

Исследование режимов гармонической генерации рамановских диссипативных солитонов во внешнем волоконном резонаторе в спектральной области 1.3 мкм

Д.С.Харенко, В.Д.Ефремов, С.А.Бабин

Проведено исследование режимов гармонической генерации импульсного ВКР-лазера с синхронной накачкой. Использование фосфоросиликатного волокна с сохранением поляризации позволило получить стабильную генерацию рамановских диссипативных солитонов (РДС) с длиной волны в области 1.3 мкм, а кратное увеличение длины внешнего резонатора относительно резонатора лазера накачки за счет волокна со смещенной дисперсией позволило повысить порог перехода в режим шумоподобных импульсов и увеличить энергию РДС до 2.5 нДж при оценочной длительности спектрально-ограниченного импульса около 200 фс.

Ключевые слова: волоконные лазеры, фемтосекундные лазеры, синхронная накачка, вынужденное комбинационное рассеяние света.

1. Введение

Длина волны источника сверхкоротких импульсов часто играет столь же важную роль, что и их энергия и длительность. Так, для биомедицинских применений (в первую очередь для различных видов нелинейной микроскопии) востребованы относительно недорогие и надежные источники субпикосекундных импульсов с высокой пиковой мощностью и длиной волны генерации вблизи 1.3 и 1.7 мкм [1]. Выбор этих длин волн обусловлен тем, что в указанных областях поглощение ОН-групп минимально, а значит, максимальна прозрачность биологических тканей. При этом область вблизи 1.3 мкм обладает дополнительным преимуществом т.к. позволяет работать с общепринятыми флюорофорами [2, 3]. Однако для этой области до недавнего времени [4, 5] полностью отсутствовали активные среды. Традиционно в качестве источников излучения для биомедицинских применений используются оптические параметрические генераторы, накачиваемые твердотельными титан-сапфировыми лазерами. Стоимость и сложность таких систем крайне высоки, что сдерживает их широкое внедрение на практике. Однако высокая пиковая мощность может также обеспечиваться и полностью волоконными лазерами при генерации сильночирпированных диссипативных солитонов (СЧДС) [6]. А генерация излучения на новых длинах волн возможна с использованием вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Недавно было продемонстрировано успешное объединение обоих подходов – генерация СЧДС на новых длинах волн посредством ВКР как внутри резонатора импульсного волоконного лазера [7], так и во внешнем кольцевом резонаторе с синхронной накачкой

[8]. Такие импульсы были названы рамановскими диссипативными солитонами (РДС) по методу их генерации [7, 9].

Для увеличения сдвига длины волны ВКР, который в работах [7–9] составил ~ 13 ТГц, можно использовать другие типы волокон, например фосфоросиликатные (с добавлением P_2O_5), где имеется дополнительный пик усиления, сдвинутый примерно на 39 ТГц [10]. При накачке в области 1.1 мкм такое волокно позволяет получить генерацию как раз на длине волны 1.3 мкм. Эта возможность в последние несколько лет активно исследуется различными группами [11–16], но немногим удалось продемонстрировать генерацию импульсов, сжимаемых до длительности менее 1 пс [14, 16].

В настоящей работе мы продолжаем исследования особенностей генерации РДС в области 1.3 мкм во внешнем резонаторе с использованием фосфоросиликатного волокна. Для увеличения долговременной стабильности, смещения длины волны генерации и обеспечения оперативной подстройки частоты следования импульсов был модифицирован лазер накачки. Увеличенная длина внешнего резонатора кратно превышала длину резонатора лазера накачки, что позволило получить и исследовать режимы так называемой гармонической генерации. При этом длина фосфоросиликатного волокна была уменьшена до 10 м, а для увеличения общей длины резонатора использовались стандартное одномодовое волокно и волокно со смещенной дисперсией.

2. Экспериментальная установка

Схема эксперимента представлена на рис.1. В качестве первого шага был существенно модифицирован лазер накачки с целью увеличения долговременной стабильности его работы и смещения результирующей несущей длины волны генерации ближе к отметке 1.3 мкм. В отличие от [6, 14], кроме стандартного волокна с диаметром моды 6.6 мкм в резонаторе лазера также использовался полосовой фильтр (ПФ) с центральной длиной волны 1093 нм и шириной 9 нм (по уровню –3 дБ). Это позволи-

Д.С.Харенко, В.Д.Ефремов, С.А.Бабин. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kharenko@ia.nsk.su

Поступила в редакцию 19 марта 2019 г., после доработки – 16 апреля 2019 г.

