

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Гервазиева Михаила Дмитриевича

«Исследование нелинейной пространственно-временной эволюции излучения в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления методом модовой декомпозиции», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика»

Актуальность темы исследования.

Многомодовость в последнее время рассматривается исследователями как дополнительная степень свободы в волоконной оптике. Обусловлено это открытием большого числа нелинейных эффектов, имеющих место в градиентном многомодовом волокне (керровская самоочистка, ВКР-очистка пучка, модовое солитонное преобразование). Некоторые из них противоречат сложившимся представлениям о низком качестве излучения на выходе из данных волокон. Так керровская самоочистка и ВКР-очистка позволяют получить на выходе из световода пучок с колоколообразным пространственным профилем, несмотря на большое число распространяющихся в волокне мод. Бурное развитие области исследований побуждает специалистов к разработке методов характеристики многомодового излучения. Перспективным методом является модовая декомпозиция, позволяющая произвести количественный анализ модового состава, получить информацию об амплитудах и относительных фазах мод. Существующие по этой теме работы, однако, демонстрировали анализ пучков, состоящих максимум из 10 мод, а использование метода не было распространено. Таким образом, работа соискателя является актуальной и направлена на решение важных задач

Общая характеристика и содержание работы.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.6 «Оптика».

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания используемого метода и основной части, включающей экспериментальные результаты, а также заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 101 страницу, включая 41 рисунок. Библиографический список включает в себя 123 наименования.

Во Введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются цели и задачи, формулируется научная новизна и практическая значимость исследования, приводятся сведения об апробации работы, формулируются положения, выносимые на защиту, приводятся данные об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются базовые понятия и принципы, используемые в работе, а также проводится обзор литературы по выбранной тематике.

Вторая глава посвящена подробному описанию метода модовой декомпозиции на основе пространственной модуляции света, который используется во всех экспериментах, составляющих работу. Подробно изложены свойства поперечных мод волокна с параболическим профилем, математический аппарат метода и процесс формирования фазовых масок для определения амплитуд и фаз мод. Отдельные разделы включают в себя описание ключевого устройства экспериментальной установки – пространственного модулятора света и его калибровки, а также переход из основного для волокна базиса мод в базис ОАМ мод для определения орбитального углового момента пучка.

В третьей главе приведены подробные описания проведенных экспериментов и полученных по их итогам результатов. Глава начинается с описания процесса численного моделирования декомпозиции для поиска факторов, влияющих на ее точность, а также непосредственно экспериментов с пучками, распространяющимися в линейном режиме. Далее приводятся результаты экспериментов по исследованию керровской самоочистки. Экспериментально подтверждаются установление теплового равновесия и сохранение некоторых физических величин. Далее были проведены эксперименты по модовой

декомпозиции пучков с ненулевым орбитальным угловым моментом, для их возбуждения излучение заводится в волокно под углом и с отстройкой от центра сердцевины. Подтверждена термализация и сохранение орбитального углового момента, выведено равновесное распределение. При анализе поведения относительных фаз мод в процессе самоочистки обнаруживается интересное явление синхронизации фаз. Глава заканчивается описанием экспериментов по анализу излучения многомодового волоконного ВКР-лазера. Продемонстрировано, что в этом случае пространственная чистка является комбинацией воздействия модово-селективного выходного зеркала резонатора и преобладающей линейной связи между модами соседних порядков ввиду намотки многомодового волокна на катушку.

В заключении представлен список основных результатов работы, а также указаны дальнейшие потенциальные направления развития работы.

Среди **основных результатов диссертации** следует отметить следующие:

- Исследован эффект керровской самоочистки, модовый анализ и рассмотрение в статистической парадигме позволил классифицировать это явление как проявление свойства термализации многомодовой системы, что выражается в установлении распределения Рэлея-Джинса. При этом анализ динамики относительных фаз мод позволил обнаружить явление синхронизации фаз.
- Исследована термализация пучков с ненулевым орбитальным угловым моментом. Продемонстрировано установление равновесного обобщенного распределения Рэлея-Джинса и сохранение орбитального углового момента.
- Проанализирован модовый состав излучения многомодового волоконного ВКР-лазера. Декомпозиция стока излучения позволила выявить, что чистка пучка преимущественно является следствием линейной связи между модами соседних порядков из-за намотки волокна на катушку, вследствие чего модовое распределение наиболее точно описывается экспоненциальным распределением.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием надежных экспериментальных методик, применением современного специализированного оборудования. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих международных и российских журналах, обсуждались на многочисленных российских и международных конференциях. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе М. Гервазиева, являются хорошо обоснованными.

Практическая значимость диссертации.

Результаты диссертационного исследования могут оказать существенное влияние на развитие методики, что в дальнейшем позволит проводить исследования эффектов в реальном времени, например, модовой нестабильности.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации.

По материалам диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, среди которых следует отметить высокорейтинговые журналы Optics Letters, Optics Express и Physical Review Letters.

Характеризуя работу М. Гервазиева, отмечу, что диссертация хорошо структурирована, изложение работы ясное и последовательное. *Автореферат* с необходимой полнотой отражает содержание исследования. Автором выполнен большой объем экспериментальных работ, в результате чего получены новые практически значимые результаты, а также создан солидный задел для дальнейших исследований. Таким образом, М. Гервазиев проявил себя как высококвалифицированный специалист, обладающий необходимыми навыками для комплексного проведения научных исследований мирового уровня

Отмечая высокий уровень работы, тем не менее, необходимо сформулировать несколько замечаний, которые носят несущественный характер и не влияют на основные результаты исследования:

1. В работе проводится модовая декомпозиция на выходе световодов, не сохраняющих состояние поляризации излучения. Вместе с тем, пространственный модулятор света, с помощью которого осуществляется модовая декомпозиция, работает только с линейной горизонтальной поляризацией. В диссертационной работе не обсуждается, как поляризация выходного излучения влияет на качество модовой декомпозиции.

2. В параграфе 3.1.2 проведена проверка точности метода модовой декомпозиции на примере спекл-пучков. При этом то, что «оригинальный и восстановленный пучки имеют высокую степень схожести» демонстрируется визуальным сравнением начального и восстановленного пучков на рис. 3.6 и 3.7. Здесь было бы уместно привести численные значения невязки – удобного параметра, который сам автор диссертации ввел ранее как раз для того, чтобы качественное сравнение «на глаз» заменить точным количественным критерием.

3. Экспериментальные исследования модового распределения проведены в световодах длиной порядка 3 метра. Было бы полезно в диссертационной работе обсудить влияние длины световода на установление равновесного распределения мод.

Заключение.

Диссертационная работа «Исследование нелинейной пространственно-временной эволюции излучения в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления методом модовой декомпозиции» полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Гервазиев Михаил Дмитриевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

Гладышев Алексей Вячеславович,

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

Научного центра волоконной оптики им. Е.М.Дианова РАН - обособленного подразделения
ФГБУН ФИЦ "Институт общей физики им. А.М.Прохорова Российской академии наук"

119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Тел. +7(9057062557), эл. почта: alexglad@fo.gpi.ru

Гладышев А.В.
10.11.2023 г.

Подпись Гладышева А.В. удостоверяю



Гладышева А.В.
СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН
Глушков В.В.