

ИМПУЛЬСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ С КВАЗИСИНХРОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НАКАЧКИ

Иваненко А.В.^{1*}, Ньюшков Б.Н.^{1,2}, Смирнов С.В.¹

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

*E-mail: ivanenko.aleksey@gmail.com DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-446-447

Синхронная накачка, как эффективный метод получения импульсной генерации, традиционно применяется в полупроводниковых [1] и жидкостных [2] лазерах, а также в твердотельных [3] и волоконных [4, 5] лазерах на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР). В основе синхронной накачки лежит импульсная модуляция мощности накачки с частотой $f_{\text{sync}} = m / T_{\text{RT}}$ (где m – целое число, T_{RT} – время обхода резонатора излучением на длине волны генерации). В тоже время, возможность формирования коротких и ультракоротких импульсов с помощью синхронной накачки в волоконных лазерах с инерционными активными средами на основе редкоземельных ионов (в частности, с Yb и Er волокнами) долгое время оставалась неисследованной. Лишь недавно нами был предложен и исследован [6, 7] метод квази-синхронной накачки в Yb-волоконных лазерах, который позволяет генерировать наносекундные и суб-наносекундные импульсы когерентного излучения. Данный метод основывается на синусоидальной модуляции мощности накачки с частотой $f_{\text{q-sync}} = f_{\text{sync}} + \delta f$, где $10^{-3} \cdot f_{\text{sync}} < \delta f < 10^{-2} \cdot f_{\text{sync}}$. Такое небольшое завышение частоты модуляции относительно частоты, соответствующей строго-синхронной накачке, позволяет формировать короткие импульсы, длительность которых может быть в $10 \div 100$ раз меньше периода модуляции. Механизм такого укорочения импульсов основывается на опережающем накоплении энергии накачки в активном волокне для преимущественного усиления переднего фронта лазерного импульса и эффективно работает в квази-двухуровневой схеме лазерной генерации, характерной для Yb волоконных лазеров.

В данной работе мы впервые демонстрируем применимость и эффективность метода квази-синхронной модуляции мощности накачки для генерации наносекундных высокоэнергетических лазерных импульсов в Er волоконных лазерах, имеющих трехуровневую схему лазерной генерации (при накачке на длине волны 980 нм) и существенно более долгоживущий в сравнении с Yb средой верхний лазерный уровень (8-10 мс против ~ 1 мс) [8]. Схема экспериментальной лазерной установки, в которой исследовались возможности квази-синхронной накачки Er активной среды, представлена на Рис. 1.

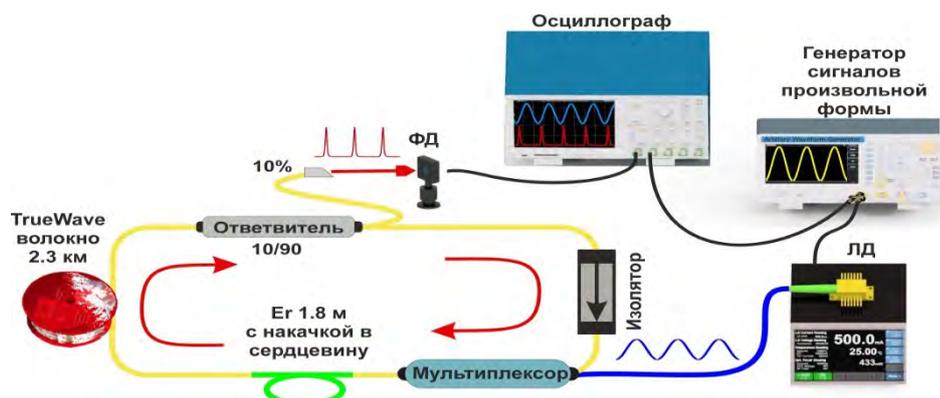


Рис. 1. Схема лазера: ЛД – лазерный диод, ФД – фотодетектор

В лазере использовалось одномодовое активное волокно длиной 1,8 м, легированное ионами Er (Liekki Er30-4/125), с накачкой в сердцевину. Для накачки использовалось излучение на длине волны 980 нм от лазерного диода с одномодовым волоконным выводом. Максимальная мощность излучения накачки, вводимого в лазер, составляла ~ 0.7 Вт. Для заведения излучения накачки в резонатор использовался волоконный спектральный мультиплексор. Мощность накачки модулировалась посредством модуляции тока лазерного диода накачки. Для этого на модуляционный вход драйвера тока подавался сигнал синусоидальной формы от радиочастотного генератора сигналов произвольной формы. Резонатор был удлинен путем вставки пассивного одномодового волокна (TrueWave fiber) длиной $\sim 2,3$ км. Результирующая оптическая длина резонатора соответствовала фундаментальной

частоте следования импульсов 88,97 кГц. Для вывода излучения из резонатора использовался 10%-й сплавной ответвитель.

