

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права  
УДК 520.874.7

**НОВИЦКАЯ**  
**Роза Игоревна**

**АНОМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ  
С МНОГОМОДОВОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Минск, 2024

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете**.

Научный руководитель - **Сташкевич Игорь Вячеславович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии  
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Афоненко Александр Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой квантовой радиофизики  
и оптоэлектроники  
Белорусского государственного университета;

**Новицкий Денис Викторович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий центром «Нанофотоника»  
ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова  
НАН Беларуси».

Оппонирующая организация – **Белорусский национальный технический университет**.

Защита состоится «27» сентября 2024 г. в 16.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09; e-mail: romanov@bsu.by.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «13» 08 2024 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат физ.-мат. наук доцент



О.Г. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 15 лет явление аномальных волн было в фокусе исследования в различных научных областях. Аномальные волны представляют собой редкие явления с экстремально высокими амплитудами, которые могут возникать и исчезать спонтанно в разных сложных физических системах. Аномальные волны были исследованы в различных оптических системах, включая интегрируемые системы, такие как волокна или волноводы с дисперсией и нелинейностью, и диссипативные системы, в основном представленные различными типами лазеров.

Диссипативные лазерные системы представляют собой хороший пример сложных физических систем для фундаментального исследования генерации аномальных волн. Лазерные системы могут работать в различных режимах и характеризуются большим количеством параметров, таких как степень нелинейности, дисперсия, коэффициенты усиления и потерь и т.д. Кроме этого, в лазерной генерации может быть задействовано различное количество продольных и поперечных мод, что позволяет изучать как временные, так и пространственные проявления аномальных волн.

Задолго до открытия аномальных волн в оптическом волокне в лазерной физике было известно явление формирования “горячих точек”, которые соответствуют резко сфокусированным областям в поперечном сечении пучка с пиковыми интенсивностями намного превышающими среднюю интенсивность. Было замечено, что в мощных лазерах оптические элементы или сам лазерный кристалл могут быть повреждены самопроизвольно возникающими горячими точками с чрезвычайно высокой интенсивностью. Однако, несмотря на многолетние исследования, основные причины и факторы, способствующие формированию горячих точек, остаются неясными. Кроме этого, известны полностью линейные интегрируемые оптические системы, в которых наблюдалась генерация пространственных аномальных волн за счет пространственных эффектов и дополнительных факторов. Это указывает на потенциальную возможность образования горячих точек и в лазерных системах при слабой нелинейности.

Таким образом, точные условия, необходимые для возникновения аномальных волн в лазерных системах, а также возможность их предсказания и искусственного создания до сих пор не исследованы до конца и остаются открытыми вопросами для изучения. Понимание механизмов генерации пространственных и временных аномальных волн является важным фундаментальным вопросом в лазерной физике и также может быть актуально для ее прикладных областей, например, для исключения или использования

подобных явлений при проектировании лазерных установок. Потенциальная возможность искусственной генерации аномальных волн может иметь применение в управлении конфигурацией выходного лазерного пучка и режима генерации лазера, что является одним из перспективных направлений для будущих исследований.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа выполнялась в рамках договора о совместной аспирантуре между БГУ и Университетом Бен-Гурион, а также в рамках научно-исследовательского проекта “Аномальные волны в лазерных системах”, выполняемого по договору с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований №F21IZR-005 (номер госрегистрации 20211110, 2020-2023 гг.).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель работы – исследование свойств и условий возникновения пространственных и пространственно-временных аномальных волн в импульсных лазерах с многомодовой поперечной структурой.

В процессе работы проводилось экспериментальное и теоретическое исследование влияния параметров многомодовых твердотельных лазеров с модуляцией добротности на вероятность возникновения пространственных и пространственно-временных аномальных волн. Основными параметрами являлись модовая структура излучения лазера (количество и порядок поперечных мод), нелинейность в резонаторе (керровская нелинейность в активной среде и насыщение поглощения в пассивном затворе), и мощность накачки. Также изучалась возможность контроля генерации аномальных волн с помощью настройки параметров лазерной системы.

Для выполнения поставленной цели в диссертационной работе были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Получить экспериментально генерацию аномальных волн в многомодовом твердотельном лазере с модуляцией добротности; определить режимы генерации, при которых возможно формирование аномальных волн.

