

## **Краткий научный отчет за 2 год выполнения проекта по гранту РФФ 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 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).

Фактически проделанная работа соответствует плану на 2 год. Краткое описание выполненных работ по пунктам плана и полученных результатов приведено ниже.

### **1) Исследование возможностей фокусировки многомодового излучения в выбранную моду МСС с интегрированными структурами, в т.ч.**

#### **1.1. Структурирование и фокусировка импульсного излучения в моды пассивного 7-сердцевинного МСС**

В рамках данного подпункта решалась проблема ввода импульсного лазерного излучения во все сердцевинны МСС одновременно с контролем таких параметров вводимого в волокно излучения как его мощность и фаза. Один из наиболее удобных способов провести данный эксперимент – выполнить процесс структурирования пучка с помощью пространственного модулятора (ПМ) света и сфокусировать структурированный пучок во все сердцевинны одновременно.

За отчётный период выполнен полный перечень запланированных работ от поиска наиболее подходящих алгоритмов задания фазовой маски для структурирования, проверки свойств после структурирования, до его фокусировки в МСС и измерения характеристик излучения на выходе. Под структурированием излучения подразумевается разделение падающего лазерного пучка на несколько отраженных пучков с заданной долей мощности и пространственным распределением, соответствующем геометрии МСС (Рис.1.1). Выполнить такое разделение можно при помощи ПМ, играющего роль дифракционного оптического элемента. Для получения некоторого требуемого распределения поля в фокальной плоскости линзы нужно выбрать подходящую, варьируя ее в каждой точке. В случае дискретного пиксельного экрана ПМ число варьируемых параметров равно числу пикселей экрана ( $N \sim 10^6$ ). Однако это число можно существенно уменьшить, исходя из того, что интерференционный узор должен состоять из небольшого количества отдельных фокусных пятен. За основу был взят поточечный алгоритм Гершберга-Сакстона с весами и модифицирован для получения возможности управлять интенсивностями отдельных ярких пятен. Теоретические выкладки проверялись численно. Для сгенерированных фазовых масок выполнялось двумерное преобразование Фурье, чтобы смоделировать действие Фурье-линзы и распространение структурированного лазерного пучка до её фокальной плоскости. Такая модель показывает хорошее соответствие между целевыми и рассчитанными интенсивностями. Разница между заданными и измеренными значениями не превышала 2%, а для мощностей — 10%.

Для сравнения модели с экспериментальным результатом были сделаны фотографии структурированного пучка в фокусе линзы (см. Рис. 1.1). Измерено относительное расстояние между пучками структурированного излучения. Оптимизация параметров структурированного излучения вкуче с прецизионной юстировкой положения МСС позволили сфокусировать излучение одновременно во все моды МСС (см. Рис.1.2). Для примера также приведены случаи при вводе только в крайнюю или центральную сердцевину. Видно, что при выбранной длине МСС (~10 см) соседние сердцевинны успевают провзаимодействовать.

Также была измерена длительность импульсов на выходе МСС. Оказалось, что она зависит от конфигурации поля на входе в МСС. Так при введении излучения только в центральную сердцевину длительность на выходе составила 210 фс, а при использовании всех сердцевин в результате взаимодействия между ними она уменьшилась до 175 фс. Таким образом экспериментально показана не только возможность фокусировки излучения в МСС, но и его временного сжатия.

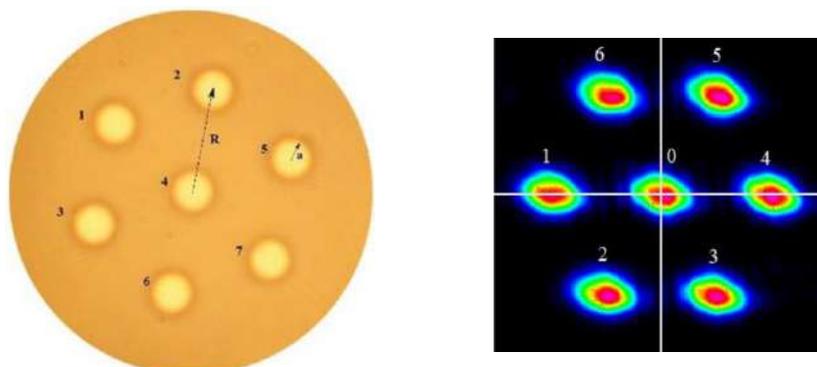


Рис. 1.1. Слева: Фотография 7-сердцевинного оптического волокна. Справа: изображение структурированного излучения при заданной одинаковой мощности в каждом пучке.

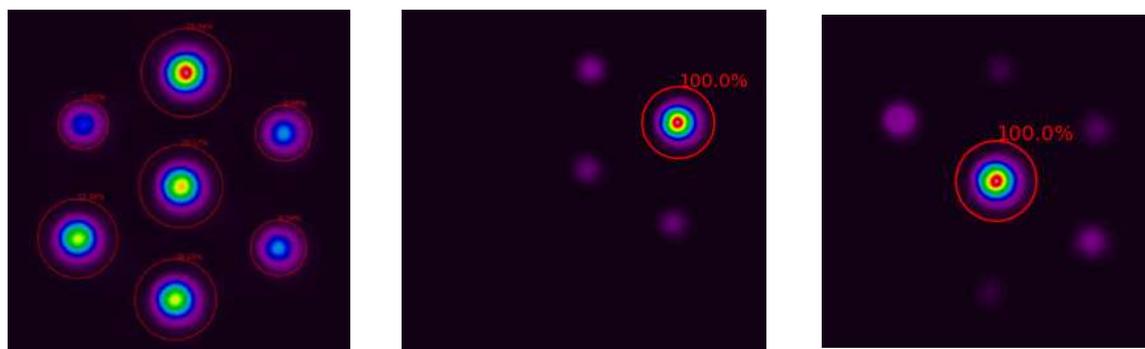


Рис. 1.2. Распределение интенсивности излучения на выходе МСС при различных вариантах заведения (слева направо: все сердцевинны, верхняя правая, центральная).

## 1.2. Концентрация (фокусировка) излучения в одну моду при генерации в активном 4-сердцевинном МСС с интегрированными структурами

Для эксперимента был собран полностью волоконный лазер на основе активного 4х-сердцевинного МСС, легированного Yb (рис.1.3). Резонатор лазера был образован 4% френелевским отражением от выходного торца световода и высокотражающими волоконными брэгговскими решетками (ВБР), которые были записаны поточечно фемтосекундным импульсами в каждой из сердцевин вблизи входного торца световода. Спектры высокоотражающих (>80%) ВБР имели близкие ширины (0.5-0.7 нм) и близкую центральную длину волны около 1030.5 нм (с относительными сдвигами 0.2-0.5 нм). Накачка осуществлялась в оболочку МСС со стороны входного торца лазерным диодом с длиной волны 976 нм и мощностью до 5.5 Вт через многомодовое волокно, которое приваривалось к 4-сердцевинному МСС со стороны ВБР. Активное волокно длиной 4.15 м наматывалось на катушку различного диаметра: 6.5, 9, 21 см.

Обнаружено, что при диаметре намотки 21см сердцевинны ведут себя независимо, а мощность распределяется практически равномерно по всем сердцевиннам, тогда как при диаметре намотки 6,5см генерация лазерного излучения осуществляется преимущественно в одной из сердцевин (рис.1.4). Хотя при такой намотке активного волокна общая мощность выходного излучения из всех сердцевин снижается, выходная мощность для выбранной сердцевинны возрастает (с 100 мВт при диаметре намотки 21 см до 175 мВт при диаметре намотки 6.5 см и 5.25 Вт накачки), составляя >92 % от общей выходной мощности. Проведен анализ экспериментальных данных и предложен механизм, объясняющий

концентрацию (фокусировку) излучения в одну из сердцевин, основанный на изгибных напряжениях в активном многосердцевинном волокне, приводящих к деформации распределения полей мод накачки и смещению максимума интенсивности в одну из сердцевин, что приводит к более эффективному поглощению излучения накачки и как следствие к лазерной генерации преимущественно в данной сердцевине.

