

Пассивная гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере

А.И.Трихшев, В.А.Камынин, В.Б.Цветков, П.А.Итрин

Представлен полностью волоконный эрбиевый лазер, работающий в режиме пассивной гармонической синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Продемонстрирована генерация на 67-й гармонике с частотой следования импульсов 5.62 ГГц и длительностью 1.8 пс. Показано, что при повышении номера гармоники изменяются как параметры частотной модуляции, так и длительность импульсов.

Ключевые слова: синхронизация мод, ультракороткие импульсы, гармоническая синхронизация мод, волоконный лазер, частотная модуляция.

1. Введение

Высокочастотные (ВЧ, частота следования импульсов более 1 ГГц) волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) востребованы во многих областях науки и технологии. В оптической метрологии и молекулярной спектроскопии высокостабильные лазерные системы УКИ позволяют получать выходные данные с улучшенным отношением сигнал/шум при уменьшении времени измерения. Подобные системы подходят также для систем навигации, где требуются высокоточные стандарты частоты, и систем высокоскоростной передачи данных. Особое место ВЧ лазерные источники занимают в радиофотонике, являясь мощным стимулом для развития целых разделов фотоники: высокостабильных непрерывных и импульсных лазеров (в том числе лазеров УКИ), широкополосных фотоприемников, волоконных фильтров, фотонных аналого-цифровых преобразователей для частот свыше 10 ГГц.

Существует несколько способов создания ВЧ лазерных систем: использование твердотельных или полупроводниковых лазеров с коротким резонатором [1], микрорезонаторов [2], а также лазерных систем, работающих в режиме гармонической синхронизации мод [3], т.е. режиме, при котором в резонаторе одновременно существуют несколько импульсов на заданных временных интервалах. Синхронизация мод может быть получена с помощью насыщающихся поглотителей (SESAM или углеродных нанотрубок) [4, 5], а также с помощью нелинейных волоконных зеркал [6]. Один из самых распространенных спосо-

бов получения синхронизации мод в волоконных лазерах основан на использовании эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации (НВП) [7]. Так, например, в работах [8–11] были получены режимы гармонической синхронизации мод на 3-й, 322-й, 928-й и 27655-й гармониках. Однако зачастую такие лазерные системы содержат объемные элементы, а для стабилизации процесса генерации и снижения уровня шумов в них используются активные элементы.

2. Экспериментальная установка

В настоящей работе продемонстрирован импульсный кольцевой волоконный лазер, работающий в режиме пассивной гармонической синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

В качестве активной среды использовалось эрбиевое волокно длиной 1 м. Коэффициент поглощения на длине волны накачки составил 6.4 дБ/м. Общая длина резонатора с учетом используемой линии задержки на одномодовом волокне была 2.4 м, что обеспечивало частоту следования импульсов 84 МГц (соответствует основной гармонике резонатора). Накачка осуществлялась излучением

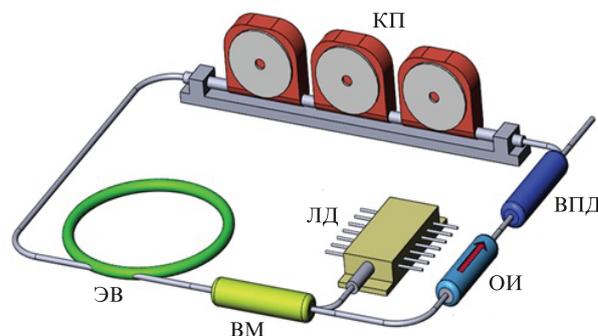


Рис.1. Схема экспериментальной установки: КП – контроллер поляризации; ЭВ – активное эрбиевое волокно; ВМ – волоконный мультиплексор; ЛД – диод накачки; ОИ – оптический изолятор; ВПД – волоконный поляризационный делитель.

А.И.Трихшев, В.А.Камынин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: trikshvegpi@gmail.com

В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

П.А.Итрин. Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42.

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г., после доработки – 18 октября 2018 г.

одномодового полупроводникового лазерного диода с длиной волны 1461 нм. Мощность излучения накачки варьировалась от 30 до 180 мВт. Гармоническая синхронизация мод достигалась путем тщательной подстройки контроллеров поляризации и оптимизации мощности накачки.

3. Результаты и их обсуждение

В результате экспериментов были найдены несколько рабочих точек, в которых наблюдался стабильный режим работы лазера, причем эти режимы можно было объединить в серии по длинам волн генерации. Так, на длине волны 1555 нм удалось получить гармоническую синхронизацию на частотах 480 МГц и 1.85 ГГц, на длине волны 1558 нм – на частотах 84, 168 и 840 МГц и на длине волны 1560 нм – на 3.11, 3.95 и 5.62 ГГц. Осциллограммы, полученные с использованием осциллографа Tektronix

MDO3052 с полосой 500 МГц, представлены на рис.2. Здесь приведены также соответствующие автокорреляционные функции, полученные с помощью автокоррелятора АВЕСТА АА-20DD. Максимальная частота следования импульсов 5.62 ГГц соответствует 67-й гармонике резонатора. Спектры выходного излучения показаны на рис.3.

