

Тема работы. **Численное моделирование пико- и фемтосекундных волоконных лазеров для биомедицинской диагностики.**

- Состав коллектива. М.П. Федорук, С.А. Бабин (ИАиЭ СО РАН), Е.В. Подвиллов (ИАиЭ СО РАН), Д.С. Харенко (ИАиЭ СО РАН), А.Е. Беднякова, И.С. Жданов, А.П. Яровиков.
- Научное содержание работы:

Спектральная область в окрестности 1.3 мкм является перспективным окном прозрачности для биомедицинских применений, в первую очередь для нелинейной микроскопии [1]. Данный спектральный регион представляет большой интерес, поскольку в нём обеспечивается более глубокое проникновение лазерного излучения в биологические ткани без их повреждения. Для нелинейной микроскопии требуются субпикосекундные источники с высокой пиковой мощностью. Стоит отметить, что в данном спектральном окне до недавнего времени отсутствовали подходящие импульсные источники [1]. Целью нашей работы является исследование и оптимизация нового типа волоконных лазеров, генерирующих импульсное излучение в области 1.3 мкм. Создание компактных, надежных и недорогих лазерных источников для нелинейной микроскопии в полностью волоконном исполнении является актуальной задачей, решение которой требует изучения фундаментальных проблем нелинейного преобразования частоты излучения волоконных лазеров, в частности, вынужденного комбинационного (рамановского) рассеяния (ВКР) в импульсном режиме, в том числе в режиме диссипативных солитонов (ДС). Необходимо также оптимизировать процесс ВКР в волоконных световодах для получения необходимых лазерных характеристик для конкретного диагностического метода, в частности, многофотонной и CARS микроскопии. Для этого необходимо исследовать влияние различных параметров (свойств световодов, в первую очередь, нелинейности и дисперсии, характеристик импульсной накачки и т.д.) на временную, мощностную и спектральную динамику генерации и возможности преобразования спектра генерации в длинноволновую область, особенно вблизи биомедицинских окон прозрачности. Для решения обозначенных проблем и достижения поставленной цели применены эффективные методы моделирования сложной нелинейной динамики сигнала в волоконных лазерах.

Перспективным методом получения мощных фемтосекундных оптических импульсов на новых длинах волн является продемонстрированная коллективом исполнителей генерация рамановских диссипативных солитонов (РДС) в полностью волоконном лазере [2,3]. В работе [2] центральная длина волны генерируемого РДС составляла всего 1060 нм, что соответствовало стоксову сдвигу в кварцевом световоде (~13 ТГц). Предложенная схема лазера является довольно сложной, поскольку генерация ДС, являющегося источником накачки, и РДС происходит в одном резонаторе и характеристики импульсов оказываются связанными друг с другом. Другим способом генерации РДС является использование внешнего резонатора и синхронной накачки. В данном подходе требуется только точное соответствие между частотой повторения импульсов накачки и длиной внешнего резонатора. Дисперсия резонатора и энергия импульсов накачки могут изменяться независимо, что предоставляет дополнительную свободу для генерации мощных фемтосекундных импульсов с необходимыми свойствами на длинах волн, недоступных в известных активных средах. В отчётном году нами выполнено исследование метода генерации РДС с большим сдвигом частоты (в области 1.3 мкм) во внешнем резонаторе с использованием нового типа фосфоросиликатного волокна с сохранением поляризации. Использование фосфоросиликатного ПМ-световода с большим ВКР-сдвигом частоты (39 ТГц) позволяет генерировать импульсы РДС на длине волны 1.3 мкм, используя лишь один каскад ВКР-преобразования и накачку в области 1 мкм.

В 2019 году коллективом исполнителей было выполнено теоретическое исследование нового способа генерации рамановских диссипативных солитонов (РДС) в области 1.3 мкм во внешнем резонаторе волоконного лазера с использованием нового типа фосфоросиликатного волокна. Было показано существование фундаментального ограничения на энергию РДС, которое заключается во влиянии эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Энергия РДС не превышает 2 нДж из-за достижения порога генерации ВКР и появления шумового рамановского импульса. Целью 2020 года был поиск способов преодоления данного ограничения на энергию, а также сравнение результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов.