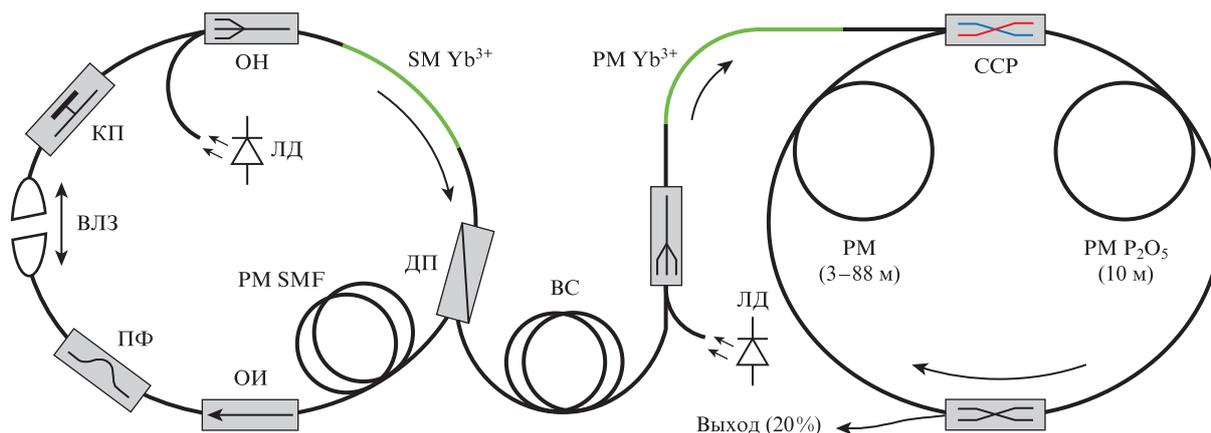


Рис.1. Схема эксперимента: резонатор лазера накачки (слева) и внешний резонатор для генерации РДС в фосфоросиликатном волокне (справа).

ло не только сместить длину волны генерации (рис.2), но и избавиться от температурной зависимости спектра пропускания, характерной для волоконного фильтра Лео. Волоконная варьируемая линия задержки (ВЛЗ), представляющая собой воздушный промежуток между двумя коллиматорами с волоконными выходами, установленными на моторизированной подвижке, была перенесена из внешнего резонатора в резонатор накачки, что позволило получить перестройку частоты генерируемых импульсов на 70 кГц. В остальном схема лазера накачки повторяет схему из работы [6]: резонатор состоит из волокон двух типов – с сохранением поляризации (PM) и без сохранения, направление распространения излучения задается чувствительным к поляризации оптическим изолятором (ОИ), контроллер поляризации (КП) служит для получения режима синхронизации мод. Для накачки используется один непрерывный многомодовый лазерный диод (ЛД), излучение которого через объединитель накачки (ОН) вводится в резонатор и далее в активное волокно с двойной оболочкой (SM Yb³⁺). Вывод излучения осуществляется через делитель поляризации (ДП). Режим синхронизации мод достигается за счет эффекта нелинейного вращения поляризации в секции резонатора, выполненной из волокна без сохранения поляризации при правильной настройке КП. Лазер генерирует chirпированные импульсы с частотой следования 15.45 МГц и длительностью 8 пс (см. вставку на рис.2).

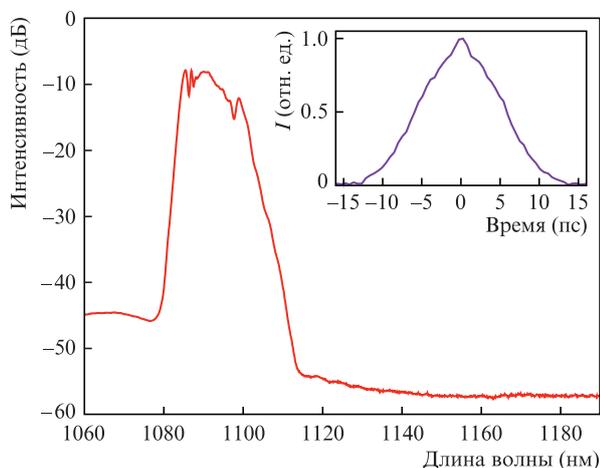


Рис.2. Оптический спектр и автокорреляционная функция (на вставке) импульса лазера накачки для генератора РДС.

