

Фемтосекундный волоконный лазер с гибридной синхронизацией мод фемтосекундного делителя частоты

© В.А. Лазарев¹, С.О. Леонов¹, А.Б. Пнев¹, С.Г. Сазонкин¹,
К.П. Цапенко¹, А.А. Крылов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 119333, Россия

Предложен фемтосекундный волоконный лазер для реализации фемтосекундного делителя частоты с целью переноса стабильности частоты от оптического стандарта. Рассмотрен один из вариантов реализации такого лазера с пленками на основе одностенных углеродных нанотрубок для синхронизации мод. Предложена схема самозапускающейся генерации со стабильной синхронизацией мод и соответствующим контролем состояния поляризации.

Ключевые слова: одностенные углеродные нанотрубки, фемтосекундный лазер, делитель частоты, синхронизация мод.

Введение. В настоящее время быстрыми темпами развиваются навигационные системы и системы глобального позиционирования. В России модернизируется глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). Одной из ключевых проблем, затрудняющих дальнейшее совершенствование ее технических параметров, является повышение точностных и эксплуатационных характеристик аппаратуры частотно-временного сегмента. В связи с этим задача построения малогабаритного, стойкого к внешним воздействиям высокоточного задающего генератора для использования в системах наземного и космического базирования является актуальной. Наиболее перспективное решение такой задачи — разработка оптического стандарта частоты на высокостабильных непрерывных лазерных источниках [1].

Следует отметить, что для применения оптического стандарта частоты (ОСЧ) в технике и промышленности необходимо разработать делитель частоты. В частности, для ОСЧ на основе $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера [2, 3], работающего на частоте 125 ТГц, необходимо реализовать деление частоты с целью получения эталонного сигнала в диапазоне 1,2...1,6 ГГц, в котором работает система ГЛОНАСС [4]. В течение долгого времени переход из оптического диапазона в радиодиапазон спектра был чрезвычайно трудной научно-технической задачей, для решения которой требовались многочисленные цепочки преобразователей и громоздкая аппаратура. Ситуация коренным образом изме-

нилась в начале 2000-х годов благодаря достижениям в области оптики сверхкоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов.

Фемтосекундные лазеры генерируют последовательность сверхкоротких импульсов [5], спектр которых представляет собой гребенку оптических частот — набор эквидистантно расположенных узких спектральных линий. Если какую-либо компоненту спектра гребенки стабилизировать с помощью стандарта частоты, то абсолютные значения частот всех других компонент будут известны. Фактически, получится линейка оптических частот, с помощью которой можно эффективно решить проблему высокоточных спектральных измерений. При этом будет стабильной частота повторения импульсов лазера в диапазоне 50...100 МГц, в котором работает аппаратура навигационно-временного обеспечения большого числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Этот стабильный сигнал частоты повторения импульсов лазера будет эталонным сигналом для передачи потребителю.

Для широкого применения эталонной частотной аппаратуры в различных отраслях промышленности, и особенно в комическом приборостроении, необходимо разработать компактный и надежный делитель оптической частоты. С этой точки зрения наиболее перспективным вариантом реализации делителя частоты является фемтосекундный волоконный лазер, работающий в непрерывном режиме генерации ультракоротких импульсов с частотой повторения импульсов 50...100 МГц.

В данной работе рассмотрен один из перспективных вариантов реализации фемтосекундного волоконного лазера, основанного на методе гибридной синхронизации мод. Этот пассивный самозапускающийся метод, позволяющий получить стабильный режим генерации сверхкоротких лазерных импульсов, что обусловило его выбор для реализации фемтосекундного волоконного лазера.

Стабильная генерация коротких импульсов в режиме синхронизации мод в волоконных лазерах осуществляется путем совместного действия двух насыщающихся поглотителей: медленного насыщающегося поглотителя, например такого как самопросветляющееся зеркало (SESAM) [6] или углеродные наноструктуры [7] (фотография, полученная с помощью микроскопа, приведена на рис. 1), и быстрого поглотителя на основе нелинейного эффекта Керра [8, 9].

На рис. 2 приведена схема разработанного кольцевого эрбиевого волоконного фемтосекундного лазера. Лазер состоит из активного волокна, легированного эрбием, диаметр сердцевинки 5 мкм, длина волокна 35 см. Накачка осуществляется с помощью лазерного диода мощностью 120 мВт, работающего на длине волны 980 нм. Излучение вводится в резонатор посредством 980/1550 нм мультиплексора.