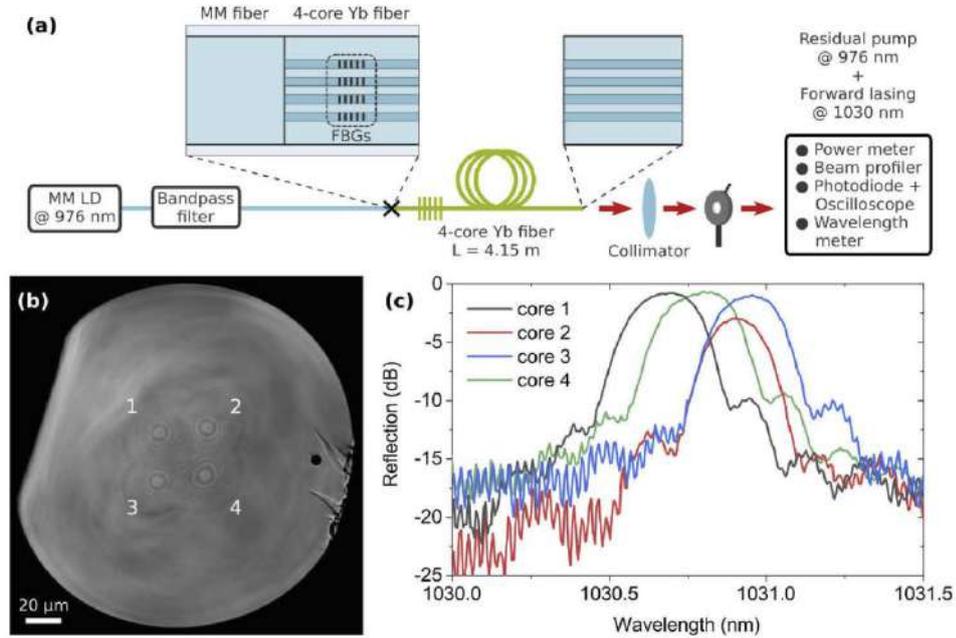


Рис. 1.3. (а) Схема лазера на основе 4-х сердцевинного активного Yb-световода, (б) поперечный срез волокна 4-х сердцевинного активного волокна, (в) спектры отражения высокоотражающих ВБР.

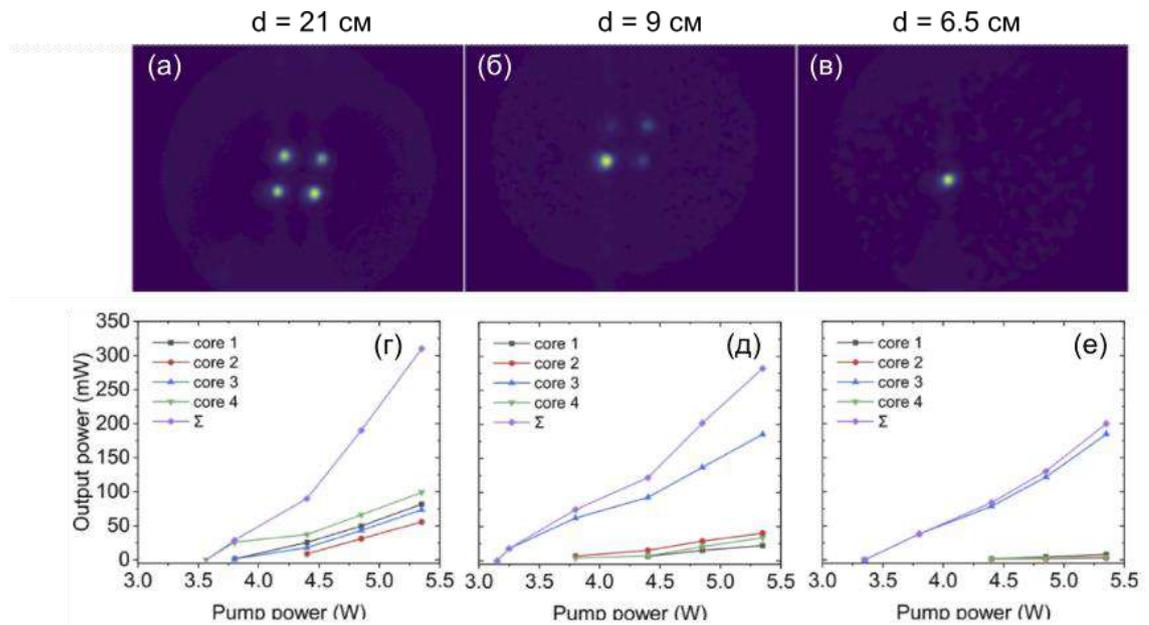


Рис. 1.4. Распределение интенсивности выходного излучения (а-в) и мощность (г-е) 4-сердцевинного Yb лазера суммарно из всех сердцевин и отдельно для каждой из них (1-4) при максимальной мощности накачки (5.5 Вт) и различных диаметрах намотки активного волокна: 21 см (а,г), 9 см (б,д), 6,5 см (в,е).

### 1.3. Получение и исследование генерации в активном 7-сердцевинном МСС с интегрированными структурами

В 7-сердцевинном волоконные световоде, изготовленных методом сверления в Научном центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, ИОФ РАН (г. Москва), фс импульсами поточно записывался массив высокоотражающих ВБР (Рис.1.5а). Все ВБР имели идентичные параметры – длину 2 мм и период  $\sim 0.733$  мкм, что соответствовало резонансной длине волны  $\sim 1064$  нм во втором порядке. ВБР совмещались в продольном

направлении волокна, в боковых сердцевинах направление записи было азимутальным. После записи массива ВБР в МСС измерялись спектры отражения в каждой из сердцевин (Рис. 1.5b). Ширина спектра отражения на уровне -3 дБ для отдельной ВБР находилась в диапазоне ~0.5-0.65 нм при коэффициенте отражения >90%, максимумы спектров некоторых ВБР имели сдвиг относительно центра (1064 нм) в пределах ширины спектра.

При длине активного МСС ~10 м, максимальная выходная мощность составила 33 Вт при 50 Вт накачки. Генерация стартует с центральной сердцевины, но уже при мощности ~0.4 Вт распределяется между всеми сердцевинами практически равномерно и не меняется с ростом суммарной мощности. Спектр выходного излучения лазера, представляющий собой сумму спектров от каждой из сердцевин резко уширяется до 0,15 нм при 0,4 Вт (когда все сердцевины начинают генерировать и затем практически не меняется с ростом мощности, достигая 0,22 нм при 33 Вт (Рис.1.5c). В то же время спектр излучения из отдельной сердцевины имеет достаточно малую ширину (~0,05 нм) при малой мощности, но уширяется с ростом мощности до 0,15 нм. Таким образом, разница в ширине спектров из отдельной сердцевины и суммарного излучения становится существенно меньше изначальной разницы в резонансных длинах волн отдельных ВБР. Данную разницу в спектральной ширине возможно еще уменьшить за счет записи ВБР с совпадающими резонансными длинами волн отражения или использования волокна с большим коэффициентом связи между сердцевинами. Предварительные эксперименты показали, что при введении сильной связи между сердцевинами МСС происходит дополнительное сужение спектра (при той же мощности лазера 33 Вт). Детальное теоретическое и экспериментальное исследование данного эффекта будет проведено на следующем этапе.

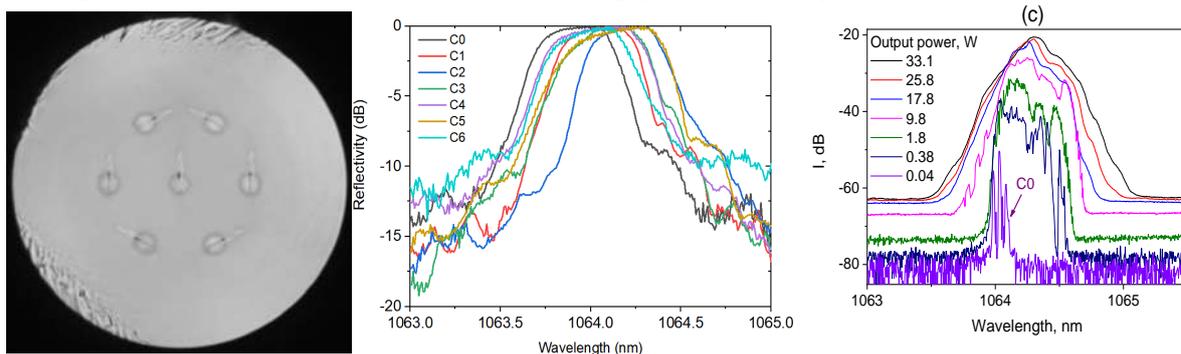


Рис. 1.5. Микрофотографии торца МВС FORC 7С-YВ #1 с записанными ВБР(а), спектры ВБР (b) и генерируемого излучения (с).

## 2) Исследование возможности переноса технологии 3D интерферометрических отражателей в МСС на ММ световоды и их использования для селекции мод в ММС резонаторах, исследование распределения по модам в градиентном и ступенчатом световодах, в т.ч.

