

# Кольцевой волоконный лазер с гибридной гармонической синхронизацией мод и частотой следования импульсов до 12 ГГц

И.О. Золотовский<sup>1</sup>, Р.В. Гуменюк<sup>1,2</sup>, П.А. Игрин<sup>1</sup>, Д.А. Коробко<sup>1,\*</sup>,  
М.А. Одноблюдов<sup>3</sup>, А.Б. Петров<sup>3,4</sup>, В.А. Рибенек<sup>1</sup> и Д.А. Столяров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный университет

<sup>2</sup>Университет Тампере, Финляндия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО

\*E-mail: korobkotam@rambler.ru

DOI: 10.31868/RFL2020.195-196

Солитонные волоконные лазеры с пассивной гармонической синхронизацией мод (ГСМ) необходимы в большом числе приложений современной фотоники и обладают рядом принципиальных преимуществ – компактностью, удобным выводом излучения при высоком качестве пучка и сравнительно низкой стоимостью при возможности изготовления из стандартного набора элементов. За реализацию ГСМ в волоконных лазерах могут быть ответственны различные механизмы. Определение механизмов собственно синхронизации мод (нелинейного вращения поляризации, насыщающего поглощения при помощи углеродных нанотрубок, полупроводниковых зеркал и т.д.) и механизмов выстраивания импульсов по гармоникам резонатора позволяет некоторым образом классифицировать ГСМ-лазеры. Значительный интерес в последнее время вызывают волоконные лазеры на основе т.н. гибридной ГСМ, в которых эффект насыщающего поглощения сопровождается смещением частоты, осуществляемым при помощи оптического модулятора [1]. В этом случае важно заметить, что частота модулятора значительно ниже частоты следования импульсов, т.е. происходит не активная, а именно пассивная синхронизация мод со смещением частоты солитонного импульса. Особенность данной схемы состоит в том, что в определенных случаях смещение частоты вместе со дополнительной спектральной фильтрацией может приводить к стабилизации и повышению качества высокочастотной импульсной последовательности [2]. Основными показателями качества импульсной последовательности являются уровень подавления супермодового шума (SSL) и, в принципе, связанные с ним флуктуации межимпульсного расстояния – временной джиттер. Главной целью данной работы стала разработка солитонного кольцевого ГСМ-лазера на основе гибридной синхронизацией мод с элементом смещения частоты, способного генерировать мульти-ГГц импульсные последовательности при высоком уровне подавления супермодового шума.

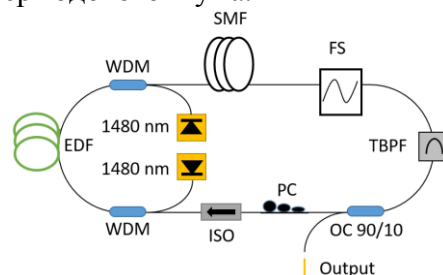


Рис. 1. Схема волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод. PC – контроллер поляризации, FS – акустооптический модулятор в режиме сдвига частоты, TBPF – перестраиваемый фильтр, OC – выходной ответвитель.

Экспериментальная схема лазера представлена на рис. 1. Результаты эксперимента фиксировались в полосе перестройки фильтра (ТВРФ) от 1528 до 1548 нм. Во всей полосе перестройки синхронизация мод на фундаментальной частоте резонатора (3,19 МГц), соответствующая одноимпульсному режиму генерации, происходила при достижении мощности накачки  $\sim 200$  мВт. При увеличении мощности накачки лазер переходит в режим ГСМ. На рис. 2 (а) показаны оптические спектры, соответствующие максимально полученным частотам следования. Отметим, что в коротковолновой (1528-1535 нм) области синхронизация мод характеризуется высокой устойчивостью. Импульсная генерация, полученная в этой полосе при помощи подстройки контроллера поляризации на малой частоте следования, сохраняется при повышении уровня накачки. В этом случае частота следования, импульсов, так же как и выходная мощность, возрастает пропорционально накачке (рис. 2 (b)), при этом важно заметить, что дополнительная подстройка поляризации не производится.

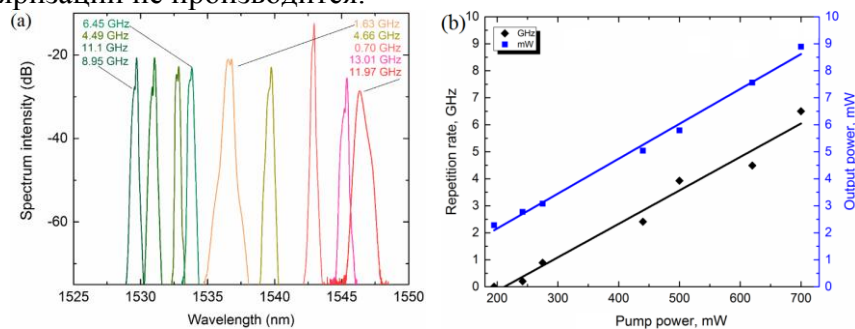


Рис. 2. (а) Оптические спектры, соответствующие указанным максимально полученным частотам следования импульсов. (b) Выходная мощность и частота следования импульсов в зависимости от мощности накачки на центральной длине волны пропускания фильтра  $\lambda_0 = 1533.7$  нм.

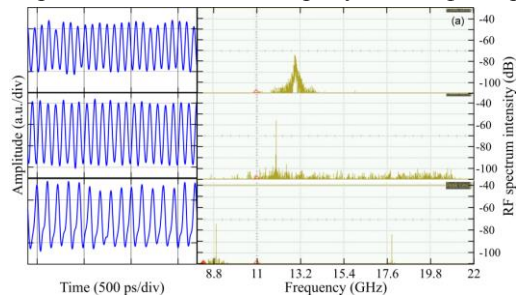


Рис. 3. Осциллограммы и радиочастотные спектры импульсных последовательностей с частотами следования 8.95, 11.97 и 13.01 ГГц на центральной длине волны пропускания фильтра  $\lambda_0 = 1529$  нм, 1546.5 нм и 1545.5 нм (снизу вверх) соответственно

В длинноволновой (1535-1548 нм) области перестройки фильтра генерация характеризуется меньшей стабильностью, т.к. эти режимы не являются устойчивыми по отношению к изменению уровня накачки. Тем не менее именно в этом диапазоне перестройки удалось достичь высоких частот следования, превышающих 10 ГГц (рис. 3). На центральной длине волны пропускания фильтра  $\lambda_0 = 1546.5$  нм получена импульсная последовательность с частотой следования 11.97 ГГц с высоким уровнем подавления супермодового шума  $SSL > 40$  dB. На  $\lambda_0 = 1545.5$  нм получена 13 ГГц последовательность, однако, RF спектр и значительно меньший уровень SSL свидетельствуют о ее слабой устойчивости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-72-10037).

## Литература

- [1] Т. Noronen, О. Okhotnikov, R. Gumenyuk, *Optics express* **24**, 14703-14708 (2016)
- [2] R.V. Gumenyuk, D.A. Korobko, I.O. Zolotovskii, *Opt Lett*, **45**, 184-187 (2020)