

Научный отчет за 3 год выполнения проекта по гранту РФФИ 21-72-30024

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 позволяют 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).

Фактически проделанная работа соответствует плану на 3 год. Краткое описание выполненных работ по пунктам плана и полученных результатов приведено ниже.

1) Исследование возможности применения внутриволоконных решёток и/или интерферометров на торце ММС/МСС для перестройки частоты ММС/МСС лазерного резонатора. Исследование эффекта сужения спектра лазерной генерации в МСС резонаторе с модовой связью и внутриволоконным интерферометрическим отражателем на основе 3D массива ВБР, в т.ч.

1.1. Формирование интерференционного зеркала на торце ММС и его применение для селекции мод и перестройки частоты резонатора волоконного ВКР-лазера.

За 3й год выполнения проекта в дополнение к технологии фемтосекундной записи внутриволоконных решеток в лаборатории была разработана технология формирования на торце оптического волокна зеркала произвольной формы с использованием безмасковой лазерной записи на фоторезисте с помощью фемтосекундного лазера. Для этого были применены методы специальной обработки оптического волокна, шлифовки и полировки, фиксации для нанесения фоторезиста, нанесения тонкопленочных покрытий в вакуумной камере, а также химической обработки экспонированного фоторезиста. Были разработаны методы экспонирования фоторезиста путем подбора оптимальной мощности фемтосекундных импульсов. В результате было изготовлено, см. рис.1.1, приосевое покрытие из диэлектрического слоя TiO_2 с коэффициентом отражения около 20%, расположенное осесимметрично на торце многомодового градиентного (GRIN) волокна диаметром сердцевинки и оболочки 100/140 мкм соответственно. Такое зеркало диаметром около 11 мкм имело наибольшее эффективное отражение для основной моды градиентного МСС и осуществляло роль пространственного селектора поперечных мод в многомодовом волоконном резонаторе, при этом напыление имело широкий спектр отражения, что позволяет перестраивать центральную частоту излучения ВКР-лазера при использовании такого выходного зеркала в паре с плотной волоконной брэгговской решеткой на другом конце ММС. Для оценки спектральных свойств с помощью широкополосного источника (суперлюминесцентного лазерного диода) и волоконного циркулятора из одномодового волокна (ХР) измерялся спектр отражения МСС с зеркалом в диапазоне 960-990 нм (рис.1.1). На широком спектре наблюдается многомодовая интерференция из-за образования интерферометра Маха-Цандера для разных поперечных мод в системе ММС – ХР, причем при искривлении ММС спектр отражения изменяется.

Схема ВКР-лазера на основе градиентного ММС с плотной ВБР и торцевым диэлектрическим выходным зеркалом представлена на рис. 1.2. Три многомодовых лазерных диода (ЛД) с волоконными выходами (105/125 мкм, $NA = 0,22$) с длиной волны ~940 нм были подключены к соответствующим входам объединителя накачки 3x1, у которого выходной порт приваривался к ММС длиной ~ 1 км с градиентным профилем показателя преломления сердцевинки GRIN 100/140 мкм и апертурой 0.29. Резонатор лазера формировался плотной ВБР с коэффициентом отражения $R \sim 90\%$, записанной УФ излучением интерферометрическим методом, и напыленным выходным торцевым

зеркалом с коэффициентом отражения $R \sim 20\%$, технология изготовления которого описана выше. Дихроичными зеркалами M1-3 происходило разделение проходящей накачки и генерируемого стоксова пучка. Для дополнительного ослабления излучения перед измерителем качества пучка устанавливался интерференционный фильтр.

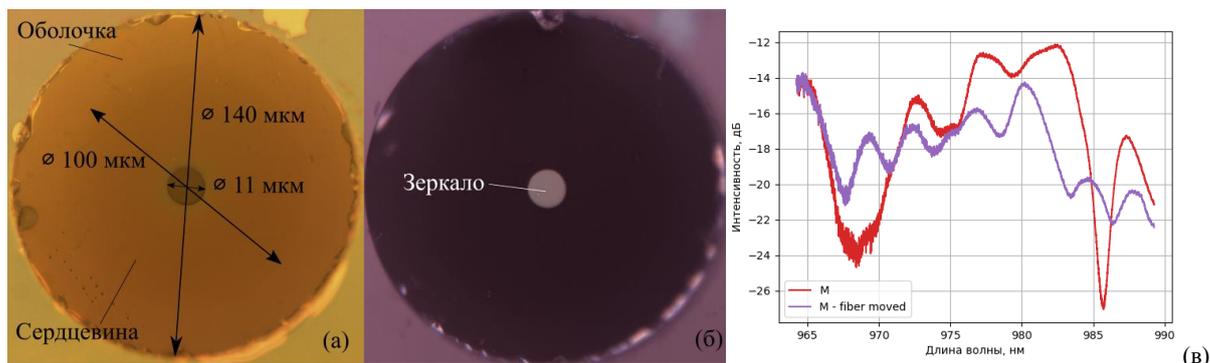


Рис. 1.1. Зеркало на торце многомодового оптического волокна: (а) торец волокна покрыт фоторезистом, в центре – отверстие без фоторезиста, (б) напыленное интерференционное зеркало в области без фоторезиста, вокруг зеркала – чистый торец волокна; (в) спектр отражения торцевого зеркала в ММС.

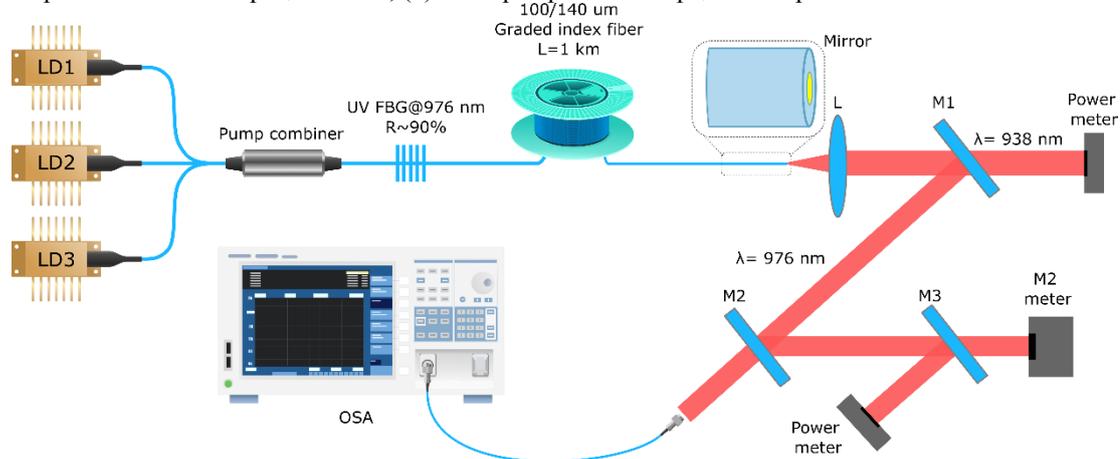


Рис. 1.2. Схема GRIN ВКР лазера с резонатором из УФ-ВБР и торцевого интерференционного зеркала.

На рис. 1.3а,б приведен измеренный профиль выходного пучка при заведении в волокно излучения лазерного диода накачки до порога ВКР генерации. При фокусировании камеры на выходной торец волокна можно наблюдать параболический профиль интенсивности пучка накачки, примерно повторяющий профиль показателя преломления градиентного ММС, и провал в центральной области вследствие отражения изготовленного зеркала в области фундаментальной моды. Величина провала хорошо согласуется с коэффициентом отражения зеркала ($\sim 20\%$). С ростом мощности накачки при ~ 80 Вт начинается генерация 1го стоксова порядка ВКР на ~ 976 нм, выходной профиль интенсивности которого приведён на рис. 1.3в в сравнении с профилем проходящего излучения диодной накачки, демонстрирующий увеличение яркости при ВКР преобразовании.

Были также измерены параметры качества M^2 генерируемого пучка стоксова излучения при различных выходных мощностях. Оказалось, что при низких выходных мощностях генерируемого сигнала $M^2 \sim 2$ (рис. 1.4а), что близко к значениям, ранее полученным в аналогичном лазере с выходным зеркалом на основе слабо-отражающей ВБР, записанной фс импульсами. Однако с ростом выходной мощности параметр качества стоксова пучка увеличивается до $M^2 \sim 2.3$ при 4-5 Вт (рис.1.4б) и далее растет с мощностью быстрее, чем для резонатора из пары ВБР, что, по-видимому, связано с большим коэффициентом отражения зеркала ($\sim 20\%$) по сравнению с оптимальной фс-ВБР ($\sim 4\%$). Однако большее отражение позволяет снизить порог генерации (Рис.1.5а), а широкополосность зеркала позволяет перестраивать центральную длину волны излучения за счет перестройки

относительно узкополосной плотной ВБР. В эксперименте наблюдалась температурная перестройка на ~ 1 нм за счет нагрева ВБР внутриволночной мощностью, при этом спектр генерации при большой мощности стабильный и не искажается при перестройке (Рис.1.5б), в дальнейшем предполагается увеличить диапазон перестройки с помощью сжатия УФ-ВБР. Полученная выходная мощность (>23 Вт@150Вт накачки) сравнима с решеточным резонатором и демонстрирует достаточно высокую лучевую стойкость напыленного интерференционного зеркала.

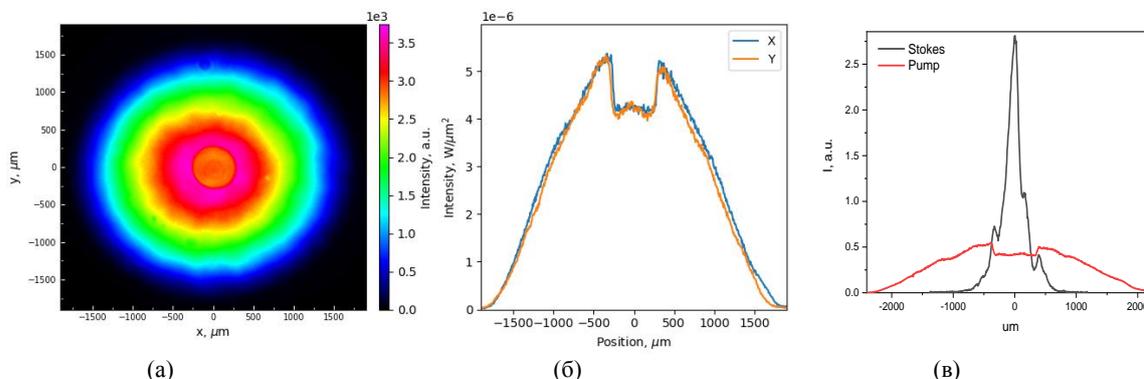


Рис. 1.3. (а) Фокусировка камеры на торец с зеркалом с подсветкой излучением ММ ЛД накачки (до порога ВКР генерации). (б) X и Y-сечения профиля интенсивности накачки. (в) Сравнение Y-сечений профиля интенсивности пучков диодной накачки и Стокса выше порога ВКР генерации.

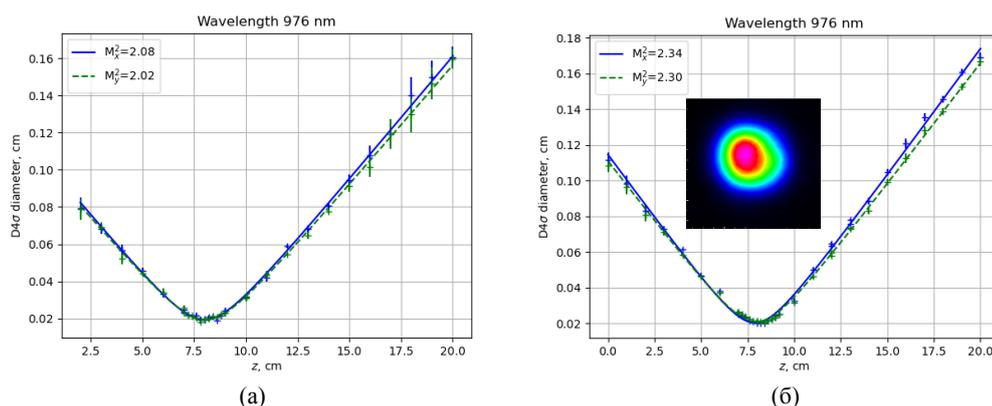


Рис. 1.4. Качество пучка при 0.6 Вт (а) и 4 Вт (а) генерируемого стоксова излучения.

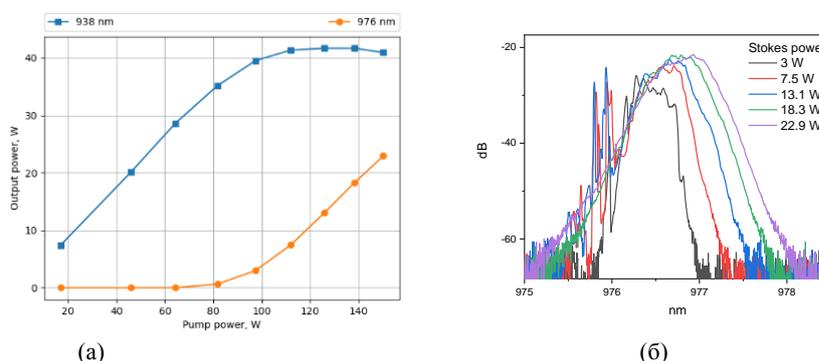


Рис. 1.5. Зависимость выходной мощности стокса от мощности накачки (а), спектр в широком диапазоне длин волн (б) и спектр стокса ВКР (в).

1.2. Исследование сужения спектра ВКР-лазера с интерферометрическим отражателем на основе массива ВБР в ММС

На данном этапе была также продолжена работа по оптимизации внутриволоконного интерферометрического отражателя на основе массива волоконных брэгговских решеток (ВБР), записанных фс лазерными импульсами с фокусом на экспериментальное

исследование эффекта сужения спектра лазерной ВКР генерации в ММС резонаторе с массивом ВБР. Для этой цели были созданы 1D, 2D и 3D массивы коротких ($L_{\text{FBG}} \leq 0.5$ мм) слабоотражающих ВБР в многомодовом GRIN волокне поточечным методом с помощью фемтосекундного лазерного излучения, который был модифицирован по сравнению с использовавшимся ранее методом записи регулярных 1D ВБР длиной ~ 1 см.

Для записи 1D массива со случайным расположением отдельных ВБР в продольном направлении их поперечное положение задавалось 3D пьезо-столиком точно на оси волокна, тогда как случайное продольное расстояние между ВБР (с длиной L_{FBG}) задавалось линейным позиционером со средним значением $\Delta L > L_{\text{FBG}}$, случайным образом изменяющимся в пределах 20%, см. Рис.1.6а. В случае 2D и 3D массивов продольный сдвиг вдоль волокна осуществлялся одновременно со случайными смещениями (Δx , Δy) в диапазоне до 10 мкм в одном (x) или двух (x, y) поперечных направлениях. 1D–3D массивы ВБР с различной длиной ВБР ($L_{\text{FBG}} = 0.5, 0.25$ мм), продольным расстоянием между ВБР ($\Delta L = 0.7, 0.33$ мм) и количеством ВБР в массиве ($N = 14, 28$), соответственно, были записаны, сохраняя почти такое же полное отражение (-12-15 дБ) для суммарного массива ВБР, см. Рис. 1.6б, как и для изучавшихся ранее регулярных выходных ВБР ($\sim 4\%$).

