

Основные результаты работ по гранту РФФИ 14-22-00118 за 2014-2016 гг.

Целью проекта является исследование процессов нелинейного взаимодействия многомодового излучения со структурированными многомодовыми волоконными световодами и создание на этой основе ВКР-лазеров 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, получение новых режимов генерации и разработка принципов нелинейного преобразования излучения в новые спектральные диапазоны.

В первый год выполнения проекта были достигнуты следующие результаты. 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 мощным лазерным диодом, генерирующим 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 числу 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 синхронно генерируются при распространении в резонаторе основного диссипативного солитона - тем самым продемонстрирована принципиальная возможность генерации фемтосекундных импульсов на новых длинах волн.

Во второй год выполнения проекта в соответствии с планом работ получены следующие основные результаты. В схеме ВКР-лазера на основе градиентного световода диаметром сердцевины 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 высоким качеством пучка. Разработана технология фемтосекундной записи и сформированы структуры показателя преломления в различных световодах, рассмотрены возможности их использования для управления спектральными характеристиками лазера. Продемонстрирована 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 продемонстрирована эффективная каскадная ВКР-генерация 2 и 3 порядка линейно-поляризованного излучения. 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 1084-1102 нм. 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.

В 3й год выполнения проекта была продолжена работа по оптимизации характеристик ВКР-лазера с прямой диодной накачкой и различных схем нелинейного преобразования.

В частности, впервые реализован полностью волоконный вариант ВКР-лазера на основе градиентного световода с прямой диодной накачкой мощными многомодовыми лазерными диодами (915 нм) с дифференциальной эффективностью преобразования в стоксову волну (954 нм) более 60%. Впервые получен режим генерации близкий к одномодовому при уровне мощности 10 Вт с дифракционной расходимостью (параметр качества $M^2 \sim 1,2$) и узким спектром (ширина <0,5 нм), что более чем на порядок улучшает параметры пучка накачки (~20 и ~10 нм соответственно). Применение в качестве выходного зеркала специальной ВБР, сформированной фемтосекундным лазером в центральной части многомодовой сердцевины, позволяет селективировать основную поперечную моду практически без потери эффективности генерации.

В полностью волоконной схеме с волоконным объединителем накачки, позволяющим подключить к градиентному световоду до 3 лазерных диодов, выходная мощность на 954 нм увеличена до ~50 Вт с качества пучка на уровне 2,6, дальнейший рост был ограничен имеющейся мощностью лазерных диодов и относительно большими потерями в точке соединения объединителя накачки и градиентного световода. Предложены пути дальнейшего повышения эффективности и мощности разработанного полностью волоконного ВКР-лазера с прямой диодной накачкой.

Высокое качество и большая мощность выходного излучения открывает возможность эффективного удвоения частоты излучения полностью волоконного ВКР-лазера с диодной накачкой в нелинейном кристалле (с генерацией около ~480 нм) с помощью обычных методов, разработанных для одномодовых пучков. Также проведены эксперименты по исследованию полностью волоконной схемы ГВГ с использованием полингованных световодов с периодической структурой. Оптимизация ГВГ в таких световодах в много- и одночастотном режимах дала близкие результаты в однопроходной схеме. Кроме того, продемонстрировано 2-кратное увеличение мощности ГВГ в одночастотном режиме при помещении полингованного световода в волоконный резонатор.

Реализован простой вариант пикосекундного ВКР-лазера на основе световода с сохранением поляризации и активной синхронизации мод с помощью акусто-оптического модулятора дополненного пассивным самомодулятором на основе эффекта нелинейного вращения поляризации. Получены импульсы с энергией более 20 нДж при длительности ~50 пс. Показано, что параметрическое смешение двух чирпованных пикосекундных импульсов (обычного и рамановского диссипативных солитонов с длинами волн 1025 и 1070 нм соответственно) в фотонно-кристаллическом световоде с нулем дисперсии около 1040 нм позволяет получить на выходе до 8 спектральных компонент (чирпованных импульсов), следующих эквидистантно в диапазоне от ~900 нм до ~1250 нм. Показано, что полученные на новых длинах волн импульсы имеют линейный чирп (модуляцию частоты) и сжимаются компрессором до длительностей ~300 фс. Полученная многоволновая когерентная структура из чирпованных импульсов названа «комбом диссипативных солитонов». Таким образом, предложен и продемонстрирован принципиально новый способ генерации фемтосекундных импульсов на разных длинах волн в широком спектральном диапазоне, причем когерентных между собой.

