

## ОТЗЫВ

официального оппонента на кандидатскую диссертацию Горбунова Олега Александровича «Изучение статистических свойств излучения многочастотных квази-непрерывных волоконных лазеров», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика»

Диссертационная работа О.А. Горбунова посвящена изучению статистических свойств излучения волоконных лазеров, работающих в квази-непрерывном режиме. Особенностью генерации данного типа лазеров является значительная, порядка  $\sim 1$  нм, ширина спектра излучения и большая длина резонатора, достигающая десятков, а в отдельных случаях сотен километров. Возникающее в этих условиях большое число продольных мод резонатора (тем более в сочетании с нелинейностью среды) формирует чрезвычайно сложную картину временной динамики интенсивности лазерного излучения, количественное описание которой возможно только с привлечением методов математической статистики.

Из работ по статистическим свойствам лазерного излучения различных типов твердотельных лазеров, проведенных до начала обсуждаемого исследования, было известно, что в случае многочастотного излучения эти свойства нетривиальным образом зависят от многих параметров системы: типа усиливающей среды, добротности резонатора, характеристик (ширины и формы спектра, величины собственных шумов) лазера накачки, режима генерации, превышения мощности накачки над порогом генерации и других. Во многих случаях экспериментально измеренные статистические свойства лазерного излучения не соответствовали их предсказаниям по существующим стохастическим моделям. Кроме того, лазерная генерация в волоконных конфигурациях, в обсуждаемом контексте, была экспериментально изучена только для случайных Бриллюэновских лазеров. Для других типов волоконных лазеров (ВКР-лазеров, лазеров на волокнах, допированных ионами редкоземельных элементов) экспериментальных данных собрано не было. Немногочисленные численные модели лазерной генерации в волоконных конфигурациях давали неоднозначные результаты, которые обычно не подтверждались экспериментально. Проведение масштабных исследований различных схем волоконных лазеров в настоящей работе позволило впервые собрать необходимый экспериментальный материал и прояснить вопросы, связанные со статистическими свойствами лазерного излучения в таких системах, а также формирующих их механизмах.

Актуальность данной диссертационной работы обусловлена острой востребованностью отдельных практических приложений волоконных лазеров, в которых статистические свойства лазерного излучения, играют ключевую роль. Среди них оптическая обработка и передача информации, сенсорика, нелинейные лазерные генераторы, микроволновая фотоника, а также другие приложения, требующие разработки новых эффективных волоконных лазеров с заданными свойствами (в т.ч. статистическими). Такая востребованность также свидетельствует о большой практической значимости результатов обсуждаемой работы.

Диссертация хорошо структурирована, должным образом оформлена и проиллюстрирована. Полный объем составляет 124 страницы и включает в себя 84 рисунка. Список литературы содержит 133 источника. Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении четко определена область проведенного исследования, дается достаточно полный обзор литературы, из которого естественным образом вытекают цели и задачи диссертационной работы. Сформулированы актуальность и научная новизна. В конце приводятся защищаемые положения.

В первой главе диссертации описываются особенности экспериментального изучения статистических свойств многочастотных волоконных лазеров. Дано описание оригинальных методов, позволяющих осуществить максимально полное описание статистических свойств излучения в условиях реального эксперимента. Приводится пример применения метода спектральной фильтрации к модельному излучению волоконного ВКР-лазера, позволивший сделать вывод о зависимости статистики излучения от положения отобранной спектральной компоненты в спектре генерации.

Во второй главе приведены результаты, полученные для волоконных лазеров с резонатором типа Фабри-Перо. Для волоконного иттербиевого лазера, характеризующегося узким спектром генерации, показано, что излучение не является гауссовским случайным процессом во всем изученном диапазоне мощностей генерации, что, по мнению автора, указывает на наличие в спектре генерации скоррелированных по фазе компонент. Проводится детальный анализ временных статистических характеристик излучения. Изучение статистических свойств волоконного ВКР-лазера в условиях ограниченной полосы измерительного оборудования проведено с использованием специальной разработанной автором методики и делается аналогичный вывод об отличии статистики излучения от гауссовского. Также экспериментально продемонстрировано различие статистических свойств излучения для спектральных компонент, отобранных в центре и на краю спектра генерации.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Исследуется вопрос о зависимости свойств излучения от мощности излучения и положения отобранной спектральной компоненты в спектре генерации; показано, что такие зависимости нетривиальны в обоих случаях. Установлено, что статистика излучения также не является гауссовской.

Четвертая глава посвящена оптическим редким событиям, возникающим в излучении волоконных лазеров. Показано, что наиболее эффективно генерация редких событий происходит с участием спектральных компонент, находящихся на краю спектра генерации волоконных ВКР-лазеров. Установлен характер изменений функции распределения вероятности интенсивности, связанных с генерацией редких событий. Изучена статистика временного распределения редких событий, сделан вывод о его соответствии пуассоновскому процессу.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

К наиболее значимым результатам, обладающим научной новизной, можно отнести следующие:

- разработана методика изучения статистических свойств излучения волоконных лазеров. Предложена оригинальная методика изучения статистических свойств лазерного излучения в условиях, когда полоса пропускания измерительного оборудования меньше ширины спектра излучения. Предложен метод спектральной фильтрации, позволяющий изучать статистические свойства излучения по отдельным частям его спектра.
- проведено исследование статистических свойств излучения волоконного иттербиевого лазера с узким спектром генерации. Показано, что в излучении присутствуют устойчивые оптические структуры, затухающие на временах порядка десяти обходов резонатора.
- проведено исследование статистических свойств излучения волоконного ВКР-лазера с широким спектром генерации (около  $\sim 1$  нм). Измерены функция распределения вероятности (ФРВ) и автокорреляционная функция (АКФ) интенсивности, являющиеся основными ее характеристиками как меры случайного статистического процесса. Продемонстрированы отличия этих характеристик от случая дельта-коррелированного гауссовского случайного процесса. Установлено, что статистические свойства излучения в центре и на краю спектра генерации различны:

в центре спектра упомянутые отличия малы (эксперимент) или отсутствуют (моделирование), в то время как на краю спектра они наиболее выражены.