### 2.1. Доработка установки фс-записи для 3D модификации

В ходе выполнения работ по проекту в части создания 3D структур показателя преломления была выполнена доработка узлов станции записи. А именно, был модернизирован ферульный узел записи, в котором круглые ферулы были заменены на квадратные, которые позволили осуществлять более равномерную засветку области наблюдения, что позволили существенно улучшить обратную связь подстройки положения волокна в процессе записи и записывать ВБР с спектром, близким к теоретическому. Кроме того, система подстройки положения волокна была оснащена 3D пьезопозиционером с большим ходом (200 мкм), что на порядок больше используемого ранее. Это позволяет реализовывать различные конфигурации 3D структур внутри сердцевины ММС с большим диаметром сердцевины. Были записаны пробные структуры показателя преломления внутри ОМС со сканированием в поперечном направлении 20 мкм и 60 мкм (рис. 2.1). Варьируя соотношения скорости протяжки волокна и частоты сканирования пьезоподвижки, можно

создавать структуры с различными параметрами по периоду и углам наклона штрихов по отношению к сердцевине волокна. При этом модификация в оболочке имеет плавное изменение показателя преломления без дефектов, что открывает возможность записи регулярных однородных структур в ММС с чисто кварцевой сердцевиной. С использованием модернизированной установки была проведена фс-запись 3D структур в ММС с градиентным и ступенчатым профилем преломления, которые применялись в описанных ниже лазерных экспериментах.

Кроме того, была реализована схема записи с круговым позиционером, размещенном на линейном, который позволяет вращать волокно с высокой точностью при одновременном перемещении волокна вдоль сердцевины. Тем самым, возможно записывать спиралевидные структуры показателя преломления. Также были начаты работы по фемтосекундной 3D модификация показателя преломления с использованием пространственного модулятора (ПМ) света. ПМ может применяться как для компенсации aberrаций на криволинейных поверхностях, так и для формирования более сложной 3D геометрии области модификации показателя преломления (например, в виде кольца) для записи в многомодовом световоде. Конкретные примеры реализаций сложных структур с помощью данных технологий будут продемонстрированы на следующем этапе работ.

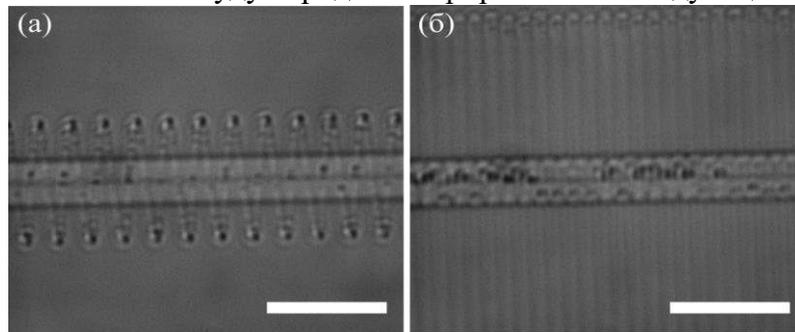


Рис. 2.1. Изображение 3D структуры показателя преломления внутри волокна, при записи со сканированием в поперечном направлении: 20 мкм (а) и 60 мкм (б). Масштабная линейка – 20 мкм.

## 2.2. Запись 3D интерферометрических отражателей на основе случайного массива ВБР в ММС и их использование в ММС резонаторах ВКР-лазера

Для записи 3-мерных массивов ВБР мы использовали ММС 100/140 мкм ( $NA=0.29$ ) с градиентным профилем показателя преломления. Запись массивов производилась в трёх вариантах (Рис. 2.2): 1D) все ВБР позиционированы в центр сердцевины ( $\Delta x=\Delta y=0$  мкм), 2D) ВБР случайным образом распределены по одной из поперечных координат ( $\Delta x=10$  мкм,  $\Delta y=0$  мкм), 3D) ВБР случайным образом распределены в двух поперечных направлениях ( $\Delta x=\Delta y=10$  мкм). Длина каждой ВБР была 0.5 мм, продольное расстояние между ВБР  $\sim 0.7$  мм для массива  $N=14$  решеток и примерно в 2 раза меньше для массива  $N=28$ . Период ВБР подбирался таким образом, чтобы резонансная длина волны фундаментальной моды находилась вблизи 976.5 нм - резонансной длины волны фундаментальной моды УФ ВБР, использовавшейся как сильноотражающее зеркало резонатора. Целевым коэффициентом отражения фс-ВБР на длине волны фундаментальной моды был уровень -15 дБ. Для каждого из вариантов массивов было записано по несколько образцов. В отличие от УФ ВБР, у которой в спектре можно различить соседние группы мод, характерные спектры отражения массивов (Рис. 2.3) сильно промодулированы, что обусловлено интерференцией как в группе, так и между группами поперечных мод.

Для проверки характеристик интерферометрического отражателя был исследован ММ ВКР лазер, в котором он использовался в качестве выходного зеркала резонатора. Сначала был собран лазер на основе 1D массива ВБР ( $N=14$ ), записанного в области фундаментальной моды с разными коэффициентами отражения (-22 и -18 дБ), см. Рис.2.3, слева. В случае использования массива ВБР с отражением -18 дБ мощность оказалась существенно выше ( $P=26$  Вт), при этом качество пучка в обоих случаях составило  $M^2=1.9-2.0$  при  $P=5$  Вт. Качество ухудшается до при увеличении мощности  $M^2=2.6-2.7$  ( $P=18$  Вт).

Выходные характеристики лазера с выходным массивом ВБР из 28 отражателей оказались близкими. Т.к. среднее отражение данного массива было -20 дБ, то эффективность ВКР преобразования оказалась средней между предыдущими двумя случаями. Аналогичный эксперимент был проведен с 2D массивом ВБР ( $N=14$ ), когда случайным образом отражатели записывались в плоскости, проходящей через центр волокна (с максимальным разбросом  $\Delta x=10\mu\text{м}$ , спектр на Рис.2.3, центр). Максимальная выходная мощность достигла 28 Вт, а измеренный параметр качества  $M2=2.0-2.1$  (рис. 2.4). И, наконец, был исследован лазер с 3D массивом ВБР ( $N=14$ ,  $\Delta x=\Delta y=10\mu\text{м}$ , спектр на Рис.2.3, справа). Выходная мощность составила 18.4 Вт, а качество пучка  $M2\sim 2.1$ , что чуть хуже, чем у 2D массива ВБР, продемонстрировавшего наилучшие характеристики. Однако, в случае 3D массива возможна дальнейшая оптимизация, что планируется сделать на следующем этапе.

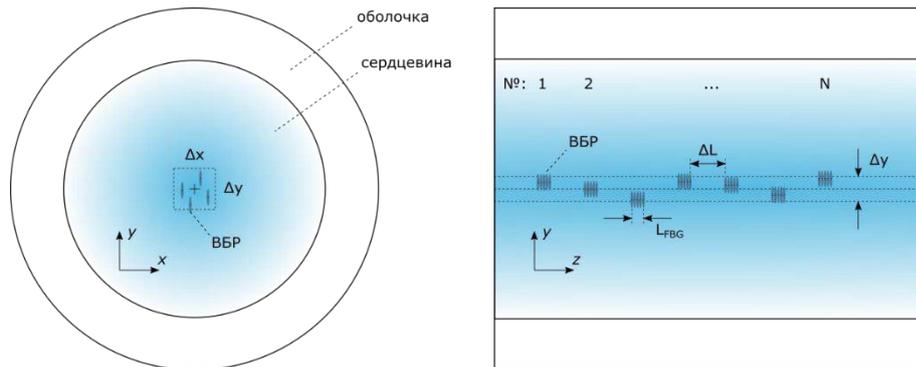


Рисунок 2.2. Схематичное расположение ВБР в сердцевине ММ ВС.

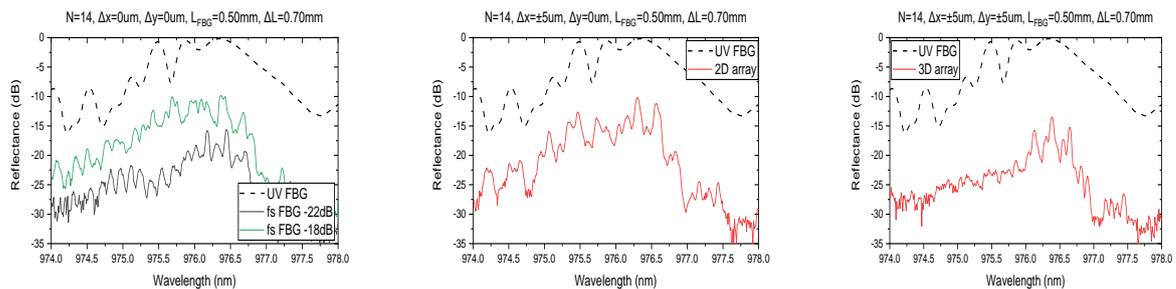


Рис. 2.3. Спектры отражения ВБР в массиве из  $N=14$  элементов с  $\Delta x=\Delta y=0\mu\text{м}$  (1D),  $\Delta x=10\mu\text{м}$  (2D),  $\Delta x=\Delta y=10\mu\text{м}$  (3D).