Далее излучение проходит через волоконный стретчер (ВС) и усиливается в отрезке активного волокна с двойной оболочкой и сохранением поляризации (PM Yb³⁺) до уровня 220 мВт (средняя мощность), что соответствует импульсной энергии 15 нДж. Длительность растянутых импульсов составила ~ 50 пс.

Внешний резонатор для генерации РДС (см. рис.1) существенно упрощен и состоит только из четырех элементов: спектрально-селективного разветвителя (ССР) для ввода излучения накачки, отрезка фосфоросиликатного волокна с сохранением поляризации PM P₂O₅ (НЦВО РАН), ответвителя 20/80 для вывода излучения и отрезка PM-волокна для согласования длины резонатора. При этом вся схема является полностью волоконной, а для генерации РДС используются только волокна с сохранением поляризации. Частота следования РДС задается лазером накачки, а их генерация начинается лишь при строгом соответствии (расхождение менее 1 мм) оптических длин обоих резонаторов. Отдельно необходимо отметить возможность крайне простой реализации так называемой гармонической генерации во внешнем резонаторе, когда его длина кратно отличается от длины резонатора лазера накачки. Для этого подбиралась длина PM-волокна в последней секции после выходного ответвителя (см. рис.1). В отличие от работы [14], где внешний резонатор был в четыре раза длиннее и состоял преимущественно из фосфоросиликатного волокна, мы использовали укороченное до 10 м волокно, что позволило выровнять длины обоих резонаторов. Кроме того, исследовались резонаторы с соотношением длин 2:1 и 8:1. Для увеличения длины внешнего резонатора использовалось волокно со смещенной дисперсией (DSF) Fujikura DS15-PS с диаметром моды 8 мкм, а также стандартное волокно с сохранением поляризации Fujikura SM98-PS (SM) с диаметром моды 6.6 мкм.

3. Результаты и их обсуждение

Поскольку оптимальные параметры длительности импульса накачки и коэффициента вывода излучения из внешнего резонатора были получены ранее в [14], в настоящей работе усилия были сконцентрированы на смещении спектра генерации ближе к 1.3 мкм и исследовании различных режимов гармонической генерации РДС во внешнем резонаторе. Использование полосового фильтра позволило получить стабильную генерацию диссипативных солитонов с центральной длиной волны 1090 нм, что

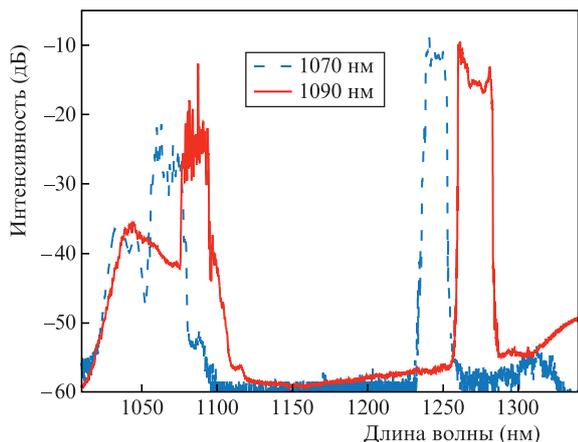


Рис.3. Изменение несущей длины волны генерации РДС.

в результате привело к смещению длины волны генерируемого РДС с 1245 до 1270 нм (рис.3). С фильтром Лию такого результата добиться было невозможно ввиду его периодической природы – при смещении максимума пропускания в длинноволновую сторону генерация начиналась на максимуме соседнего периода. Из рис.3 видно, что режим генерации не изменился – оптический спектр имеет резкие края, характерные для сильночирпированных диссипативных солитонов, а шумовой пик в районе 1340 нм говорит о достижении порога генерации для следующей германосиликатной компоненты ВКР. Именно эти параметры контролировались во всех дальнейших экспериментах – характерный вид спектра и появление шумового пика ВКР, приводившее в конечном итоге к переходу в режим генерации шумоподобных импульсов [17].

На рис.4 показана эволюция оптического спектра РДС при увеличении мощности накачки для конфигурации с соотношением длин резонаторов 2 : 1. Использовалось волокно DSF. Ширина спектра монотонно увеличивалась с 14 нм (штриховая кривая) до 23 нм (сплошная кривая). Оценочная длительность спектрально-ограниченного импульса в последнем случае составила 200 фс. Дальнейшее увеличение мощности накачки привело к существенному росту паразитной ВКР-генерации на германосиликатном пике (1340 нм) и разрушению режима диссипативного солитона – основной спектр на 1270 нм качественно изменил форму и слился с пиком на 1340 нм (пунктирная кривая).

