

Основные результаты работ по гранту РФФ № 21-72-30024 в 2021 г.

Проект направлен на решение проблемы эффективного управления характеристиками многомодового излучения за счет индуцированных фс-лазером 3-мерных (объемных) структур показателя преломления (ПП) регулярного и случайного характера внутри многомодового световода, которые позволят фильтровать, модифицировать, преобразовывать, связывать моды между собой, причем контролируемым образом. Это открывает принципиально новые возможности управления многомодовыми пучками как в линейном, так и нелинейном (совместно с эффектами ВКР, Керра, ЧВС и др.) режимах и создавать на этой основе новые технологии и устройства на основе фс-структурированных многомодовых и многосердцевинных световодов (ММС и МСС).

1 год выполнения проекта был посвящен разработке методов характеризации и управления параметрами многомодового излучения с помощью пространственного модулятора света, разработке методов формирования в ММС 3-мерных регулярных структур показателя преломления типа 3D ВБР с помощью поточечной фемтосекундной модификации показателя преломления, исследованию режимов селекции фундаментальной моды или набора мод в ВКР-лазере на основе градиентного ММС с многомодовой диодной накачкой и внутри-волоконными 3D ВБР и получению генерации ВКР-лазера на основе ММС со ступенчатым профилем ПП с диодной накачкой, экспериментальному и теоретическому исследованию совместного действия нелинейных эффектов Керра и ВКР на модовую динамику и качество пучка при ВКР-преобразовании многомодового излучения в градиентном ММС с внутриволоконными 3D ВБР, отработке технологии 3D интерферометрических отражателей в МСС на основе ВБР, записанных в разных сердцевинах, и исследованию ВКР-генерации с ними, изучению влияния рэлеевского рассеяния на фс-индуцированных случайных 1D структурах показателя преломления на характеристики волоконного РОС-лазера. При выполнении работ были получены следующие результаты:

1) Разработаны методы характеризации и управления параметрами многомодового излучения на основе модовой декомпозиции (МД) пучка с использованием пространственного фазового модулятора света (ПМС) и проведено их тестирование на задаче распространения импульсного излучения в градиентных ММС. В частности, реализовано ПО, позволяющее производить измерение модового состава фазовым ПМС в полностью автоматическом режиме. Автоматизированы процедура калибровки и анализа сохранённых данных (реконструкции пучка). Оптимизация процесса генерации фазовых масок, захвата и сохранения данных позволила существенно снизить время разложения по модам. Работоспособность метода МД проверена для оптических импульсах разной природы и длительности от суб-наносекундных до пикосекундных в ММС. Во всех случаях продемонстрировано отличное согласие между измеренным распределением ближнего поля (спекл-картины) и восстановленным по результатам МД. Проведена модификация метода МД для анализа излучения квази-непрерывного выходного излучения многомодового ВКР-лазера, включая сильно-многомодовый пучок диодной накачки и маломодовый пучок стокова излучения.

2) Разработаны методы формирования 3-мерных структур показателя преломления в ММС с помощью поточечной фемтосекундной модификации. Для задания необходимых профилей структур проведена разработка методов сканирования (развертки) сфокусированного пучка в рамках двух подходов. Первый подход основан на смещении пучка лазерного излучения в фокальной области объектива при изменении угла входа в фокусирующую оптику за счет расположения поворотного оптического элемента перед ней. Второй подход основан на смещении волокна в процессе записи с помощью 3-мерного пьезо-позиционера, на котором закреплена ферула с волокном. По разработанным методам сканирования (развертки) разработаны и созданы устройства и узлы записи для обеспечения сканирования сфокусированного пучка лазерного излучения внутри ММС с градиентным и ступенчатым профилем ПП (а также в МСС), и с их помощью записаны образцы регулярных и случайных структур.

3) Проведены эксперименты по записи 3D ВБР с различными параметрами в различных схемах фемтосекундной записи (поточечная, астигматический пучок, поперечное сканирование) в сравнении с традиционной методом УФ записи ВБР. Исследованы спектральные характеристики 3D ВБР в зависимости от условий записи и выбраны оптимальные. С оптимальными ВБР собран ВКР лазер на основе градиентного ММС с селекцией фундаментальной моды LP_{01} (качество пучка $M^2 < 2$ при мощности > 50 Вт на 976 нм), который дает рекордное увеличение яркости ($BE=73$) генерируемого пучка по сравнению с сильно-многомодовым излучением диодной накачки ($M^2 \sim 34$ на 940 нм). Продемонстрирована возможность получения моды следующего порядка (LP_{11}) в таком

лазере. Реализована каскадная генерация 2го стоксова порядка на 1019 нм с дифракционным качеством пучка ($M^2 \sim 1.3$). Кроме того, собран и запущен ВКР лазер с прямой диодной накачкой на основе ММС со ступенчатым профилем показателя преломления, в котором генерируются моды (набор мод) более высокого порядка.