- проведено исследование статистических свойств излучения волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Показано, что статистические свойства спектральной компоненты излучения зависят от ее положения в спектре, причем качественно эти отличия аналогичны наблюдавшимся для ВКР-лазера с фиксированным резонатором: в центре спектра отличие от дельта-коррелированного гауссовского случайного процесса намного меньше по сравнению с излучением на краю спектра. Показано, что статистические свойства могут качественно изменяться в зависимости от мощности генерации.
- продемонстрировано наличие оптических редких событий в излучении волоконных ВКР-лазеров как с фиксированным высокодобротным резонатором, так и со случайной распределенной обратной связью. Редкие события протекают с участием спектральных компонент, локализованных на краю спектра генерации; экспериментально измеренная амплитуда редких событий достигала 50 средних значений интенсивности, а в численном моделировании – более 100. Для волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью установлено, что процесс генерации оптических редких событий на краю спектра генерации является пуассоновским процессом с характерным временем излучения до десятков микросекунд.

В целом, диссертационная работа является законченным исследованием, выполненном на высоком научном уровне. Достоверность полученных результатов, равно как и их научная новизна, не вызывают сомнений. По итогам работы опубликованы шесть статей в ведущих научных рецензируемых журналах и сделан ряд докладов на всероссийских и международных конференциях. Автореферат соответствует диссертации по содержанию.

В то же время, работа не свободна от недостатков, вызывающих отдельные вопросы, которые могут быть прояснены автором во время защиты:

- Важнейшим результатом рассматриваемой работы явилось развитие нового метода описания излучения волоконных лазеров как случайного статистического процесса, характеризующегося в первую очередь ФРВ и АКФ интенсивности лазерного поля. Для различных лазерных режимов (и различных лазерных конфигураций) автор детально рассматривает характер отклонений ФРВ и АКФ от тех же функций, соответствующих дельта-коррелированному гауссовскому случайному процессу. При этом создается впечатление, что в диссертации ФРВ и АКФ интенсивности априори считаются взаимозависимыми, в то время как гауссовский случайный процесс не обязан быть дельта-коррелированным и наоборот. Кроме того, отличия ФРВ и АКФ интенсивности от случая дельта-коррелированного гауссовского случайного процесса интерпретируется как эффект фазовой корреляции между отдельными модами лазерного поля. Хотя генерация полностью независимых мод лазера, очевидно, приводят к гауссовскому статистическому процессу (и это подробно описано автором), обратное утверждение, я полагаю, также требует некоторого пояснения.
- Хотя диссертация написана очень хорошим простым языком, и большинство рассуждений автора направлено на подробное объяснение физических механизмов, лежащих в основе наблюдаемых явлений (что свидетельствует об их глубоком понимании самим автором), использование в тексте диссертации отдельных терминов иногда вызывает вопросы. В частности, это касается термина «стохастический процесс», который в общепринятом понимании эквивалентен термину «случайный процесс». В работе этот термин зачастую используется в более узком смысле, обычно соответствующему термину «гауссовский случайный

процесс». Хотя использование такой терминологии никак не влияет на восприятие информации (из контекста и других рассуждений всегда понятно, о каком стохастическом процессе идет речь), хотелось бы понять, какой дополнительный смысл имеет для автора использования этого термина вместо общепринятого и в чем заключается их различие (если есть).

- На стр. 53 автор пишет «Наблюдаемая мощность генерации лежала в диапазоне 0,5-3,7 Вт, вблизи порога режим генерации имел импульсный характер [34], наблюдалось самосканирование мод [119]». Обычно для реализации режима самосканирования лазера необходимо обеспечить эффективное отражение внутрирезонаторного лазерного излучения на динамических решетках инверсной населенности, которые оно само и записывает. Лазерный резонатор с решетками 98% и 25%, представленный на рис. 24, не способствует реализации этого режима. Можно пояснить, о каком эффекте идет речь и как его появление влияет на статистические свойства лазерного излучения в данной конфигурации?
- На стр. 78 автор сравнивает осциллограммы излучения лазера, полученные при разной мощности: «При меньшей мощности излучение имеет обычный "стохастический" вид и качественно не отличается от, например, волоконных лазеров с ВБР, описанных в главе 2. Но при больших мощностях зависимость приобретает нехарактерную модуляцию с существенными провалами». Было бы интересно узнать, с каким физическим механизмом, по мнению автора, может быть связано появление упомянутой модуляции и к каким изменениям статистических характеристик этот механизм приводит. Может ли записанная осциллограмма быть классифицирована как нестационарный случайный процесс?

Перечисленные недостатки не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общий высокий научный уровень работы.

Диссертационная работа «Изучение статистических свойств излучения многочастотных квази-непрерывных волоконных лазеров» полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Горбунов Олег Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Официальный оппонент  
ведущий научный сотрудник  
Ульяновского государственного университета  
кандидат физико-математических наук

Фотиади А.А.

«24» апреля 2021 г.

Подпись А.А. Фотиади удостоверяю

Ученый секретарь УлГУ  
кандидат педагогических наук



Литвинко О.А.