Численная модель лазерной системы включает участок волоконного световода, образующего внешний резонатора, и дискретные элементы. Сигнал распространяется в световоде, последовательно проходя через дискретные элементы резонатора. Моделирование последовательных проходов сигнала вдоль кольцевого резонатора выполняется до установления решения или, другими словами, достижения устойчивого режима лазерной генерации. Критерием установления решения является малость изменения энергии сигнала на двух последовательных обходах резонатора. Численный спектр ВКР-усиления сигнала в фосфоросиликатном световоде, изображённый на рисунке 1а, хорошо согласуется с экспериментально измеренным спектром усиления.

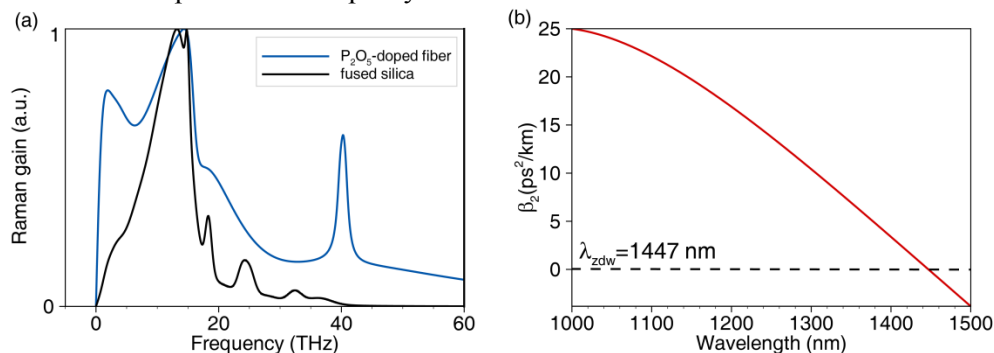


Рисунок 1 – Спектр ВКР-усиления в стандартном и фосфоросиликатном световодах (а).
Зависимость дисперсии световода от длины волны (б).

На первом этапе было выполнено сравнение результатов моделирования с результатами натурального эксперимента для резонатора длиной 30 метров. Численный и экспериментальный спектры выходного излучения приведены на рисунке 2. Длины волн генерации рамановских диссипативных солитонов, а также их спектральная форма и энергия совпадают в расчёте и эксперименте. Также результаты моделирования воспроизводят верхний предел для энергии РДС, равный 2 нДж. Дальнейшее увеличение энергии невозможно из-за генерации шумового импульса ВКР в области 1310-1350 нм.

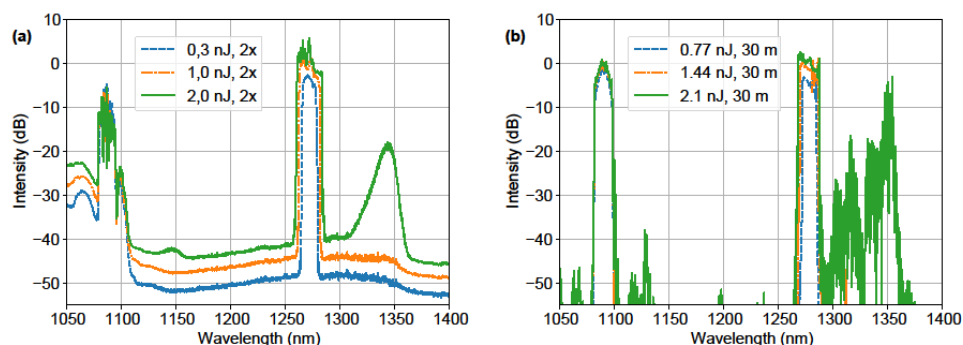


Рисунок 2 – Спектр сигнала накачки и РДС на выходе из резонатора в эксперименте (а) и расчёте (б).

Помимо порога ВКР-генерации, важным вопросом является длина взаимодействия импульса накачки и РДС. Из рисунка 3а, изображающего временную динамику излучения в резонаторе, видно, что данная длина не превосходит 15 метров. Таким образом, длина фосфоросиликатного световода в экспериментальной схеме лазера, равная 10 метрам, близка к оптимальной.