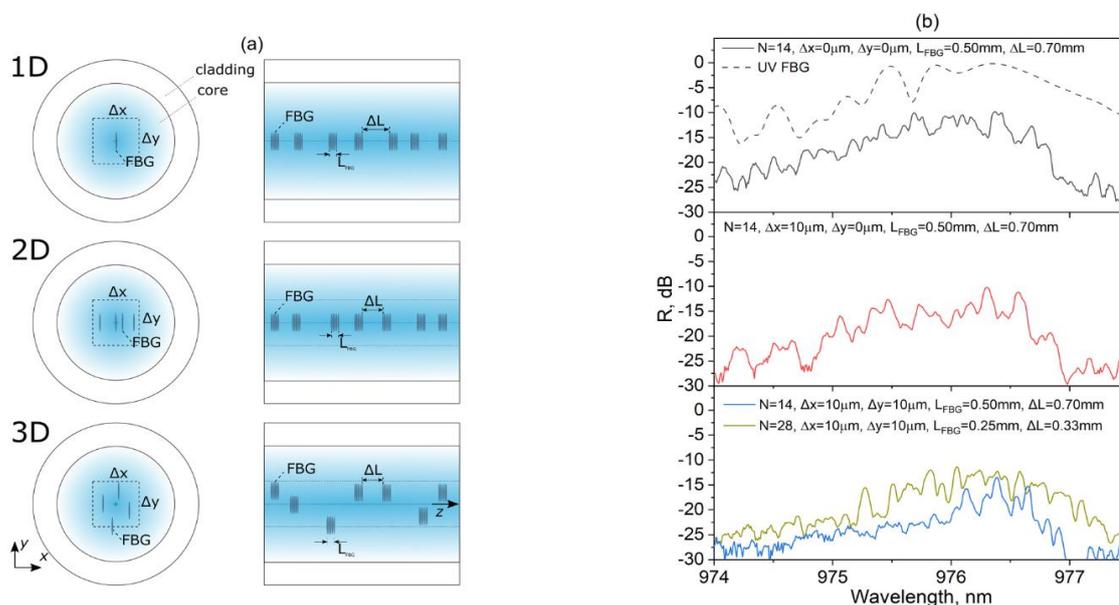


Рис. 1.6. Схема расположения ВБР в случайных 1-3D массивах, записанных в ММС: N ВБР длины L_{FBG} со средним расстоянием ΔL вдоль оси z (1D) плюс поперечные случайные сдвиги в пределах Δx (2D) и $\Delta x, \Delta y$ (3D) (а) и соответствующие им спектры отражения вместе со спектром плотной УФ-ВБР (б).

В случайных массивах ВБР интерференция частично отраженного света от отдельных ВБР приводит к случайным неоднородностям спектра с периодами $\sim 0.05\sim 0.5$ нм, в результате чего пики интерференции «замывают» модовые пики. Тем не менее, лишь несколько (1–3) высокоамплитудных пиков отражения случайного массива ВБР перекрываются с основным пиком отражения высокоотражающей УФ-ВБР с центром ~ 976.5 нм (соответствующим фундаментальной моде). Амплитуды пиков высокоотражающей ВБР, соответствующих группам мод более высокого порядка, уменьшаются на ~ 10 дБ для 4-6-го пиков в области 974-975 нм. Аналогичное уменьшение на ~ 10 дБ (примерно от -15 до -25 дБ) наблюдается в коротковолновой области спектра случайного массива, поскольку расположение ВБР вблизи оси волокна приводит к отражению преимущественно мод с низким индексом. Поскольку самый короткий спектральный период массива определяется его общей длиной ($\sim 1,6$ см), а самый длинный период определяется расстоянием между соседними ВБР ($\sim 0,5$ нм для массива с $N = 14$ и ~ 1 нм для $N = 28$) спектральные характеристики массива с $N=28$ становятся более гладкими и широкими, чем для $N = 14$, как показано на 3D-панели рис. 2б. Вместе с плотной УФ ВБР (спектр приведен на 1D панели) массив ВБР формировал резонатор ММ ВКР-лазера с

диодной накачкой на ~ 940 нм (схема, как на рис.1.2). , в котором получено качество пучка $M^2 \sim 2$ (рис.1.7a) и мощность генерации до ~ 30 Вт.

Спектр генерации повторяет нерегулярные пики спектра отражения (черная кривая на рис.1.7b), возникающие в результате интерференции отражений от разных ВБР в массиве. В результате при выходной мощности 5-10 Вт генерируется узкий пик (~ 0.1 нм), затем в генерацию выходят боковые пики, а при высоких мощностях интерференционные пики замываются так, что спектр уширяется до ~ 0.3 нм, см. рис.1.7d, что приближается к типичному значению 0.4 нм для ММ ВКР-лазера с длиной фс – ВБР на выходе.

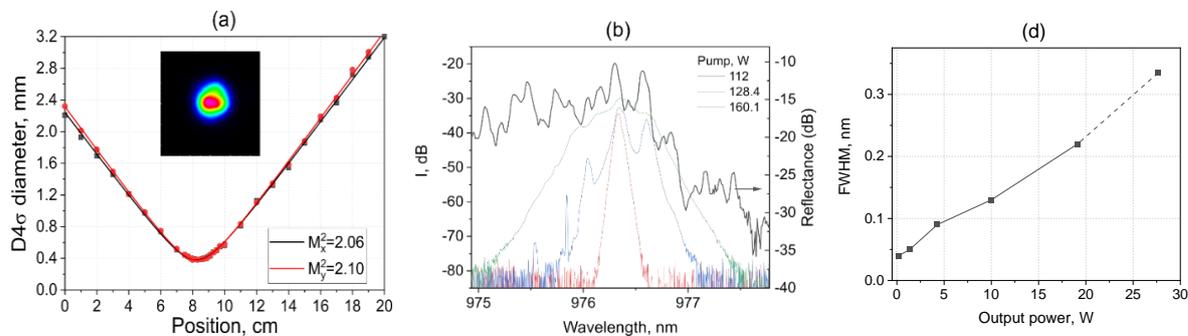


Рис. 1.7. Качество пучка (a) и спектр (б) ММ ВКР лазера со случайным 2D массивом ВБР ($L=0,5$ мм, $N=14$, $\Delta L=0,7$ мм, $\Delta x=10$ мкм, $\Delta y=0$) при различной мощности накачки, черная кривая в спектре соответствует отражению массива. (d) ширина генерируемого спектра в зависимости от мощности.

Таким образом, случайные массивы ВБР обеспечивают сравнимую мощность и качество пучка с регулярной длиной ВБР с близким интегральным отражением ($R \sim 4\%$ на длине волны 976 нм). В то же время генерируемый массивом спектр значительно уже из-за эффекта интерференции, приводящего к дополнительной модуляции спектра отражения массива. В дополнение к интересной физике нелинейного пространственно-спектрального преобразования многомодового стоксова пучка при его взаимодействии со случайным массивом ВБР, это новый технологический подход, который позволяет довольно просто записывать фс импульсами короткие ВБР с произвольным интервалом в приосевой области многомодового волокна вместо прецизионного изготовления длинных осевых ВБР. Такой полностью волоконный ВКР лазер с диодной накачкой также обладает хорошими возможностями масштабирования мощности, поскольку случайный массив ВБР менее чувствителен к тепловой нагрузке, что является важным свойством для практических применений. Высокое качество пучка и узкий спектр лазера позволяют также эффективно генерировать вторую гармонику в нелинейных кристаллах в видимом диапазоне. **Разные лямбда?**

1.3. Сужение/коллапс спектра лазерной генерации в МСС резонаторе с модовой связью и интерферометрическим отражателем на основе 3D массива ВБР

На данном этапе исследовалось влияние связи мод сердцевин на спектр генерации лазера на основе активного 7-сердцевинного МСС. Для этого использовались два отрезка МСС, изготовленные из одной заготовки, но с разным расстоянием между сердцевинами после вытяжки. Диаметр оболочки/расстояние между сердцевинами составили 137/28,3 мкм для МСС №1 и 135/17,2 мкм - МСС №2 (рис.1.8). Для МСС № 2 использовалась дополнительная внешняя трубка из плавленного кварца для сохранения при вытяжке того же диаметра оболочки при уменьшенном расстоянии между сердцевинами, что обеспечивало их связь.

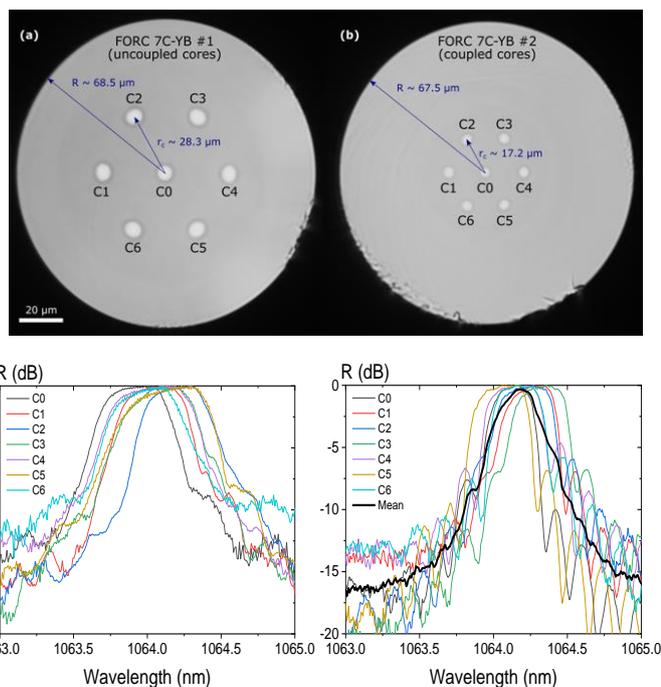


Рис. 1.8. Изображения торцов двух типов МСС и соответствующие спектры отражения ВБР, измеренные для каждой из сердцевин в: (a) FORC 7C-Yb #1, (b) FORC 7C-Yb #2, сплошная линия — среднее геометрическое ВБР спектров.

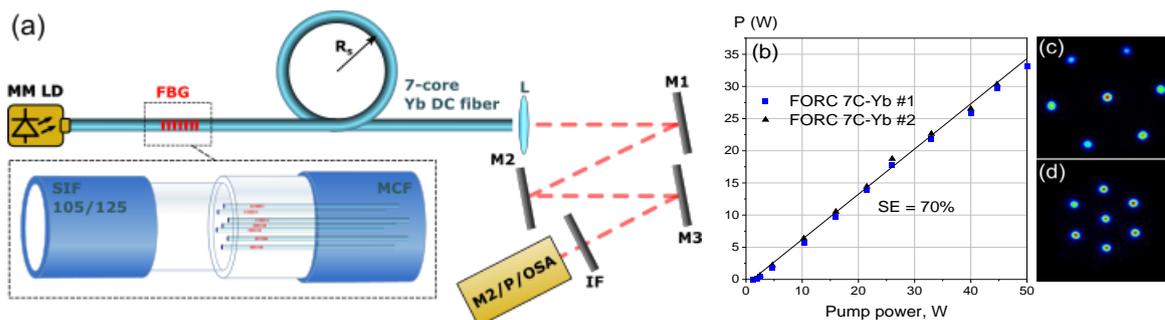


Рис.1.9. (a) Схема Yb-волоконного МСС лазера: LD – многомодовый лазерный диод; ВБР – массив высокоотражающих ВБР; L – линза; IF – интерференционный фильтр; M1-3 – дихроичные зеркала; M² – анализатор качества пучка; P – измеритель мощности; OSA – анализатор оптического спектра. (b) Выходная мощность P в зависимости от входной мощности накачки, выходные пучки для МСВ#1 (c) и МСВ#2 (d) при P ≈ 0,4 Вт.

Схема Yb лазера на основе активного МСС показана на рис. 1.9а. Для накачки в оболочку использовался многомодовый лазерный диод (ЛД) с длиной волны излучения 976 нм. Выходное волокно ЛД было приварено к концу МСС с записанным фс лазером массивом высокоотражающих ВБР на длине волны 1064 нм. Выходной конец МСС был сколот под прямым углом, что обеспечивало френелевское отражение ~4%. Сравнивались характеристики лазера с МСС №1 (без связи) и №2 (со связью) с соответствующими массивами ВБР (их спектры показаны на рис.1.8). Длины МСС (~10 и ~35 м) выбраны так, чтобы на длине волны 1064 нм они генерировали примерно одинаковую мощность – до 33 Вт при накачке 50 Вт с дифференциальной эффективностью ~70% (см. рис.1.9б). Излучение в отдельных сердцевинах имеют близкую выходную мощность выше порога, но МСС №1 (без связи) демонстрирует разные пороги генерации в сердцевинах и неоднородное распределение мощности вблизи порога (см. Рис. 1.9с,д).

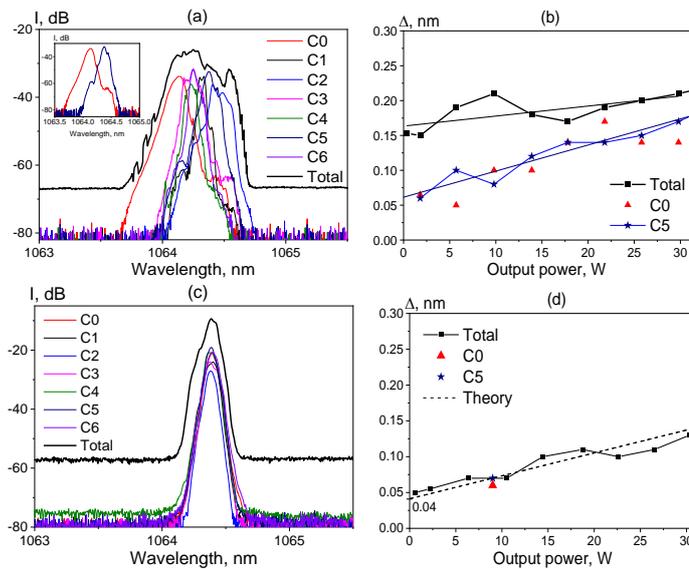


Рис. 1.10. Спектры лазера с МСВ №1 при мощности ~ 10 Вт для суммарного пучка и индивидуальных сердцевин C0-6 (вставка: C0,5) без связи (а), соответствующие ширины спектральных линий в зависимости от выходной мощности (б). Спектры лазера с МСВ №2 при мощности ~ 10 Вт для суммарного пучка и индивидуальных сердцевин C0-6 со связью (с) и соответствующие ширины спектральных линий в зависимости от выходной мощности (д).

Сердцевины без связи (МСС №1) генерируют независимо, их спектры соответствуют спектрам отражения ВБР, имеющим значительные сдвиги длин волн, так что общий спектр значительно уширен по сравнению с индивидуальными, как показано на рис.1.10а. С ростом мощности общая ширина спектра меняется незначительно около ~2 нм, тогда как индивидуальные ширины спектров увеличиваются от ~0.05 до ~0.17 нм при большом разбросе значений для разных сердцевин (рис.1.10б). При наличии связи сердцевин (МСС №2) генерируемые спектры становятся намного более стабильными и коллапсируют в одну линию, так что отдельные спектры генерации и суммарный спектр становятся одинаковыми, как показано на рис.1.10с. С ростом мощности суммарная ширина линейно растет от ~0.04 до ~0.12 нм, как и индивидуальные спектры сердцевин (рис.1.10д).