4) Проведено экспериментальное и теоретическое исследование совместного действия нелинейных и линейных эффектов на модовую динамику и качество пучка при ВКР-преобразовании многомодового излучения лазерных диодов в градиентном ММС с внутриволоконными 3D ВБР. Измерены профили пучков накачки и Стокса, их модовый состав с помощью техники МД, исследованы эффекты взаимодействия интенсивных волн сигнала и накачки (выжигание пространственных дыр). Для условий эксперимента проведен численный расчет в модели связанных мод, который хорошо описывает основные эффекты. Детальное сравнение результатов расчета и эксперимента показало, что провал в накачке, вызванный истощением, уширяется из-за сильной случайной связи мод. При этом он преобразуется в узкий и высокоинтенсивный (близкий к одномодовому) стоксов пучок, что как следствие, приводит к увеличению яркости. Несмотря на наличие сильной случайной связи мод, стоксов пучок не размывается благодаря совместному действию Керровской самоочистки и фильтрации фс-ВБР. Эти эффекты слабо влияют на сильно-многомодовый пучок диодной накачки, поперечный профиль которого в основном определяется случайной связью мод, что приводит к параболической форме на входе и почти однородному истощению на выходе. В аналогичных экспериментах со ступенчатым ММС профиль проходящей накачки имеет профиль близкий к прямоугольному, а стоксов пучок становится многомодовым и сильно изрезанным из-за интерференции, с намного худшим параметром качества ($M^2 \sim 12$), чем в градиентном ММС.

5) Разработана технология 3D интерферометрических отражателей в МСС на основе ВБР, записанных в разных сердцевинах с регулярными и/или случайными продольными сдвигами. Исследованы спектральные свойства данных структур в зависимости от их параметров. Создан и исследован ВКР-лазер на основе 7-сердцевинного МСС и 3D интерферометрических отражателей, формируемых с двух концов МСС в периферийных сердцевинах. Показано, что в МСС с перекрестной связью между сердцевинами интерференция приводит к модуляции спектров вблизи порога генерации. В результате, данный метод обеспечивает многоволновую генерацию, а при определенных условиях приводит к селекции одного узкого спектрального пика. Кроме того, селективная запись высокоотражающих ВБР в определенных сердцевинах МСС позволяет задавать форму выходного пучка многосердцевинного лазера и тем самым производить пространственную локализацию выходного стоксова пучка, например, в центральной сердцевине, тогда как накачка и внутриволоконное стоксово излучение равномерно распределены между сердцевинами.

б) Изучено влияние рэлеевского рассеяния на фс-индуцированных случайных 1D структурах показателя преломления во внешнем волокне на характеристики эрбиевого волоконного РОС-лазера. В частности, проведена отработка технологии и характеристика записанных образцов случайных структур в одномодовом световоде. Показано, что можно получить увеличение уровня рэлеевского рассеяния (РР) до +50 дБ/мм относительно уровня естественного РР стандартного волокна SMF-28e+ при низком уровне наведенных потерь в 5-см образце (<2 дБ). Присоединение рэлеевского отражателя приводит к сужению линии РОС-лазера (~1 кГц) на порядок, примерно также, как и рэлеевское отражение от 25-км катушки волокна SMF-28e+. Использование образца длиной 10 см с рассеянием на уровне +41 дБ/мм и низким уровнем потерь (0,5 дБ) вместо одной из ВБР в схеме эрбиевого лазера с линейным резонатором приводит к одночастотной (<10 кГц) случайной генерации мощностью до 2,5 мВт, с возможностью плавной перестройки внутри линии усиления эрбия за счет перестройки второй ВБР с сохранением узкополосного режима генерации.

