


**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт лазерной физики  
Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
чл.-корр. РАН



 А.В. Тайченачев

«16» апреля 2021 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Горбунова Олега Александровича

«Изучение статистических свойств излучения квази-непрерывных волоконных лазеров»

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. Временные и статистические свойства лазерного излучения, наряду со спектральными и энергетическими, являются его фундаментальными характеристиками, отражая особенности процесса генерации, и, одновременно, определяя доступную область практических применений. Многочастотная лазерная генерация, характерная для твердотельных лазеров и, в частности, волоконных, характеризуется крайне сложной внутренней динамикой, обусловленной нелинейным взаимодействием большого количества продольных мод между собой. Даже при генерации в режиме постоянной мощности на малых временных масштабах могут наблюдаться значительные флуктуации интенсивности, что дает основание называть этот режим генерации «квази-непрерывным». Соответственно, для количественного описания удобно использовать статистические методы. Соответствующая область лазерной физики получила название статистической нелинейной оптики.

Волоконные лазеры обладают высокими эксплуатационными характеристиками и находят широкое применение. При этом вопрос о статистических свойствах излучения представляет интерес не только в разрезе статистической нелинейной оптики, но и как косвенный метод изучения нелинейных эффектов в волокне. Действительно, ввиду малого поперечного сечения волокна величина интенсивности света достигает в нем очень высоких

значений, что приводит к большому влиянию обычно слабых нелинейных эффектов. Нелинейное взаимодействие продольных мод, в свою очередь, оказывает влияние на статистику излучения в целом. Кроме того, тип статистики излучения конкретного лазера важен в различных прикладных задачах, таких как генерация суперконтинуума, генерация гармоник в кристаллах и других.

Экспериментальное изучение временных и статистических свойств многочастотного лазерного излучения представляет известные сложности ввиду очень малого временного масштаба флуктуаций интенсивности – порядка 0,1 нс и менее. Полноценные исследования по данному вопросу стали проводиться с появлением полупроводниковых фотодетекторов с малым временем отклика и цифровых осциллографов с полосой пропускания до десятков ГГц. К настоящему моменту исследования произведены для твердотельных лазеров различных типов. В диссертационной работе Горбунова О.А. представлены экспериментальные результаты исследования статистических свойств излучения для волоконных лазеров, полученные впервые.

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 ограничивается область проведения исследования, дается обзор литературы, определяются цели и задачи диссертационной работы. Сформулированы актуальность и научная новизна. В конце приводятся защищаемые положения.

Первая глава посвящена описанию методики изучения статистических свойств излучения волоконных лазеров. Проанализированы основные факторы, искажающие истинную динамику интенсивности при измерениях. Показано, что наибольшее влияние оказывает эффект ограничения полосы, возникающий из-за превышения шириной оптического спектра полосы пропускания осциллографа. Показано, что выяснение вопроса о наличии корреляций в излучении при наличии вышеупомянутого фактора может быть осуществлено с помощью оригинальной методики, заключающейся в эффективном ограничении полосы для модельного стохастического сигнала с последующим сравнением с экспериментальными результатами. Также описана методика спектральной фильтрации, позволяющая изучать части спектра излучения по-отдельности, характеризуя тем самым статистические свойства излучения в зависимости от положения в спектре. Применение последней методики к результатам численного моделирования процесса генерации в волоконном ВКР-лазере позволило установить, что статистические свойства в центре спектра и на краю качественно различаются.

Во второй главе описываются экспериментальные результаты, полученные при изучении статистических свойств излучения волоконных лазеров с фиксированными резонаторами, образованными парой волоконных брэгговских решеток, играющими роль зеркал в лазерах этого типа. Описаны два типа волоконных лазеров: иттербиевый и ВКР-лазер. В первом случае показано, что излучение не является стохастическим и содержит спектральные корреляции. Продемонстрирована нетривиальная динамика автокорреляционной функции интенсивности, характеризующаяся провалами ниже среднего уровня, что можно интерпретировать, как проявление антикорреляций в излучении. Для ВКР-лазера, характеризующегося широким ( $\sim 1$  нм) спектром излучения с центром на 1,56 мкм, произведено сравнение со стохастическим сигналом по разработанной методике, описанной в главе 1, и показано различное поведение функции распределения вероятности интенсивности, что свидетельствует о наличии корреляций в излучении.

