

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

# Генерация ультракоротких импульсов с минимальной длительностью 90 фс в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с гибридной синхронизацией мод

Д.А.Дворецкий, С.Г.Сазонкин, В.С.Воропаев, М.А.Негин, С.О.Леонов, А.Б.Пнев, В.Е.Карасик, Л.К.Денисов, А.А.Крылов, В.А.Давыдов, Е.Д.Образцова

*Исследованы режимы генерации ультракоротких импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с гибридной синхронизацией мод на основе бор-азотных одностенных углеродных нанотрубок и нелинейного эффекта Керра в волоконных световодах. Получены стабильные дечирпированные ультракороткие импульсы длительностью ~90 фс, с частотой следования ~42.2 МГц и средней выходной мощностью ~16.7 мВт, что соответствует энергии в импульсе ~0.4 нДж и пиковой мощности лазера ~4.4 кВт.*

**Ключевые слова:** синхронизация мод, одностенные нанотрубки, солитон, ультракороткие импульсы, волоконный лазер.

## 1. Введение

В последние два десятилетия волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ), работающие в режиме синхронизации мод (СМ), широко используются в различных областях науки и техники [1]. Отметим, что в ряде применений требуется стабильность длительности и частоты следования импульсов, низкий шум интенсивности, а также фазовый шум источника УКИ. Так, стабилизация указанных параметров наиболее важна в частотной метрологии, комб-спектроскопии, ТГц импульсной спектроскопии, телекоммуникациях и других применениях [2–5]. В последнее время привлекает внимание гибридная синхронизация мод, которая, с одной стороны, позволяет добиться надежного запуска режима СМ, а с другой – улучшить параметры УКИ [4, 6, 7].

Стабильная генерация УКИ в режиме гибридной синхронизации мод в волоконных лазерах осуществляется путем совместного действия двух насыщающихся поглотителей: медленного поглотителя (со временем отклика примерно до 0.2 пс), например, такого как самопросветляющееся полупроводниковое зеркало (SESAM) [8], графеновые пленки [9] или углеродные нанотрубки [10], и быстрого поглотителя на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации (НЭП) в волоконных световодах (с предельным временем отклика ~10 фс) [11, 12]. Недавно легированные бор-азотом углеродные нанотрубки (С:BNNT) выступили в роли эффективного насыщающегося поглотителя, обладающего параметрами насыщения и глубиной

модуляции, достаточными для надежного запуска синхронизации мод в эрбиевых волоконных лазерах ультракоротких импульсов [13].

В настоящей работе впервые получены стабильные дечирпированные ультракороткие импульсы с минимальной длительностью ~90 фс в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с отрицательной внутрирезонаторной дисперсией групповых скоростей и гибридной синхронизацией мод на основе бор-азотных одностенных углеродных нанотрубок и НЭП в волоконных световодах.

## 2. Описание экспериментальной установки

Схема кольцевого резонатора полностью волоконного лазера представлена на рис. 1. В качестве медленного пассивного модулятора использовались легированные бор-азотом одностенные углеродные нанотрубки (С:BNNT) [13, 14]. Для реализации быстрого механизма синхронизации мод на основе НЭП применялся коммерческий изолятор-поляризатор (ISO-PM), который также осуществлял функцию изолятора для получения однонаправленной генерации. Два контроллера поляризации (КП), установленные в резонаторе, обеспечивают стабильность работы лазера.

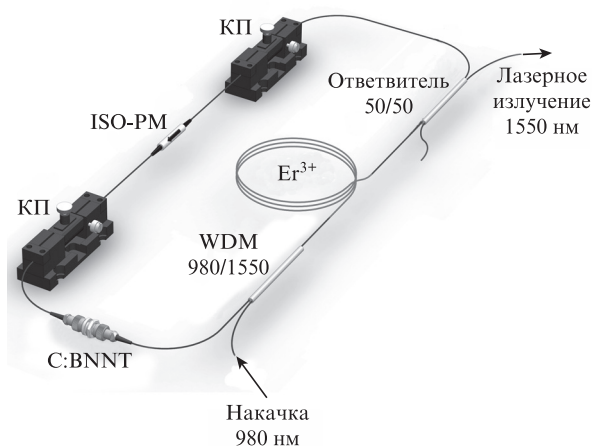


Рис. 1. Схема кольцевого волоконного эрбиевого лазера с гибридной синхронизацией мод

Д.А.Дворецкий, С.Г.Сазонкин, В.С.Воропаев, М.А.Негин, С.О.Леонов, А.Б.Пнев, В.Е.Карасик, Л.К.Денисов. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: ddvoretzkiy@gmail.com  
 А.А.Крылов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
 В.А.Давыдов. Институт физики высоких давлений РАН им. Л.Ф.Вережацина, Россия, 142190 Москва, Троицк, Калужское ш., стр. 14  
 Е.Д.Образцова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 23 мая 2016 г., после доработки – 30 сентября 2016 г.

