

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора  
ИПФ РАН по научной  
работе, д. ф.-м. н.

  
М. Ю. Глявин

«09» июля 2023 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации 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 учёной степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

### **Актуальность темы исследования**

В недавнее время наблюдается всплеск интереса к исследованиям многомодовых (ММ) волоконно-оптических световодов, применительно к задачам генерации и передачи мощного лазерного излучения. Интерес обусловлен как развитием источников и средств анализа лазерного излучения, так и перспективами существенного увеличения уровня мощности передаваемого сигнала, при котором стандартные одномодовые волокна уже становятся неприменимыми. Наличие пространственной степени свободы в ММ волокнах и возникающая в результате оптической нелинейности

коллективная многомодовая динамика излучения приводят к множеству новых фундаментальных эффектов, например керровской самоочистке пучка, ВКР-очистке пучка и эффекту модового солитонного самопреобразования, что несомненно, представляет огромный интерес для разработки мощных лазерных систем. Кроме того, отмечается возрастающий интерес к использованию пространственной степени свободы в ММ волокнах для телекоммуникационных приложений. Таким образом, исследования в этой области являются крайне актуальными и востребованными. Очень важной проблемой в данном контексте является исследование пространственно-временной динамики мощного излучения в ММ волокнах и сопоставление экспериментальных данных с выдвигаемыми теориями, что подразумевает развитие методов диагностики пространственной структуры и модового состава излучения. Диссертационная работа Гервазиева М. Д. посвящена именно этим актуальным проблемам.

**Целью** данной работы является исследование нелинейной пространственно-временной эволюции излучения при распространении в многомодовом волокне с параболическим профилем показателя преломления.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация содержит 101 страницу и состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных сокращений и списка литературы. Содержание диссертации соответствует поставленной цели и задачам исследования, сопровождаются достаточным количеством рисунков и формул.

**Во введении** обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены защищаемые научные положения, определены научная новизна и практическая ценность полученных в работе результатов.

**В первой главе** дан обзор текущего состояния исследований в области нелинейных эффектов в ММ волокнах. Основное внимание сосредоточено на



исследованиях керровской нелинейности и ВКР и их проявлениях в виде эффектов самоочистки пучка и перераспределения энергии между модами излучения. Также приведены сведения об экспериментальных методах изучения модового состава излучения на выходе из волокна.

**Во второй главе** подробно описан метод модовой декомпозиции излучения на выходе волокна, основанный на цифровой компьютерной голографии с использованием пространственных фазовых модуляторов света (SLM). Важной особенностью разрабатываемой в работе экспериментальной установки, реализующей данный метода, является способ создания амплитудной модовой маски, используя только фазовую модуляцию и свойства дифракции на периодических фазовых структурах, специально синтезируемых на SLM. Также в данной главе представлены сведения об особенностях конкретных фазовых модуляторов, используемых в работе, приведена экспериментальная схема для калибровки их параметров и результаты калибровки.

**Третья глава** посвящена детальным экспериментальным исследованиям ряда эффектов в ММ волокнах с параболическим профилем показателя преломления. А именно, исследованы эффекты керровской самоочистки пучка и перераспределения модового состава излучения к некоторому равновесному профилю, в том числе особенности проявления данных эффектов для пучков с ненулевым угловым моментом, а также эффекты модовой фильтрации в ВКР волоконном лазере. В данной главе представлены подробные описания экспериментальных схем и экспериментальных результатов, проведена интерпретация полученных данных в соответствии с теоретическими моделями, на основе чего сделаны выводы об особенностях применимости термодинамического описания для нелинейной динамики большого числа мод и получающихся равновесных распределений в случае керровской самоочистки пучка и нелинейного распространения пучков. В основе всех экспериментов лежит метод модовой декомпозиции, позволивший получить



распределения рекордно большого числа мод, вычислить интегральные характеристики, такие как полный угловой момент пучка, и проверить законы их сохранения

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации, а также рекомендации для дальнейшего развития исследования.