На примере 2-сердцевинного волокна была построена упрощенная модель, объясняющая коллапс спектра в МСС со связью. Если сердцевины расположены близко, то собственные моды, распространяющиеся вдоль волокна, представляют собой когерентные суперпозиции мод сердцевин $V_{\pm} = (A_1 \pm A_2) / \sqrt{2}$, называемых супермодами (СМ). При каждом обходе резонатора они усиливаются на коэффициент $G = \exp(gL)$ и ослабляются на коэффициент g_0 на выходе, но отражатели (ВБР1 и ВБР2) смешивают их, поэтому собственные моды генерации (СМГ) будут представлять собой суперпозиции СМ. Было показано, что частота устойчивой генерации определяется максимумом среднегеометрических коэффициентов отражения ВБР_{1,2} $|r_1(\omega^*)r_2(\omega^*)| = \max(r_1(\omega)r_2(\omega))$. Это приводит к тому, что эффективный спектр отражения массива ВБР становится узким, а моды генерации гибридизируются вблизи максимума эффективного отражения (ω^*). При этом спектральное уширение генерируемой линии с ростом мощности соответствует формуле уширения спектра вследствие фазовой самомодуляции в односердцевинном волокне $\Delta = 4 / \pi [\Delta_{FBG} \gamma L \ln(1/R_0)] P_{out}^{-1/2}$ с 7 раз большей площадью моды (рис.1.10д, штриховая линия).

Таким образом, связь сердцевин ведет к образованию супермод и их гибридизации при отражении от ВБР, что в свою очередь приводит к лазерной генерации одинакового спектра во всех ядрах, несмотря на большое различие центральных длин волн и формы спектра отражения отдельных ВБР в массиве. Предварительные радиочастотные измерения подтвердили, что отдельные пучки взаимно когерентны, что делает когерентное объединение генерируемых отдельных пучков достаточно простым. Помимо интересной фундаментальной проблемы (с возможностью дальнейшей детализации эффекта спектрального коллапса), это весьма перспективный подход для создания мощных

многосердцевидных волоконных лазеров на основе массивов ВБР с достаточно грубыми характеристиками, но генерирующих высокостабильный узкополосный выходной пучок.

2) Исследование возможности преобразования частоты генерации ВКР-лазера на основе градиентного ММС в видимый и ИК диапазоны при накачке многомодовыми лазерными диодами с разными длинами волн. Исследование возможностей генерации структурированных пучков с помощью сложных внутриволоконных 3D структур в ММС/МСС, сформированных с использованием пространственного модулятора света. Исследование нелинейных эффектов при распространении структурированного пучка в ММС/МСС, в т. ч.

2.1. Исследование возможности преобразования в ИК диапазон при накачке лазерными диодами с разными длинами волн и ГВГ в видимом диапазоне

Для расширения спектрального диапазона генерации ВКР-лазера на основе градиентного ММС в ИК диапазоне, в дополнение к изученной ранее каскадной генерации с диодной накачкой на одной длине волны (938 нм) с генерацией на 976 нм (1й Стокс) и 1019 нм (2й Стокс) в резонаторе из двух пар ВБР, на данном этапе исследовалась возможность генерации сразу на ~ 1019 нм (с резонатором из одной пары ВБР на 1019 нм) с комбинированной диодной накачкой на двух длинах волн (938 и 976 нм). В этом случае излучение диода на 976 нм находится в спектральной полосе ВКР усиления диодной накачки на 938 нм, что позволяет избавиться от резонатора, генерирующего стоксово излучение 1го порядка.

На рис. 2.1 приведены полученный спектр и мощность ВКР генерации на 1019 нм (с выходной ВБР $R=6\%$) в зависимости от входной мощности диодной накачки на 938 нм при фиксированной мощности диодной накачки на 976 нм (вблизи порога). При ~ 10 Вт на 938 нм начиналась генерация на 1019 нм, которая достигала 3Вт при 55 Вт накачки на 938 нм. На рис. 2.1 приведены измеренный профиль и параметр качества пучка, генерируемого при двухволновой накачке вместе с детальным спектром генерации вблизи 1019 нм. Как параметр качества $M^2 \sim 2.7$, так и широкий спектр (Рис.2.2.) говорят о том, что при усилении многомодового излучения на длине волны 976 нм чистка пучка недостаточна и как следствие в ВКР генерации на 1019 нм возбуждаются поперечные моды высокого порядка (преимущественно LP_{01} судя по профилю). То есть ВКР преобразование многомодовой ЛД накачки 938 нм в 1019 нм идет, но не очень эффективно и с недостаточным увеличением яркости, при этом еще остаются возможности для улучшений.

Также были начаты эксперименты с диодной накачкой на ~ 800 нм, которые запланированы на следующий этап проекта.

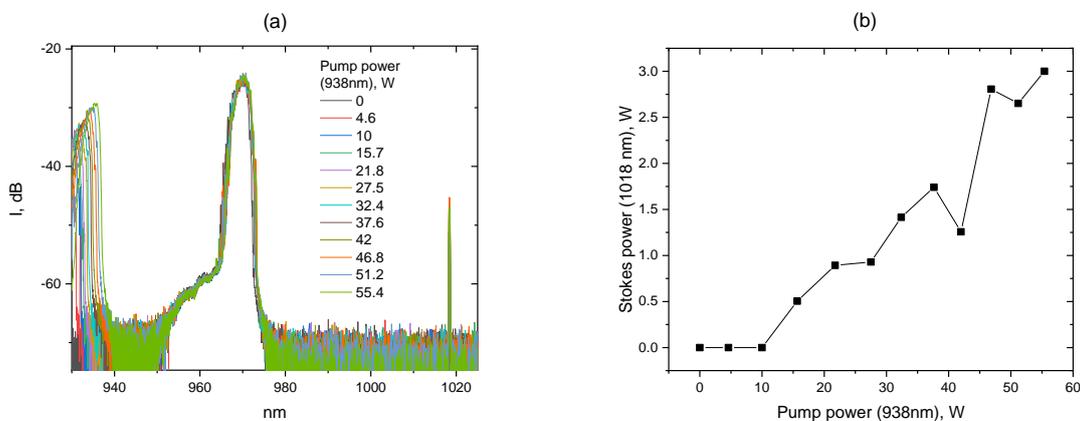


Рис. 2.1. Выходной спектр ВКР лазера (а), зависимость мощности сигнала на 1019 нм от мощности накачки на 938 нм (б)

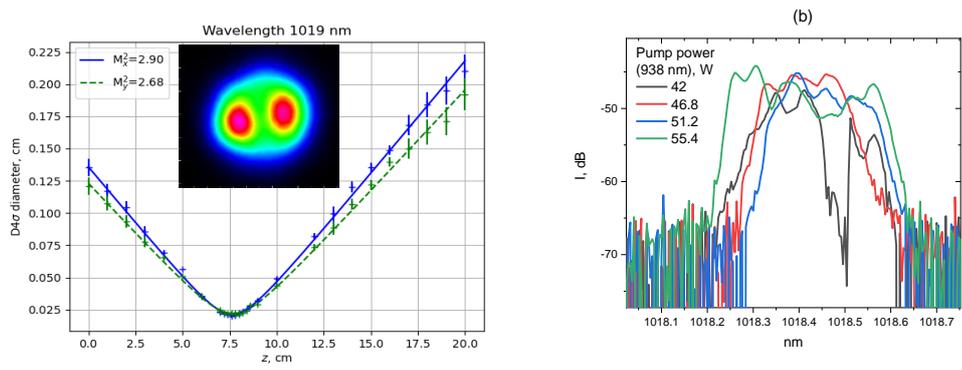


Рис. 2.2. Качество пучка (а) и детальный спектр (б) ВКР генерации на ~1019 нм при мощности ~2 Вт.

В другой серии экспериментов изучались возможности преобразования в видимый диапазон с помощью нелинейного кристалла. Предполагалось, что сужение линии ВКР-лазера с массивом ВБР (описанное в п.1) до 0.1-0.2 нм при мощности 10-20 Вт, позволит повысить эффективность генерации второй гармоники (ГВГ) в однопроходной схеме (например, за счет увеличения длины кристалла), так и использовать резонатор для увеличения интенсивности в кристалле, связанный с основным резонатором ВКР-лазера (эту схему будем условно называть внутрирезонаторной ГВГ).

В качестве исходных были взяты данные выполненного ранее предварительного эксперимента по однопроходной ГВГ многомодового ВКР-лазера на 976 нм в двух вариантах (каскадная генерация с диодной накачкой на 915 нм 2го Стокса на 976 нм с улучшенным качеством пучка, $M^2=1.9$ и прямая ВКР-генерация на 976 нм с накачкой на 940 нм с качеством пучка $M^2=2.2-2.4$), см. рис.2.3. В соответствии с разницей в качестве пучка коэффициент преобразования составил 3.8 и 1.8 [в ед. 10^{-3} W^{-1}]. При этом вызванное температурным дрейфом насыщение ГВГ на 488 нм при мощности ВКР-лазера >11 Вт устранялось менее острой фокусировкой.

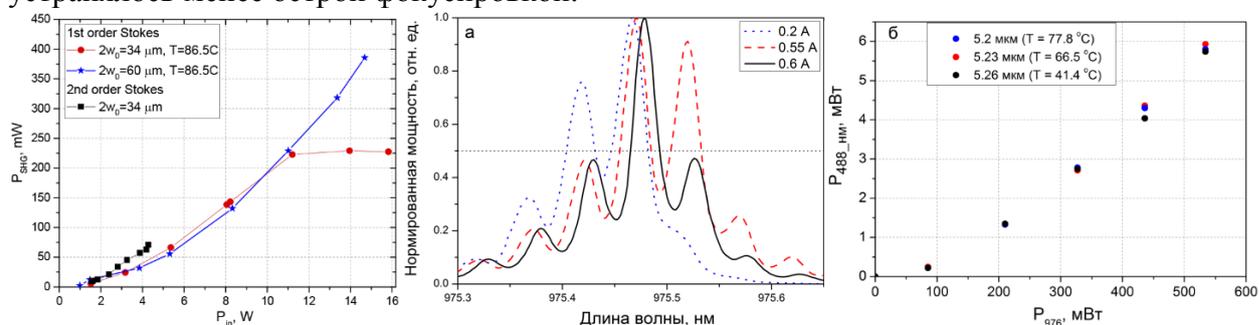


Рис.2.3. Мощность ГВГ (488 нм) в кристалле PPLN длиной около 5 мм в однопроходной схеме с ММ ВКР-лазером на 976 нм с качеством пучка $M^2=2.2-2.4$ нм (1й Стокс) и 1.9 (2й сток).

Рис.2.4. (а) Спектр излучения лазерного диода при разных токах накачки; (б) Мощность генерации второй гармоники в однопроходной схеме с новым кристаллом PPLN (L=1 см).

Новая серия экспериментов была начата с тестирования кристалла PPLN в 2 раза большей длины. Была собрана однопроходная схема генерации второй гармоники с поляризованным маломодовым излучением от лазерного диода со спектром, близким к спектру ВКР-лазера с массивом ВБР (см. рис.1.7) и в ней охарактеризован кристалл PPLN длиной 1 см с шестью периодами от 5,17 мкм до 5,32 мкм, помещенный в термостат. Характерный спектр диода показан на рис. 2.4а, в генерацию попеременно выходят от одной до трех линий при изменении тока накачки. На рис. 2.4б показана зависимость мощности генерации излучения на 488 нм от мощности лазерного диода для трех периодов кристалла при оптимальной температуре. Видно, что результаты для разных периодов совпадают, но из-за конечной ширины спектра основного излучения зависимость отклоняется от квадратичной. По первым точкам можно оценить коэффициент

квадратичной нелинейности как $2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1}$, что значительно выше, чем в кристалле длиной 0.5 см, использованном ранее (даже с учетом случайной поляризации ВКР-лазера).

Далее исследовалась возможность увеличения эффективности ГВГ в высокодобротном резонаторе, который частично связан с резонатором основного излучения. Были теоретически рассчитаны расстояния между зеркалами, необходимые диаметры перетяжек и другие параметры резонатора, и по результатам расчета собрана и испытана тестовая экспериментальная схема с резонатором и диодным лазером в качестве накачки, см. рис 2.5. Диаметр перетяжки пучка за коллиматором *K* был 400 мкм, в соответствии с этим рассчитаны длины плеч резонатора, чтобы он был устойчив. Общая длина резонатора составила 33,3 см. Положение зеркала 32 модулировалось пьезокерамикой, на которую подавался синусоидальный сигнал амплитудой 5 В и частотой следования 940 Гц с генератора сигналов *ГС*, выходное излучение из резонатора детектировалось с помощью фотодетектора *ФД*.

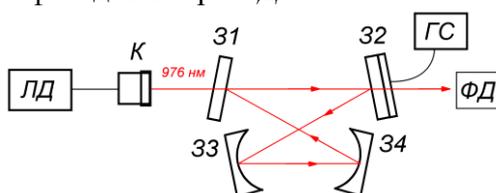


Рис. 2.5. Схема эксперимента. ЛД – лазерный диод, К – коллиматор, 31 – входное зеркало резонатора с коэф. пропускания 6%, 32-34 – плотные зеркала резонатора, ГС – генератор сигналов для пьезокерамики, ФД – фотодетектор.

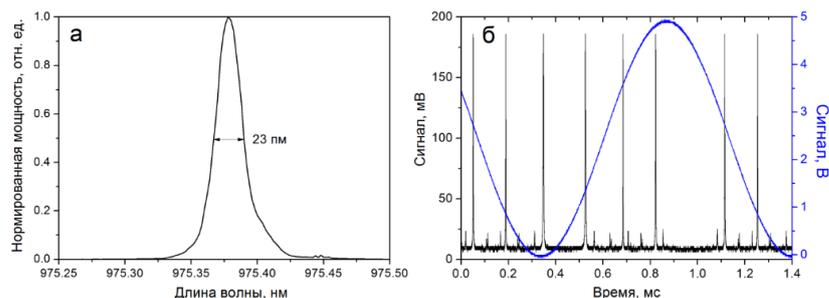


Рис. 2.6. (а) Выходной спектр лазерного диода; (б) Осциллограммы выходного сигнала из резонатора (черный) и сигнала на пьезокерамике (синий).

После добавления изолятора на выходе лазерного диода и исключения обратной волны, которая отражалась от зеркал резонатора обратно в лазерный диод, характеристики резонатора были улучшены, лазерный диод работал в близком к одночастотному режиме (рис. 2.6). После настройки и оптимизации на осциллограмме наблюдались узкие пики пропускания резонатора: добротность резонатора составила величину ~ 80 . Коэффициент усиления излучения на длине волны 976 нм внутри резонатора был около 40. Между пиками пропускания резонатора видны два слабых пика с существенно меньшей амплитудой, они соответствуют поперечным модам резонатора. Поскольку проведенные эксперименты с кристаллом и резонатором дали хорошие результаты, на следующем этапе планируется проверить ГВГ в исследованном кристалле с узкополосным (0.1-0.2 нм) ВКР-лазером и качеством пучка $M^2 < 2$ при мощности до 20 Вт на 976 нм во внутривибрационной схеме, когда усиливающий ГВГ резонатор будет связан с основным резонатором ВКР-лазера, что позволяет резонансно усиливать интенсивность многочастотное излучение.