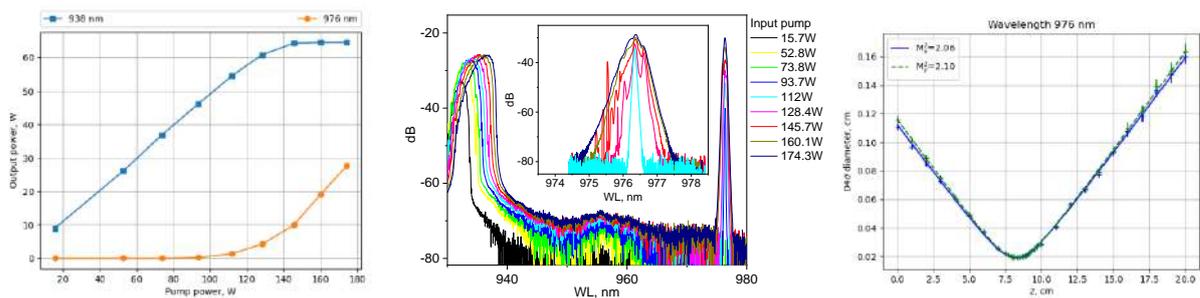


Рис. 2.4. Выходная мощность, спектр и качество пучка  $M2$  в схеме с 2D массивом ВБР.

Таким образом, получена и исследована генерация ВКР лазера на основе ММС с градиентным профилем показателя преломления и сформированными методом фс-записи интерферометрических отражателей на основе 1D-3D случайных массивов коротких ВБР (14-28 элементов). Продемонстрирована возможность селекции массивом низших поперечных мод ( $M2\sim 2$ ) и достижения уровня мощности  $\sim 30$  Вт, что сравнимо с параметрами ВКР лазера с регулярной фс-ВБР со специальным поперечным профилем, полученными на предыдущем этапе.

### 2.3. Исследование распределения по поперечным модам ВКР-лазера в градиентном и ступенчатом световодах

Было продолжено начатое на предыдущем этапе исследование распределения по поперечным модам ВКР-лазера в градиентном световоде методом модовой декомпозиции (МД) с использованием пространственного модулятора (ПМ) света. Используя свойство ортонормированности волоконных мод, разложение Якоби-Ангера и теоремы о преобразовании Фурье, фазовые маски формируются ПМ таким образом, чтобы центр первого порядка дифракции содержал информацию об амплитуде моды или её фазе (относительно некоторой моды). Наличие в ВКР-лазере большого количества некоррелированных продольных мод не позволяет восстановить относительные фазы между поперечными модами. Таким образом, общее время измерения может быть сокращено без ущерба для результатов МД.

При разложении излучения в градиентном МСС используется базис Гаусс-Лагерровских (LG) мод. Каждая мода может быть выражена аналитически и характеризуется своим азимутальным ( $m$ ) и радиальным ( $r$ ) числами, которые образуют так называемое главное квантовое число (ГКЧ) по формуле:  $q = |m| + 2r$ . В аналитическом выражении число мод бесконечно, но на практике оно ограничено границей волокна, на которой параболическая зависимость показателя преломления переходит в константу, соответствующую оболочке. Большинство реальных экспериментов же проводятся при значении ГКЧ меньшим, чем то, когда границы начинают оказывать существенное влияние. Таким образом, по заданному значению ГКЧ однозначно формируется набор мод для разложения. В случае со ступенчатым профилем показателя преломления набор мод формируется иначе. Тут невозможно искусственно «занизить» число используемых мод или выписать простую формулу-аналог ГКЧ ввиду нетривиальной зависимости констант распространения от угловых и радиальных чисел. Значимыми параметрами являются радиус сердцевинки волокна, и разница показателей преломления, через которые можно вычислить так называемую нормированную частоту  $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ . В спецификациях к волокнам обычно указывается параметр  $V$  и радиус, по которым можно вычислить относительную разницу. Именно они и были взяты за основу. Для поиска существующих мод необходимо решить характеристическое уравнение, которое для каждого значения азимутального числа  $m$  позволяет получить набор решений. Таким образом алгоритм состоит из двух частей: 1. Поиск решений характеристического уравнения и формирование набора мод, поддерживаемых волокном; 2. Расчёт распределения поля для каждой найденной моды. Позже рассчитанные распределения используются в алгоритме модовой декомпозиции, который не зависит от вида базисных функций.

Результаты МД для генерируемого пучка ВКР-лазера ( $M^2 \sim 2$ ) с многомодовой ( $M^2 \sim 34$ ) диодной накачкой на основе градиентного МСС с селекцией мод с помощью регулярной фс-ВБР со специальным поперечным профилем приведены на Рис. 2.5 слева. Видно, что при  $P=20$  Вт доля фундаментальной моды составляет около 40%, а более 60% всей энергии пучка сосредоточено в первых трех модах. Это приводит к увеличению яркости стока пучка по сравнению с пучком накачки. В то же время полученные данные показывают, что значение ранее измеренного параметра  $M^2 > 1$  связано со значительным вкладом мод  $LG_{1,0}$  и  $LG_{-1,0}$  в выходной пучок стоковой волны. Сравнивая экспериментальное распределение мод с различными аналитическими выражениями (см. Рис. 2.5 слева), мы видим, что распределение мод в ВКР-лазере гораздо лучше описывается экспоненциальным законом (показано пунктирной линией), чем распределением Рэля-Джинса, которым описывается «термализация» мод в консервативных многомодовых системах. Распределение Рэля-Джинса имеет более слабое падение чем экспоненциальное, что наблюдалось ранее как эффект самоочистки при распространении коротко-импульсных пучков в градиентных световодах.

Качественно иное (также не описываемое обычным распределением Рэля-Джинса) поведение демонстрируют геликоидальные (спиральные) пучки, возникающие при заведении излучения под небольшим углом и с отстройкой от центра волокна. Показано, что таким пучкам присуще наличие углового момента, и метод МД позволил установить,

что его величина сохраняется при увеличении пиковой мощности, а распределение энергии по модам стремится к обобщённому распределению Рэля-Джинса, которое было рассчитано нами (см. Рис. 2.5 справа), включающему как главное квантовое число, так и угловой момент. Примечательно, что визуально эффект самоочистки здесь не наблюдается.

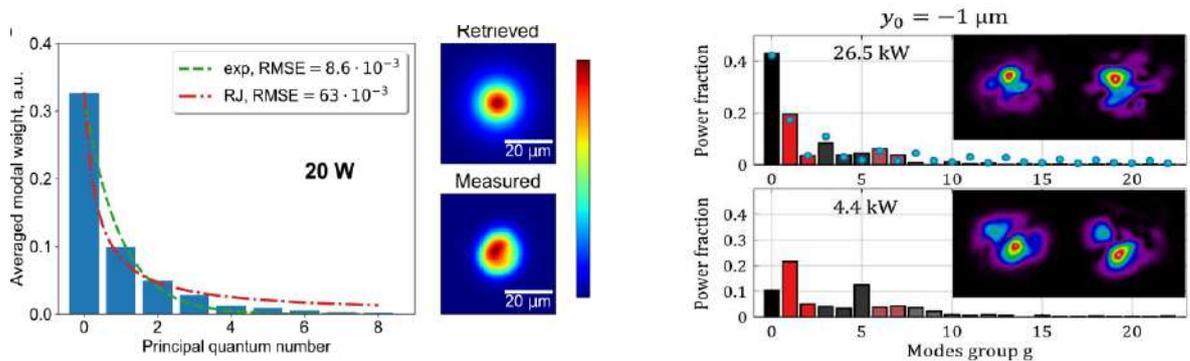


Рис. 1.5 Слева — распределение мощности по модам в стоковом пучке многомодового ВКР-лазера при выходной мощности 20 Вт, отсортированные по их главному квантовому числу и усредненные по степени их вырождения. Штриховые и штрих-пунктирные линии представляют собой аппроксимирующие кривые для экспоненциального закона и распределения Рэля-Джинса соответственно. Справа - экспериментальные результаты (столбцы) МД при отстройке пучка от центра волокна на -1 мкм для различных значений пиковой мощности импульса. Точками обозначены теоретические значения. На вставках — измеренные и восстановленные профили пучков.