Полученные в работе результаты обладают **несомненной научной новизной**. Впервые метод модовой декомпозиции позволил провести анализ модового состава излучения на выходе ММ-волокна, содержащего большое количество (~80) мод. При экспериментальном анализе модового состава излучения в нелинейном режиме распространения было подтверждено формирование равновесного распределения энергии по модам (в том числе для пучков с ненулевым орбитальным моментом), которое хорошо описывается обобщенной формулой Релея-Джинса, что было ранее предсказано теоретически. При распространении в режиме самоочистки пучка выявлен эффект фиксации фаз между модами. Экспериментально продемонстрировано, что модовое распределение выходного излучения ВКР лазера на ММ-волокне хорошо описывается экспоненциальной функцией, что обусловлено доминированием случайной межмодовой связи над нелинейностью. Полученные результаты позволили впервые достаточно подробно сопоставить экспериментальные измерения и предсказания термодинамического подхода к описанию нелинейной динамики излучения в ММ волокнах.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена тщательным анализом применимости развитых измерительных методов с помощью проведения тестовых экспериментов и численного моделирования, а также проведения проверок корректности измерений. В частности, результаты численного синтеза профиля измеряемых многомодовых пучков по данным модовой декомпозиции хорошо совпадают с независимыми измерениям профиля пучков с помощью камеры. Результаты экспериментов находятся в соответствии с теоретическими предсказаниями.



**Практическая значимость результатов** не вызывает сомнений. Проведенные исследования, позволившие установить соответствие экспериментальных данных предсказаниям термодинамического подхода к описанию нелинейной динамики пучков, дают основания для возможности использования ММ волокон в различных устройствах в режимах, при которых в выходном излучении эффективно присутствует небольшое число мод, несмотря на нелинейные взаимодействия. Кроме того, реализованный метод модовой декомпозиции, может найти широкое применение при анализе оптических пучков в многомодовых волокнах в разрабатываемых лазерных волоконных системах, а также в активно исследуемых в настоящее время телекоммуникационных системах, использующих пространственную степень свободы. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию и внедрению в организациях, занимающихся исследованием, разработкой и производством мощных волоконных лазерных систем, а также исследованиями и разработками в области перспективных волоконных телекоммуникационных систем.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на 6 международных и российских конференциях, а также опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах и 2 расширенных тезисах конференций.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие **замечания**:

1. В экспериментальной реализации метода модовой декомпозиции используются амплитудные и фазовые профили мод, рассчитанные на основе идеализированного профиля показателя в градиентном ММ-волокне. Однако в реальном волокне профиль показателя преломления может отличаться от идеализированного в результате погрешностей изготовления, а также дополнительных возмущений, например, изгибов волокна. Было бы полезно

обсудить, как отличие профилей реальных мод от расчетных профилей скажется на применимости и точности метода модовой декомпозиции.

2. При исследовании нелинейного режима распространения в главе 3 предполагается, что уширение спектра импульсов не существенно. Для подтверждения данного предположения было бы полезно привести характерные ширины спектров на входе и на выходе, а также оценки  $V$ -интеграла для центральной части импульса.

3. Присутствуют некоторые погрешности в оформлении диссертации. Например, части рисунков 3.1-3.3 обозначены латинскими буквами, тогда как в подписях они обозначены русскими буквами.

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую оценку работы и несколько не снижают ценность полученных результатов.

### **Заключение по диссертации**

Диссертация Гервазиева М.Д. «Исследование нелинейной пространственно-временной эволюции излучения в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления методом модовой декомпозиции» выполнена на высоком научно-техническом уровне, является законченной и самостоятельной научной квалификационной работой, содержит новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития волоконной оптики и лазерной физики. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация Гервазиева М.Д., несомненно, удовлетворяет требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор, Гервазиев Михаил Дмитриевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.



Доклад по диссертации Гервазиева М.Д. заслушан на семинаре  
Отделения Нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН 16 октября 2023 г.

Отзыв составил заведующий лабораторией квантовой и нелинейной  
оптики сильно локализованных полей (335) ИПФ РАН, д. ф.-м. н.

Андр / Алексей Вячеславович Андрианов

Дата: « 08 » ноября 2023 г.

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Тел.: 8 (831) 418-90-46

e-mail: andrian@ipfran.ru

Подпись сотрудника ИПФ РАН Андрианова А.В. заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н.



Мор / И.В. Корюкин

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-  
Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Тел.: 8 (831) 436-62-02

Интернет-сайт: <https://ipfran.ru>, e-mail: [dir@ipfran.ru](mailto:dir@ipfran.ru)