2. Изучить влияние параметров лазерной системы, таких как модовая структура излучения лазера (количество и порядок поперечных мод), нелинейность в резонаторе (керровская нелинейность в активной среде и насыщение поглощения в пассивном затворе) и мощность накачки на вероятность возникновения пространственных и пространственно-временных аномальных волн.

3. Исследовать статистические и пространственно-временные характеристики наблюдаемых аномальных волн.

4. Разработать теоретическую модель для описания генерации пространственных и пространственно-временных аномальных волн в твердотельном лазере с несколькими поперечными модами, работающем в режиме модуляции добротности.

5. Проанализировать возможность контроля аномальных волн за счет управления параметрами лазерной системы.

**Объектом** исследования являются пространственно-временные аномальные волны. **Предмет исследования** – генерация аномальных волн в импульсных лазерах с многомодовой поперечной структурой.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально получена и исследована генерация пространственных аномальных волн в неодимовом лазере с несколькими поперечными модами, работающем в режиме модуляции добротности при низкой энергии накачки.

2. Установлено, что получить аномальные волны возможно только при определенной модовой структуре излучения лазера, когда в генерации задействовано достаточно большое количество поперечных мод высокого порядка.

3. Экспериментально установлено, что керровская нелинейность и нелинейность, вносимая пассивным затвором, не являются необходимыми факторами для получения пространственных аномальных волн в лазере с модуляцией добротности.

4. С помощью теоретического моделирования показано, что в лазере с несколькими поперечными модами и пренебрежимо слабыми нелинейными эффектами в резонаторе формирование пространственных и пространственно-временных аномальных волн может происходить за счет спонтанной синхронизации поперечных мод. Установлено, что вероятность возникновения аномальных волн в усредненных по времени профилях лазерного пучка выше при меньшей разности частот между модами и более пространственно-анизотропной модовой структуре излучения лазера.

5. Исследованы параметры многомодового лазера с модуляцией добротности, влияющие на вероятность возникновения пространственных аномальных волн. Экспериментально показано, что с помощью изменения конфигурации резонатора за счет юстировки зеркал и изменения размера внутрирезонаторной диафрагмы можно получить или устранить генерацию аномальных волн. С помощью теоретического моделирования установлено, что вероятность возникновения аномальных волн и их пространственно-временные

характеристики зависят от двух основных параметров – разности частот между поперечными модами и модовой структуры излучения лазера, которые определяются конфигурацией резонатора.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В результате взаимодействия поперечных мод высокого порядка в многомодовом лазере с активной или пассивной модуляцией добротности возникают пространственные аномальные волны. Их генерацию можно получить или устранить с помощью изменения конфигурации резонатора за счет юстировки зеркал и изменения размера внутрирезонаторной диафрагмы.

2. Керровская нелинейность и нелинейность насыщения поглощения, вносимая пассивным затвором, не являются необходимыми факторами для возникновения пространственных аномальных волн в многомодовом лазере с модуляцией добротности.

3. В многомодовом лазере с активной модуляцией добротности формирование пространственных аномальных волн происходит за счет спонтанной синхронизации поперечных мод. Вероятность их возникновения в усредненных по времени профилях лазерного пучка выше при разности частот между поперечными модами, соответствующей периоду биений большему длительности гигантского импульса.

4. Временная динамика аномальных волн, формирующихся в поперечном сечении пучка, определяется разностью частот между поперечными модами. При разности частот между модами, соответствующей периоду биений меньшему длительности гигантского импульса, возникают пространственно-временные аномальные волны.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя состоял в определении общего направления и основных целей исследования, в разработке методик и условий экспериментальных исследований, а также в обсуждении и интерпретации полученных результатов. Научные руководители со стороны Университета Бен-Гуриона в Негеве и соавторы к.ф.-м.н. А. Карабчевская и к.ф.-м.н. С. Дервянко принимали участие в определении целей и задач исследования, обсуждении и интерпретации полученных экспериментальных и теоретических результатов, а также в подготовке научных публикаций.