2.2. Формирование сложных внутриволоконных 3D структур в ММС с использованием пространственного модулятора света.

На данном этапе работ была продемонстрирована возможность создания сложных внутриволоконных 3D структур в ММС/МСС, сформированных с использованием пространственного модулятора (ПМ) света.

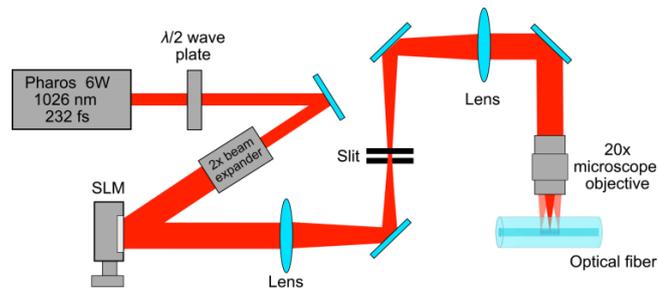


Рис. 2.7. Экспериментальная схема записи сложных внутриволоконных 3D структур в ММС/МСС с использованием пространственного модулятора света.

Схема эксперимента представлена на рис. 2.7. В качестве источника излучения использовался фемтосекундный лазер с параметрами (1026 нм, 230 фс, 1 кГц). Диаметр лазерного луча был увеличен с 4 мм до 8 мм с помощью 2-кратного расширителя пучка, чтобы заполнить матрицу (15,36 x 8,64 мм) отражающего ПМ Holoeye Pluto-2.1 NIR-149, который модулировал фазу падающего излучения. После отражения от ПМ при малых углах падения лазерное излучение проходило через 4-f оптическую систему на основе двух линз с фокусным расстоянием 20 см. Пространственный фильтр, расположенный в плоскости Фурье линзы 1, пропускал только первый порядок дифракции и блокировал другие порядки дифракции (нулевой и порядки выше 1-го), создаваемых SLM. Объектив с большим рабочим расстоянием Mitutoyo APO NIR 20x был помещен в плоскость изображения второй линзы 2 оптической системы 4-f для фокусировки излучения в сердцевину одномодового волокна SMF-28 или многомодового волокна Draka 100/140 мкм. Волокно помещалось во внутренний канал прямоугольной стеклянной ферулы с полированной боковой гранью, расположенной на 3D-подвижке PlanarDL, которая использовалась только для установки начального фокусного положения внутри сердцевины. Для компенсации aberrации на цилиндрической поверхности волокна использовалось иммерсионное масло, которое заполняло зазор между стенкой канала и волокном. Фазовая маска $\varphi_{\text{grating}}(x,y) = (2\pi/\Lambda) \times x$, представляющая собой периодическую решетку с периодом $\Lambda=11$ пикселей, была сгенерирована на ПМ для получения 1-го порядка дифракции. Перемещение фокусного пятна внутри поля зрения объектива (x_f, y_f) осуществлялось путем суммирования фазовой маски периодической решетки с рассчитанной маской $\varphi_{\text{tilt}}(x,y)$. Для смещения фокусного пятна по глубине вдоль оси z (фокусировка или дефокусировка в зависимости от знака z_f) формировалась маска φ_{focus} . Суммирование данных фазовых масок $\varphi_{\text{tilt}}, \varphi_{\text{focus}}$ приводит к 3D смещению точки фокусировки в сердцевине волокна в нужную точку с координатами (x_f, y_f, z_f) .

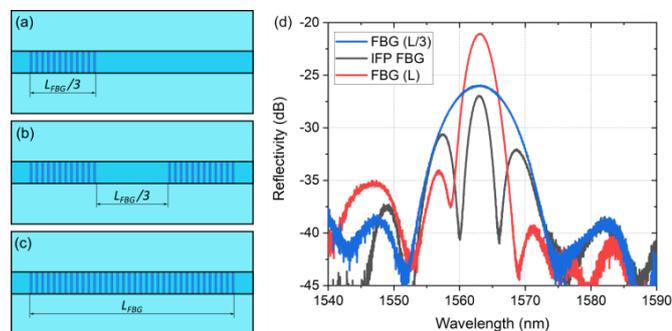


Рис. 2.8 Схема записи ВБР с помощью ПМ: запись первой части ВБР (а), запись второй части ВБР (b), запись центральной части ВБР (с), соответствующая эволюция спектров при записи трех частей ВБР (d).

Для создания регулярных ВБР на основе предложенной методики необходимо прежде всего удостовериться, что структура пространственно когерентна. Для проверки этого факта, была реализована следующая процедура записи ВБР с периодом $\Lambda=1.07$ мкм и общей длиной $L = 150$ мкм. Общая длина ВБР была разделена на 3 части одинаковой длины по 50

мкм: центральную часть и две боковые части. Первоначально была записана первая боковая часть ВБР (рис. 2.8a), что привело к слабому и широкополосному отражению в районе 1557 нм (рис. 2.8d, синяя линия) из-за небольшой длины записанной структуры. Затем была записана вторая боковая часть ВБР той же длины и периода (рис. 2.8b), в результате чего был получен интерферометр Фабри–Перо с соответствующим спектром отражения (рис. 2.8d, зеленый), имеющий модуляцию по спектру $\Delta\lambda \approx 6$ нм, что соответствует эффективной базе интерферометра ≈ 150 мкм. В конце была записана центральная часть ВБР, расположенная между ранее записанными боковыми частями (рис. 2.8c), которая формировала ВБР с общей длиной 150 мкм. Спектры отражения этой ВБР (рис. 2.8d, красная линия) представляют собой типичные спектры обычной ВБР той же длины, что доказывает высокую пространственную когерентность полученных структур.

Однако коэффициент отражения ВБР, записанной поточечным методом, ограничен двумя факторами: низким изменением показателя преломления порядка 10^{-4} , вызванным одиночным лазерным фс импульсом, и малым размером области модификации (≈ 0.5 мкм) по сравнению с диаметром сердцевины волокна (≈ 10 мкм). Последний фактор уменьшает интеграл перекрытия между областью изменения показателя преломления и профилем основной моды. Для дальнейшего увеличения изменения показателя преломления модифицированной области и, как следствие, общего коэффициента отражения ВБР был реализован подход многоимпульсного воздействия, основанный на выявленной высокой пространственной когерентности создаваемых структур. В этом случае после первоначальной записи ВБР процедура записи повторялась N раз (1-3) с той же энергией импульса и набором фазовых масок. На рис. 2.9 показана эволюция спектров отражения ВБР после воздействия различного количества импульсов N (1, 2 и 3) при записи одного штриха решетки (рис. 2.9a). Каждый последующий импульс увеличивает изменение показателя преломления, что приводит к увеличению коэффициента отражения ВБР от начального -22.4 дБ до -16.2 дБ для $N=2$, а затем до -15.1 дБ для $N=3$. Численно рассчитанные спектры отражения ВБР показывают хорошее совпадение с экспериментальными при изменении показателя преломления 2×10^{-4} для первого прохода и последующем увеличении до 4.1×10^{-4} и 4.6×10^{-4} для второго и третьего проходов. Дальнейшее увеличение числа лазерных импульсов не приводит к существенному увеличению изменения показателя преломления из-за насыщения величины модуляции показателя преломления при многоимпульсном воздействии.

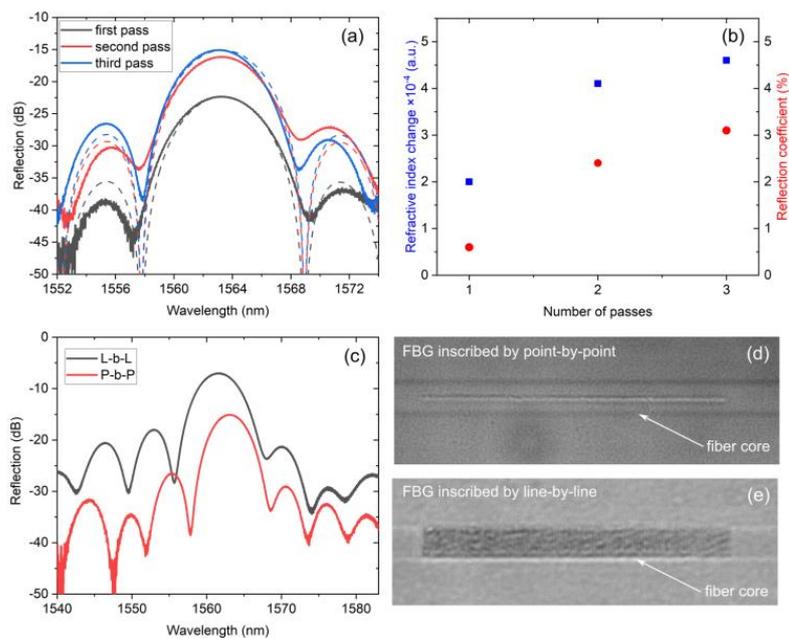


Рис. 2.9. Спектры отражения однородной ВБР, записанной поточечно за несколько проходов (a), зависимость изменения показателя преломления от количества проходов (b), сравнение спектров отражения однородной

ВБР, записанной поточечно и методом сканирования (с), изображение ВБР, записанной поточечно (d) и методом сканирования (e).

Кроме того, предложенный метод записи ВБР позволяет контролировать не только продольное положение области изменения показателя преломления относительно оси сердцевинки волокна, но и поперечное положение, что позволяет задавать поперечный размер каждого шага решетки, т.е. записывать ВБР сканированием сердцевинки в поперечном направлении (рис. 2.9e) с расстоянием между соседними положениями точки фокусировки 0,5 мкм в одной плоскости для обеспечения перекрытия точек. На рис. 2.9с представлены спектры отражения ВБР, записанных по данной схеме с $R=19\%$, что в 6 раз выше по сравнению с ВБР, записанных поточечным методом записи с той же энергией импульса и общей длиной ВБР. Рост отражения при записи со сканированием сердцевинки можно объяснить увеличением в несколько раз интеграла перекрытия между модой оптического волокна и областью изменения показателя преломления (рис. 2.9e) по сравнению со случаем поточечной записи (рис. 2.9d).

Вышеупомянутые результаты записи были получены со смещением фокуса только в двух направлениях (x или y) без изменения глубины фокусировки. В то же время предлагаемая техника записи дает возможность изменять координату по оси z, как описано в экспериментальной части. Это не так важно в случае одномодового волокна с диаметром сердцевинки волокна 10 мкм, что сопоставимо с продольным размером области изменения показателя преломления. Однако в случае многомодового волокна с диаметром сердцевинки ~ 100 мкм оно открывает возможность к 3-мерному структурированию показателя преломления, позволяющему записывать ВБР в ММ-волокне, отражающие моды более высокого порядка с внеосевым распределением интенсивности. Для демонстрации данной возможности был сгенерирован набор фазовых масок для записи ВБР кольцеобразного сечения диаметром 20 мкм в сердцевине волокна ММ GRIN- Draka 100/140 с диаметром сердцевинки 100 мкм. Спектры отражения ВБР с периодом 1,07 мкм и с различным поперечным сечением: на оси с амплитудой сканирования поперек сердцевинки волокна 10 мкм и вне оси с кольцеобразным сечением диаметром 20 мкм. Как видно, в первом случае (рис. 2.10a) наблюдается только основной пик в районе 1552 нм, соответствующий пику отражения основных и низших мод. Тогда как во втором случае (рис. 2.10b) помимо значительно более слабого основного пика появляется дополнительный пик на 1540 нм, соответствующий отражению мод более высокого порядка, эффективно перекрывающихся с созданной кольцевой структурой.

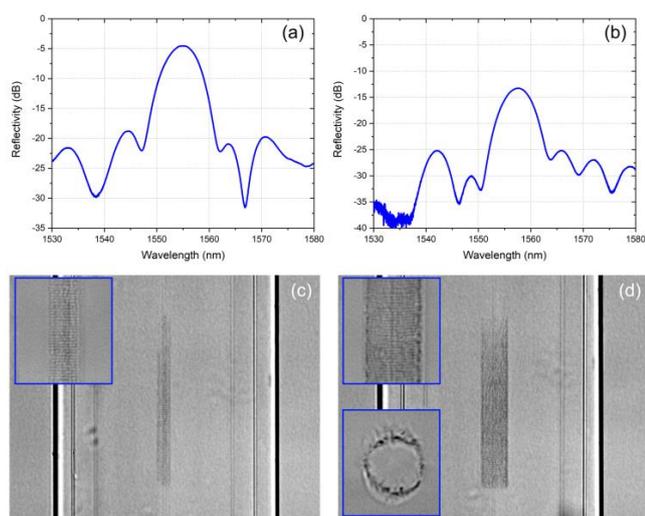


Рис. 2.10. Спектры отражения ВБР, записанных в ММ и имеющих различное поперечное сечение штриха: на оси с амплитудой сканирования 10 мкм (a) и вне оси с кольцеобразным сечением диаметром 20 мкм (b), соответствующие изображения ВБР (c, d).

Таким образом, разработана новая методика записи ВБР в статическом волокне с использованием SLM для изменения положения точек фокусировки внутри сердцевины волокна. была продемонстрирована запись сложных 3D ВБР структур с кольцеобразным поперечным сечением, обеспечивающей селективное отражение мод более высокого порядка в многомодовом волокне. Метод позволяет также получать ВБР со сложной структурой в продольном направлении (аподизированные, с фазовым сдвигом в структуре) с различным размером штриха от одиночной модификации до широкой плоскости, охватывающей всю сердцевину волокна. Изучение этих возможностей будет продолжено на следующем этапе проекта.

2.3. Исследование возможностей генерации структурированных пучков и нелинейных эффектов при их распространении в МСС.

Благодаря внедрению многосердцевинных световодов (МСС) появляется возможность когерентно усиливать мощные лазерные импульсы с сохранением характеристик излучения, а также становится возможным объединять излучение разных лазерных источников в один луч с минимальными потерями мощности. Большинство работ посвящены исследованию распространения излучения с центральной длиной волны 1550 нм, что обусловлено минимальными оптическими потерями и аномальной дисперсией, благодаря которой возможно проявление таких эффектов, как нелинейное сложение и сжатие импульсов. При этом энергия импульса часто ограничивается появлением нелинейного частотного чирпа. Однако перспективным также видится и использование МСС с нормальной дисперсией для мощных фемтосекундных лазеров и усилителей.

В отчётном периоде исследовалось распространение ультракоротких импульсов длительностью 100 фс в 7-сердцевинном МСС со слабой связью в линейном и нелинейном режимах на длине волны 1 мкм. Схема эксперимента представлена на Рис. 2.11. Лазерный луч расширяется до диаметра 8 мм для получения максимального разрешения при дальнейшем структурировании пространственным модулятором (ПМ). ПМ позволяет более гибко управлять параметрами пучка, возбуждая как каждую сердцевину по отдельности, так и любую их комбинацию. Для расчета голограмм используется итеративный взвешенный алгоритм Герхберга-Сакстона. Он был разработан для создания массива одинаковых оптических ловушек, однако небольшая модификация позволяет управлять интенсивностью излучения в каждой оптической ловушке и чрезвычайно удобна для возбуждения отдельных сердцевины МСС.

