

Проект РНФ № 14-22-00118

«Генерация и нелинейное преобразование излучения в схеме волоконного ВКР-лазера с прямой диодной накачкой большой мощности» (2014-2016 гг.)

Аннотация проекта

Известно, что полностью волоконная схема лазера не требует юстировки и обеспечивает высокую эффективность преобразования некогерентного излучения мощных многомодовых диодов в стабильный одномодовый лазерный пучок высокого качества, что особенно важно для практических применений. Однако даже наиболее эффективные на сегодняшний день иттербиевые волоконные лазеры имеют ряд ограничений: относительно узкий диапазон рабочих длин волн (1-1,15 мкм), фотопотемнение активных световодов и соответственно снижение эффективности со временем и др.

Развитие в последнее время технологий полупроводниковых источников с возможностью объединения их излучения в одном волоконном световоде открыли новые возможности увеличения мощности и яркости источников накачки, позволяющие создавать новые полностью волоконные лазерные конфигурации, получать и исследовать в них новые режимы генерации и нелинейного преобразования. В частности, одним из актуальных направлений является исследование возможностей реализации эффективных волоконных схем генерации и преобразования лазерного излучения без использования легированных редкоземельными элементами (Yb, Er, Tm и др.) активных волокон - с усилением света на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в пассивных световодах с прямой диодной накачкой.

В проекте предлагается исследовать процессы нелинейного взаимодействия многомодового излучения со структурированными многомодовыми волоконными световодами и создать на этой основе ВКР-лазеры с прямой накачкой мощными лазерными диодами, обеспечивающими эффективную генерацию лазерного излучения высокого качества (как непрерывного, так и импульсного) в полностью волоконной схеме без легирования редкоземельными элементами, получить новые режимы генерации и разработать принципы нелинейного преобразования излучения в новые спектральные диапазоны.

Основные результаты 1 этапа (2014 г.)

В первый год выполнения проекта достигнуты следующие результаты, в соответствии с планом работ. Выяснены основные механизмы эффекта «чистки» пучка в градиентном световоде, оптимизирована схема ВКР-лазера на основе градиентного световода с диаметром сердцевины 62,5 мкм с накачкой мощными лазерными диодами, генерирующего в области 980 нм. Определена оптимальная длина ВКР-лазера в зависимости от мощности диодной накачки для световодов с диаметром сердцевины 62,5 и 85 мкм.

Продемонстрирован предельный уровень эффективности непрерывной генерации ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью - относительная квантовая эффективность, определяемая как отношение числа

фотонов генерируемой стоксовой волны к числа фотонов накачки (в отсутствие генерации) на выходе световода как для первой, так и для второй стоксовой компоненты достигает 100%. Показано, что спектр генерации ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью имеет вид гиперболического секанса, как и обычный ВКР-лазер.

Разработаны и экспериментально реализованы принципиально новые схемы модуляции добротности и синхронизации мод для волоконного ВКР-лазера и получены новые режимы импульсной генерации длительностью от микросекунд до десятков фемтосекунд. Получены и изучены диссипативные солитоны нового типа – рамановские диссипативные солитоны, которые когерентно складываются с основными, тем самым продемонстрирована принципиальная возможность спектрального мультиплексирования фемтосекундных импульсов.

Полученные за 1 год результаты представлены в 4 устных докладах (из них 1 приглашенный) на ведущих международных конференциях в области оптики и лазерной физики, и приняты к печати/ опубликованы в 11 статьях, из них 9 - в высокорейтинговых журналах из баз Web of Science и Scopus.

Публикации из отчета 2014 года, в т.ч. вышедшие в 2015 году

1. S. A. Babin, I. D. Vatnik, A. Yu. Laptev, M. M. Bubnov, E. M. Dianov. High-efficiency cascaded Raman fiber laser with random distributed feedback. *Opt. Express* **22** (21) 24929-24934 (2014).
2. Z. Wang, H. Wu, M. Fan, Y. Rao, I. Vatnik, D. Churkin, E. Podivilov, S. Babin, H. Zhang, P. Zhou, H. Xiao, and X. Wang, Random Fiber Laser: Simpler and Brighter, *Optics and Photonics News*, N12: Special Issue "Optics in 2014", p.30 (2014).
3. А. В. Достовалов, А. А. Вольф, С. А. Бабин. Поточечная запись ВБР первого и второго порядка через полиимидное покрытие фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 нм. *Прикладная фотоника*, т.1, № 2, 48-61 (2014).
4. S. A. Babin, E. I. Dontsova, I. D. Vatnik, S. I. Kablukov. Second harmonic generation of a random fiber laser with Raman gain. *Proceedings SPIE*, v. 9347, paper 9347-34, p.1-9 (2015).
5. А. Н. Малов, А.М. Оришич, А. В. Достовалов, А.Г. Кузнецов, С.А. Бабин. Сравнительные характеристики применения импульсно-периодического СО₂-, волоконного наносекундного и фемтосекундного лазеров для изготовления микроотверстий. *Прикладная фотоника*, т.2, №2, с.166-182 (2015)
6. А.В. Достовалов, А.А. Вольф, С.А. Бабин. Запись длиннопериодных волоконных решеток ограниченным щелью пучком фемтосекундного излучения ($\lambda = 1026$ нм). *Квант. электроника*, **45** (3), 235–239 (2015).
7. A. G. Kuznetsov, E. V. Podivilov, S. A. Babin. Actively Q-switched Raman fiber laser. *Laser Phys. Lett.* **12** (3) 035102 (2015) [5pp].
8. A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, S. A. Babin. Simultaneous formation of ablative and thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation. *Laser Phys. Lett.* **12** (3) 036101 (2015).