ленные в кольцевом резонаторе с двух сторон от изолятора-поляризатора, использовались для настройки режимов генерации волоконного лазера. В качестве активного эрбиевого волоконного световода служил отрезок волокна длиной 1.34 м с поглощением ионов  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны накачки  $\sim 43$  дБ/м и коэффициентом дисперсии, равным  $-30.7 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$  на длине волны  $\lambda = 1550$  нм. Для точной настройки дисперсии внутри резонатора использовалось волокно SMF-28 (Corning Corp., США), имеющее отрицательную дисперсию групповых скоростей (ДГС) в области 1550 нм. Суммарное внутрирезонаторное значение дисперсионного параметра  $\beta_2$  в схеме составило  $-0.021 \text{ пс}^2$  на  $\lambda = 1550$  нм.

Накачка активного эрбиевого волокна осуществлялась через спектрально-селективный волоконный ответвитель 980/1550 (WDM 980/1550) одномодовым лазерным диодом на длине волны  $\lambda_p = 980$  нм с максимальной оптической мощностью на выходе до 330 мВт. Лазерный выход из резонатора представлял собой плечо волоконно-оптического разветвителя с коэффициентом деления 50/50.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

При настройке КП в исследуемом лазере возникают два различных по ширине спектра самостартующих одноимпульсных режима генерации (спектры импульсов режимов генерации приведены ниже). На вставке к рис.2,а представлена типичная осциллограмма режимов генера-

ции (осциллограф Infinium MSO9254A, Keysight Technologies, Santa Rosa, США). Порог режима синхронизации мод для обоих типов генерации наблюдался при средней мощности накачки около 100 мВт ( $\lambda_p = 980$  нм). При увеличении мощности накачки до максимальной (330 мВт) срыва генерации в обоих режимах не наблюдалось. Стоит отметить, что столь низкий порог генерации по накачке (по сравнению, например, с порогом синхронизации мод только на основе НЭП [2]) обусловлен комбинацией двух механизмов синхронизации мод – медленный насыщающийся поглотитель надежно запускает режим синхронизации мод, в то время как быстрый механизм окончательно формирует импульс [4].

На рис.2,б изображен спектр электрических сигналов на основной частоте повторения осциллятора (полученный с помощью анализатора электрического спектра FSL 3 model.03, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Munich, Германия), которая в точности соответствует длине резонатора 4.93 м и находится в районе 42 МГц (разрешение 300 Гц). Для обоих режимов генерации график имеет ярко выраженный пик на частоте 42.22 МГц при отношении сигнал/шум 63 дБ, что говорит о стабильности генерации от импульса к импульсу. На вставке к рис.2,б приведен частотный спектр в полосе от 10 кГц до 2 ГГц с разрешением 30 кГц. Отметим, что высокое отношение сигнал/шум для режима генерации в ВЧ области частот свидетельствует о стабильности полученной синхронизации мод [15].

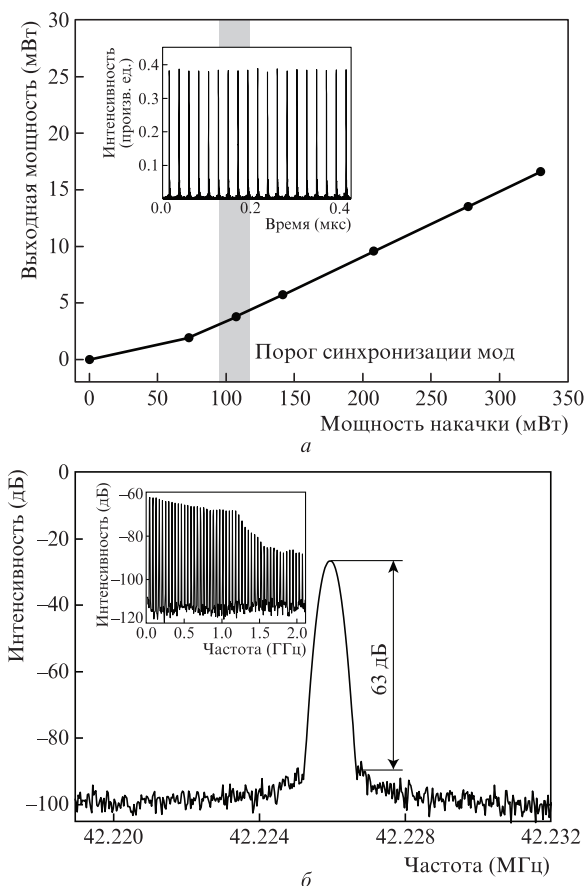


Рис.2. Зависимость средней выходной оптической мощности от мощности накачки (на вставке осциллограмма генерации ультракоротких импульсов) (а), а также частотные спектры генерации (б).