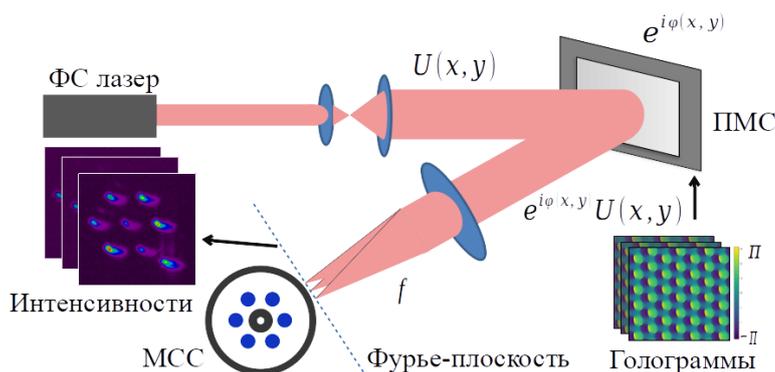


Рисунок 2.11. Схема эксперимента по селективному возбуждению сердцевины с использованием пространственного модулятора света.

Для исследования распространения ультракоротких импульсов использовалось МСС со следующими параметрами: ядра имеют одинаковый диаметр 5 мкм и NA 0,125; оболочка имеет стандартный диаметр 125 мкм; расстояние между ядрами равняется 17,3 мкм. Прежде всего, мы удостоверились, что способны завести излучение в отдельно выбранную сердцевину, установив соответствующую фазовую маску на ПМ на коротком отрезке волокна. В дальнейшем, чтобы избежать влияния изгиба и увеличить связь между сердцевинами, мы выполнили серию экспериментов с волокном, уложенным в прямую

линию длиной 29 см. Происходило поочерёдное возбуждение каждой отдельно-взятой сердцевинки и измерение выходного распределения интенсивностей для различных уровней мощности на входе. Результаты представлены на Рисунке 2.12. Можно наблюдать достаточно богатую динамику большинства сердцевин. Только первая остается изолированной от других и сохраняет около половины падающей мощности. Наиболее интересные случаи, когда возбуждается 0-ая, 2-ая, 5-ая или 6-ая сердцевинки. В последних двух случаях наблюдается явная нелинейная связь между парой сердцевин. Зависимость очень похожа на функцию пропускания полупроводникового насыщающегося зеркала. Для более детального исследования изменения формы импульса при распространении в МСС была применена методика оптического частотного стробирования (FROG). Полученные временные формы представлены на Рисунке 2.13.

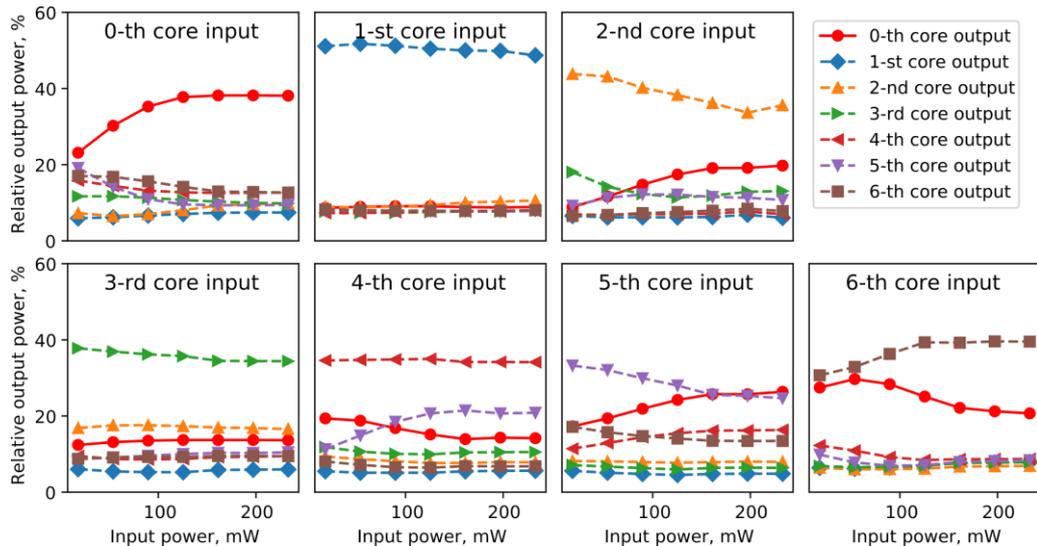


Рисунок 2.12. Зависимость распределения мощностей на выходе от входной мощности для при возбуждении отдельных сердцевин (обозначено подписью внутри каждого графика) МСС длиной 29 см.

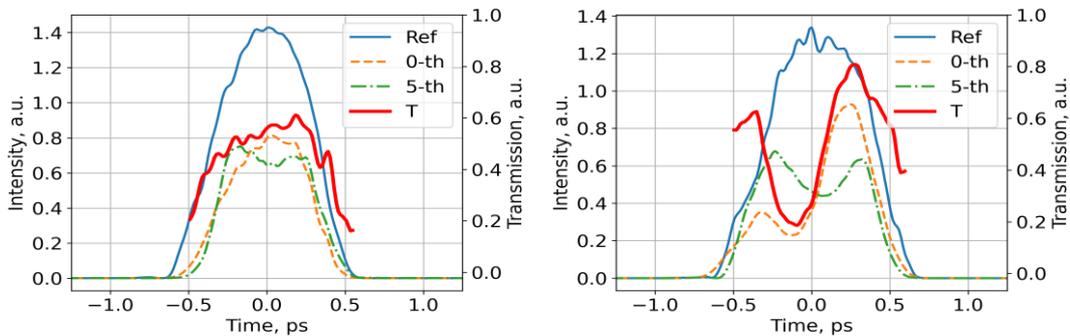


Рисунок 2.13. Временная огибающая импульсов на 1-ом, 0-ом и 5-ом выходах МСС при заведении излучения в 5-ую сердцевину при уровне мощности в 125 мВт (слева) и 220 мВт (справа). Сплошная красная линия — функция пропускания полученного искусственного насыщающегося поглотителя.

В качестве опорной огибающей выбран импульс, прошедший через 1-ую (изолированную) сердцевину. Он демонстрирует небольшое уширение во времени и почти линейное увеличение пиковой мощности выходного импульса по сравнению с входной мощностью. Такое поведение типично для стандартного одномодового волокна. Пятая сердцевина демонстрирует такое же поведение при малых входных мощностях, но при больших выходная пиковая мощность фиксируется на уровне около 0,8 кВт. При этом в центральной части импульса появляется провал. При этом принципиально другая зависимость наблюдается для 0-ой (центральной) сердцевинки. Пиковая мощность выходного импульса быстро растет при максимальной входной мощности, а его длительность существенно уменьшается. Следует отметить, что одновременно появляется

боковой пик. Однако, несмотря на это, мы можем заключить, что кусок МСС проявляет свойства элемента амплитудной само-модуляции (график функции пропускания представлен красной кривой) и потенциально может быть использован в качестве синхронизатора мод в сверхбыстрых волоконных лазерах.

Таким образом, исследовано распространение ультракоротких импульсов в 7-сердцевинном МСС в линейном и нелинейном режимах. Использование пространственного модулятора света с фазовыми масками, сгенерированными взвешенным алгоритмом Герхберга-Сакстона, позволило легко переключать излучение между различными сердцевинами МСС. Обнаружено, что для уложенного прямолинейно МСС наблюдается нелинейная связь между сердцевинами. Таким образом, кусок МСС можно рассматривать как искусственный насыщающийся поглотитель, и мы считаем, что такое устройство может быть полезно для разработки мощных ультракоротких волоконных лазеров и приложений для формирования ультракоротких импульсов.

3) Исследование возможности формирования в резонаторе на основе ММС и LMA световодов стабильных пространственно-временных световых структур и возможности достижения пассивной пространственно-временной синхронизации мод.

Увеличение пиковой мощности как внутри волоконного лазерного резонатора, так и в схемах доставки излучения к объекту сопряжено с рядом трудностей, главной из которых является нелинейность. Для преодоления этой проблемы используются как волокна с большим полем основной моды (large mode area, LMA), так и многомодовые волокна с градиентным профилем показателя преломления, показавшие в последнее время наличие большого числа новых нелинейных эффектов, и в том числе, эффекта керровской самоочистки. Данный эффект позволит поддерживать высокое качество излучения при распространении с пиковыми мощностями на уровне 1-5 кВт. Эффект был экспериментально продемонстрирован с использованием различных оптических волокон для различных длин волн, включая использование многомодовых оптических волокон в схемах с объёмной оптикой. При этом стоит отметить, что в качестве возбуждающего лазера использовались мощные твердотельные лазеры, излучение которых фокусировалось на торец многомодового волокна элементами объёмной оптики. Нами же была поставлена цель исследовать возможность достижения эффекта самоочистки при непосредственной сварке выходного волокна LMA-лазера с синхронизацией мод и многомодового волокна.

Для наблюдения эффекта нами был использован прототип LMA лазера с резонатором из специализированного волокна Nufern LMA-YDF10/130-M. Центральная длина волны составила 1064 нм, частота повторения ~ 27 МГц. Длительность генерируемых импульсов оценивается в 12 пс, а энергия составила 11 нДж. При этом пиковая мощность составляет величину порядка 1 кВт, что как раз достаточно для проявления эффекта керровской самоочистки. Участок многомодового волокна устанавливался на выходе лазера. Исследовалось распределение интенсивности в отсутствие режима синхронизации мод (непрерывное излучение), когда пиковая мощность излучения эквивалентна средней и составляла величину порядка 100 мВт, и в импульсном режиме с высокой средней мощностью. Результаты представлены на Рисунке 3.1. Видно, что при возникновении режима синхронизации мод фундаментальная мода становится существенно более ярко выраженной, однако для достижения этого эффекта пришлось сделать сварку со смещением в 5 мкм (чтобы возбудить моды в высокими квантовыми числами), что приводит к дополнительным потерям.

Таким образом, увеличение доли фундаментальной моды на выходе многомодового волокна при его дальнейшей сварке с одномодовым волокном должно приводить эффективно к уменьшению потерь в данном сегменте, т. е. к эффекту амплитудной самомодуляции. Была предпринята попытка установки данного участка внутри резонатора LMA-лазера, однако стабильного режима синхронизации мод сразу получить не удалось. Причиной может быть либо высокие дополнительные потери, вносимые сваркой

смещением, либо слишком низкий коэффициент модуляции. Для преодоления этих трудностей предполагается создать задающий генератор с ещё большим диаметром моды, что по оценкам должно увеличить пиковую мощность ещё в 5-10 раз. Эти работы планируется продолжить на следующем этапе проекта.

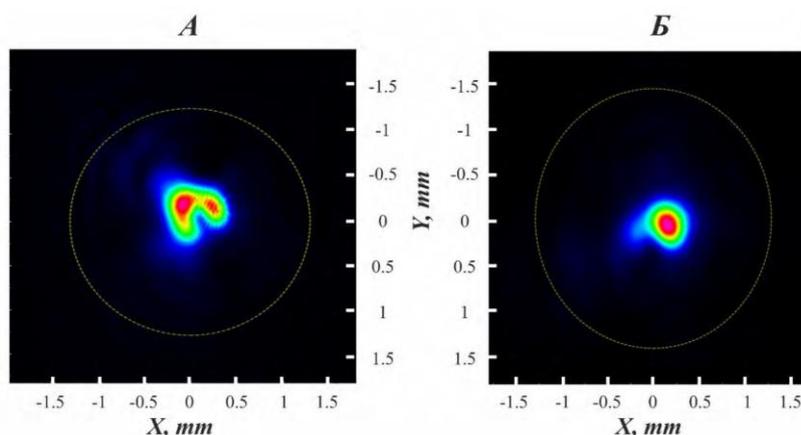


Рисунок 3.1. Поле пучка при непрерывном излучении (А, низкая пиковая мощность) и в режиме синхронизации мод (Б, высокая пиковая мощность).

Проведённые работы показали, что в отрезке многомодового волокна, приваренного на выход полностью волоконного LMA-лазера наблюдается эффект самоочистки, который положительно влияет на форму пучка на выходе, представляющего собой стабильную пространственно-временную структуру с преимущественной долей фундаментальной моды. Таким образом именно увеличение диаметра моды исходного задающего генератора, результатом чего является увеличенная пиковая мощность внутри резонатора, позволяет осуществить переход к многомодовым оптическим волокнам. Несмотря на то, что добиться стабильной пространственно-временной синхронизации мод пока не удалось, продемонстрированный эффект керровской самоочистки для пучка LMA лазера с временной синхронизацией мод является многообещающей технологией для улучшения эффективности лазерных резонаторов, в том числе выполненных из многомодового оптического волокна. Становится возможным создание новых типов гибридных резонаторов для волоконных задающих генераторов с высокой выходной мощностью.

4) Исследование возможности применения МСС с регулярными и случайными структурами в качестве датчиков формы. Характеризация структурированных МСС методами рефлектометрии (ф-OTDR и/или OFDR), применяемых в ОМС.

В данном пункте работ исследовался датчик формы на основе распределенных случайных отражателей с усиленным рэлеевским рассеянием. Распределенные случайные отражатели были созданы методом прямой фемтосекундной (фс) лазерной записи в МСС (Рис 4.1а), которые записывались в виде массивов точечных неоднородностей (см. Рис 4.1б), расстояние между которыми задавалось случайным образом. Каждая неоднородность показателя преломления формировалась одним фс импульсом. Фокусировка импульсов в область сердцевинки волоконного 7-сердцевинного МСС осуществлялась с помощью объектива Mitutoyo APO NIR 50x. Путем вращения волокна в феруле отражатели записывались поочередно в трех боковых сердцевинах волокна: 1, 2, 3 (см. Рис 4.1а). При оптимальной энергии фс импульсов (620 нДж) прирост уровня обратного рассеяния относительно естественного уровня составил +50 дБ, а значение вносимых оптических потерь равнялось 8,58 дБ/м на длине волны 1550 нм. Случайные отражатели записывались в одномодовые боковые сердцевинки при одинаковых условиях фокусировки. Длина записанных массивов точечных неоднородностей равнялась 10 см, а расстояние между соседними точками составляло 50 ± 5 мкм. Случайная добавка ± 5 мкм к периоду 50 мкм

позволяла избежать появления выделенных брэгговских резонансов в спектре отражения записываемой структуры.

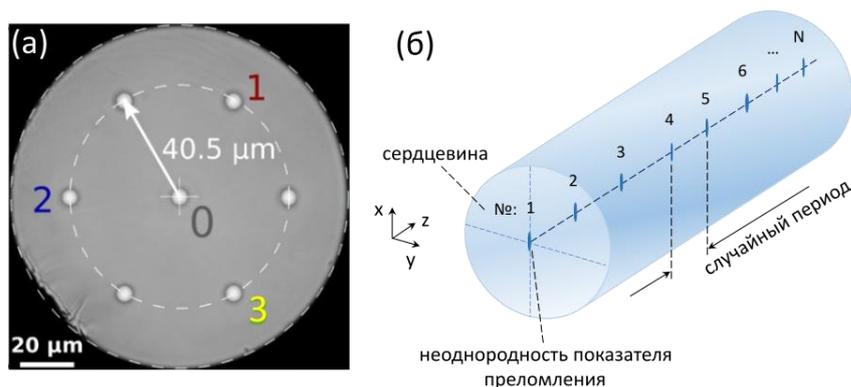


Рис. 4.1 (а) Поперечное сечение 7-сердцевинного МСС, где номерами 1, 2, 3 указаны боковые сердцевин с записанными отражателями; (б) распределенный случайный отражатель - массив точечных отражателей.