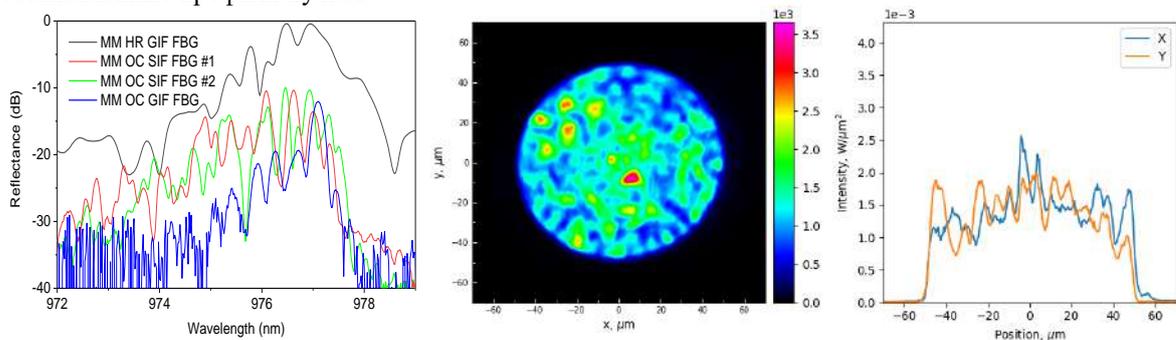


Рис. 2.6. Спектры фс-ВБР (красный, зеленый) и профиль генерируемого пучка в ступенчатом МСС.

Был также исследован профиль стокова пучка, генерируемого в ВКР-лазере с комбинированным резонатором, в котором к градиентному МСС с плотной УФ ВБР добавлялся короткий отрезок ступенчатого МСС с записанной в нем выходной фс-ВБР (мощность составила 10 и 15 Вт при использовании одной #1 и двух #1,2 ВБР, см. рис.2.6). Так как амплитуды разных пиков в спектре ВБР, соответствующие резонансам с разными группами мод, имеют примерно одинаковые величины, генерируемый стоков пучок в ступенчатом МСС заполняет всю сердцевину (рис.2.6 справа) и имеет значительно худшее качество пучка ( $M^2 \sim 14-16$ ) по сравнению с фс-ВБР в градиентном МСС (при качестве пучка накачки  $M^2 \sim 36$ ). При этом распределение мод стремится к равномерному. Таким образом, в ступенчатом световоде эффект ВКР чистки пучка намного хуже, чем в градиентном из-за более плоского профиля пучка накачки и из-за худших пространственно-спектральных свойств фильтрации фс-ВБР в ступенчатом МСС.

### 3) Разработка методов формирования волоконного отражательного интерферометра (ВОИ) непосредственно на торце ММС/МСС, исследование возможностей создания чувствительного элемента сенсора коэффициента преломления

За истекший период разрабатывалась технология формирования различных структур на торце волокна. В частности, актуальную задачу представляет формирование отражателей для определенных групп мод в многомодовом волокне. Габаритные размеры и сложность формы зеркал (например концентрические круги произвольной толщины) требуют использования безмасковой лазерной литографии. Для этого ведется разработка метода удаления фоторезиста с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в области фокусировки сильного объектива (около 1 - 2 мкм).

Перемещение области фокусировки по образцу осуществляется с помощью прецизионной X-Y подвижки с точностью 10 нм. Таким образом, можно нанести на поверхность любой узор путем последовательной модификации поверхности. Эксперименты были проведены на длине волны 1026 нм. Был использован фоторезист типа ФПН-20-ИЗО (положительный) для определения порога модификации, а также для подпороговой модификации слоя фоторезиста толщиной 2 мкм. В результате было обнаружено, что фоторезист удаляется лишь частично и только в режиме надпороговой засветки, правая колонка (**Error! Reference source not found.3.1**). Наиболее полное удаление фоторезиста было при  $1.6 E_0$  и скорости 700 мкм / с ( $E_0$  – энергия порога абляции). Однако, даже наиболее чистая поверхность (правая верхняя область модификации) пока не позволяет нанести качественное оптическое покрытие.

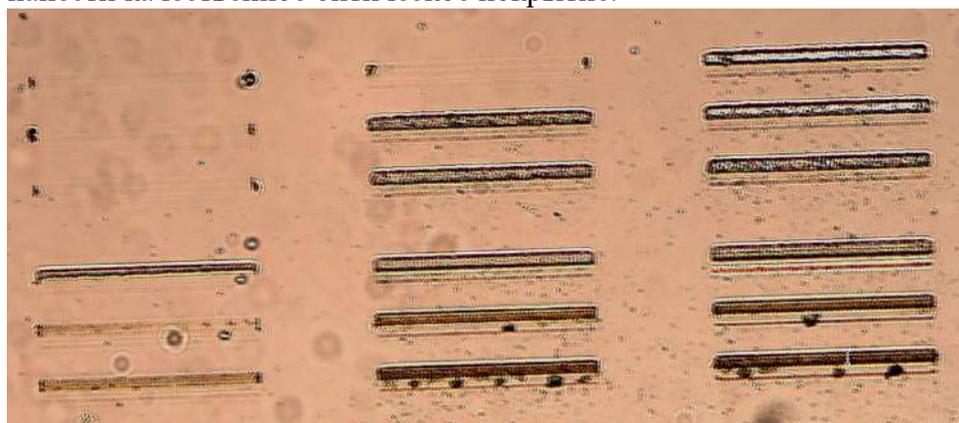


Рис. 3.1. Результат фемтосекундной модификации фоторезиста.

Как один из вариантов потенциальных структур на торце волокна для применения в качестве торцевого волоконного микросенсора коэффициента преломления, была выполнена экспериментальная работа, подтверждающая высокие характеристики структуры. Для исследования возможных характеристик структура сенсора был выполнена в объемном варианте схемы Кречмана. Было проведено измерение изменения давления в вакуумной камере в процессе откачки атмосферы вплоть до  $10^{-3}$  мм. рт. ст. Продемонстрированы высокие характеристики сенсора: спектральная чувствительность 1000 нм / ПП, разрешающая способность -  $6.5 \cdot 10^{-8}$  ПП, параметр качества -  $529 \text{ ПП}^{-1}$  (ПП – показатель преломления)

#### 4) Разработка и сборка схемы импульсного ВКР-лазера на основе градиентного ММС с активной синхронизацией мод (АОМ модуляция, модуляция накачки), экспериментальное и теоретическое исследование пространственно-временной динамики излучения в различных схемах импульсного лазера

Были исследованы и сравнены три различные схемы импульсного ВКР-лазера на основе многомодового градиентного (GRIN) световода с накачкой многомодовым ММ ЛД: с модуляцией с помощью объемного акустооптического модулятора (АОМ) и с помощью АОМ пигтейлированного 10/125 LMA волокном (рис. 4.1. a,b) и с помощью модуляции усиления (рис. 4.1c). Во всех трех схемах при превышении порога генерации 2-го Стокса выходные импульсы принимают вид последовательности коротких наносекундных суб-импульсов как для 1-го, так и для 2-го стоксова порядка ВКР с огибающей, повторяющей профиль пропускания АОМ или временного профиля усиления (мощности ЛД).

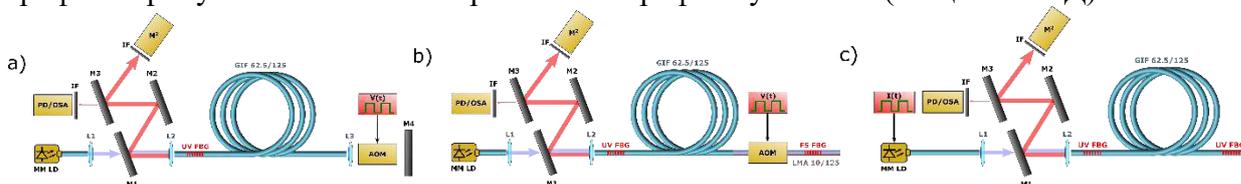


Рис. 4.1. Исследуемые схемы импульсных ММ ВКР лазеров.

В схеме с объемным АОМ резонатор имеет относительно малые потери, и, кроме того, непоглощенный пучок накачки после АОМ подается обратно в резонатор, увеличивая коэффициент усиления ВКР. В этом случае была получена максимальная выходная мощность ВКР-генерации: общая мощность 810 мВт с огибающей 400 нс (рис.4.2а), но качество пучка оказалось самым низким среди трех схем ( $M^2 \sim 5$  и  $M^2 \sim 3$  для 1-го и 2-го стоксовых порядков, соответственно). Полностью волоконная схема лазера с использованием пигтейлированного АОМ позволяет модулировать потери с минимальным временем отклика, благодаря чему были получены прямоугольные формы импульса (при времени открытия АОМ 500 нс) с почти 100% внутриимпульсной модуляцией как для 1-го, так и для 2-го порядка (с длительностью суб-импульсов 10нс). Однако из-за несоответствия волокна GRIN и волокна LMA, в котором была записана фс ВБР с узким спектром отражения приводит к относительно высоким потерям, общая средняя мощность составила всего  $\sim 30$  мВт. В обеих схемах с АОМ используется непрерывная накачка, и из-за прогрева всего резонатора стабильность режима неудовлетворительна, возмущение происходит через  $\sim 10$  секунд, что требует подстройки частоты модуляции АОМ. Реализация схемы с модуляцией усиления, в которой модулировалась мощность накачки, позволила избежать этого недостатка, а стабильность режима значительно повысилась. При этом генерация 1го Стоксова порядка происходила только в максимуме импульса накачки, тогда как форма импульса 2го порядка была со 100% модуляцией (рис.4.2с). Также удалось добиться качества пучка  $M^2 \sim 3.3$  и 2.05 для ВКР 1го и 2го стоксовых порядков соответственно. Средняя мощность, составляющая 120 мВт, меньше, чем в схеме с объемным АОМ.