Медленный насыщающийся поглотитель в виде полимерной пленки, содержащей единичные углеродные нанотрубки, включен в модуль, состоящий из двух FC-коннекторов. Для эффективной реализации — механизма нелинейной эволюции поляризации (НЭП) кольцевой резонатор содержит два контроллера поляризации с обеих сторон двулучепреломляющего поляризующего волокна типа PANDA (PZ-волокно) [10]. Волоконный изолятор обеспечивает одностороннюю генерацию в кольцевом резонаторе. Генерируемое излучение отводится из резонатора посредством оптического разветвителя с уровнем отведения оптической мощности 3 дБ.

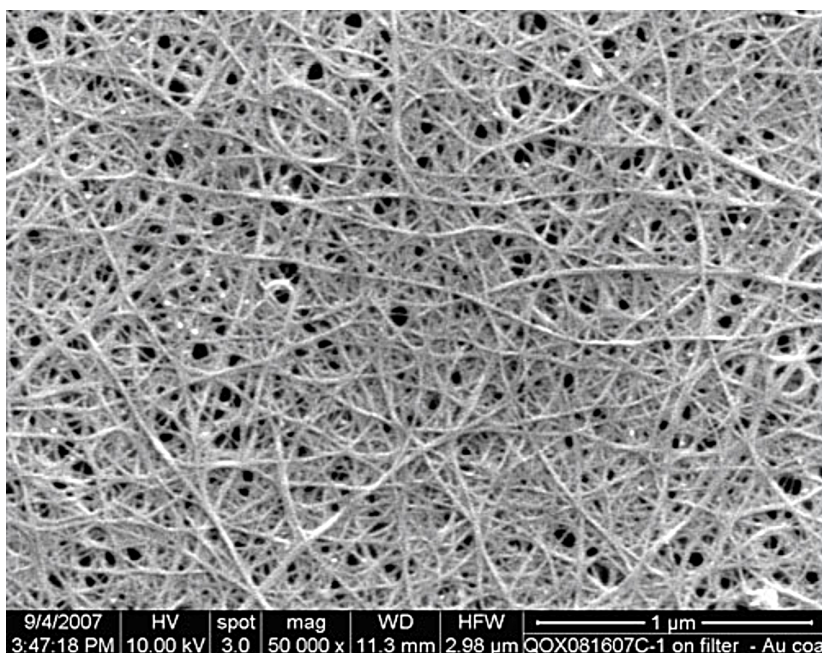


Рис. 1. Изображение углеродных нанотрубок, полученное на микроскопе

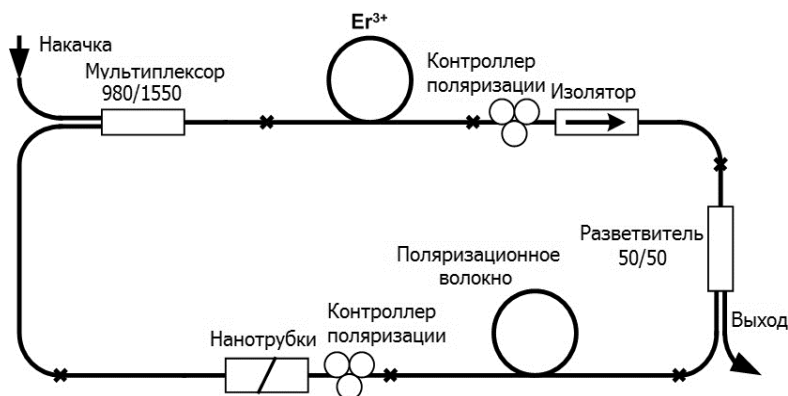


Рис. 2. Схема кольцевого эрбиевого волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод

В лазере использована НЭП как механизм быстрого насыщения внутри кольца резонатора с синхронизацией мод с помощью поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУН). Медленно насыщающиеся поглотители способствуют надежному запуску синхронизации мод, но короткие импульсы можно получить только при использовании механизма быстрого насыщения, такого как НЭП за счет эффекта Керра в волоконном резонаторе. Таким образом, медленно насыщающийся поглотитель инициирует стабильную синхронизацию мод, а поглотитель на основе быстрого эффекта Керра способствует уменьшению длительности и повышению качества импульсов.

Следует отметить, что используемые в лазере эрбиевые волокна обладают нормальной дисперсией групповых скоростей (ДГС) в спектральном диапазоне 1 500...1 600 нм. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента дисперсии от длины волны для эрбиевого активного волоконного световода. Видно, что световод характеризуется малым значением нормальной дисперсии, что позволяет получать устойчивую генерацию фемтосекундных импульсов даже при малых отрицательных значениях суммарной дисперсии внутри резонатора.