Созданные случайные отражатели характеризовались в пространственной и частотной областях с помощью OFDR рефлектометра LUNA OBR4600, имеющего пространственное и спектральное разрешение до 10 мкм и 0,02 пм. Сердцевин с записанными отражателями опрашивались рефлектометром поочередно с помощью оптического MEMS переключателя Sercalo Microtechnology Ltd SC 1×8. На Рис. 4.2а приведена амплитуда обратно рассеянного излучения вдоль оптической оси (z), демонстрирующая прирост уровня обратного рассеяния относительно естественного примерно на +50 дБ, а малый наклон уровня обратного рассеяния от z говорит о малых вносимых потерях. На Рис.4.2б представлен спектр отражения случайного отражателя, который имеет однородное отражение излучения в широком спектральном диапазоне (1545-1585 нм),

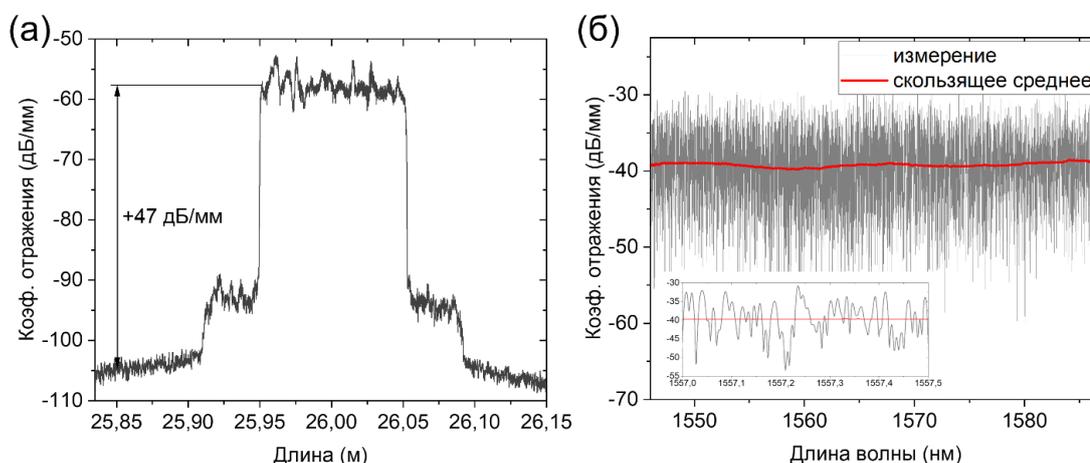


Рис. 4.2 (а) Амплитуда обратно рассеянного излучения в зависимости от длины волокна и (б) спектр отражения массива точечных отражателей длиной 10 см, записанного в одной из боковых сердцевин волокна при энергии фс импульсов 620 нДж. На вставке показан увеличенный фрагмент спектра.

Далее был собран волоконный датчик 3D формы на основе МСС с записанными распределенными отражателями, схема которого представлена на рис.4.3. Для измерения спектральных сдвигов вдоль волокна использовался рефлектометр LUNA OBR 4600, выполняющий опрос схемы следующим образом: сначала измеряется обратное рэлеевское рассеяние волокна без приложения внешних воздействий. Эти данные сохраняются как референсный сигнал. Далее проводятся измерения уровня обратного рассеяния при изгибе определенного участка волокна. Затем производится кросс-корреляция профилей обратного рассеяния из двух наборов данных и вычисляется спектральный сдвиг вдоль

волокна, являющийся откликом на деформацию ε . Данный сдвиг аналогичен сдвигу резонансной длины волны $\Delta\lambda$ брэгговской решетки. Для учета температурных изменений и продольных растяжений волокна проводилась нормировка: из измеренных спектральных сдвигов боковых сердцевин вычитался спектральный сдвиг центральной сердцевин.

С помощью MEMS переключателя Sercalo Microtechnology Ltd SC 1×8 можно быстро опрашивать разные сердцевин без лишних механических воздействий на волокно, которые могут привести к дополнительным ошибкам при восстановлении формы волокна. Для исследования работоспособности датчика при различных уровнях оптических потерь в линии в схему датчика был включен аттенюатор Thorlabs VOA50-APC, который может контролируемо вносить потери в оптический канал.

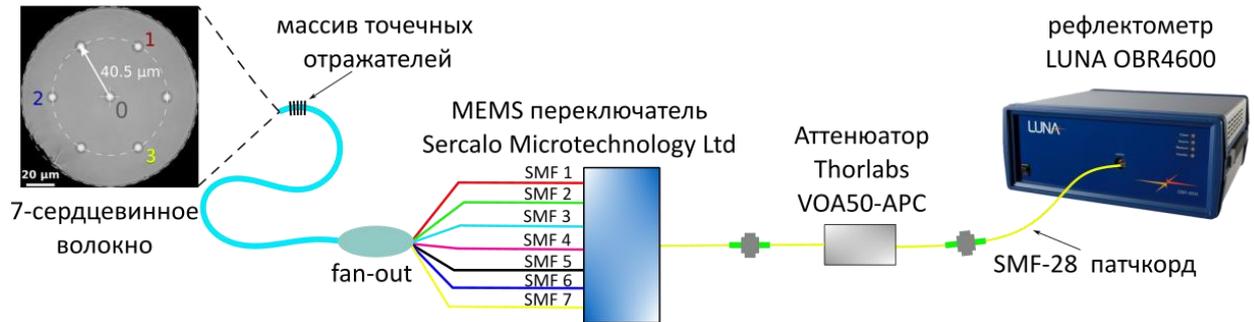


Рис. 4.3 Схема волоконного датчика 3D формы на основе многосердцевинного волокна с записанными распределенными случайными отражателями.

Путем поочередного опроса боковых сердцевин с записанными отражателями получаем спектральные сдвиги i -ой сердцевин в j -ой точке волокна $\Delta\nu_{ij}$, которые далее пересчитываются в деформацию $\varepsilon_{ij} = -\frac{\lambda}{cK} \Delta\nu_{ij}$, где c – скорость света. Средняя длина волны λ равняется 1567 нм, а калибровочный коэффициент K составляет 0,78. Для расчета вектора кривизны \mathbf{k}_j в j -ой точке волокна при его изгибе мы использовали следующий подход. Из полученного набора данных ε_{ij} с помощью суммирования по N сердцевинам вычисляем \mathbf{k}_j следующим образом:

$$\mathbf{k}_j = -\frac{2}{Nr_c} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ij} \cos \alpha_i \mathbf{n}_x + \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ij} \sin \alpha_i \mathbf{n}_y \right),$$

где r_c – расстояние от центра волокна до i -ой боковой сердцевин, α_i – угол между локальной осью x и вектором, направленным к i -ой сердцевине. (см. Рис.4.4), \mathbf{n}_x и \mathbf{n}_y – единичные вектора для осей x и y соответственно. Тогда можно извлечь модуль $k = |\mathbf{k}_j|$ и аргумент вектора кривизны $\vartheta = \arg \mathbf{k}_j$. Радиус кривизны R определяется как обратное значение модуля вектора кривизны k .

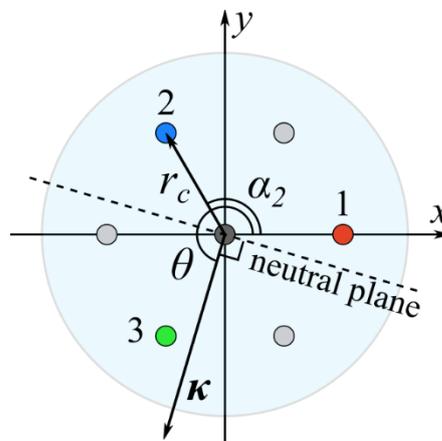


Рис.4.4 Поперечное сечение многосердцевинного волокна и соответствующие параметры для расчета вектора кривизны \mathbf{k} .

Для восстановления трехмерной формы волокна применялся метод однородных матриц преобразований. Для проверки полученного датчика трехмерной формы участок многосердцевинного волокна с записанными отражателями длиной 10 см наматывался на разные цилиндрические поверхности диаметром D с шагом намотки h . Всего было рассмотрено 4 конфигурации: 1) $D = 56$ мм, $h = 10$ мм, 2) $D = 56$ мм, $h = 20$ мм, 3) $D = 30,5$ мм, $h = 20$ мм, 4) $D = 30,5$ мм, $h = 12,5$ мм. Полученные результаты приведены на Рис. 4.5, где сплошными линиями обозначены измеренные трехмерные кривые, а пунктирными линиями – референсные кривые.

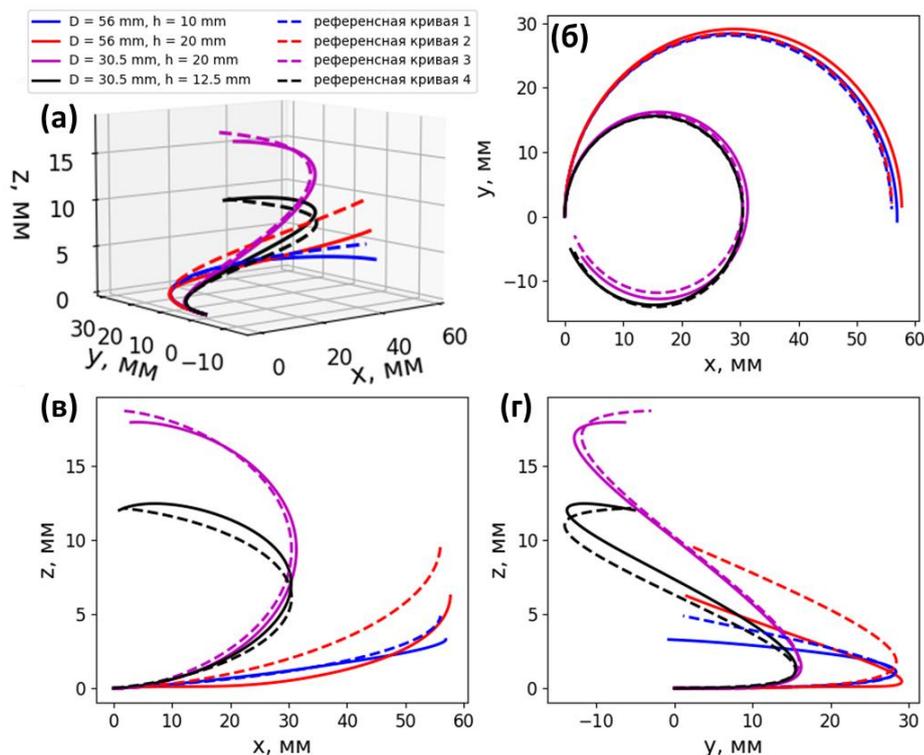


Рис. 4.5 Измеренные трехмерные кривые (сплошные линии) и референсные кривые (пунктирные линии): (а) 3D вид, (б) проекция на плоскость XY, (в) проекция на плоскость XZ, (г) проекция на плоскость YZ.

Было исследовано влияние оптических потерь, вносимых в оптический канал с помощью аттенюатора, на погрешность восстановления трехмерной кривой. Для сравнения были рассмотрены сердцевины с записанными отражателями и датчик на основе немодифицированных сердцевин. При увеличении значения вносимых потерь погрешность восстановления искусственного датчика не превышает 4 мм, как и в случае измерения в отсутствии потерь. В случае датчика на основе сердцевин без записанных отражателей абсолютная ошибка увеличивается при увеличении значения вносимых потерь – при величине потерь 20 дБ ошибка восстановления формы увеличивается в 10 раз для всех рассмотренных конфигураций. Таким образом, увеличенное отношение сигнал/шум датчика с записанными распределенными случайными отражателями позволяет восстанавливать форму волокна с меньшей погрешностью по сравнению с датчиком на основе чистого волокна при внесении потерь в оптический канал, а также расширить рабочий диапазон по уровню сигнала.

5) Исследование возможности применения методов машинного обучения для анализа и обработки многомодовых сигналов сенсорных систем мониторинга. Исследование возможности применения метода комбинационного рассеяния света с использованием многомодовых волокон и волоконных лазерных систем для мониторинга замораживаемых биообъектов, в т.ч.

5.1. Исследование возможности применения методов машинного обучения для анализа и обработки многомодовых сигналов сенсорных систем мониторинга.

В данном пункте работ исследовалась возможность применения методов машинного обучения для анализа и обработки многомодовых сигналов сенсорных систем, в частности температурного сенсора на основе МСС. Для этой цели методом фемтосекундной лазерной записи были созданы массивы ВБР в 7-сердцевинном волокне. В центральной сердцевине записан массив из 5 ВБР длиной 3 мм с близко расположенными резонансными длинами волн отражения (1549 нм, 1549,5 нм, 1550 нм, 1550,5 нм и 1551 нм) (См. Рис. 5.1б). Затем записаны такие же, но одиночные ВБР в боковых сердцевинах со спектральными резонансами, совпадающими с одним из резонансов в центральной сердцевине (См. Рис. 5.1в). Пространственное представление записанных массивов ВБР изображено на Рис.5.1а.

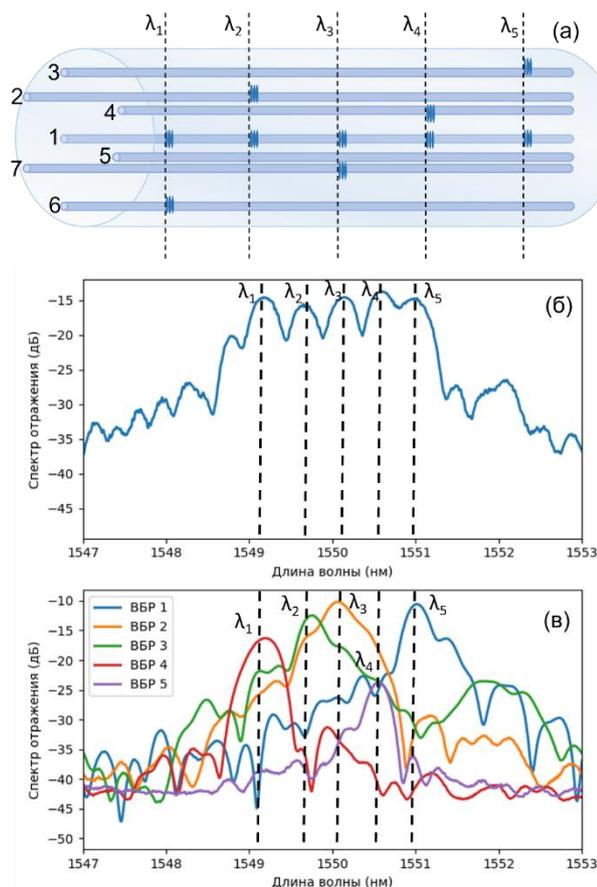


Рис. 5.1 (а) Схема пространственного расположения ВБР, записанных в 7-сердцевинном волокне, (б) спектр отражения массива из 5 ВБР в центральной сердцевине, (в) спектры отражения одиночных ВБР.