В диссертацию не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных научных конференциях: XXV Международная научно-практическая конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 20 апреля 2017 г.); IV, V Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 11-12 мая 2017 г., 16-17 мая 2019 г.); XI, XII, XIII, XIV Международная научно-техническая конференция «Квантовая Электроника» (Минск, 13-17 ноября 2017 г., 18-22 ноября 2019 г., 22-26 ноября 2021 г., 21-23 ноября 2023 г.); V Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 14-16 ноября 2018 г.); XIX International Conference & School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and IV International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics» (Minsk, September 24-28, 2018); Young Researchers Conference «International Day of Light 2021» (Beer-Sheva, Israel, May 20, 2021); the 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META 2023 (Paris, France, July 18-21, 2023).

Результаты исследований внедрены в образовательный процесс физического факультета БГУ и используются при чтении лекций по учебной дисциплине «Современные лазерные системы. Расчет оптико-лазерных систем» для студентов по специальностям 1-31 04 01 Физика (по направлениям), направления 1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность) и 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий (имеется 1 акт о практическом использовании).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты работы опубликованы в 17 научных работах, в числе которых 7 статей в научных изданиях, соответствующих п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 2.6 авторского листа), 10 статей в сборниках материалов научных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, в том числе 36 рисунков занимают 34 страницы, 3 таблицы на 3 страницах, одно приложение занимает 1 страницу. Список использованных источников содержит 131 наименование, включая 17 собственных публикаций соискателя ученой степени (на 11 страницах).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Глава 1** посвящена обзору актуальных результатов исследования и открытых вопросов в области оптических аномальных волн в целом и аномальных волн в лазерных системах в частности. Рассмотрены типы аномальных волн и их характерные свойства, а также известные проявления в интегрируемых и диссипативных оптических системах.

Аномальные волны удовлетворяют трем основным критериям:

1. Амплитуда аномальной волны более чем в два раза превышает среднюю амплитуду самой высокой трети волн.
2. Аномальные волны имеют стохастическую природу.
3. Функция распределения вероятностей амплитуды или интенсивности в присутствии аномальных волн имеет L-образную форму в логарифмическом масштабе.

В зависимости от свойств оптической системы, аномальные волны могут иметь временные, пространственные и пространственно-временные проявления.

В диссипативных лазерных системах временные аномальные волны возникают в нестационарных или хаотических режимах синхронизации мод или модуляции добротности. Например, в волоконных лазерах с пассивной синхронизацией мод аномальные волны проявляются как экстремальные импульсы, спонтанно возникающие за счет солитонных вспышек или нелинейных столкновений хаотических импульсов в резонаторе лазера. В многомодовых оптических и лазерных системах в результате нестационарного взаимодействия большого количества поперечных мод возникают пространственные и пространственно-временные аномальные волны. Известно, что в мощных твердотельных лазерах может происходить повреждение оптических элементов за счет случайно возникающих “горячих точек” с интенсивностью гораздо большей, чем средняя интенсивность пучка. Такие “горячие точки” могут формироваться за счет спонтанного взаимодействия поперечных и/или продольных мод и приводить к дальнейшему распаду пучка под действием нелинейных эффектов филаментации и катастрофической самофокусировки.

Также известно, что сильная нелинейность часто является одним из необходимых факторов для генерации аномальных волн в различных физических системах. Однако, теоретически и экспериментально было показано, что пространственно-временные аномальные волны могут возникать и в полностью линейных системах. Такие системы характеризуются большим количеством взаимодействующих мод, а также наличием неоднородности в распределении их характеристик или корреляций между ними, что

