

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, академик РАН, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, чл.-корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Потатуркин Олег Иосифович, д. т. н., профессор, ИАиЭ СО РАН

Федорук Михаил Петрович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, НГУ

Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Фрумин Леонид Лазаревич, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Лобач Иван Александрович, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Достовалов Александр Владимирович, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Коляда Наталья Александровна, к. ф.-м. н., ИЛФ СО РАН

Николаев Назар Александрович, к. т. н., ИАиЭ СО РАН

Симонов Виктор Александрович, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Ефремов Владислав Дмитриевич, ИАиЭ СО РАН

Мункуева Жибзэма Этигэловна, ИАиЭ СО РАН

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы.

Многомодовые оптические волокна сейчас буквально переживают второе рождение. Повышенный интерес обусловлен с одной стороны, развитием источников и средств анализа лазерного излучения, а с другой стороны — существенным увеличением уровня мощности передаваемого сигнала, при котором стандартные одномодовые волокна уже становятся неприменимыми. Наличие дополнительной, пространственной степени свободы не только открывает новые возможности для управления групповыми скоростями, получения синхронизма при параметрических преобразованиях и достижению состояния синхронизации мод (как продольных, так и поперечных), но и приводит к множеству новых фундаментальных эффектов, например керровской самоочистке пучка, ВКР-очистке пучка и эффекту модового солитонного

самопреобразования. Вкупе с современными трендами в телекоммуникациях на использование многомодовых волокон тема диссертационной работы является актуальной.

Методики, применяемые в диссертационной работе М. Д. Гервазиева являются современными и полностью подходят для решения поставленных задач.

Основная цель диссертационной работы М. Д. Гервазиева состояла в исследовании нелинейной эволюции излучения при распространении в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления методом анализа модового состава. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: изучить математический аппарат метода модовой декомпозиции, расширить его для случая большого количества мод, а также провести численное моделирование метода целью выявления факторов, критически влияющих на точность его работы; собрать экспериментальную установку для проведения модового анализа; исследовать излучение многомодового волоконного ВКР-лазера методом модовой декомпозиции; провести модовый анализ пучка при эффекте керровской самоочистки.

Личное участие соискателя.

В ходе выполнения работ М. Д. Гервазиев принимал активное участие в постановке задач, исследовании возможностей метода, проведении основных экспериментов, анализе и обсуждении результатов, а также презентации результатов на научных конференциях и написании статей. При выполнении диссертационной работы М. Д. Гервазиев проявил себя как квалифицированный специалист, умеющий работать в коллективе, решать сложные задачи, а также проводить исследования высокого научного уровня.

Новизна.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Исследован математический аппарат модовой декомпозиции в случае многомодовых волокон с градиентным профилем показателя преломления. Численное моделирование метода позволило уточнить роль наиболее важных параметров, влияющих на точность восстановления амплитуд мод и их относительных фаз. Такими параметрами являются: размер фазовой маски, величина

пространственного частотного сдвига и смещение от центра корреляционного отклика.

2. Впервые проведены успешные эксперименты по модовой декомпозиции спекл-пучков на выходе из многомодового волокна, состоящих из ~ 80 мод. Разница между исходным и реконструированным пучками всегда оставалась относительно низкой. Полученные распределения энергии мод позволяют заключить, что для пучков малой мощности, распространяющихся в линейном режиме, моды среднего порядка содержат около половины полной энергии пучка.
3. Исследован модовый состав излучения при возникновении эффекта керровской самоочистки при различной длительности импульса (от фемтосекунд до наносекунд). Доля фундаментальной моды в итоговом распределении составляет 60-70 %, а доля мод высших порядков спадает с увеличением значения главного квантового числа. Равновесное распределение хорошо описывается формулой Рэля-Джинса, соответствующее ему значение продольного импульса совпадает с экспериментально полученным и определяется исключительно условиями заведения.
4. Показано, что при эффекте самоочистки происходит фиксация межмодовых фаз, начиная с некоторого уровня мощности.
5. Исследована динамика распространения пучков, обладающих ненулевым орбитальным угловым моментом. Продемонстрировано, что излучение также достигает термодинамического равновесия. Распределение мод при этом описывается обобщенной формулой Рэля-Джинса. Продемонстрированы законы сохранения продольного импульса и орбитального углового момента.
6. Проведен анализ модового состава стокового излучения ВКР-лазера и излучения прошедшей накачки. Полученные данные показывают, что число мод в генерируемом стоковом пучке на два порядка меньше, чем число мод, возбуждаемых накачкой (около 780). В излучении накачки при превышении порога ВКР первые вырожденные группы поперечных мод со значением главного квантового числа до 8 истощаются примерно на 30-50% в зависимости от мощности. При