Исследованы и оптимизированы процессы генерации и параметрического преобразования излучения ВКР-лазера на основе различных световодов с внутренней структурой. В частности, в световодах типа Панда, сохраняющих поляризацию, реализована каскадная генерация от 1-го до 5-го стоксова порядка (с перестройкой длины волны от ~1,1 до ~1,4 мкм) на основе полуоткрытого резонатора с кольцевым волоконным зеркалом и случайной распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии. В отличие от обычного ВКР-лазера с каскадным резонатором из брэгговских решёток, такая схема гораздо проще и эффективнее. Продемонстрированы рекордные уровни полной эффективности преобразования излучения накачки, превышающие 87%, 75% и 70% для 1-го, 2-го и 3-го порядка соответственно, при уровне выходной мощности ~10 Вт линейно-поляризованного излучения. При этом ширина линии слабо зависит от мощности (как корень кубический), достигая примерно 1, 2 и 3 нм для 1, 2 и 3 порядков, в соответствии с разработанной кинетической теорией уширения спектра генерации высших стоксовых порядков. Кроме того, впервые получена лазерная генерация со случайной распределённой обратной связью в активном висмутовом световоде, разработанном в ИЦВО РАН. На основе двулучепреломляющего фотонно-кристаллического световода впервые реализован полностью волоконный поляризованный вариант оптического параметрического генератора.

Продемонстрированы потенциальные возможности практических применений рассмотренных вариантов волоконного ВКР-лазера. В частности, ВКР-лазер на основе градиентного световода с прямой диодной накачкой, позволяющий генерировать основную поперечную моду мощностью десятки Ватт с расходимостью пучка, близкой к дифракционной, является перспективным источником яркой мощной накачки в области 950-1000 нм для твердотельных и волоконных лазеров, эффективное удвоение частоты излучения такого лазера позволяет генерировать лазерное излучение в сине-зеленой области (470-500 нм) с перспективой применений в биомедицинской диагностике и лазерных дисплеях. Эффективные каскадные ВКР-лазеры (как и висмутовые лазеры) со случайной распределённой обратной связью, реализованные в пассивных световодах с сохранением поляризации с генерацией в области 1,35-1,45 мкм представляют большой интерес для телекоммуникационных и сенсорных применений в качестве эффективных источников накачки для распределенных ВКР-усилителей, а также в качестве перестраиваемых источников для опроса волоконных датчиков на брэгговских решётках. Волоконный параметрический генератор с перестройкой 0,9-1 мкм, пикосекундный ВКР-лазер с активной синхронизацией мод и генератор фемтосекундных импульсов на основе комба диссипативных солитонов в области 0,9-1,3 мкм - в биомедицинской диагностике на основе методов когерентной оптической томографии, CARS и многофотонной

микроскопии, а мощный фемтосекундный лазер – для микрообработки и структурирования материалов, в т.ч. волоконных световодов.

Таким образом, в результате выполнения проекта за 3 года создана новая лазерная платформа на основе структурированных одномодовых и многомодовых световодов с мощной диодной накачкой со сформированными в них фемтосекундными импульсами структурами показателя преломления, которые позволяют управлять модовым составом и характеристиками излучения (мощность, спектр, пространственно-временная динамика), что открывает принципиально новые возможности как фундаментального, так и прикладного характера. Задачи проекта выполнены полностью.