9. D. V. Churkin, I. V. Kolokolov, E. V. Podivilov, I. D. Vatnik, M. A. Nikulin, S. S. Vergeles, I. S. Terekhov, V. V. Lebedev, G. Falkovich, S. A. Babin and S. K. Turitsyn. Wave kinetics of random fibre lasers. *Nature Comm.* **6**, 6214 (2015).
10. D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, A. Apolonski, and S. A. Babin. Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser. *Opt. Express* **23** (2) 1857-1862 (2015).
11. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, and S. A. Babin. High-efficiency CW all-fiber parametric oscillator tunable in 0.92-1 μm range. *Opt. Express* **23** (2) 833-838 (2015).
12. S. A. Babin, E. V. Podivilov, D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, M. P. Fedoruk, O. V. Shtyrina, V. L. Kalashnikov, A. Apolonski. SRS-driven evolution of dissipative solitons in fiber lasers. *Chapter in Book "Nonlinear Optical Cavity Dynamics"*, ed. by Philippe Grelu, Wiley VCH Verlag GmbH 458 pages, 2015 (ISBN: 978-3-527-41332-4).

Основные результаты 2 этапа (2014 г.)

Во второй год выполнения проекта в соответствии с планом работ получены следующие основные результаты. В схеме ВКР-лазера на основе градиентного световода диаметром сердцевинны 62,5 мкм с прямой диодной накачкой мощностью до 65 Вт на 915 нм продемонстрирована непрерывная генерация в новом спектральном диапазоне (954 нм) с дифференциальной эффективностью более 40% и качеством пучка, близким к гауссовому. С помощью технологии фемтосекундной записи сформированы структуры показателя преломления в различных световодах и рассмотрены возможности их использования для управления спектральными характеристиками лазера. Демонстрирована возможность получения одночастотной генерации в волоконном лазере с распределённой обратной связью на основе брэгговской решётки со случайным профилем показателя преломления. Разработан и изготовлен полностью волоконный многолучевой интерферометр, способный осуществлять узкополосную фильтрацию лазерного излучения в отражении, с характеристиками аналогичными интерферометру Фабри-Перо в пропускании. Показано, что применение интерферометра в качестве зеркала волоконного лазера позволяет получить одночастотную генерацию с возможностью быстрой и непрерывной перестройки частоты в широком диапазоне.

Реализованы эффективные схемы ВКР-лазера с использованием световодов с сохранением поляризации (СП) типа Панда, как в непрерывном, так и импульсном режимах генерации. В непрерывном режиме в схеме ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью в СП световоде получена рекордная абсолютная эффективность ВКР-преобразования 87% (квантовая эффективность - 92%) с генерацией линейно-поляризованного стоксова излучения (1,11 мкм) мощностью ~10 Вт. В СП световоде большей длины (1000 м) реализована каскадная ВКР-генерация линейно-поляризованного излучения с рекордной квантовой эффективностью: 83% для 2го порядка (1,17 мкм) и 77% для 3го порядка (1,23 мкм). При этом спектр генерации уширяется с увеличением стоксова порядка, но практически не зависит от уровня выходной мощности: ширина линии равна ~1 нм, ~2 нм и ~3 нм для 1, 2 и 3го порядков соответственно. Разработана теория, адекватно описывающая каскадную ВКР-генерацию в СП

световоде. Впервые получена каскадная ВКР-генерация фемтосекундных импульсов в кольцевом резонаторе на основе СП световода длиной 40 м. Показано, что в этом случае реализуется режим рамановских диссипативных солитонов с каскадной синхронной накачкой: основной солитон (1020 нм) является импульсом накачки для 1го стоксова порядка (1065 нм), который в свою очередь является импульсом накачки для 2го стоксова порядка (1115 нм). В результате, солитоны разных порядков имеют близкие характеристики: энергия 5-10 нДж, длительность ~40 пс, сжимаемая внешней дифракционной решёткой до <300 фс. При этом они когерентны между собой и при сложении дают интерференционную структуру с периодом <38 фс.