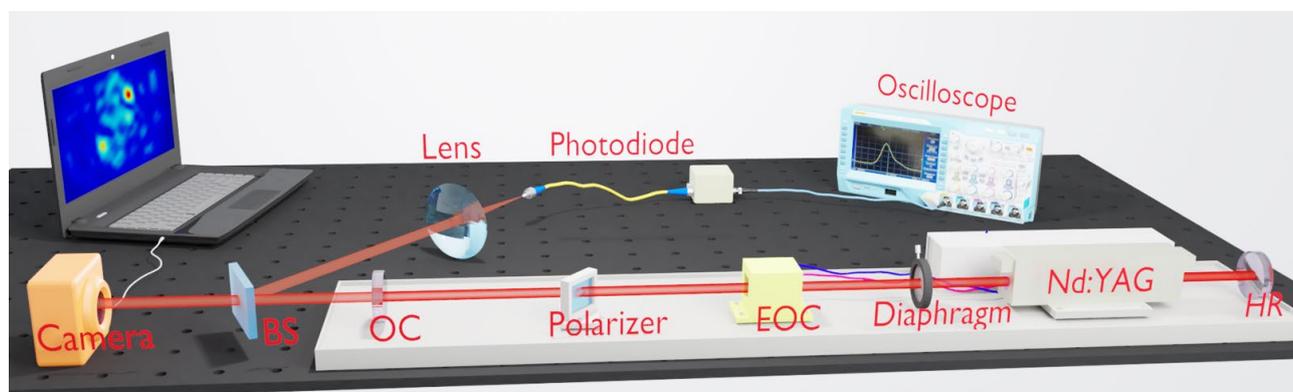
необходимо для получения характерной L-образной статистики интенсивности аномальных волн.

Ряд открытых вопросов в области изучения аномальных волн в лазерных системах включает механизмы и условия их возникновения в лазерах различных типов, роль линейных и нелинейных эффектов, возможность генерации аномальных волн в лазерных системах с низкой нелинейностью, а также возможность контроля (стабилизация лазеров с синхронизацией мод, устранение “горячих точек”), предсказания и искусственного создания аномальных волн.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию пространственных и пространственно-временных проявлений аномальных волн в твердотельных лазерах с многомодовой поперечной структурой, их свойств и статистических характеристик, а также факторов, необходимых для возникновения аномальных волн в таких лазерных системах.

В главе 2 рассмотрено экспериментальное исследование генерации пространственных аномальных волн в многомодовом твердотельном лазере с пассивной и активной модуляцией добротности и изучена возможность их формирования в зависимости от параметров лазерной системы, таких как модовая структура излучения лазера, мощность накачки и степень проявления нелинейных эффектов в резонаторе.

Для экспериментального наблюдения и регистрации аномальных волн использовалась схема установки на основе многомодового Nd:YAG лазера с ламповой накачкой, генерирующего в режиме модуляции добротности (рисунок 1). Профили выходного лазерного пучка регистрировались с помощью камеры со специализированным программным обеспечением, синхронизированной с частотой генерации лазера. Временной профиль гигантских импульсов регистрировался с помощью цифрового осциллографа.



**Рисунок 1 – Схема установки для экспериментального наблюдения и регистрации аномальных волн в Nd:YAG лазере с модуляцией добротности**

Модовая структура излучения лазера (количество и порядок поперечных мод, участвующих в лазерной генерации) является одним из важных параметров, определяющих профиль выходного лазерного пучка. Для изучения влияния модовой структуры излучения лазера на вероятность возникновения аномальных волн были экспериментально проанализированы четыре режима генерации лазера:

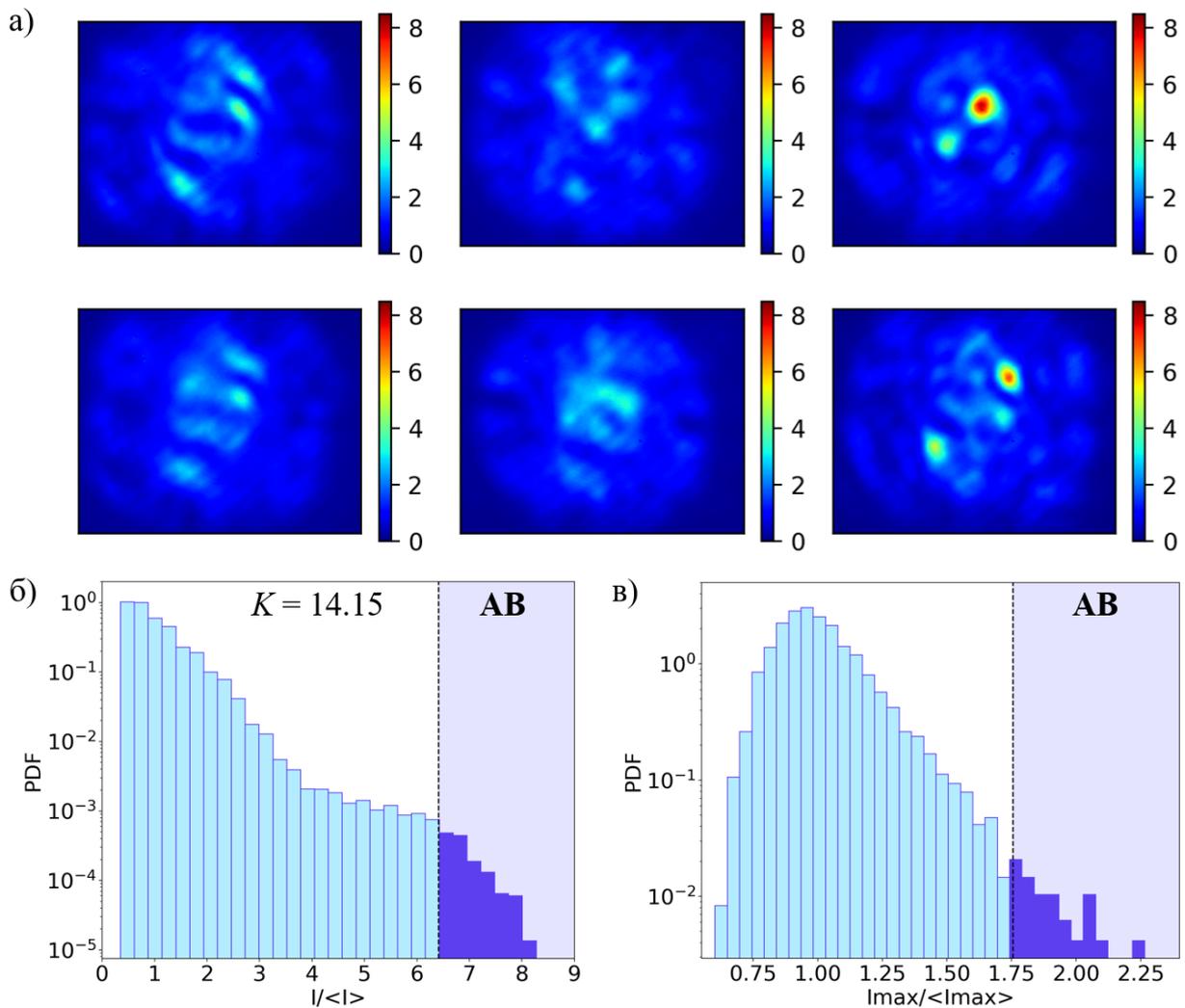
- I – генерация на фундаментальной поперечной моде;
- II – генерация на нескольких модах низкого порядка;
- III – генерация на нескольких модах высокого порядка;
- IV – генерация на многих модах высокого порядка.

Экспериментально установлено, что пространственные аномальные волны в Nd:YAG лазере с пассивной или активной модуляцией добротности возникают только в режиме IV, когда профиль выходного лазерного пучка имеет сложное и неоднородное пространственное распределение, сформированное в результате суперпозиции большого количества поперечных мод высоких порядков.

Другим принципиально важным параметром является нелинейность в резонаторе, включающая различные эффекты: керровскую нелинейность в активной среде, тепловую нелинейность, нелинейное насыщение поглощения в пассивном затворе, нелинейное взаимодействие мод и усиление в активной среде. Для изучения возможности генерации пространственных аномальных волн при низкой нелинейности в эксперименте использовалась конфигурация установки с активным (линейным) затвором для модуляции добротности, что позволило устранить эффект нелинейного насыщения поглощения. Чтобы изучить влияние самофокусировки в активной среде при возрастающей энергии импульса, энергия накачки изменялась в диапазоне от 7 до 10 Дж (при пороговой энергии накачки в 5 Дж). Значение пороговой мощности для самофокусировки, при которой дифракционная расходимость гауссового пучка компенсируется нелинейной самофокусировкой в активной среде Nd:YAG, равно 1.4 МВт, что примерно в 3 раза больше, чем значение пиковой мощности в резонаторе при энергии накачки 7 Дж и сравнимо с ним для 8 и 10 Дж. Таким образом, данные энергии накачки соответствуют режимам генерации, в которых проявление эффекта Керра может варьироваться от незначительного до существенного.