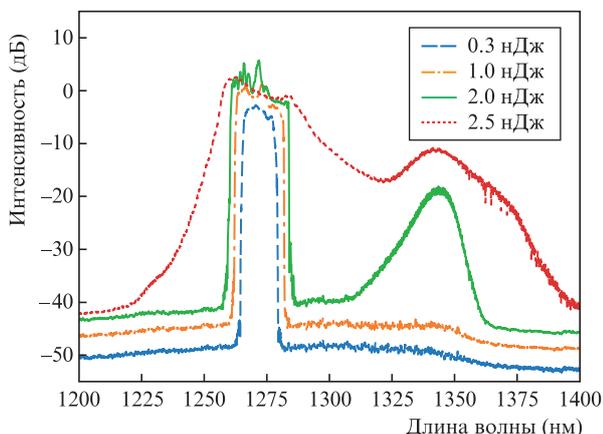


Рис.4. Эволюция оптического спектра с увеличением энергии генерируемого РДС (соотношение длин резонаторов 2 : 1, волокно DSF).

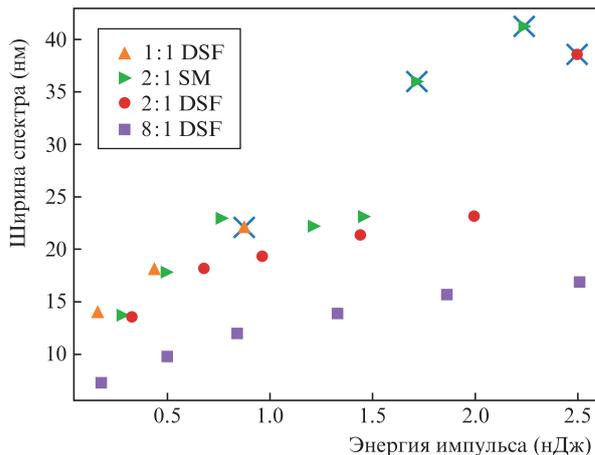


Рис.5. Зависимость ширины оптического спектра (по уровню -10 дБ) генерируемого импульса от его энергии.

Кроме соотношения длин 2:1, исследовались соотношения 1:1 и 8:1, а также 2:1 с использованием волокна SM с сохранением поляризации, для которого точка нулевой дисперсии расположена вблизи 1.27 мкм [18]. Измерялись максимально достижимая энергия и ширина оптического спектра, которая напрямую определяет минимально возможную длительность сжатого импульса. Результаты измерений для всех конфигураций приведены на рис.5. Здесь крестами отмечены точки перехода в режим генерации шумоподобных импульсов. Так, для соотношения 1 : 1 такой переход наблюдается уже при энергии в 0.8 нДж. Увеличение длины резонатора в два раза за счет стандартного волокна привело как к увеличению ширины оптического спектра, так и к увеличению энергии до 1.7 нДж. Уширение можно объяснить тем, что фактически увеличилась величина нелинейного набега фазы при полном обходе резонатора, в то время как дисперсионный набег сильно не изменился.

При замене стандартного волокна SM на волокно DSF наблюдается еще большее увеличение порога разрушения солитонного режима генерации и небольшое уменьшение ширины оптического спектра. Здесь скорее играет роль увеличившийся диаметр моды, чем добавившийся дисперсионный набег. Это подтверждается результатами измерения длительности РДС на выходе (рис.6). При этом ширина автокорреляционной функции (АКФ) для обоих режимов практически совпадает и составляет 30 пс. При дальнейшем увеличении длины волокна DSF до соотношения длин резонаторов 8:1 происходит одновременное увеличение как нелинейного, так и дисперсионного набега фаз, что в контексте генерации СЧДС должно приводить к пропорциональному увеличению энергии импульсов за счет увеличения их длительности [19]. На практике удалось увеличить энергию до 2.5 нДж без перехода в режим генерации шумоподобных импульсов (квадраты на рис.5) при ширине оптического спектра 17 нм. При этом ширина АКФ выросла до 60 пс (см. рис.6).