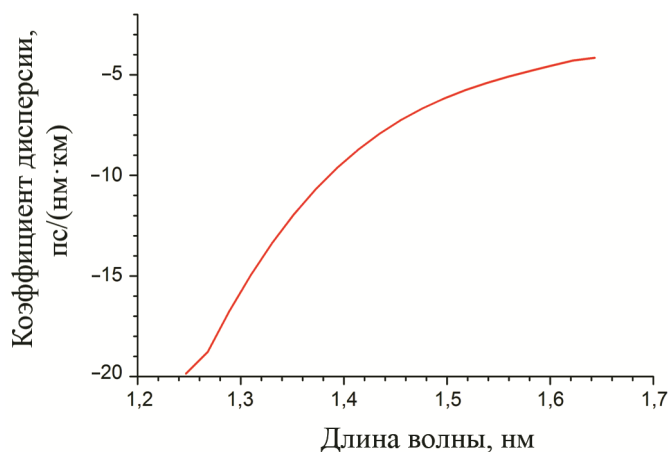


Рис. 3. Коэффициент дисперсии активного эрбиевого волоконного световода LD141(110)

Получена генерация одиночных импульсов с самозапускающейся стабильной синхронизацией мод с использованием контроллеров поляризации. Измерения параметров разработанного лазера проводились на стенде, схема которого представлена на рис. 4.

Излучение исследуемого лазера 1 делится с помощью оптического разветвителя 2, 20 % оптической мощности отводится для измерения спектра с помощью оптического анализатора спектра 8, остальные 80 % отводятся для измерения длительности импульса с помощью автокоррелятора 7. Часть излучения отводится на InGaAs-приемник из-

лучения 5, подключенный к осциллографу 6. Приемник излучения работает в диапазоне длин волн $0,9 \dots 1,7$ мкм, чувствительность приемника 1 А/Вт, темновой ток — 0,8 нА, частота среза — 1 ГГц.

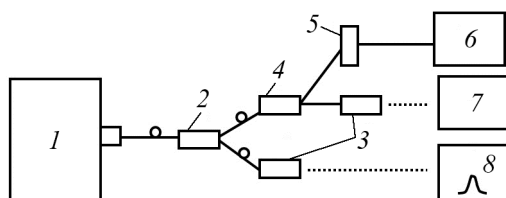
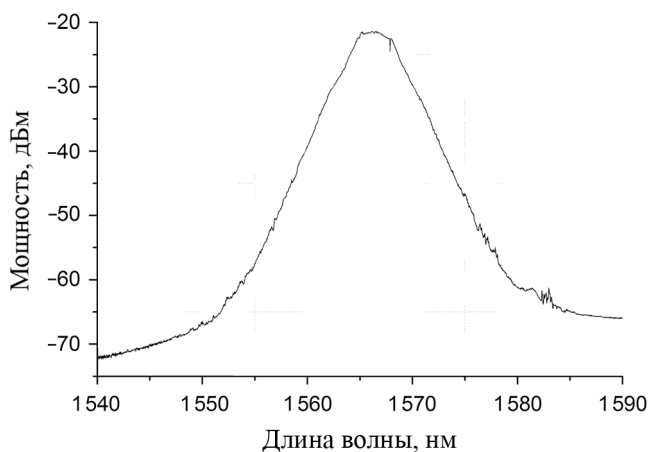
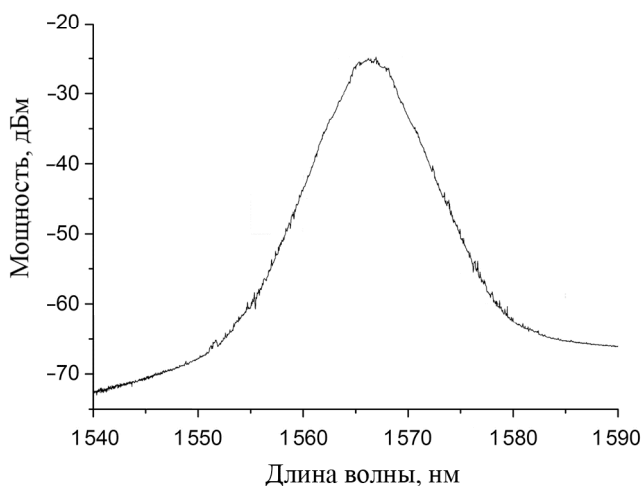