Полученные результаты проекта представлены в 39 докладах (из них 11 приглашенных, 23 устных, 5 стендовых) на ведущих международных конференциях в области оптики, фотоники и лазерной физики, и опубликованы в 3 книгах и 46 статьях, из них 35 - в высокорейтинговых журналах из баз Web of Science и Scopus, результаты проекта отражены в Интернете на странице лаборатории волоконной оптики ИАиЭ: <http://www.iae.nsk.su/index.php/ru/laboratory-sites/117>

Основные публикации по проекту

1. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, M. I. Skvortsov, I. N. Nemov, and S. A. Babin. 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping. *Las. Phys. Lett.* 13 (3), 035102 (2016).
2. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, and S. A. Babin. Nearly single-mode Raman lasing at 954 nm in a graded-index fiber directly pumped by a multimode laser diode. *Opt. Lett.* 42 (1), 9-12 (2017).
3. S.A. Babin, S.I. Kablukov, E.A. Zlobina, E.V. Podivilov, S.R. Abdullina, I.A. Lobach, A.G. Kuznetsov, I.D. Vatnik, D.V. Churkin, S.K. Turitsyn. Random Distributed Feedback Raman Fiber Lasers. Chapter in book: Raman Fiber Lasers. Springer Series in Optical Sciences, vol. 207, Feng Y. (eds.), Springer, pp.273-354, 2017 (on-line 2016).
4. С.И. Каблуков, Е.А. Злобина, М.И. Скворцов, И.Н. Немов, А.А. Вольф, А.В. Достовалов, С.А. Бабин. Селекция мод в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой при использовании ВБР в многомодовом градиентном световоде. *Квант. электроника* 46 (12), 1106-1109 (2016).
5. И.Н. Немов, М.И. Скворцов, Е.А. Злобина, С.И. Каблуков. Сравнение спектральных характеристик волоконных брэгговских решёток разной длины, записанных в градиентном многомодовом световоде. *Прикладная фотоника* 3(2) 166-176 (2016).
6. S. A. Babin, E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, E. V. Podivilov. High-order random Raman lasing in a PM fiber with ultimate efficiency and narrow bandwidth. *Scientific Reports* 6, 22625 (2016).
7. I. A. Lobach, S. I. Kablukov, M. I. Skvortsov, E. V. Podivilov, M. A. Melkumov, S. A. Babin, and E. M. Dianov. Narrowband random lasing in a Bismuth-doped active fiber. *Scientific Reports* 6, 30083 (2016).
8. A. G. Kuznetsov, D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, and S. A. Babin. 50-ps Raman fiber laser with hybrid active-passive mode locking. *Opt. Express* 24 (14) 16280-16286 (2016).
9. A. V. Dostovalov, A. A. Wolf, A. V. Parygin, V. E. Zyubin, and S. A. Babin. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Opt. Express* 24 (14) 16232-16237 (2016).

10. S.R. Abdullina, A.A. Vlasov, I. A. Lobach, O. V. Belai, D. A. Shapiro, and S. A. Babin. Single-frequency Yb-doped fiber laser with distributed feedback based on a random FBG. *Laser Phys. Lett.* 13 075104 (2016).
11. V. S. Terentyev, V. A. Simonov, S. A. Babin. Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers. *Opt. Express* 24 (5) 4512-4518 (2016).
12. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, and S. A. Babin. All-PM CW fiber optical parametric oscillator. *Opt. Express* 24 (22) 25409-25414 (2016).
13. E. I. Dontsova, S. I. Kablukov, I. D. Vatnik, S. A. Babin. Frequency doubling of Raman fiber lasers with random distributed feedback. *Opt. Lett.* 41 (7) 1439-1442 (2016).
14. 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* 41, (1), 175-178 (2016).
15. 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).
16. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Linearly polarized random fiber laser with ultimate efficiency. *Opt. Lett.* 40, (17) 4074-4077 (2015).
17. 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).
18. 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 Technol.* 33 (24), 5178-5183 (2015).
19. 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).
20. 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).
21. A. G. Kuznetsov, E. V. Podivilov, S. A. Babin. Actively Q-switched Raman fiber laser. *Laser Phys. Lett.* 12 (3) 035102 (2015).
22. 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).
23. 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).
24. 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).
25. E. A. 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).
26. 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 12 (pp.277-316) in *Book "Nonlinear Optical Cavity Dynamics"*, ed. by Philippe Grelu, Wiley VCH Verlag GmbH 458 pages, 2016 (on-line 2015).

27. 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).