В соответствии с концепцией квази-синхронной накачки [7] для получения импульсов наименьшей длительности требуется плавное уменьшение изначально завышенной частоты модуляции и ее приближение к фундаментальной частоте (~88,97 кГц), которая задается оптической длиной резонатора. В эксперименте шаг изменения частоты составлял 5 Гц с временным интервалом 0,5 секунд. При такой перестройке частоты модуляции происходит плавный переход от неглубокой синусоидальной модуляции непрерывного излучения генерации к формированию дискретных наносекундных импульсов (рис. 2 (а)). Рисунок 2 (б) иллюстрирует соответствующую эволюцию оптического спектра излучения при перестройке частоты модуляции, а Рис. 2 (в) иллюстрирует последовательность генерируемых одиночных импульсов на длине волны 1,532 мкм (красная линия) с минимальной длительностью (350 нс) и последовательность синусоидальных импульсов накачки на длине волны 0,98 мкм (синяя линия) длительностью 5.86 мкс при частоте модуляции 89,98 кГц.

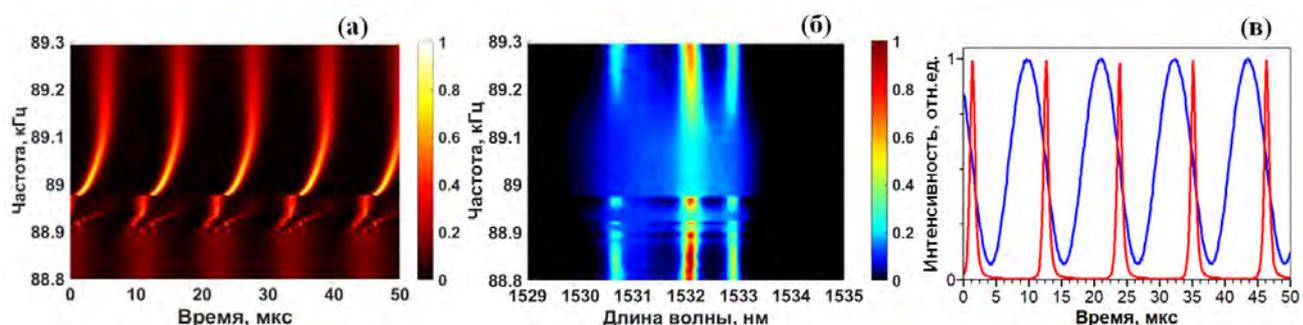


Рис. 2. (а) частотно-временное распределения мощности генерации при перестройке (понижении) частоты модуляции накачки в окрестности фундаментальной частоты повторения импульсов; (б) соответствующая эволюция спектрального распределения мощности генерации; (в) последовательность генерируемых одиночных импульсов на длине волны 1,532 мкм (красная линия) и последовательность импульсов накачки на длине волны 0,98 мкм (синяя линия) при частоте модуляции 89,98 кГц

Таким образом, в данной работе экспериментально продемонстрирована применимость и эффективность метода квази-синхронной накачки для импульсной генерации на длинах волн вблизи 1.55 мкм в волоконных лазерах, использующих активные волокна, легированные ионами эрбия. Тем самым показана универсальность метода квази-синхронной накачки, который способен одинаково эффективно работать в лазерах с активными волокнами легированными разными редкоземельными элементами. Метод обеспечивает высокую стабильность параметров генерации и низкий уровень шумов, сравнимые с классическими методами активной синхронизации мод. При этом для такого подхода не требуется технически сложно реализуемая высокочастотная импульсная модуляция накачки. Благодаря этому, а также отсутствию необходимости использования каких-либо внутрирезонаторных модуляторов или насыщающихся поглотителей, такой метод импульсной генерации отличается простотой реализации, высокой надежностью и энергоэффективностью.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 17-72-30006-П).

Литература

1. AuYeung J.C. and Johnston A.R., *Appl. Phys. Lett.* **40**, 112–114 (1982)
2. Peter D.S., et al, *Opt. Lett.* **16**, 405–407 (1991)
3. Granados E., et al, *Opt. Exp.* **17**, 569–574 (2009)
4. Kobtsev S., et al, *Opt. Exp.* **26**, 29867–29872 (2018)
5. Kharenko D., et al, *Opt. Exp.* **26**, 15084–15089 (2018)
6. S.V.Smirnov S., et al, *J. Opt. Soc. Am. B* **37**, 3068–3076 (2020)
7. Nyushkov B., et al, *Opt. Fiber Tech.* **66**, 102650 (2021)
8. Giles C.R. and Desurvire E., *J. Light. Technol.* **9**, 271–283 (1991)