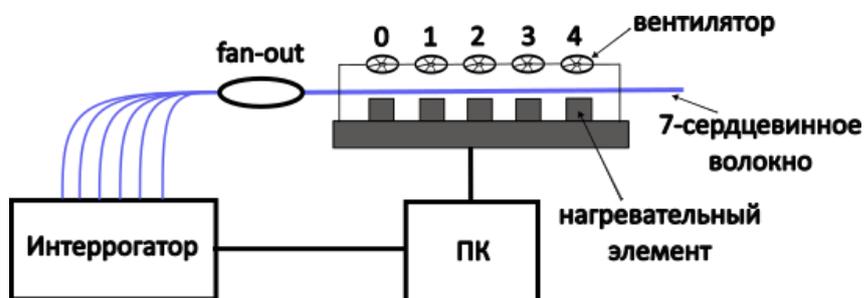


Рис. 5.2 Схема экспериментальной установки.

Далее была собрана экспериментальная установка (рис.5.2) для тестирования температурного воздействия на 7-ми сердцевинный МСС с записанными ВБР и сбора данных для разработки методов машинного обучения. Волокно помещалось в печь,

состоящую из 5 нагревательных элементов и 5 вентиляторов для охлаждения волокна. При этом каждый нагревательный элемент и вентилятор (для более быстрого охлаждения) воздействует на отдельный участок волокна, где расположены решетки с одинаковыми спектральными резонансами. Опрос 7-сердцевинного волокна проводился интеррогатором через fan-out. Управление печкой и сбор данных интеррогатора осуществлялся с помощью скрипта, написанного на языке python.

Затем проводилось тестирование печки. Диапазон температур печки составил от комнатной температуры 27 °С до 110 °С. Скорость нагрева равнялась приблизительно 10 °С/мин, а скорость охлаждения составила около 9 °С/мин. На Рис. 5.3а представлены результаты по нагреву 1 и 3 нагревательного элемента от 27 °С до 110 °С, что свидетельствует о достаточной теплоизоляции каналов и слабом влиянии соседних каналов друг на друга. Сдвиг резонансных длин волн приведен на Рис. 5.3б. Из данного графика видно, что резонансы на 1549,55 нм и 1550,5 нм, соответствующие 1 и 3 каналам, смещаются в длинноволновую область пропорционально увеличению температуры, при этом максимальный сдвиг резонансов превышает 1 нм. На Рис. 5.3в и Рис. 5.3г представлены спектры отражения в центральной сердцевине до нагрева и после нагрева соответственно. Видно, что резонансы в спектре центральной сердцевины соотносятся с резонансами в спектрах боковых сердцевины.

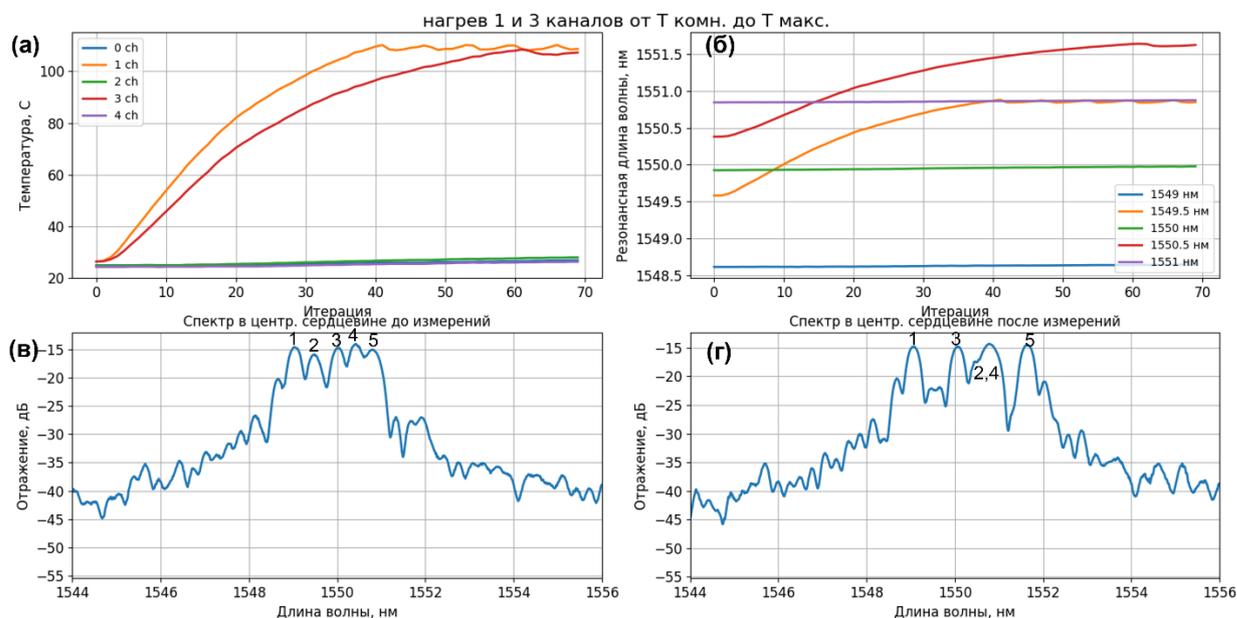


Рис. 5.3 (а) Изменение температуры, (б) сдвиг резонансных длин волн ВБР в боковых сердцевинах, спектр отражения ВБР в центральной сердцевине (в) до и (г) после изменения температуры.

Для тестирования также рассматривались два соседних канала (1 и 2), при этом 1-ый нагревался от 70 °С до 110 °С, а 2-ой охлаждался от 70 °С до 27 °С. Изменение температуры приведено на Рис. 5.4а. Видно, что нагрев 1-ого канала не влияет на охлаждение 2-ого канала. На Рис. 5.4б приведены сдвиг резонансных длин волн ВБР в боковых сердцевинах. 1 канал соответствует коротковолновому резонансу 1549,5 нм, а 2 канал - длинноволновому резонансу 1550 нм. Таким образом, наблюдаем ситуацию при которой резонансы различных каналов пересекаются по длине волны, что соответствует наложению пиков в спектре отражения массива ВБР, записанного в центральной сердцевине (Рис. 5.4в,г). Именно такие ситуации невозможно отследить с помощью стандартного метода на основе определения резонансной длины волны отражения каждой ВБР в массиве, но возможно проанализировать методами машинного обучения.

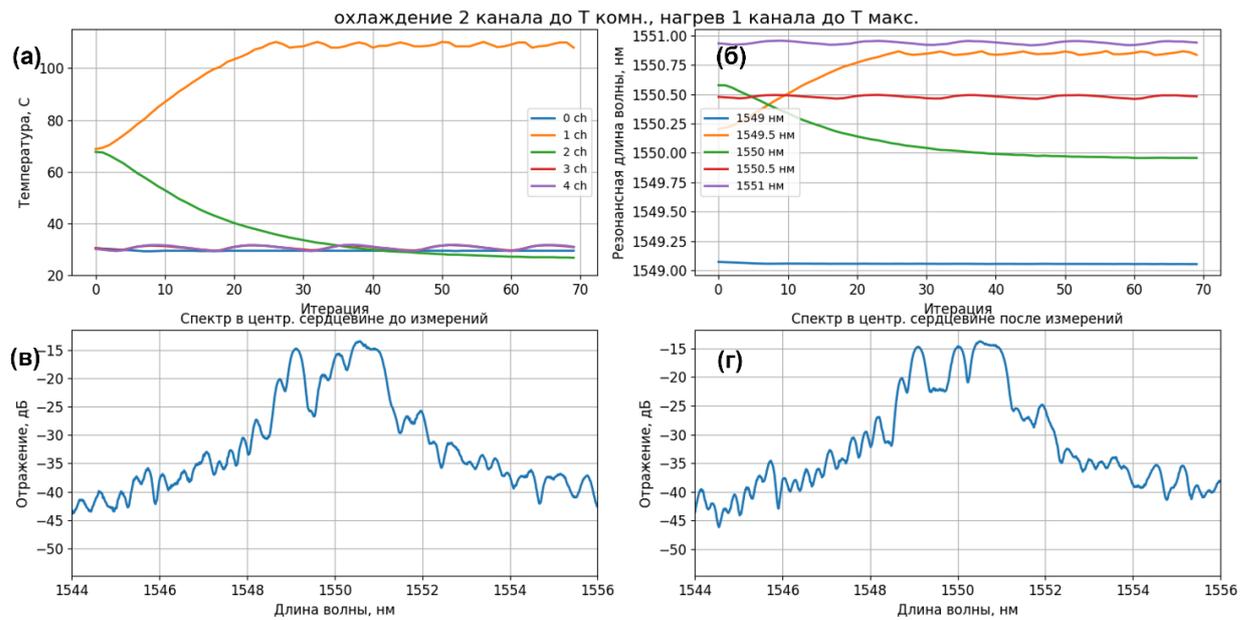


Рис. 5.4 (а) Изменение температуры, (б) сдвиг резонансных длин волн ВБР в боковых сердцевинах, спектр отражения ВБР в центральной сердцевине (в) до и (г) после изменения температуры.

Для обучения алгоритмов машинного обучения был создан набор экспериментальных данных, представляющий собой временные ряды спектральных сдвигов резонансных пиков ВБР и соответствующих им спектров отражения сенсора с плотно записанными ВБР. Для набора экспериментальных данных случайным образом задавались температуры из диапазона 27-110 °С на 5 элементах нагревателей и последовательно регистрировались сдвиги резонансов ВБР каждую секунду до момента стабилизации температуры на каждом нагревательном элементе. Статистика выбора конкретной температуры нагревателя соответствовала равномерному распределению. В результате было проведено измерения 100 различных температурных комбинаций с разной динамикой изменения температуры. На рис 5.5 представлена гистограмма, зарегистрированных спектральных резонансных сдвигов ВБР при наборе экспериментальных данных. Для определения распределения температуры по спектральному отклику сенсора с плотно записанными ВБР была выбрана архитектура длинной цепи элементов краткосрочной памяти (Long short-term memory, LSTM). Данная разновидность рекуррентных нейронных сетей позволяет эффективно находить скрытые зависимости во временных рядах, при этом имеет устойчивость к таким нежелательным эффектам как затухающий или взрывающийся градиент в процессе обучения нейронной сети.

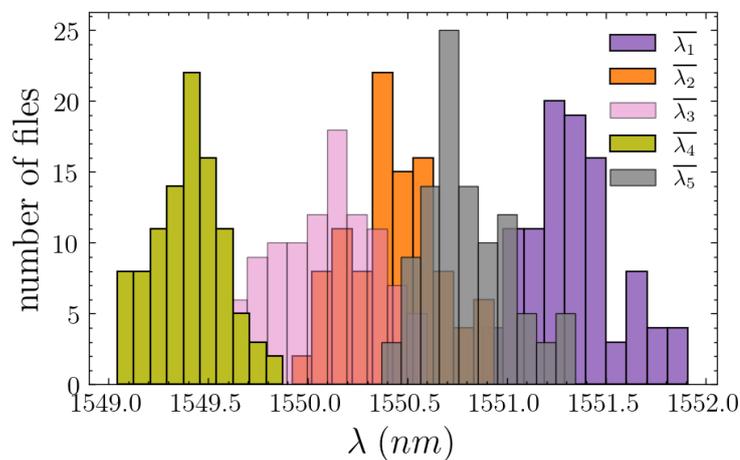


Рис. 5.5 Гистограмма, зарегистрированных спектральных резонансных сдвигов ВБР при наборе экспериментальных данных.

Для реализации LSTM сети использовалась программная библиотека Pytorch, написанная на языке Python. В качестве входного массива для нейронной сети выступает массив оптического спектра сенсора с плотно записанными ВБР, выходной слой сети представляет собой 5 значений спектральных сдвигов ВБР, записанных в боковых сердцевинах. Архитектура LSTM включала три скрытых слоя размерностью 64. Для обучения нейронной сети производилась нормировка входных данных – интенсивность спектра отражения сенсора смещалась на среднюю интенсивность и делилась на средне квадратичное отклонение по всему набору обучающих данных. Выходные данные, спектральные сдвиги резонансов ВБР нормировались таким же способом для каждого ВБР отдельно.

Далее экспериментальные данные делились на обучающую и валидационную выборки для процедуры обучения LSTM – нейронной сети и верификации обучения. Рис. 5.6 представляет эволюцию средней абсолютной ошибки определения резонансного сдвига каждой ВБР решетки по спектру отражения сенсора.

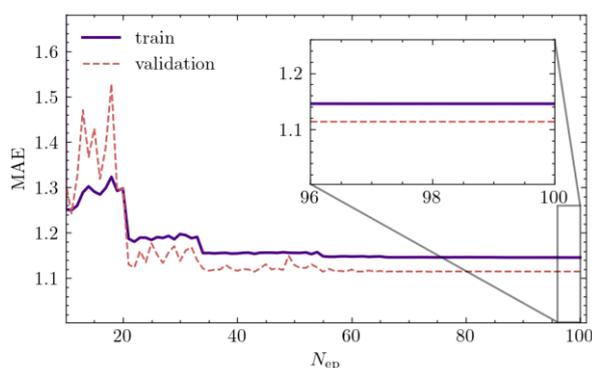


Рис.5.6. Кривая обучения нейронной сети для обучающей и валидационной части экспериментальных данных.

Средняя ошибка определения спектрального сдвига резонанса ВБР на обучающих данных превышает 1 нм. Таким образом, величина ошибки не позволяет с достаточной точностью определять спектральные сдвиги ВБР. Наиболее вероятной причиной недостаточной эффективности нейронной сети является малый объем обучающих данных по сравнению с размерностью решаемой задачи: по 4000 точкам спектра отражения сенсора необходимо предсказать 5 значений спектральных сдвигов резонанса ВБР. В дальнейшем планируется увеличить статистическую значимость различных комбинаций температур, подаваемых на нагреватели для увеличения точности нейронной сети. Также планируется провести интенсивную оптимизацию гиперпараметров архитектуры нейронной сети, в том числе количество скрытых слоев, их размерности и ширину временного окна временных рядов, подаваемых на вход нейронной сети, что в совокупности позволит более точно определять спектральный сдвиг резонансной длины волны ВБР.

5.2. Исследование возможности применения метода комбинационного рассеяния света с использованием многомодовых волокон и волоконных лазерных систем для мониторинга замораживаемых биообъектов.

В результате работы пост-дока Конрада Ролле в 3й год проекта предложена техника само-сдавливающегося быстрого замораживания (SPRF), обладающая рядом преимуществ перед традиционной техникой замораживания под высоким давлением (HPF), используемой для криоконсервации биообъектов. Были проведены исследования вопроса о том, как концентрация криопротекторов (CPA) меняет давление внутри отпаянных капилляров, и как с учетом этого проводить эксперименты по SPRF замораживанию. Было предложено ввести в капилляр оптический зонд в виде многомодового световода для мониторинга образца в процессе замораживания по комбинационному рассеянию (КР) света гексагонального льда, чувствительному к давлению. Это позволило впервые оценить

изменения давления в процессе SPRF. Выбрав dimethyl sulfoxide (DMSO) в качестве модельного криопротектора (CPA), было продемонстрировано, что давление падает до нуля, когда концентрация DMSO превышает 15 wt %. Была предложена и реализована архитектура капиллярного образца с двумя камерами (рис.5.7), разделенными перегородкой, позволяющей выровнять давление (но не концентрации DMSO). Эксперименты показали, что давление и концентрация DMSO в камере с MMC волоконным выводом может варьироваться независимо, что подтверждается данными дифференциальной сканирующей калориметрии, и таким образом улучшить КР мониторинг замораживаемых образцов в процессе SPRF замораживания/витрификации биообъектов.

