мВт и  $\sim 100$  мкВт для генерации на основной и Бриллюэновской частоте, соответственно. Дальнейшее масштабирование мощности возможно с внешними усилителями. При этом мощность на основной частоте может быть увеличена с помощью волоконного эрбиевого усилителя (EDFA), в то время как использование внешнего Бриллюэновского усилителя (построенного из того же волокна, что и кольцевой резонатор, и накачиваемого через EDFA самим же лазером), предпочтительней для эффективного узкополосного усиления на Бриллюэновской частоте. Обе рабочие частоты лазера строго привязаны к собственным частотам внешнего кольцевого резонатора, и их температурный дрейф, измеренный в эксперименте, составляет  $\sim 8.8$  МГц/мин. На Рис. 2 а, б показаны самогетеродинные спектры излучений лазера, измеренные при помощи волоконного интерферометра Маха – Цендера с разностью плеч 55 км и фазового электрооптического модулятора  $\sim 25$  МГц. Разложение этих спектров на Гауссовские и Лоренцевские компоненты (через функцию Фойгта) позволило оценить естественную (Лоренцевскую) ширину линии генерации как  $\sim 270$  Гц для основного и  $\sim 110$  Гц для Бриллюэновского излучения. Эти результаты хорошо согласуются с прямыми измерениями радиочастотного (RF) спектра, характеризующего биения между двумя лазерными выходами, показанными на Рис. 2, с. Спектр имеет выраженный пик с центром в  $\sim 10.9$  ГГц и шириной  $\sim 290$  Гц. Пиковая частота соответствует Бриллюэновскому частотному сдвигу ( $\sim 1535$  нм).

Также в докладе будут рассмотрены другие конфигурации двухчастотных лазеров, обладающие еще более узкими линиями генерации ( $< 70$  Гц) [5] и возможностью перестройки разницы частот в широком диапазоне ( $\sim 60$  ГГц). Все они являются хорошими кандидатами для применений в устройствах радиофотоники, в частности, для генерации спектрально чистых радиочастотных сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-581) и Российского научного фонда (проект № 18-12-00457).

## Литература

1. D.Marpaung et al, «Nature Photonics» 13, 80-90 (2019)
2. Spirin V.V. et al, Laser Physics Letters 9, 377 (2012)
3. Spirin V.V. et al, Opt. Express 28, 478 (2020)
4. Spirin V.V. et al, Opt. Express 28, 37322 (2020)
5. Spirin V.V. et al, Optics and Laser Technology 141, 107156 (2021)