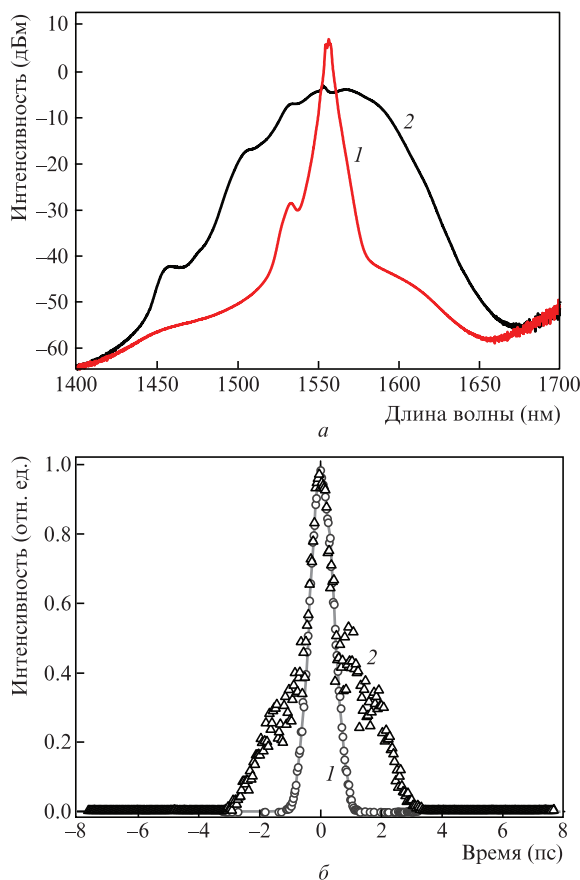


Рис.3. Спектры (а) и автокорреляционные функции по интенсивности импульсов, описываемых функцией  $\text{sech}^2$  (1) и гауссовой функцией, а также приближение УКИ функцией Гаусса (сплошная кривая) (б) в кольцевом эрбиевом волоконном лазере. Средняя выходная мощность импульсов равна 16.7 мВт, частота следования – 42.2 МГц, длительность импульса (FWHM) – 650 фс.

На рис.3,а представлены спектры импульсов для двух типов генерации в режиме синхронизации мод при средней выходной мощности 16.7 мВт. Спектр излучения, имеющий более узкую форму (1), лучше всего аппроксимируется функцией  $\text{sech}^2(\lambda)$  с шириной по полувысоте  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 4$  нм, а форма широкого спектра излучения (2) аппроксимируется функцией Гаусса с  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 56$  нм. На рис.3,б приведены соответствующие измерения автокорреляционных функций импульсов по интенсивности для двух типов генерации и их приближение функцией Гаусса при длине волокна от ответвителя до автокоррелятора (модель FR-103WS, Femtochrome Research Inc., Berkeley, США), равной  $\sim 2$  м. Отметим, что гауссова форма спектра и импульса характерна для генерации «растянутых импульсов» (stretched-pulse) [16] или солитонов с управляемой дисперсией (УД-солитон) [5, 17]. Форма спектра импульса в виде  $\text{sech}^2(\lambda)$  является характерной для классического солитона [18]. Однако отсутствие боковых пиков, обусловленных модуляционной нестабильностью классического солитона, говорит о генерации близкого к классическому УД-солитона (подобные трансформации изучались, например, в работе [19]). Из сказанного выше и с учетом того, что внутрирезонаторная ДГС имела отрицательное значение, можно сделать предположение о том, что установившиеся режимы генерации ультракоротких импульсов являются УД-солитонами.

Оценка длительности по полувысоте дает ширину импульса  $\sim 650$  фс для обоих типов генерации. Отметим, что для импульса формы  $\text{sech}^2$  произведение длительности сигнала на полосу частот  $\text{TBP} = \Delta\nu\tau_{\text{min}} \approx 0.322$ , а для импульса с гауссовой формой спектра  $\text{TBP} \approx 4.45$  (типичное значение  $\text{TBP}$  для импульса с гауссовой формой спектра приблизительно равно 0.441). Таким образом, полученный  $\text{sech}^2$ -импульс близок к своему пределу по полосе частот (для классического солитона  $\text{TBP} \approx 0.315$ ).