В третьей главе описываются статистические свойства излучения волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью, в которых отсутствует фиксированный резонатор, а обратная связь реализуется за счет слабого рассеяния на неоднородностях сердцевинки волокна. Были исследованы три конфигурации волоконных лазеров. В зависимости от конкретной реализации выходной спектр излучения имел различную ширину и форму.

Четвертая глава посвящена описанию оптических редких событий, возникающих в излучении волоконных лазеров. На краю спектра генерации волоконных ВКР-лазеров как с фиксированным резонатором, так и со случайной распределенной обратной связью были экспериментально зарегистрированы экстремальные волны интенсивностью выше 50 средних значений, а в численном моделировании наблюдались интенсивности до 120 средних значений.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Защищаемые положения соответствуют поставленным целям и задачам исследования.

В качестве основных результатов диссертационной работы можно перечислить следующие:

1. Установлено, что излучение волоконных лазеров в исследованных конфигурациях не является стохастическим и содержит спектральные корреляции.

2. Установлено, что статистические свойства излучения зависят от положения в спектре генерации. На краю спектра вероятность возникновения волн высокой интенсивности существенно выше таковой для стохастического излучения.

3. Установлено, что на краю спектра генерации возникают оптические редкие события. Для волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью показано, что процесс генерации редких событий является пуассоновским.

Все результаты, представленные в диссертации, получены впервые и содержат научную новизну. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и представлены на всероссийских и международных научных конференциях. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

По тексту автореферата и диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В автореферате недостаточно хорошо раскрыта практическая значимость проделанной работы.
2. На некоторых рисунках в автореферате (например, рис.2б и 3б) и в самой диссертации (рис. 18б, рис. 20 и др.) приводятся статистические зависимости, в том числе, для отрицательных значений мгновенной интенсивности, что не имеет физического смысла и может ввести читателя в заблуждение. Следует строить подобного рода зависимости исключительно для значений  $I \geq 0$ .
3. Некоторые результаты на графиках приводятся в зависимости от мощности накачки, что не информативно. Желательно приводить результаты, указывая мощность излучения лазера внутри активной среды. Иначе приходится пересчитывать приведенные числа, используя график зависимости выходной мощности от мощности накачки и коэффициент отражения выходного зеркала.
4. В диссертационной работе не обсуждается вопрос о влиянии статистических свойств излучения накачки на статистические свойства выходного излучения исследованных лазеров.
5. В защищаемых положениях не приводится диапазон мощностей лазеров, в которых верны полученные результаты.

Отмеченные недостатки не снижают научного уровня и качества диссертационной работы О.А. Горбунова, а также общей высокой оценки.

Диссертация Горбунова О.А. является самостоятельной завершенной исследовательской работой, в которой был изучен важный научный вопрос о статистических свойствах излучения квази-непрерывных многочастотных волоконных лазеров. По ценности полученных результатов, числу и качеству опубликованных работ диссертация полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаем,

что Горбунов Олег Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Отзыв составлен на основе рассмотрения диссертации на научном семинаре Института лазерной физики СО РАН, состоявшемся 16 апреля 2021 г (протокол № 1 от 16.04.2021).

**Отзыв подготовили:**

Старший научный сотрудник  
Лаборатории квантовых сенсоров,  
кандидат физико-математических наук



Д.В. Бражников

Ведущий научный сотрудник - руководитель  
научно-исследовательской группы оптических часов,  
кандидат физико-математических наук



В.С. Пивцов

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН,  
кандидат физико-математических наук



П.В. Покасов

**Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Почтовый адрес: 630090, г.Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 15Б.

Тел./факс (383) 333-20-67

E-mail: [info@laser.nsc.ru](mailto:info@laser.nsc.ru)

<http://www.laser.nsc.ru>