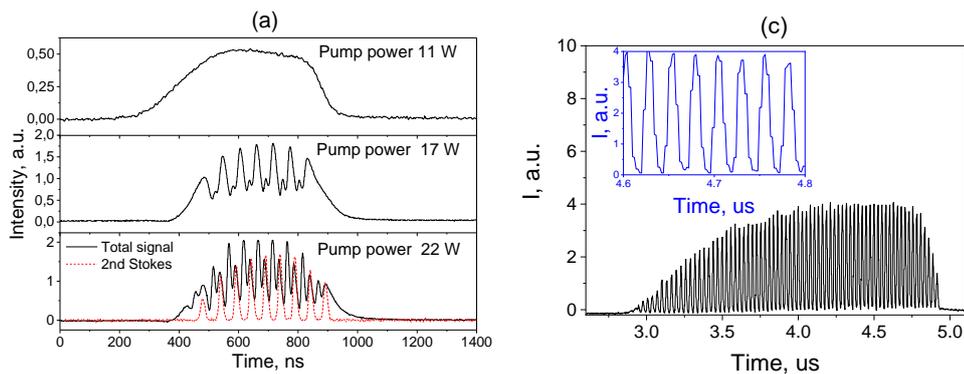


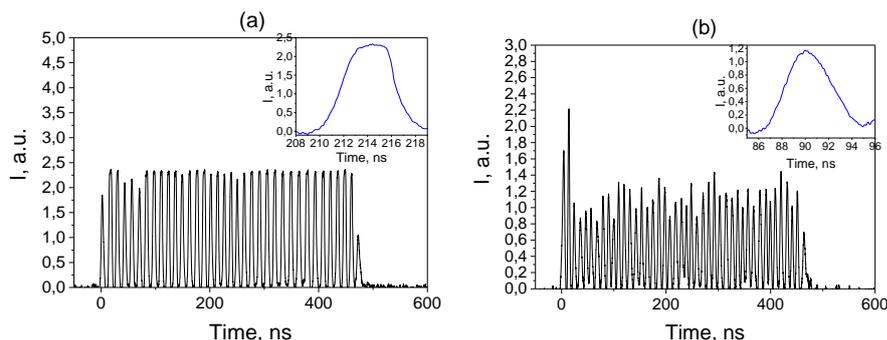
Рис. 4.2. Выходные импульсы 2го Стокса для схем с объемным АО - красный (а), пигтейлированным LMA 10/125 волокном АОМ (б) и в схеме с модуляцией усиления (с).

Максимальная пиковая мощность пучка 1-го Стокса была достигнута в схеме с объемным АОМ ( $\sim 300$  Вт) из-за наименьших потерь и двойного прохода волны накачки. Схема с пигтейлированным АОМ имеет наибольшие потери и пиковую мощность пучка 1го Стокса  $\sim 10$  Вт. Схема с модуляцией усиления наиболее стабильна, но имеет пиковую мощность всего 2.7 Вт, в основном из-за неоптимальной модуляции накачки. Энергии импульса 1-го Стокса для трех различных схем составляют 4.2 мкДж, 60 нДж и 41 нДж соответственно.

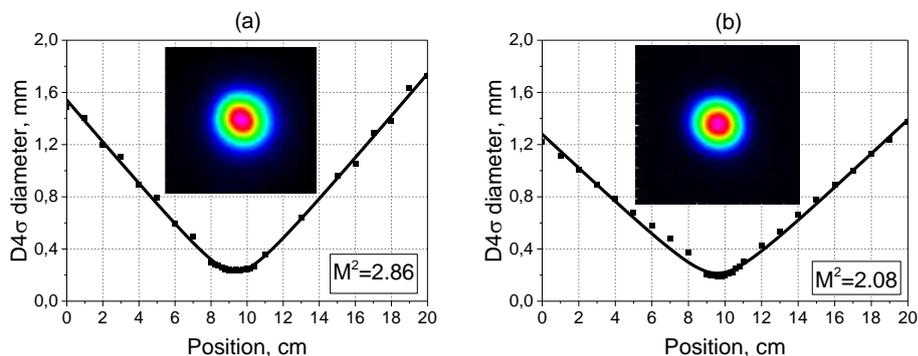
## 5) Исследование возможностей пространственно-временной синхронизации мод в резонаторе на основе градиентного ММС и одномодового LMA световодов

В качестве первого шага для получения пространственно-временной синхронизации мод, более подробно исследовалась полностью волоконная схема лазера с активной синхронизацией мод (рис.4.1б) на основе АОМ с LMA 10/125 волокном и градиентным МСС 62,5/125 с диодной накачкой на 976 нм. Измеренная временная форма импульса и соответствующая пространственная форма пучка для 1го (1018 нм) и 2го (1064 нм) стоксовых порядков показаны на рис. 5.1. и 5.2 соответственно. Импульс имеет 100% модуляцию как для 1го, так и 2го стоксовых порядков, причем практически в противофазе, т.к. модуляция возникает из-за их взаимодействия. Длительность отдельных суб-импульсов составляет 5-7 нс, однако предварительный анализ из структуры показал, что они имеют низкую временную когерентность и являются фактически шумовыми. Измеренный

параметр качества составил  $M^2 \sim 2.86$  и  $2.08$  соответственно, что говорит о высокой пространственной когерентности генерируемых стоксовых пучков 1-го и 2-го порядка при низкокогерентной накачке лазерным диодом ( $M^2 \sim 20$ ).

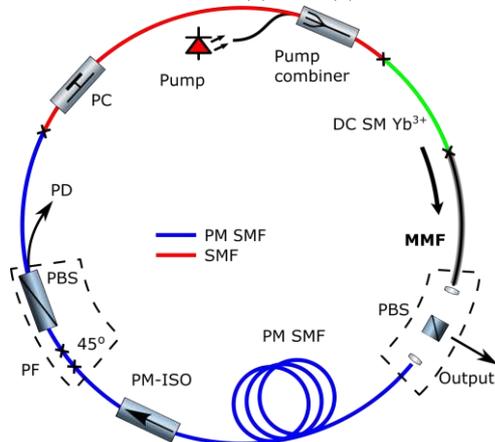


**Рис. 5.1.** Форма импульсов 1го (1018 нм) и 2го (1064 нм) стоксовых порядков при 40 Вт многомодовой накачки. Вставки: форма субимпульсов.



**Figure 5.2.** Измеренный параметр качества  $M^2$  1го (1018 нм) и 2го (1064 нм) стоксовых порядков при 40 Вт многомодовой накачки. Вставки: форма субимпульсов.

Дальнейшие эксперименты были сфокусированы на получении высокой временной когерентности в схеме пассивной пространственно-временной синхронизации мод в резонаторе на основе градиентного ММС и одномодового LMA световодов, см. Рис.5.3.



**Рис. 5.3.** Схема волоконного лазера с резонатором на основе градиентного ММС (MMF) и одномодового LMA (остальная часть резонатора) световодов с пассивной пространственно-временной синхронизации мод.

Его особенность заключается в том, что ММС помещается сразу за активным LMA-световодом с диаметром сердцевины 10 мкм. Без ММС энергия импульсов в таком лазере достигает 50 нДж при длительности генерируемых импульсов порядка 15 пс, что при грубой оценке даёт пиковую мощность в 3 кВт. При этом внутри резонатора сразу после активного волокна эта мощность может быть ещё выше, и этого уровня уже достаточно для активации таких эффектов, как керровская самоочистка, приводящих к улучшению качества пучка после прохождения ММС. Предполагается, что самоочистка Керра будет либо оказывать положительное влияние на стабильность пассивной синхронизации мод методом нелинейного вращения поляризации, либо полностью его заменит, открыв возможность

создания полностью многомодового лазера с пространственно-временной синхронизацией мод. После участка ММС следует сборка из элементов объемной оптики, с помощью которой подбирается оптимальный размер пятна на входе в одномодовое LMA-волокно для достижения режима синхронизации мод. Эта работа будет продолжена на следующем этапе, на котором запланировано исследование возможности формирования стабильных когерентных пространственно-временных световых структур типа световых «пульс» и др.