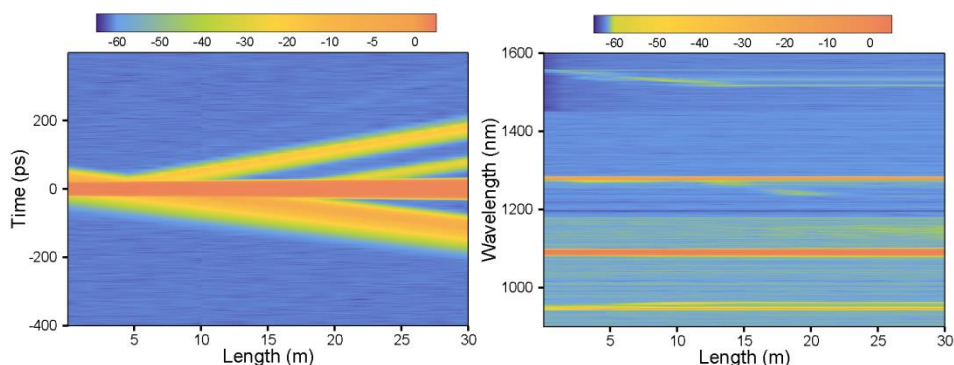


Рисунок 3 – Внутррезонаторная динамика временной (а) и спектральной (б) формы импульса в резонаторе длиной 30 метров.

Главной целью моделирования являлся поиск способов увеличения энергии и спектральной ширины РДС. Для этого было выполнено моделирование генерации РДС во внешних резонаторах различной длины и построены области стабильной генерации в пространстве параметров накачки – энергии и ширины спектра. Оказалось, что уменьшение длины резонатора до 5 метров приводит к росту порога генерации шумового ВКР и увеличению энергии РДС свыше 6 нДж. Ширина спектра РДС при этом превышает 50 нм, что соответствует длительности 100 фс после сжатия. Данная длительность сравнима с наименьшей длительностью импульса в области 1.3 мкм, полученной к настоящему времени [4].

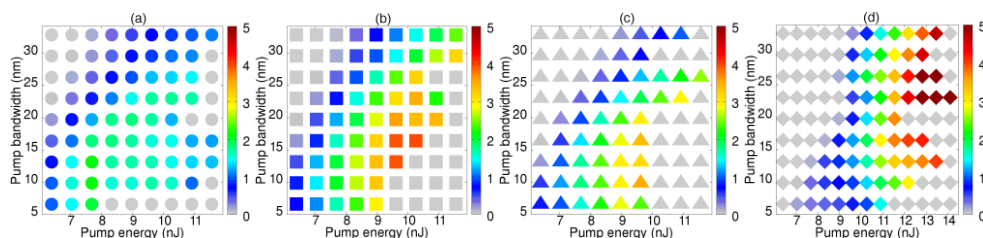


Рисунок 4 – Области устойчивой генерации РДС в резонаторе длиной 30 метров (а), 15 метров (б), 10 метров (с) и 5 метров (д). Цветом показана энергия РДС.

Для более детального анализа ключевых параметров импульса – энергии и ширины спектра, данные параметры были изображены на одном графике для различных длин резонатора (рисунок 5). Как можно видеть, спектральная ширина импульса однозначно определяется его энергией. А именно, невозможно получить солитоны с широким спектром и малой энергией и наоборот. Данное поведение соответствует результатам эксперимента, приведённым в работе [5]. Также было показано, что увеличение дисперсии резонатора при фиксированной длине позволяет увеличить энергию импульса. Таким образом, для получения ультракоротких импульсов с высокой энергией управление дисперсией резонатора является более перспективным методом, чем увеличение длины резонатора, ограниченное эффектом вынужденного комбинационного рассеяния.