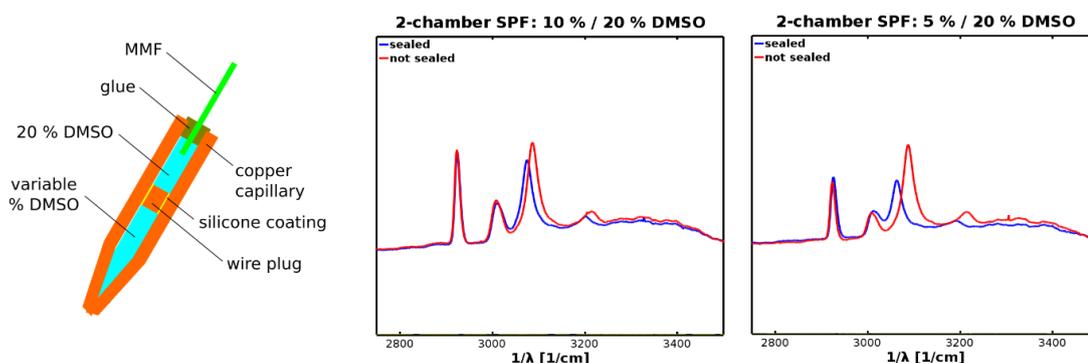


Рис. 5.7. Дизайн само-сдавливающейся двойной камеры медного капилляра с MMC волоконным выводом (слева) и характерные спектры КР при температуре жидкого азота: концентрация DMSO постоянна (20 wt %) в камере с волоконным выводом и изменяется в торцевой камере, синие спектры соответствуют отпаянным капиллярам, красные спектры сняты после разогрева, открывания и перезамораживания того же образца.

Был также разработан каскадный ВКР-лазер на основе фосфосиликатного волокна, генерирующий миллисекундные импульсы с энергией 8.5 мДж на длине волны 1475 нм, предназначенный для сверхбыстрого лазерного отогрева витрифицированных микроскопических образцов биообъектов с линейным размером ~ 100 мкм (к которым относятся, например, преимплантационные эмбрионы). Накачка лазера осуществляется иттербиевым волоконным лазером с длиной волны 1061 нм в импульсном режиме, который задается модуляцией тока лазерных диодов. Рассмотрены и оптимизированы спектральные и мощностные характеристики излучения (рис.5.8) для импульсов длительностью ~1 мс и частотой повторения 100 Гц. Показано, что максимальная мощность ВКР-генерации на центрах P₂O₅ в каскадном резонаторе из двух пар ВБР (1235 и 1475 нм для 1го и 2го стоксовых порядков ВКР) ограничивается конкурирующим процессом рассеяния на центрах SiO₂ (1113 нм для 1го порядка) в фосфосиликатном волокне.

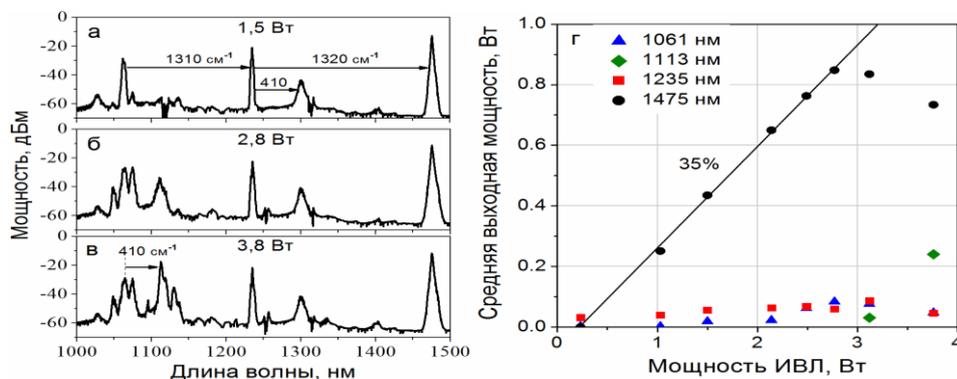


Рис. 5.8. Выходной спектр ВКР-лазера при средней мощности ИВЛ накачки 1.5 Вт (а), 2.8 Вт (б) и 3.8 Вт (в); (д) Выходная мощность излучения на длине волны 1063 нм (треугольники), 1113 нм (ромбы), 1234 нм (квадраты) и 1475 нм (кружки) в зависимости от мощности ИВЛ на входе.

Данный лазер был протестирован в экспериментах по лазерному разогреву преимплантационных эмбрионов мыши (совместно с Сектором криоконсервации и репродуктивных технологий ИЦиГ СО РАН). Для этого был создан экспериментальный стенд с автоматизированной системой быстрого переноса замороженного образца в теплый раствор, позволяющий в процессе облучать эмбрион одиночным лазерным импульсом. В ходе эксперимента эмбрионы помещались на держатель с отверстием диаметром 120 мкм, куда фокусировался лазерный пучок. После разогрева эмбрионы перемещались в раствор с низкой концентрацией криопротектора, в котором анализировалась их морфология. Было исследовано влияние импульсов с разной длительностью, испытаны разные протоколы криоконсервации, основанные на применении проникающих криопротекторов (смесь DMSO+пропиленгликоль+сахароза) и непроникающих криопротекторов (фиколл+сахароза). Известно, что при использовании проникающих криопротекторов эмбрионы могут успешно криоконсервироваться, однако они токсичны. Использование непроникающих криопротекторов снижает токсичность среды, но для успешного отогрева образцов необходим сверхбыстрый разогрев лазерным излучением.

В предварительном контрольном эксперименте на установке было показано, что без лазерного излучения при использовании проникающих криопротекторов эмбрионы выживают. В общей сложности было проведено 8 экспериментов с эмбрионами, общий пул - 82 эмбриона. В ходе экспериментов были выявлены ряд факторов, влияющих на выживаемость эмбрионов при лазерном разогреве. Мощность ВКР-лазера по оценке достаточна для отогрева образца объемом $2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ с температуры жидкого азота. Однако микроразмерная капля с эмбрионами окружена холодным держателем, поэтому сразу после лазерного разогрева может происходить охлаждение капли за счет прямого контакта с держателем. Таким образом, при малых экспозициях (<1 мс) наблюдается недогрев, связанный с охлаждением эмбрионов из-за малой теплоемкости образца и большой площади контакта с держателем, а при больших экспозициях (проверено до ~2мс) - перегрев, приводящий к повреждениям, ассоциируемым с лазерным излучением: повреждение оболочек, потемнение эмбриона.

Таким образом, реализованное решение волоконного ВКР-лазера ограничено энергией 10 мДж, эксперименты по разогреву микрообъектов с такой энергией импульса не дали однозначно положительного результата. Основным ограничителем малых образцов является, по-видимому, высокое соотношение площади к объему, из-за которого образец быстро охлаждается сразу после лазерного импульса. Поэтому было решено создать многомодовый твердотельный лазер, способный генерировать 1 мс импульсы энергией до 5 Дж на длине волны 1535 нм. Этой энергии достаточно, чтобы выполнить процедуру разогрева образцов со стандартным объемом (до 1 мм^3), используемым в криоконсервации. В этом решении будет увеличена теплоемкость образца и соотношение объема к площади. Начата подготовка новых экспериментов по лазерному разогреву икринок рыбок *Danio* с более мощным лазером, которые планируется завершить на следующем этапе.

6. Дополнительные исследования

Дополнительно исследовались вызванные фс импульсами спиральные плазменные филаменты при распространении в ММС и возможности их использования для записи спиралевидных 3D структур показателя преломления, развивались методы модовой декомпозиции для будущего анализа многомодовых пучков, генерируемых в разных схемах резонаторов ММ ВКР лазера с внутриволоконными и торцевыми структурами, возможности записи ВБР и массивов ВБР для селекции мод в многомодовых висмутовых световодах, возможности применения массивов ВБР для 2D тактильных сенсоров с использованием методов машинного обучения, которые будут продолжены на следующем этапе проекта.

По результатам 3 года проекта опубликованы 14 статей WoS/Scopus [1-14] (из них 2 – в журналах 1 квартиля [1,2], 2 – 2 квартиля [3,4], а также 4 публикации, индексируемых РИНЦ [15-18], 3 статьи отправлены в журналы 1 квартиля [19-21], участниками проекта сделаны 22 доклада на ведущих конференциях (из них 2 – пленарных, 5 – приглашенных), проведена Международная школа молодых ученых, защищена 1 кандидатская диссертация, в рамках лаборатории организованы 2 молодежные тематические группы.

Основные публикации:

1. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.V. Dostovalov, E.V. Podivilov, S.A. Babin. Spectrum collapse in a 7-core Yb-doped fiber laser with an array of fs-inscribed fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.* **48** (13) 3603-3606 (2023). <https://doi.org/10.1364/OL.493139> Q1
2. A. Dostovalov, A. Wolf, Zh. Munkueva, M. Skvortsov, S. Abdullina, A. Kuznetsov and S. Babin. Continuous and discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femtosecond pulses in singlemode and multimode fibers. *Optics & Laser Technology* **167**, 109692 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109692> Q1
3. A. G. Kuznetsov, A. A. Wolf, Zh. E. Munkueva, A. V. Dostovalov, S.A. Babin. Multimode graded-index fiber with random array of Bragg gratings and its Raman lasing properties. *Fibers* **11**, 48 (2023). <https://doi.org/10.3390/fib11060048> Q2
4. K. Rolle, K.A. Okotrub, I.V. Zaytseva, S.A. Babin, N.V. Surovtsev. Self-pressurized rapid freezing at arbitrary cryoprotectant concentrations. *J. of Microscopy* **292** (1), 27-36 (2023). doi: 10.1111/jmi.13220 Q2
5. Е.А. Евменова, А.Г. Кузнецов, К.А. Окоотруб, С.А. Бабин. Волоконный ВКР-лазер с длиной волны 1,48 мкм для сверхбыстрого отогрева криоконсервированных микробиологических объектов. *Квант. Электр.* **53** (8) 661-666 (2023).
6. A. G. Kuznetsov, A. A. Wolf, O. N. Egorova, S. L. Semjonov, A. V. Dostovalov, E. V. Podivilov, S. A. Babin. Influence of core coupling on spectral characteristics of 7-core Yb-doped fiber laser with fs-inscribed FBGs. *J. Phys. Conf. Ser.* (accepted, in print).
7. А.Г. Кузнецов, А.А. Вольф, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, А.В. Достовалов, Е.В. Подивилов, С.А. Бабин. Сужение спектра генерации в 7-сердцевинном волоконном лазере с массивом ВБР, записанном фс-импульсами. *Квант. электр.* (принята, в печати).
8. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, E.V. Podivilov, S.A. Babin, Narrowband lasing in a multicore Yb-doped fiber with fs-inscribed FBG array. *Tech. Digest Series* (Optica Laser Congress), Optica Publishing Group, paper JM4A.7 (2023). doi: [10.1364/ASSL.2022.JM4A.7](https://doi.org/10.1364/ASSL.2022.JM4A.7)
9. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, Zh. Munkueva, S.A. Babin. Raman lasing in multimode diode-pumped graded-index fiber with fs-inscribed 3D random FBG array. *Proc. SPIE* v.12405: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XXII, paper 124050L doi: 10.1117/12.2650993
10. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, Zh. Munkueva, A.V. Dostovalov, S.A. Babin. Optimization of random FBG array in multimode graded-index fiber for Raman lasing with improved spatio-spectral characteristics. *Proc. SPIE*, vol.12760: Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XIV, 127600L (2023) <https://doi.org/10.1117/12.2689180>
11. D. S. Kharenko, N. Koliada, M. Gervaziev, I. Chekhovskoy, N. Bochkarev, A. Revyakin, G. Patrin, O. Shtyrina, M. Fedoruk, S. Babin. Nonlinear pulse dynamic in a weak coupled

- normal dispersion multicore fiber. *Proc. SPIE*, vol.12775: Quantum and Nonlinear Optics X, 127750W (2023) <https://doi.org/10.1117/12.2688542>
12. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, Zh. Munkueva, A.V. Dostovalov, S.A. Babin. Raman lasing in multimode diode-pumped graded-index fiber with fs-inscribed random structures. *Technical Digest Series (CLEO/Europe-EQEC)*, Optica Publishing Group, paper CJ-P.20 (2023). doi 10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231506
 13. S.A. Babin. Femtosecond laser structuring of multicore and multimode fibers for laser applications. 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (*PIERS*) *Proceedings*, 10221481 (2023), IEEE Publ. (2023). doi:10.1109/PIERS59004.2023.10221481
 14. F. Mangini, M. Ferraro, M. Zitelli, A. Niang, T. Mansuryan, A. Tonello, V. Couderc, A. De Luca, S. A. Babin, F. Frezza, S. Wabnitz. Helical plasma filaments in optical fibers. *Technical Digest Series (CLEO 2023)*, Optica Publishing Group, paper JTu2A.111 (2023). https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2023.JTu2A.111
 15. Мункуева Ж.Э., Бронников К.А., Достовалов А.В., Бабин С.А. ДАТЧИК 3D ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ВОЛОКНА С ЗАПИСАННЫМИ РАСПРЕДЛЕННЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ОТРАЖАТЕЛЯМИ *Фотон-экспресс*, №3 (190), 269-270 (2023). doi 10.24412/2308-6920-2023-6-269-270
 16. Антропов А. А., Харенко Д. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОЧИСТКИ В МНОГОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ НА ВЫХОДЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ МОДЫ. *Фотон-экспресс*, №3 (190), 198-199 (2023). Doi 10.24412/2308-6920-2023-6-198-199
 17. Гервазиев М.Д., Харенко Д.С., Подивилов Е.В., Манджини Ф., Ферраро М., Дзителли М., Вабниц С., Бабин С.А. ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА КЕРРОВСКОЙ САМОЧИСТКИ В МНОГОМОДОВОМ ГРАДИЕНТНОМ ВОЛОКНЕ МЕТОДОМ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ. *Фотон-экспресс*, №3 (190), 251-252 (2023). doi 10.24412/2308-6920-2023-6-251-252
 18. А.Г. Кузнецов, А.А. Вольф, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, А.В. Достовалов, Е.В. Подивилов, С.А. Бабин. СУЖЕНИЕ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ В 7-СЕРДЦЕВИННОМ УВ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С МАССИВОМ ВБР, ЗАПИСАННЫМ ФС-ИМПУЛЬСАМИ. *Фотон-экспресс*, №3 (190), 506-507 (2023).
 19. A. Dostovalov, A. Kokhanovskiy, E. Golikov, A. Revyakin, Z. Munkueva, D. Kharenko and S. Babin. Fiber Bragg Gratings inscription assisted by spatial light modulator. *Optics Letters* (submitted) Q1
 20. N. Shabalov, A. Wolf, A. Kokhanovskiy, A. Dostovalov and S. Babin, Soft 2D tactile sensor based on fiber Bragg gratings and machine learning algorithms, *Sensors and Actuators: A. Physical* (submitted) Q1
 21. S. Firstov, A. Dostovalov, A. Vakhrushev, A. Khegai, A. Umnikov, M. Melkumov, S. Babin, E. Firstova, K. Riumkin, S. Alyshev. Cladding-pumped laser and amplifier for E- and S-bands based on multimode bismuth-doped GRIN fibers: toward “watt-level” output power. *Optics Letters* (submitted) Q1