Рис. 4. Структурная схема стенда для измерения параметров фемтосекундного волоконного лазера:

1 — исследуемый лазер; 2, 4 — оптические разветвители 20/80; 3 — коллиматоры; 5 — ФПУ; 6 — осциллограф; 7 — автокоррелятор; 8 — анализатор оптического спектра



a



б

Рис. 5. Спектр лазерного излучения:

a — мощность накачки 40 мВт; *б* — мощность накачки 120 мВт

На рис. 5 представлены измеренные спектры лазерного излучения при различном уровне мощности накачки. Как отмечалось, спектр лазера представляет собой гребенку оптических частот, однако на рис. 5 вследствие ограниченности разрешающей способности используемого спектрального прибора структура гребенки не наблюдается. Видно, что при изменении мощности накачки происходит эволюция спектра, можно зафиксировать незначительное уменьшение ширины спектра при увеличении мощности накачки в 1,2 раза.

Измерены параметры ультракоротких импульсов в зависимости от изменения ненасыщенного коэффициента пропускания ОУН-пленок (в диапазоне 54...85 %) и уровня мощности накачки. На рис. 6 представлена осциллограмма полученных фемтосекундных лазерных импульсов. Видно, что частота следования импульсов составляет около 50 МГц, что позволяет реализовать делитель частоты для переноса стабильности ОСЧ в указанный частотный диапазон.

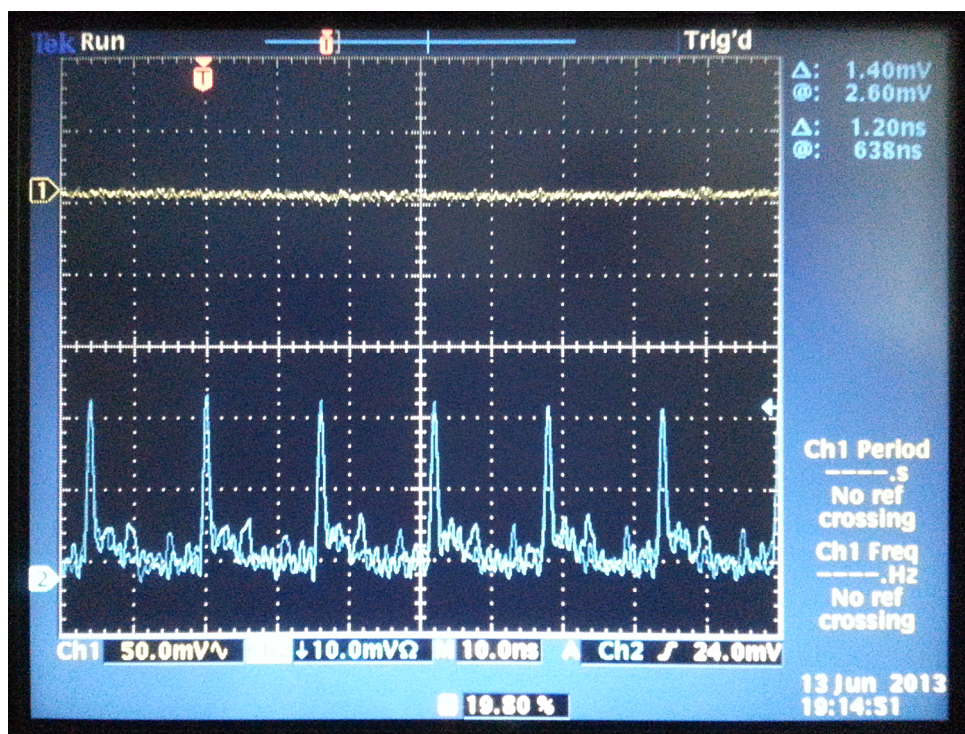


Рис. 6. Осциллограмма фемтосекундных импульсов

Проведено сравнение выходных параметров сверхкоротких импульсов в волоконном лазере на основе общей кольцевой схемы со схемой, в которой использован механизм НЭП, инициируемой путем добавления в кольцо резонатора PZ-волокна. Установлено, что наименьшая длительность импульса менее 300 фс достигается при реа-

лизации механизма НЭП. Таким образом, метод гибридной синхронизации мод позволяет получить стабильный режим генерации с более короткими импульсами по сравнению со случаем использования НЭП-механизма в лазерном резонаторе.