Следует отметить, что максимальная ширина спектра РДС во всех конфигурациях не превышала 25 нм. Данный предел может определяться как длиной используемого фосфоросиликатного волокна (10 м), так и длительностью и шириной спектра импульсов накачки. Существенную роль также может играть ширина спектра усиления для фосфоросиликатного пика. Получить ответы на эти вопросы должен помочь численный расчет, отпра-

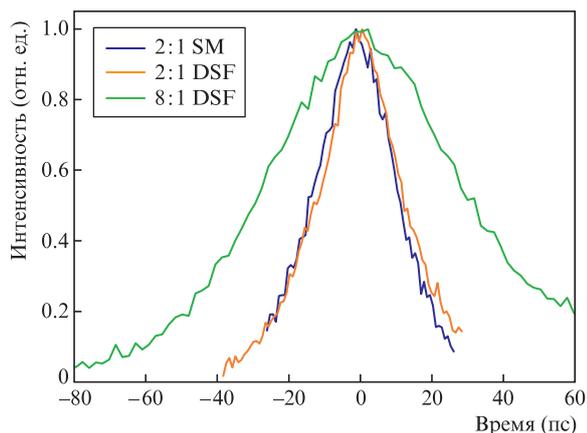


Рис.6. Автокорреляционная функция генерируемого импульса при различных конфигурациях резонатора. Цветной вариант рисунка помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

ной точкой которого могут быть результаты настоящей работы.

4. Заключение

В работе изучена гармоническая генерация рамановских диссипативных солитонов во внешнем резонаторе с использованием фосфоросиликатного волокна. Центральная длина волны составила 1270 нм с максимальной энергией до 2.5 нДж, частотой следования 15.45 МГц и шириной спектра до 23 нм. При этом спектр имеет резкие края, характерные для диссипативного солитона, как и в работе [14]. Оценочная длительность спектрально-ограниченного импульса составила ~ 200 фс. Установлено, что за счет варьирования полной дисперсии и длины внешнего резонатора можно повысить порог разрушения РДС. Усиленное излучение данного источника может быть интересным для применений в биологии, в первую очередь для многофотонной микроскопии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00409.

- Xu C., Wise F.W. *Nat. Photon.*, **7**, 875 (2013).
- Kobat D., Durst M.E., Nishimura N., Wong A.W., Schaffer C.B., Xu C. *Opt. Express*, **17**, 13354 (2009).
- Hoover E.E., Squier J.A. *Nat. Photon.*, **7**, 93 (2013).
- Gumenyuk R., Puustinen J., Shubin A.V., Bufetov I.A., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *Opt. Lett.*, **38**, 4005 (2013).
- Хегаи А.М., Афанасьев Ф.В., Рюмкин К.Е., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Мясников Д.В., Мелькумов М.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **46**, 1077 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1077 (2016)].
- Kharenko D.S., Gonta V.A., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 025107 (2016).
- Babin S.A., Podivilov E.V., Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kalashnikov V.L., Apolonski A.A. *Nat. Commun.*, **5**, 4653 (2014).
- Churin D., Olson J., Norwood R.A., Peyghambarian N., Kieu K. *Opt. Lett.*, **40**, 2529 (2015).
- Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Apolonski A., Babin S.A. *Opt. Express*, **23**, 1857 (2015).
- Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 1022 (2000).
- Kobtsev S., Kukarin S., Kokhanovskiy A. *Opt. Express*, **23**, 18548 (2015).
- Kharenko D.S., Efremov V.D., Babin S.A. *Proc. CLEO/Europe-EQEC* (Munich: IEEE, 2017, p. CF-P.15).
- Elahi P., Makey G., Turnali A., Tokel O., Ilday F.O. *Proc. CLEO/Europe-EQEC* (Munich: IEEE, 2017, p. CJ-2-1).
- Kharenko D.S., Efremov V.D., Evmenova E.A., Babin S.A. *Opt. Express*, **26**, 15084 (2018).
- Kobtsev S., Ivanenko A., Kokhanovskiy A., Gervaziev M. *Opt. Express*, **26**, 29867 (2018).
- Batjargal O., Ou Y.-H., Keikens K., Barton J.K., Kieu K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **30**, 1846 (2018).
- Smirnov S., Kobtsev S., Kukarin S., Ivanenko A.V. *Opt. Express*, **20**, 27447 (2012).
- Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (Oxford: Acad. Press, 2013).
- Kharenko D.S., Shtyrina O.V., Yarutkina I.A., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Babin S.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 2314 (2011).