Длительность генерируемых импульсов изменялась в диапазоне 0.8–1.8 пс. Зависимость длительности импульсов от частоты в режиме гармонической синхронизации мод представлена на рис.4. Можно предположить, что для устойчивого режима генерации на высоких гармониках требуется увеличение спектральной плотности мощности (за счет сужения спектра), чтобы компенсировать падение пиковой мощности, а также для сохранения достаточного нелинейного поворота плоскости поляризации.

Относительный уровень фазовых шумов в различных режимах работы лазера представлен на рис.5. Видно, что с увеличением номера гармоники уровень шумов резко

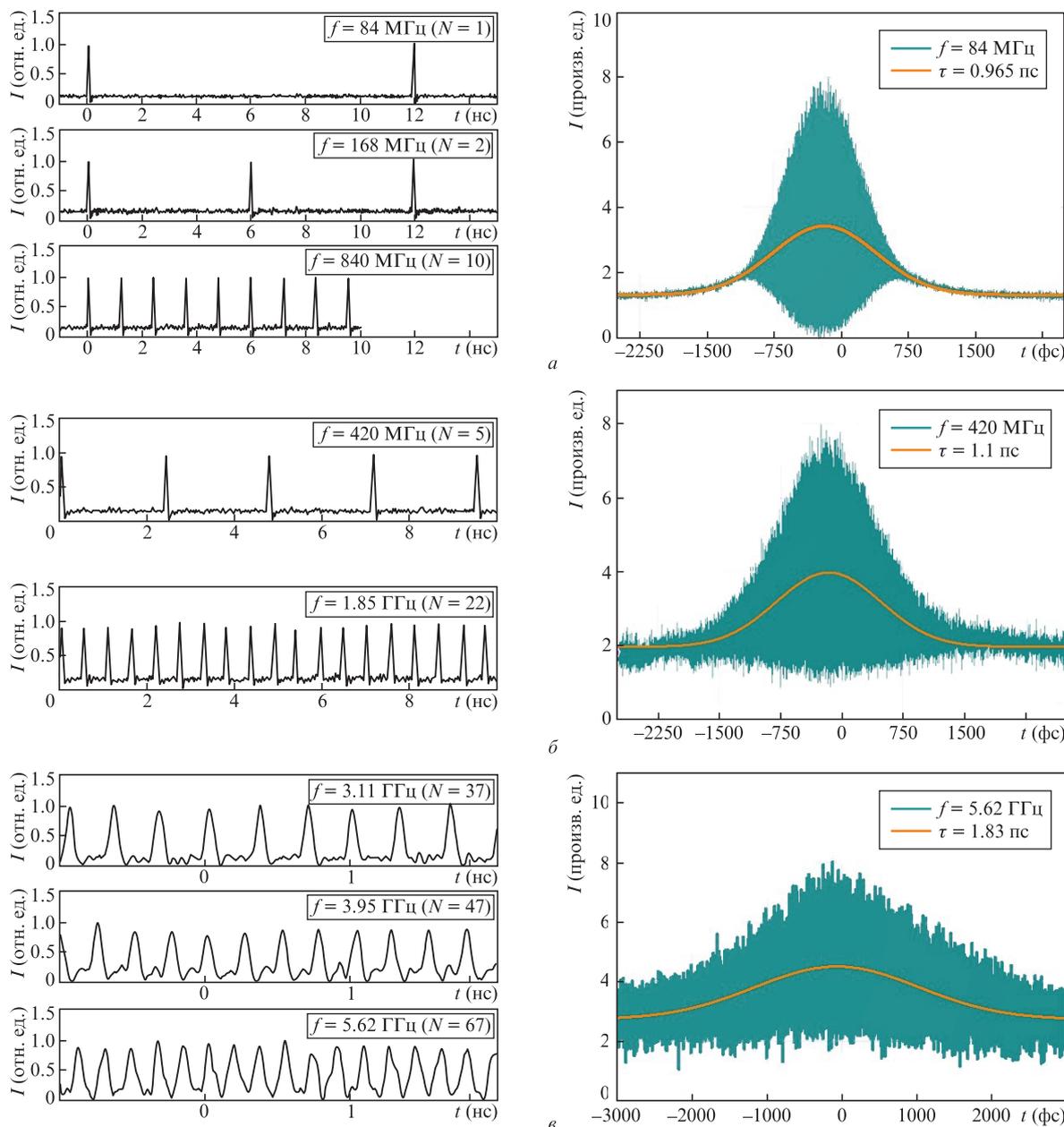


Рис.2. Осциллограммы (слева) и соответствующие автокорреляционные функции (справа) выходных импульсов для длин волн генерации 1558 (а), 1555 (б) и 1560 нм (в): f – частота следования импульсов; N – номер гармоники; τ – длительность импульса.