## б) Изучение влияния рэлеевского рассеяния на индуцированных случайных 3D структурах показателя преломления во внешнем ММС на характеристики излучения волоконного ВКР-лазера на основе ММС с регулярными 3D структурами

Запись случайных 1D-3D массивов точечных отражателей производилась в ММС 100/140 (NA=0.29) с градиентным профилем показателя преломления в трех вариантах (Рис. 6.1): 1D) все точки позиционированы на центральной оси сердцевины (а) или имеют сдвиг оси от центра (б); 2D) точки имеют случайный разброс по одной оси в интервале  $\text{rand}Y=20$  мкм (с); 3D) точки случайным образом распределены в поперечных направлениях (X,Y). Сдвиг волокна в поперечных направлениях задавался в процессе записи путем смещения напряжения на осях трехмерного пьезопозиционера. Продольное расстояние между точками составляло  $\Delta L = 50 \pm 10$  мкм. Энергия фс импульсов подбиралась таким образом, чтобы в сигнале обратного рассеяния достигалось насыщение.

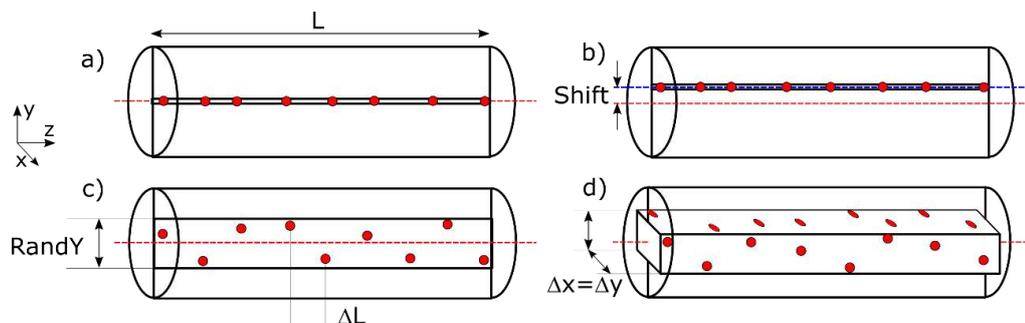


Рис. 6.1. Случайные отражатели различных типов, записанные фс-импульсами внутри сердцевины градиентного волокна: 1D линейные отражатели вдоль оси волокна (а), 1D линейные отражатели, смещенные от оси (б); 2D-плоскость (с) и 3D объем(д) со случайными точечными рассеивателями.

Рефлектограммы двух 50-мм массивов точечных отражателей, записанных в ММС, приведены на Рис. 6.2. При позиционировании области модификаций показателя преломления в центр сердцевины (Рис.6.1а) сигнал обратного рассеяния увеличивался на +54 дБ относительно естественного, а при случайном отклонении модификаций от центра по осям X,Y (Рис.6.1d) на +45 дБ. Отметим, что в первом случае наблюдается более равномерное обратное рассеяние вдоль массива отражателей.

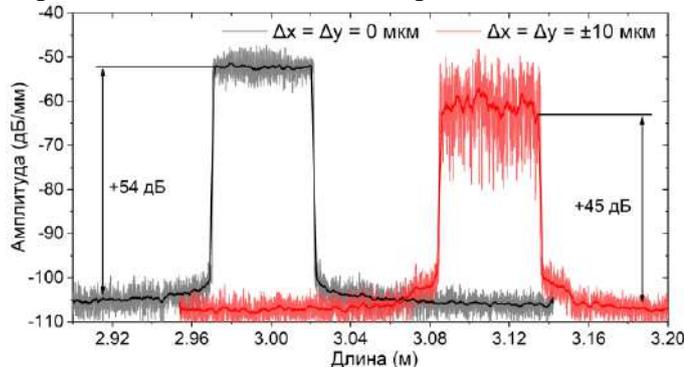


Рис. 6.2. Рефлектограммы массивов точечных отражателей, записанных в центре сердцевины ММС и вблизи центра с поперечным отклонением  $\pm 10$  мкм по осям x,y.

Затем был собран и исследован однокаскадный ВКР лазер на основе градиентного ММС со случайным отражателем в двух вариантах: 1) случайный отражатель ставился в ВКР-лазер с диодной накачкой в качестве выходного зеркала вместо фс-ВБР; 2) случайный отражатель добавлялся к ВКР-лазеру с диодной накачкой с плотной УФ-ВБР и выходной фс-ВБР. В первой схеме эксперимент показал, что высокие потери в отражателе существенно ограничивают эффективность преобразования излучения многомодовой ЛД накачки в стоксов пучок, тогда как уменьшение плотности точек рассеяния приводит к увеличению выходной мощности и улучшению качества пучка. Тем не менее в такой схеме впервые получена случайная генерация 1го стоксова порядка. При этом существует оптимальное значение плотности фс-индуцированных точек рассеяния при оптимальной геометрии (1D-3D), при которой достигается максимальная эффективность преобразования без деградации пучка. Сравнение свойств генерации в градиентном ММС с диодной накачкой показывает, что наименьший порог составляет  $\sim 140$  Вт для плотного одномерного отражателя (длиной 120-240 мм), тогда как максимальная выходная мощность 6.2 Вт при мощности накачки 181 Вт с качеством пучка  $M^2 \sim 3.2$  достигается для 2D отражателя примерно той же длины (120 мм) (рис. 6.2). Показано, что качество улучшается до  $M^2 \sim 2.4$  (с преобладающим содержанием фундаментальной моды  $LP_{01}$ ) за счет небольшого снижения выходной мощности (до 5.5 Вт) при использовании менее плотного короткого (60 мм) 1D-отражателя. Показано, что также возможна селекция моды  $LP_{11}$  при использовании двух одномерных отражателей с относительным смещением между ними в поперечном направлении. Во второй схеме, использование 2D-образца с поперечным разбросом точек  $\text{randY}=20$  мкм в качестве дополнительно слабого отражателя к ВБР-резонатору для 1го стоксова порядка и УФ-ВБР для 2 порядка позволяет получить каскадную случайную генерацию стоксовой волны 2-го порядка на длине волны 1019 нм с близким к дифракционному качеством пучка ( $M^2 \sim 1.6$ ) и мощностью около 5 Вт (рис. 6.3). Это примерно соответствует результатам эксперимента для обычного двухкаскадного резонатора с двумя парами ВБР.

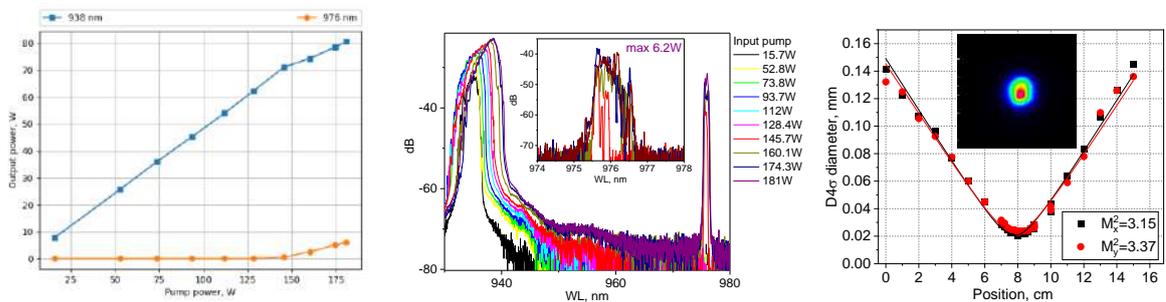


Рис. 6.2. Выходная мощность, спектр и качество пучка ММ ВКР лазера с 2D случайным отражателем ( $L=120\text{mm}$ ,  $\Delta L=25\mu\text{m}$ )

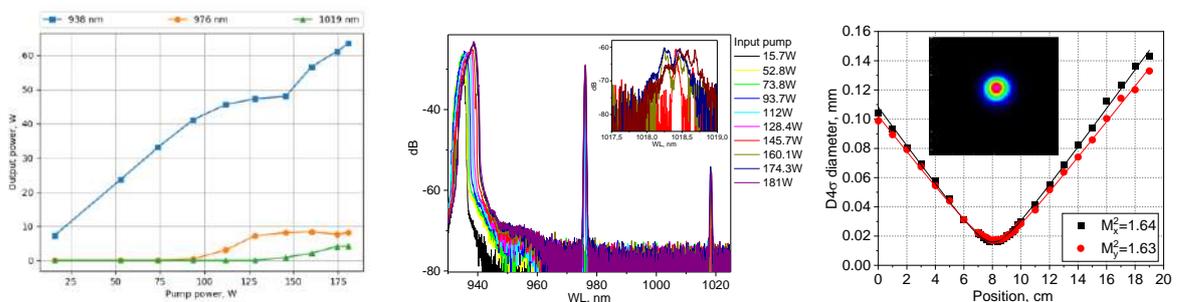


Рисунок 6.3. Выходная мощность (зеленый — 2 стокс ВКР на 1019 нм), спектры и качество пучка 2-й стоксовой волны 2-каскадной ММ ВКР лазера с 2D случайным отражателем ( $L = 120$  мм,  $\Delta L = 25$  мкм,  $\text{randY} = 20$  мкм).