этом около 40% всей энергии стоксова пучка сосредоточено в фундаментальной моде. По результатам измерения установлено, что отклонение ранее измеренного параметра M^2 пучка Стокса от 1 обусловлено тем, что значительная доля его мощности (20-30%) приходится на моды $LG_{1,0}$ и $LG_{-1,0}$.

7. Анализ стоксова излучения позволил сделать вывод, что в диссипативной системе с модовой связью с преобладанием усиления и фильтрации основной моды термализация не достигается, и распределение мод определяется в основном случайной связью между соседними модами. Данный факт выражается в том, что характер распределения мод по главному квантовому числу оказывается близким к экспоненциальному закону и остается довольно далеким от распределения Рэля-Джинса.

Степень достоверности результатов.

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и экспериментальным результатам других работ. Все измерения производились с помощью апробированных методик и точных приборов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых мировых журналах и представлены на международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов.

Практическая значимость.

Результаты данной работы могут быть использованы в микроскопии или при создании волоконных элементов и других устройств на основе многомодовых волокон. Также особый интерес представляет и сам метод, позволяющий проанализировать излучение, состоящее из большого количества мод, который до сих пор применялся лишь к маломодовым волокнам со ступенчатым профилем показателя преломления. Таким образом результаты настоящей работы будут полезны не только специалистам в области нелинейной волоконной оптики, но и более широкому кругу исследователей.

Соответствие специальности.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как основным объектом исследования излучение, распространяющееся в оптическом волокне.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Результаты работы докладывались соискателем лично на следующих конференциях и семинарах: международная конференция «9-й Международный семинар по волоконным лазерам 2020» (август 2020 г., Академгородок, Новосибирск), международная конференция «2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)» (июнь 2021 г., г. Мюнхен, Германия), конференция «Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2021)» (октябрь 2021 г., Пермь), международная конференция «20th International Conference Laser Optics 2022 (ICLO 2022)» (июнь 2022, г. Санкт-Петербург), международная конференция «30th Annual International Laser Physics Workshop 2022 (LPHYS'22)» (июль 2022, онлайн), международная конференция «10-й Международный семинар по волоконным лазерам 2022» (август 2022 г., Академгородок, Новосибирск).


Результаты диссертационной работы достаточно подробно отражены в семи публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных:

1. Gervaziev M. D. et al. Mode decomposition of multimode optical fiber beams by phase-only spatial light modulator //Laser Physics Letters. – 2020. – Т. 18. – №. 1. – С. 015101.
2. Mangini F. et al. Statistical mechanics of beam self-cleaning in GRIN multimode optical fibers //Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 7. – С. 10850-10865.
3. Podivilov E. V. et al. Thermalization of orbital angular momentum beams in multimode optical fibers //Physical Review Letters. – 2022. – Т. 128. – №. 24. – С. 243901.
4. Kharenko D. S. et al. Mode decomposition of output beams in LD-pumped graded-index fiber Raman lasers //Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XII. – SPIE, 2021. – Т. 11890. – С. 124-129.
5. Kharenko D. S. et al. Mode-resolved analysis of pump and Stokes beams in LD-pumped GRIN fiber Raman lasers //Optics Letters. – 2022. – Т. 47. – №. 5. – С. 1222-1225.
6. Gervaziev M. et al. Mode decomposition method for investigating the nonlinear dynamics of a multimode beam //Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 51-61.
7. Mangini F. et al. Modal phase-locking in multimode nonlinear optical fibers //Optics Letters. – 2023. – принята в печать.

Диссертация «Исследование нелинейной пространственно-временной эволюции излучения в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления методом модовой декомпозиции» Гервазиева Михаила Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н., профессор, академик РАН



Шалагин А.М.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.



Лобач И.А.