Исследованы возможности нелинейного преобразования частоты излучения в различных схемах ВКР-лазера. В частности, четырехволновое смешение обычного (1015 нм) и рамановского (1055 нм) диссипативных солитонов длительностью ~40 пс, полученных в процессе синхронной ВКР-генерации, во внешнем СП фотонно-кристаллического световоде (ФКС) с использованием перестраиваемой линии задержки приводит к генерации стоксова импульса с длиной волны, перестраиваемой в диапазоне от 1084 до 1102 нм. Длительность сжатого во внешнем компрессоре параметрического импульса составила ~2 пс, а энергия достигала 1 нДж. Исследована возможность генерации второй гармоники (ГВГ) излучения непрерывного ВКР-лазера на основе регулярной (в линейном резонаторе) и случайной распределенной обратной связи (СРОС) с зеркалом Саньяка или ВБР на конце световода. Сравнение показало, что максимальная мощность ГВГ достигается в схеме СРОС-лазера с ВБР благодаря максимальной спектральной плотности мощности в этом случае. Мощность генерируемого красного излучения (654 нм) превышает 100 мВт. Благодаря низкой когерентности такой волоконный источник излучения интересен для биомедицинских диагностических применений.

Полученные за 2 год результаты представлены в 14 устных докладах (из них 4 приглашенных) на ведущих международных конференциях в области оптики и лазерной физики, и опубликованы в 16 статьях, из них 11 - в высокорейтинговых журналах из баз Web of Science и Scopus.

Публикации 2015 года

1. Е. А. Злобина, Е. И. Донцова, С. И. Каблуков, С. А. Бабин. Моделирование эффекта чистки пучка и оптимизация параметров ВКР-лазера на основе градиентного световода с прямой диодной накачкой. *Прикладная фотоника*, **2** (1), 31-43 (2015).
2. I. A. Lobach, S. I. Kablukov, E. V. Podivilov, A. A. Fotiadi, S. A. Babin. Fourier synthesis with single-mode pulses from a multimode laser. *Opt. Lett.* **40** (15) 3671-3674 (2015).
3. I. A. Lobach, S. I. Kablukov, M. A. Melkumov, V. F. Khopin, S. A. Babin, and E. M. Dianov. Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping. *Opt. Exp.* **23** (19), 24833-24842 (2015).

4. O. A. Gorbunov, S. Sugavanam, D. V. Churkin. Intensity dynamics and statistical properties of random distributed feedback fiber laser. *Opt. Lett.* **40** (8), 1783-1786 (2015).
5. D. V. Churkin, S. Sugavanam, I. D. Vatnik, Z. Wang, E. V. Podivilov, S. A. Babin, Y. J. Rao, S. K. Turitsyn. Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers. *Advances in Optics and Photonics* **7** (3), 516-569 (2015).
6. E. A. Zlobina, D. S. Kharenko, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Four wave mixing of conventional and Raman dissipative solitons from single fiber laser. *Opt. Exp.* **23** (13), 16589-16594 (2015).
7. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Linearly polarized random fiber laser with ultimate efficiency. *Opt. Lett.* **40**, (17) 4074-4077 (2015).
8. A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, I. A. Lobach, S. A. Babin. Femtosecond laser inscription of long-period fiber gratings in a polarization-maintaining fiber. *J. Lightwave Techn.* **33** (24), 5178-5183 (2015).
9. A. V. Dostovalov, A. A. Wolf, V. K. Mezentsev, A. G. Okhrimchuk, S. A. Babin. Quantitative characterization of energy absorption in femtosecond laser micro-modification of fused silica. *Opt. Exp.* **23** (25) 32542-32547 (2015).
10. Лобач И.А., Каблуков С.И., Мелькумов М.А., Хопин В.Ф., Бабин С.А., Дианов Е.М. Одночастотный висмутовый лазер с самосканированием частоты. *Фотон-экспресс*, №6(126), с.87-88 (2015).
11. Харенко Д.С., Беднякова А.Е., Подивилов Е.В., Федорук М.П., Аполонский А.А., Бабин С.А. Генерация мощных фемтосекундных ВКР-импульсов в волоконном лазере. *Фотон-экспресс*, №6(126), с.71-72 (2015).
12. Злобина Е.А, Каблуков С.И, Бабин С.А. Эффективный линейно-поляризованный волоконный ВКР-лазер со случайной обратной связью. *Фотон-экспресс*, №6(126), 74-75 (2015).
13. Злобина Е.А, Харенко Д.С., Каблуков С.И, Бабин С.А. Четырехволновое смешение диссипативных солитонов на основной и стоксовой частотах, генерируемых в одном волоконном лазере. *Фотон-экспресс*, №6(126), 234-235 (2015).
14. В. С. Терентьев, В. А. Симонов. Численное моделирование волоконного отражательного фильтра на основе металло-диэлектрической дифракционной структуры с повышенной лучевой стойкостью. *Квант. электр.* (в печати).
15. E. I. Dontsova, S. I. Kablukov, I. D. Vatnik, S. A. Babin. Frequency doubling of Raman fiber lasers with random distributed feedback. *Opt. Lett.* (in print).
16. D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, A. Apolonski, S. A. Babin. Cascaded generation of coherent Raman dissipative solitons. *Optics Letters* (published on-line: www.osapublishing.org/ol/upcoming.cfm).