По результатам 1 года опубликованы 12 статей WoS/Scopus [1-12], из них [1-3] в журналах 1 квартиля, сделаны 13 докладов на конференциях (из них 2 приглашенных), проведена Международная школа молодых ученых, привлечен по конкурсу 1 постдок из Германии. Результаты проекта отражены в Интернете на странице лаборатории волоконной оптики ИАиЭ:

<http://www.iae.nsk.su/index.php/ru/laboratory-sites/117>

Список основных публикаций:

1. S. A. Babin, A. G. Kuznetsov, O. S. Sidelnikov, A. A. Wolf, I. N. Nemov, S. I. Kablukov, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, S. Wabnitz. Spatio-spectral beam control in multimode diode-pumped

- Raman fibre lasers via intracavity filtering and Kerr cleaning. *Sci. Rep.* **11**, 21994 (2021) | <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01491-0>
2. M. I. Skvortsov, A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, O. N. Egorova, S. L. Semjonov, and S. A. Babin. Narrow-linewidth Er-doped fiber lasers with random distributed feedback provided by artificial Rayleigh scattering. *J. Lightwave Techn.*, published online DOI:10.1109/JLT.2021.3116758
 3. A.G. Kuznetsov, I.N. Nemov, A.A. Wolf, S.I. Kablukov, and S.A. Babin. Multimode LD-pumped all-fiber Raman laser with excellent quality of 2nd-order Stokes output beam at 1019 nm. *Opt. Express* **29** (11) 17573-17580 (2021).
 4. A. G. Kuznetsov, I. N. Nemov, A. A. Wolf, E. A. Evmenova, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Cascaded generation in multimode diode-pumped graded-index fiber Raman lasers. *Photonics* **8**(10), 447 (2021). <https://doi.org/10.3390/photonics8100447>
 5. M. I. Skvortsov, A. A. Wolf, E. A. Fomiryakov, V. N. Treshchikov, S. P. Nikitin, A. A. Vlasov, A. V. Dostovalov, S. A. Babin. Er-doped fiber laser with regular and random distributed feedback. *J. Phys. Conf. Ser.*, (2022) accepted, in print.
 6. М. И. Скворцов, С. Р. Абдуллина, А. А. Вольф, А. В. Достовалов, А. Е. Чуринов, О. Н. Егорова, С. Л. Семёнов, К. В. Проскурина, С. А. Бабин. Одночастотный эрбиевый лазер со случайной распределенной обратной связью на основе неупорядоченных структур, созданных фемтосекундным лазерным излучением. *Квант. электр.* **51**(12) 1051 – 1055 (2021). <https://doi.org/10.1070/QEL17650>
 7. А.Г. Кузнецов, С.И. Каблуклов, Е.В. Подивилов, С.А. Бабин. Исследование пространственных характеристик выходного пучка каскадного ВКР-лазера с многомодовой диодной накачкой. *Квант. электр.* **51** (12) 1090 – 1095 (2021). <https://doi.org/10.1070/QEL17657>
 8. M.I. Skvortsov, V.I. Labuntsov, A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, S.A. Babin. Seven-core fiber Raman laser with fs-inscribed random structures. *Proc. SPIE*, vol.11773: Micro-structured and Specialty Optical Fibres VII (Event: SPIE Optics + Optoelectronics, 2021, Online), 117730H (2021); doi: 10.1117/12.2592527
 9. A. G. Kuznetsov, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Multimode diode-pumped graded-index fiber Raman laser with pulsed generation in all-fiber scheme. *Proc. SPIE* vol: 11890: Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XII (SPIE/COS Photonics Asia 2021), 118901A (2021); <https://doi.org/10.1117/12.2601490>
 10. V. D. Efremov, A. A. Antropov, E. A. Evmenova, and D. S. Kharenko. Numerical simulation of the picosecond fiber optical parametric oscillator based on PCF. *Proc. SPIE*, vol. 11905: Quantum and Nonlinear Optics VIII (SPIE/COS Photonics Asia 2021), 119051L (2021); <https://doi.org/10.1117/12.2601314>
 11. K. Bronnikov, A. Dostovalov, A. Wolf, and S. Babin. Influence of parameters of FBG array inscribed in a multicore optical fiber on the accuracy of shape reconstruction of a flexible medical instrument. *OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021* (19 – 23 July, 2021, Virtual Event), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2021), paper SM2A.3 <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2021.SM2A.3>
 12. A. Parygin. Control Software for Formation of Heterogeneous Structures in Optical Fiber. *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) 2021*, pp. 800-805, doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537442. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9537442>