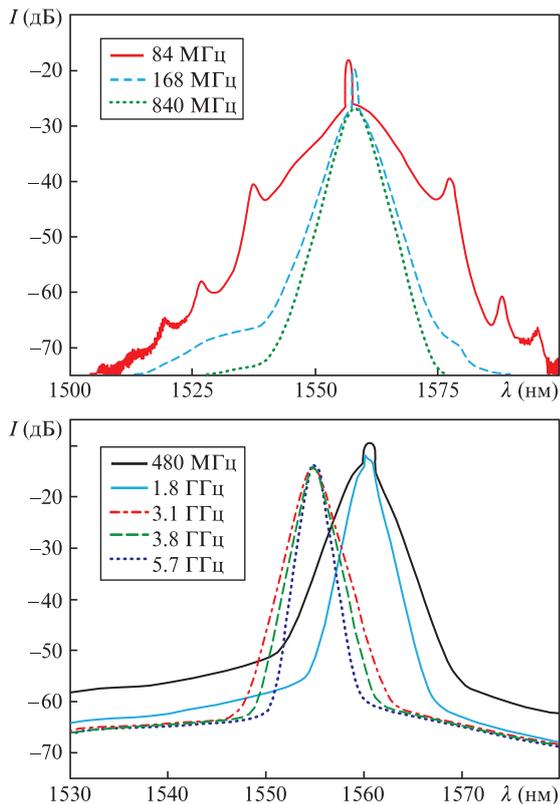


Рис.3. Спектры выходного излучения для разных гармоник.

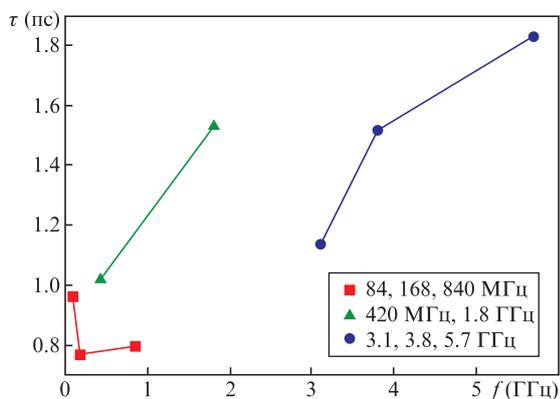


Рис.4. Зависимость длительности импульсов τ от частоты f .

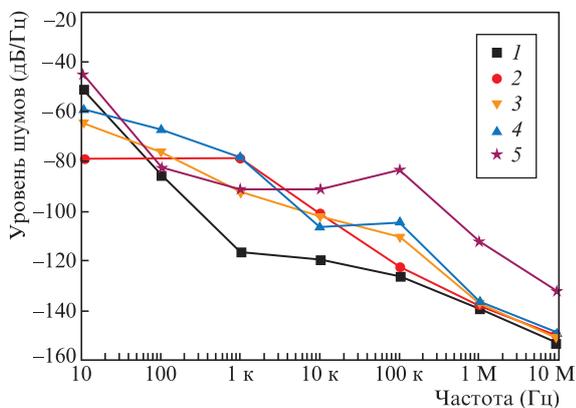


Рис.5. Относительный уровень фазовых шумов лазера на основной частоте (1), на основной частоте при генерации непрерывного излучения (2), на частоте 4-й (3), 6-й (4) и 11-й гармоник (5).

Табл.1.

| f (МГц) | τ (пс) | C (ГГц/пс) | $\Delta\lambda$ (нм) |
|-----------|-------------|--------------|----------------------|
| 97* | 0.74 | -1300 | 5.9 |
| 97 | 1.63 | -143 | 2.67 |
| 200 | 1.5 | -94 | 1.98 |
| 400 | 2.5 | -94 | 1.85 |
| 580 | 2 | -100 | 1.62 |
| 900 | 1.5 | -87 | 2.1 |
| 1200 | 1.5 | 90 | 1.47 |

* При работе лазера в режиме сильной частотной модуляции (чирп $C = -1300$ ГГц/пс) не удалось получить серию режимов гармонической синхронизации мод.