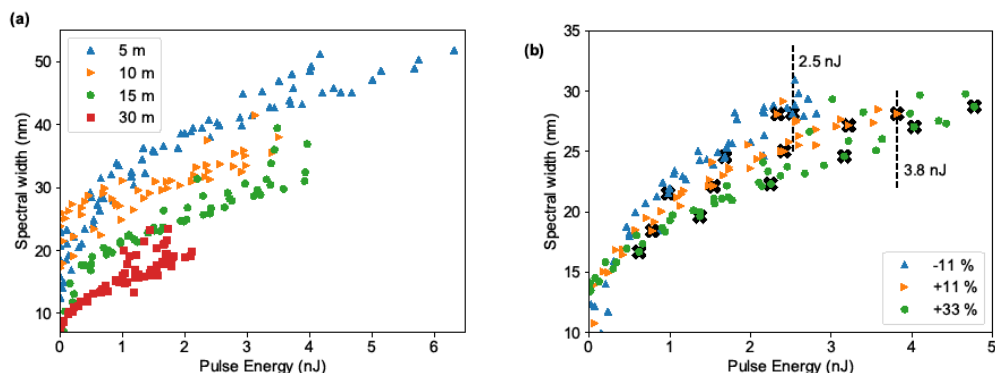


Рисунок 5 – Зависимость ширины спектра РДС от энергии для всех длин резонатора (а) и резонатора длиной 15 метров (б) с различными дисперсионными кривыми.

Основные результаты работы в 2020 году:

1. С помощью математического моделирования выполнено исследование генерации рамановских диссипативных солитонов в фосфоросиликатном световоде. Показано, что численные результаты качественно согласуются с результатами натурального эксперимента. Численная модель воспроизводит все основные характеристики сигнала, наблюдаемые в эксперименте, а именно длину волны, форму спектра и порог ВКР-генерации.
2. Показано, что уменьшение длины резонатора до 5 метров позволяет получить генерацию РДС с энергией свыше 6 нДж и шириной спектра более 50 нм, что соответствует длительности 100 фс после сжатия. Изменение дисперсии резонатора также позволяет управлять энергией РДС. Важно отметить, что продемонстрированные области стабильной генерации РДС являются ограниченными, что свидетельствует о том, что в работе найдена максимальная достижимая энергия сигнала в лазере данного типа. Достигнутых характеристик излучения достаточно для использования рассмотренного волоконного лазера в биомедицинских применениях.

- [1]. C. Xu and F. W. Wise, Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy, *Nature Photonics* 7, 875 - 882 (2013).
- [2]. S. A. Babin, E. V. Podivilov, D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, M. P. Fedoruk, V. L. Kalashnikov, A. Apolonski. Multicolour nonlinearly bound chirped dissipative solitons. *Nature Communications* 5, 4653 (2014).
- [3]. E. V. Podivilov, D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, M. P. Fedoruk, S. A. Babin. Spectral comb of highly chirped pulses generated via cascaded FWM of two frequency-shifted dissipative solitons. *Sci. Rep.* 7, 2905 (2017).
- [4] L. Rishøj, B. Tai, P. Kristensen, and S. Ramachandran, “Soliton self-mode conversion: revisiting Raman scattering of ultrashort pulses,” *Optica* 6(3), 304 (2019).
- [5] D. S. Kharenko, V. D. Efremov, and S. A. Babin, “Study on harmonic generation regimes of Raman dissipative

- Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило выполнить исследование многомерного пространства параметров лазерного резонатора, целью которого являлся поиск способов увеличения энергии РДС и уменьшения длительности импульса после сжатия, а также более детальное исследование факторов, ограничивающих энергию

РДС. Основные характеристики импульсов накачки – длительность, ширина спектра и энергия, являлись оптимизационными параметрами.

- Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).

A. E. Bednyakova, D. S. Kharenko, I. Zhdanov, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, and S. A. Babin, "Raman dissipative solitons generator near 1.3 μm : limiting factors and further perspectives," *Opt. Express* 28, 22179-22185 (2020), IF 3.669

D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, I. Zhdanov, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, and S. A. Babin, "Investigation of Raman Dissipative Solitons Generation in an External Phosphosilicate-Fiber Cavity," in *Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper JW3A.110.

D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, I. Zhdanov, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, and S. A. Babin, "Investigation of Raman Dissipative Solitons Generation in an External Phosphosilicate-Fiber Cavity," in *Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper JW3A.110. (индекс. В WoS, Scopus)

- Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Впечатления положительные, постоянно использую вычислительный кластер НГУ в своей работе.