Оценка стабильности частоты повторения импульсов, а также схемы реализации систем обратной связи для регулировки параметров лазерного резонатора будут рассмотрены в дальнейшей работе.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено уменьшение длительности ультракоротких импульсов, получаемых в кольцевом волоконном эрбиевом лазере с синхронизацией мод с использованием НЭП-механизма. Применялись активные эрбиевые волокна с положительной дисперсией групповых скоростей в спектральном диапазоне длин волн 1500...1600 нм. Наименьшая длительность импульсов, полученная при исследовании, составила 250 фс. Следует отметить, что на основе разработанного лазера путем разработки систем обратной связи для регулировки параметров лазерного резонатора можно создать фемтосекундный делитель частоты, который в сочетании с ОСЧ будет востребован в навигационных системах, прецизионной спектроскопии, радиоастрономии, фундаментальной метрологии, при геодезических измерениях и в других областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., Shelkovikov A.S. Femtosecond Er^{3+} Fiber Laser for Application in an Optical Clock. *Laser Physics*, 2006, vol. 17, no. 11, pp. 1286–1291.
- [2] Губин М.А. Киреев А.Н., Пнев А.Б., Тюриков Д.А., Шелестов Д.А., Шелковников А.С., Лазарев В.А. Наблюдение резонансов насыщенной дисперсии метана в двухмодовом $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}/\text{CH}_4$ -лазере. *Квантовая электроника*, 2012, т. 42, № 7, с. 565–566.
- [3] Губин М.А. Киреев А.Н., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Подмарьков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П., Шелковников А.С. Оптический стандарт частоты на основе $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}/\text{CH}_4$ -лазера. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, Спецвыпуск № 8 «Современные проблемы оптотехники»*, 2012, с. 121–126.
- [4] Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. *Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1*. Москва, РНИИ КП, 2008.
- [5] Vernaleken A., Schmidt B., Wolferstetter M., Hänsch T.W., Holzwarth R., Hommelhoff P. Carrier-envelope frequency stabilization of a Ti:sapphire oscillator using different pump lasers. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 16, pp. 18387–18396.
- [6] Keller U., Weingarten K.J., Kärtner F.X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Honninger C., Matuschek N., Aus der Au J. Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, vol. 2, no. 3, pp. 435–452.
- [7] Мусатов А.Л., Израэльянц К.Р., Образцова Е.Д., Иванова С.Р., Скабалланович Т.А. Низковольтная нестационарная электронная эмиссия из одно-

стенных углеродных нанотрубок — экзoeлектронная эмиссия. *Письма в ЖЭТФ*, 2005, т. 82:1, с. 52–54.

- [8] Nelson. L.E., Jones D.J., Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. Ultrashort-pulse fiber ring lasers. *Appl. Phys.*, B., 1997, vol. 65, pp. 277–294.
- [9] Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Jablonski M. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes. *IEEE Journal of selected topics in QE*, 2004, vol. 10, pp. 137–146.
- [10] Koh J., Chen X., Li M.-J., Nolan D.A., Artuso A. New polarizing optical fibers. *Proc. of SPIE*, 2006, p. 6351.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лазарев В.А., Леонов С.О., Пнев А.Б., Сазонкин С.Г., Цапенко К.П., Крылов А.А. Фемтосекундный волоконный лазер с гибридной синхронизацией мод для создания фемтосекундного делителя частоты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/929.html>

Лазарев Владимир Алексеевич — младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: измерения в волоконной оптике, метрология ВОЛС, волоконно-оптические датчики для измерения температуры и деформации. e-mail: sintetaza@mail.ru

Леонов Станислав Олегович — младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: измерения параметров фотонно-кристаллических волоконных световодов, генерация суперконтинуума. e-mail: leonov-st@mail.ru

Пнев Алексей Борисович — младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка оптических стандартов частоты, создание измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков. e-mail: apniiov@gmail.ru

Сазонкин Станислав Григорьевич — инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка непрерывных волоконных лазеров. e-mail: sazstas@gmail.ru

Цапенко Константин Павлович — студент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка оптических стандартов частоты, измерения характеристик фемтосекундных волоконных лазеров. e-mail: kostyatsapenko@gmail.com

Крылов Александр Анатольевич — научный сотрудник лаборатории волоконной оптики Научного центра волоконной оптики РАН. Область научных интересов: разработка фемтосекундных волоконных лазеров, волоконно-оптических гиометров. e-mail: krylov@fo.gpi.ru