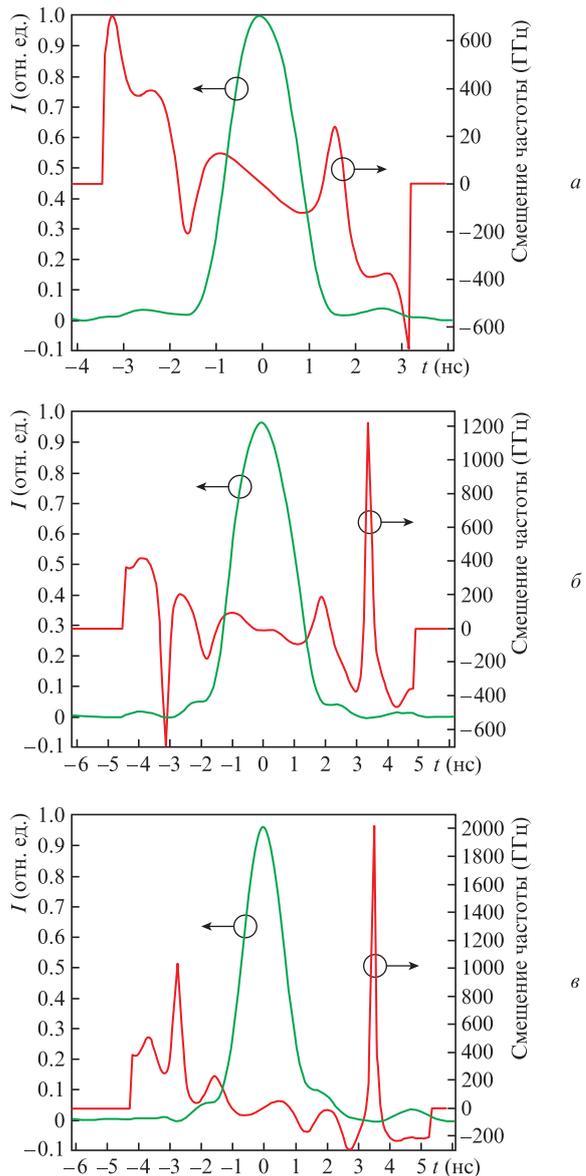


Рис.6. Форма и частотное смещение несущей выходного импульса на основной частоте (а), на частоте 6-й (б) и 12-й гармоник (в).

возрастает, что связано с отсутствием сильных механизмов стабилизации периода следования импульсов в резонаторе в схеме с пассивной гармонической синхронизацией мод.

При измерении частотной модуляции импульсов длина резонатора была укорочена, вследствие чего основная

частота следования импульсов увеличилась до 97 МГц. Измерение частотной модуляции, длительности и ширины спектра импульсов проводилось с помощью прибора FROG HR150 Coherent solution. Результаты измерения приведены в табл.1. Формы частотной модуляции импульсов на основной, 6-й и 13-й гармониках представлены на рис.6, из которого следует, что с увеличением номера гармоники частотная модуляция импульса сильно искажается.

4. Заключение

Итак, создана лазерная система УКИ на базе кольцевого волоконного лазера, работающего в режиме гармонической синхронизации мод. Получен режим генерации на 67-й гармонике (5.62 ГГц) при основной частоте лазера 84 МГц. Установлено, что существуют рабочие точки, в которых возможна перестройка лазера по гармоническим частотам на заданных длинах волн. Длительность импульсов при этом варьировалась в диапазоне 0.8–1.8 пс. Установлено, что на высоких гармониках фазовый шум ухудшается в среднем на 25–30 дБ. С увеличением

номера гармоники частотная модуляция искажается сильнее.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН в рамках Программы фундаментальных исследований №I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

1. Bandelow U., Radziunas M., Vladimirov A., Hüttl B., Kaiser R. *Opt. Quantum Electron.*, **38**, 495 (2006).
2. Kippenberg T.J., Holzwarth R., Diddams S.A. *Science*, **332**, 6029 (2011).
3. Li X., Zou W., Chen J. *Opt. Express*, **23** (16), 21424 (2015).
4. Sotor J., Sobon G., Macherzynski W., Abramski K.M. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 055102 (2014).
5. Komarov A., Leblond H., Sanchez F. *Opt. Commun.*, **267**, 162 (2006).
6. Chen H.R., Lin K.H., et al. *Opt. Lett.*, **38**, 845 (2013).
7. Peng J., Zhan L., Luo S., Shen Q. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 3009 (2013).
8. Yan M., Li W., Yang K., Bai D., Zhao J., Shen X., Ru Q., Zeng H. *Opt. Lett.*, **37**, 3021 (2012).
9. Amrani F., Haboucha A., Salhi M., Leblond H., Komarov A., Grellu P., Sanchez F. *Opt. Lett.*, **34**, 2120 (2009).
10. Lecaplain C., Grellu P. *Opt. Express*, **21**, 10897 (2013).
11. Chen H., Chen S.-P., Jiang Z.-F., Hou J. *Opt. Express*, **23**, 1308 (2015).