На рис.4 приведены автокорреляционная функция по интенсивности и фаза дечирпированного импульса с гауссовой формой спектра при длине волокна от ответвителя до системы анализа сверхкоротких лазерных импульсов (Swamp Optics LLC, GRENOUILLE Model 15-40-USB,

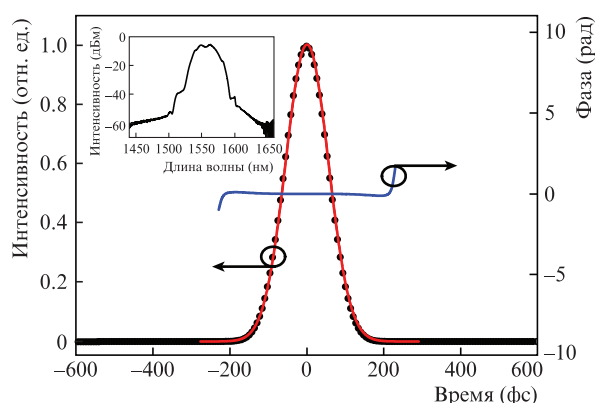


Рис.4. Функция автокорреляции по интенсивности и фаза УКИ с гауссовой формой спектра (на вставке спектр генерации). Средняя выходная мощность импульсов равна 16.7 мВт, частота следования – 42.2 МГц, длительность импульса (FWHM) – 90 фс.

США), равной  $\sim 1.7$  м, а на вставке показан полученный спектр генерации при максимальной выходной мощности. Отметим, что минимальная длительность импульса с гауссовой формой спектра получена при изменении длины волокна SMF-28 на выходе лазера и составила  $\sim 90$  фс (FWHM), при этом параметр ТВР оказался равен 0.47, то есть временная ширина импульса близка к своему пределу по полосе частот. Отсутствие какого-либо пьедестала на полученной функции автокорреляции (см. рис.4), который обычно наблюдается при сжатии импульсов с высокой энергией в волокне (см., напр., [20]), говорит о том, что сжатие импульса происходит только за счет дисперсии в волокне, а также об отсутствии влияния нелинейных эффектов при распространении импульса с относительно низкой энергией.

Таким образом, в настоящей работе получена генерация стабильных дечирпированных УКИ с частотой следования 42.22 МГц, средней выходной мощностью 16.7 мВт и минимальной длительностью импульса 90 фс, что соответствует энергии в импульсе, равной  $\sim 0.4$  нДж, и пиковой мощности 4.4 кВт, полученной на выходе резонатора, в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с гибридной синхронизацией мод на основе бор-азотных одностенных углеродных нанотрубок и нелинейной эволюции поляризации в волоконных световодах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-38-60102 мол\_а\_дк) и фонда Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых-кандидатов наук (грант № МК-7724.2016.8).

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам НЦВО РАН А.К.Сенаторову, М.М.Бубнову и М.Е.Лихачеву за предоставленные активные волоконные световоды и за проведенные измерения их основных характеристик.

1. Fermann M., Hartl I. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 191 (2009).
2. Dvoretzkiy D.A. et al. *Opt. Express*, **23**, 33295 (2015).
3. Zaytsev K.I. et al. *J. Appl. Phys.*, **115**, 193105 (2014).
4. Krylov A.A. et al. *Laser Phys. Lett.*, **12** (6), 06500 (2015).
5. Turitsyn S.K. et al. *Phys. Reports*, **521** (4), 135 (2012).
6. Chernysheva M.A. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 425 (2014).
7. Khudyakov D.V., Borodkin A.A., Lobach A.S., et al. *Appl. Phys. B.*, **121**, 19 (2015); doi:10.1007/s00340-015-6196-8.
8. Keller U. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 435 (1996).
9. Popa D. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 203106 (2010).
10. Lim J. et al. *Opt. Express*, **17**, 14115 (2009).
11. Nelson L. et al. *Appl. Phys. B.*, **65**, 277 (1997).
12. Таусенев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **35** (7), 581 (2005).
13. Krylov A.A. et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33** (2), 134 (2016).
14. Arutyunyan N.R. et al. *Carbon*, **50** (3), 791 (2012).
15. Li J. et al. *Opt. Express*, **22**, 31020 (2014).
16. Nelson L.E., Jones D.J., Tamura K., et al. *Appl. Phys. B*, **65**, 277 (1997).
17. Han X. *J. Lightwave Technol.*, **32** (8), 1472 (2014).
18. Kelly S.M.J. *Electron. Lett.*, **28** (8), 806 (1992).
19. Prilepsky J.E., Derevyanko S.A., Turitsyn S.K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1254 (2007).
20. Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Kukarin S.V. *Opt. Express*, **23**, 3914 (2015).