Т.о. показано, что добавление случайных 1D-3D структур слабо, влияет на генерацию 1го стоксова порядка ВКР, однако существенно уменьшает порог случайной

генерации 2го стоксова порядка, для которого получена мощность 5 Вт с близким к дифракционному качеством пучка ( $M^2 \sim 1.6$ ). Также показано, что случайный 1D-3D отражатель можно использовать вместо выходной фс-ВБР и впервые получить случайную генерацию 1го стоксова порядка в ММС, однако из-за больших потерь в нем выходная мощность в максимуме (для 2D отражателя) составила 6.2 Вт.

**7) Кроме запланированных, были выполнены дополнительные исследования радиационной стойкости ВБР, свойств геликоидальных (спиральных) плазменных филаментов при распространении фс импульсов в ММС с целью их использования для записи спиралевидных 3D структур, проведен расчет параметрической генерации, начата работа по применению ММС для диагностики замораживаемых биообъектов.**

По результатам 2 года проекта опубликованы 18 статей WoS/Scopus [1-18] (из них 5 – в журналах 1 квартала [1-5], из них 2 высокорейтинговых,  $IF \geq 9$  [1,2]), 2 статьи приняты [19,20], 1 статья отправлена в печать [21], участниками проекта сделаны 16 докладов на конференциях (из них 5 – приглашенных), проведена Международная школа молодых ученых, привлечены по конкурсу 3 постдока, защищены 2 кандидатские диссертации.

### **Основные публикации**

1. A.Wolf, A.Dostovalov, K.Bronnikov, M.Skvortsov, S.Wabnitz, S.Babin. Advances in femtosecond direct writing of fiber Bragg gratings in multicore fibers: technology, sensor and laser applications. *Opto-Electr. Advances* **5** (4) 210055 (2022). <https://doi.org/10.29026/oea.2022.210055> **Q1 IF=8.9**
2. E.V.Podivilov, F.Mangini, O.S.Sidelnikov, M.Ferraro, M.Gervaziev, D.S.Kharenko, M.Zitelli, M.P.Fedoruk, S.A.Babin, and S.Wabnitz. Thermalization of orbital angular momentum beams in multimode optical fibers. *Phys Rev. Lett.* **128**, 243901 (2022). **IF=9.185**  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.243901> **Q1**
3. D.S.Kharenko. M.D.Gervaziev, A. G.Kuznetsov, E. V.Podivilov, S.Wabnitz, S.A.Babin. Mode-resolved analysis of pump and Stokes beams in LD-pumped GRIN fiber Raman lasers. *Optics Letters* **47** (5), 1222-1225 (2022). <https://doi.org/10.1364/OL.449119> **Q1**
4. A.A.Wolf, M.I.Skvortsov, I.A.Lobach, A.V.Dostovalov, S.A.Babin. Bending induced output power concentration in a core of a 4-core Yb-doped fiber laser. *Opt. Exp.* **30** (5), 7580-7590 (2022).  
<https://doi.org/10.1364/OE.445156> **Q1**
5. 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 from the self-channeling of intense femtosecond laser pulses in optical fibers. *Opt. Lett.* **47** (1), 1–4 (2022).  
<https://doi.org/10.1364/OL.445321> **Q1**
6. V.D.Efremov, E.A.Evmenova, A.A.Antropov, D.S.Kharenko. Numerical investigation of the energy limit in a picosecond fiber optic parametric oscillator. *Appl. Opt.* **61**(7), 1806–1810(2022).
7. A.G.Kuznetsov, S.I.Kablukov, Y.A.Timirtdinov, S.A.Babin. Actively mode locked Raman fiber laser with multimode LD pumping. *Photonics* **9**, 539 (2022). <https://doi.org/10.3390/photonics9080539>
8. В.С. Терентьев, В.А. Симонов. Экспериментальная реализация спектрального сенсора коэффициента преломления на основе отражательного интерферометра. *Оптика и спектроскопия* **130** (12) 1904-1909 (2022).
9. П.Ф. Кашайкин, С.А. Васильев, А.Л. Томашук, А.Д. Игнатьев, В.А. Брицкий, А.А. Шаймерденов, А.М. Аханов, П.П. Сильнягин, Т.В. Кульсартов. Поведение волоконных брэгговских решеток при интенсивном реакторном облучении. *Квант. электроника* **52** (11), (2022), в печати.
10. A. G. Kuznetsov, A. A. Wolf, I. N. Nemo, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Comparison of multimode LD pump beam shaping in step-index and graded-index fibers and its influence on Raman lasing.

*Proc. SPIE*, Vol.12140: Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VII, 121400F (2022).  
<https://doi.org/10.1117/12.2622184>

11. M. Ferraro, F. Mangini, Y. Sun, M. Zitelli, R. Crescenzi, A. Niang, M. C. Crocco, V. Formoso, R. G. Agostino, R. Barberi, A. De Luca, A. Tonello, S. A. Babin, V. Couderc, S. Wabnitz. Laser-induced damages in silica multimode optical fibers. *Proc. SPIE*, vol. 12142: Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III, 121420R (2022). <https://doi.org/10.1117/12.2623746>
12. M. Ferraro, F. Mangini, M. Zitelli, A. Niang, R. Crescenzi, T. Mansuryan, A. Tonello, V. Couderc, A. De Luca, S. A. Babin, F. Frezza, S. Wabnitz. Exploiting the geometry of optical fibers for igniting helical-shape plasma filaments. *Proc. SPIE*, vol. 12143: Nonlinear Optics and its Applications, 1214302 (2022). <https://doi.org/10.1117/12.2624477>
13. N. N. Smolyaninov, D. S. Kharenko. Bottlenecks in Implementation of the Mode Decomposition Algorithm Based on Phase-Only Spatial Light Modulator. 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Proc., IEEE Publ., 693-697 (2022). <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855062>
14. F. Mangini, M. Ferraro, M. Gervaziev, D. S. Kharenko, M. Zitelli, Y. Sun, V. Couderc, E. V. Podivilov, S. A. Babin, and S. Wabnitz. Thermodynamics of multimode fiber systems revealed by holographic mode decomposition. Optica Advanced Photonics Congress - Nonlinear Photonics 2022. *Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2022), paper NpTu1F.4 (2022). <https://doi.org/10.1364/NP.2022.NpTu1F.4>
15. F. Mangini, E. V. Podivilov, M. Ferraro, O. S. Sidelnikov, M. Gervaziev, D. S. Kharenko, M. Zitelli, Y. Sun, M. P. Fedoruk, S. A. Babin, S. Wabnitz. Thermalization of orbital angular momentum beams in optical fibers. Conference on Lasers and Electro-Optics 2022. *Technical Digest Series*, Optica Publishing Group, paper FF1A.8 (2022). [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_QELS.2022.FF1A.8](https://doi.org/10.1364/CLEO_QELS.2022.FF1A.8)
16. M.I. Skvortsov, S.R. Abdullina, A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, A.A. Vlasov, E.V. Podivilov and S.A. Babin. Narrowing of the generation line of a DFB laser to subhertz width in hybrid configuration. International Conference Laser Optics 2022, *Proc.*, IEEE Publ., paper WeR1-22 (2022). <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840035>
17. V.D.Efremov, D.S.Kharenko. Numerical investigation of a double arms pump impact in the fiber optical parametric oscillator. International Conference Laser Optics 2022, *Proc.*, IEEE Publ., paper ThRI-p27 (2022). <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839732>
18. M. I. Skvortsov, A.A. Wolf, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, K.V. Proskurina, A.V. Dostovalov, A. A. Vlasov, A.E. Churin, S. A. Babin. Narrow-linewidth tunable Er-doped fiber laser based on fs-pulse-inscribed artificial Rayleigh reflector. *Frontiers in Optics + Laser Science 2021. Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2021), paper JTu1A.92 (2022). <https://doi.org/10.1364/FIO.2021.JTu1A.92>
19. A.G. Kuznetsov, A.A. Wolf, Zh. Munkueva, S.A. Babin. Random lasing in multimode diode-pumped graded-index fiber based on artificial Rayleigh scattering in fs-inscribed random structure. *Proc. SPIE*, v.12310: Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XIII (2022), принята в печать.
20. Alexey A. Wolf, Alexey G. Kuznetsov, Olga N. Egorova, Sergey L. Semjonov, and Sergey A. Babin. 7-core Yb-doped fiber laser with femtosecond pulse inscribed fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE*, v.12310: Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XIII (2022), принята в печать.
21. K. Rolle, K.A.Okotrub, I.V.Zaytseva, S.A.Babin, N.V.Surovtsev. Self-pressurized rapid freezing at arbitrary cryoprotectant concentrations. *Appl. Phys. Lett.*, отправлена в печать.