В результате экспериментальных исследований генерация пространственных аномальных волн была получена для всех энергий накачки в рассмотренном диапазоне, причем характеристики аномальных волн были близкими для экспериментов с разными энергиями накачки. Примеры профилей выходного лазерного пучка и статистики 2D и пиковой

интенсивности по профилям пучка для энергии накачки в 7 Дж представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Генерация пространственных аномальных волн в режиме активной модуляции добротности при энергии накачки 7 Дж:**  
**а) примеры профилей выходного лазерного пучка без аномальных волн (первая и вторая колонки слева) и с аномальными волнами (правая колонка) (интенсивность нормирована на среднюю); б) распределение 2D интенсивностей по профилю пучка, рассчитанное по нескольким характерным кадрам; в) распределение максимальных интенсивностей по профилю пучка по всем зарегистрированным кадрам (закрашенные области на рисунках б,в соответствуют интенсивностям пространственных аномальных волн, также указано значение коэффициента эксцесса  $K$ )**

Таким образом, в рассмотренных режимах с низкой мощностью накачки близкой к пороговой для самофокусировки эффект Керра не оказывает определяющее влияние на формирование аномальных волн и их свойства. Нелинейность, вносимая пассивным затвором, также не является необходимым фактором для формирования пространственных аномальных волн. При этом

возникновение пространственных аномальных волн возможно только тогда, когда в лазерной генерации задействовано достаточно большое количество поперечных мод высокого порядка.

**Глава 3** посвящена теоретическому моделированию генерации пространственных аномальных волн в твердотельном лазере с модуляцией добротности за счет спонтанной синхронизации поперечных мод в случае отсутствия нелинейных эффектов в резонаторе.

Для описания динамики генерации лазера с несколькими поперечными и продольными модами было использовано приближение, позволяющее представить полное поле в резонаторе в виде суммы полей отдельных мод с некоторыми индексами по продольным и поперечным координатам:

$$E(x, y, z, t) = \sum_{q,m,n} A_{qmn}(t) U_{mn}(x, y, z) e^{2\pi i \nu_{qmn} t + i \varphi_{qmn}},$$

где  $A_{qmn}(t)$ ,  $\nu_{qmn}$  и  $\varphi_{qmn}$  – медленно меняющаяся огибающая напряженности поля, частота и начальная фаза ТЕМ<sub>mn</sub> моды с поперечными индексами  $m, n$ , соответствующей продольной моде с индексом  $q$ ;

$U_{mn}(x, y, z)$  – распределение поля моды в поперечной плоскости.

На основе данного подхода предложена модель, позволяющая описать генерацию пространственных аномальных волн в усредненном по времени профиле выходного лазерного пучка в экспериментальной конфигурации лазерной установки для наблюдения пространственных аномальных волн, представленной на рисунке 1.

Для расчета интенсивности пучка на выходе резонатора зависимость амплитуд мод от времени  $A_{qmn}(t)$  определялась на основе многомодовых балансных уравнений, записанных для Nd:YAG лазера, генерирующего по четырехуровневой схеме в режиме активной модуляции добротности. Энергия накачки считалась фиксированной и равной 7 Дж. КПД накачки в модели считался равным 1.7% и задавался таким образом, чтобы получить длительность гигантского импульса на полувысоте  $\tau_{FWHM}=55$  нс, измеренную экспериментально для данной энергии накачки.

Распределения полей поперечных мод  $U_{mn}(x, y, z)$  описывались в базисе мод Гаусса-Лагерра, который являлся наиболее подходящим для описания экспериментально наблюдаемых профилей выходного пучка за счет цилиндрической симметрии системы. В теоретической модели рассматривалась одна продольная мода ( $q=0$ ) и 15 поперечных мод Гаусса-Лагерра с cos- и sin-конфигурациями, которые соответствуют наиболее выраженным модам в экспериментально полученных профилях выходного пучка. С помощью задания различных значений дополнительных неактивных потерь в резонаторе для cos- и sin-мод моделировался экспериментально наблюдаемый эффект пространственной анизотропии, когда формируемые профили лазерного пучка

не обладали радиальной симметрией и существовало выделенное направление, соответствующее более выгодным условиям для генерации мод с определенной пространственной конфигурацией.

Частоты поперечных мод Гаусса-Лагерра с радиальным и азимутальным индексами  $m$  и  $n$  определяются следующим образом:

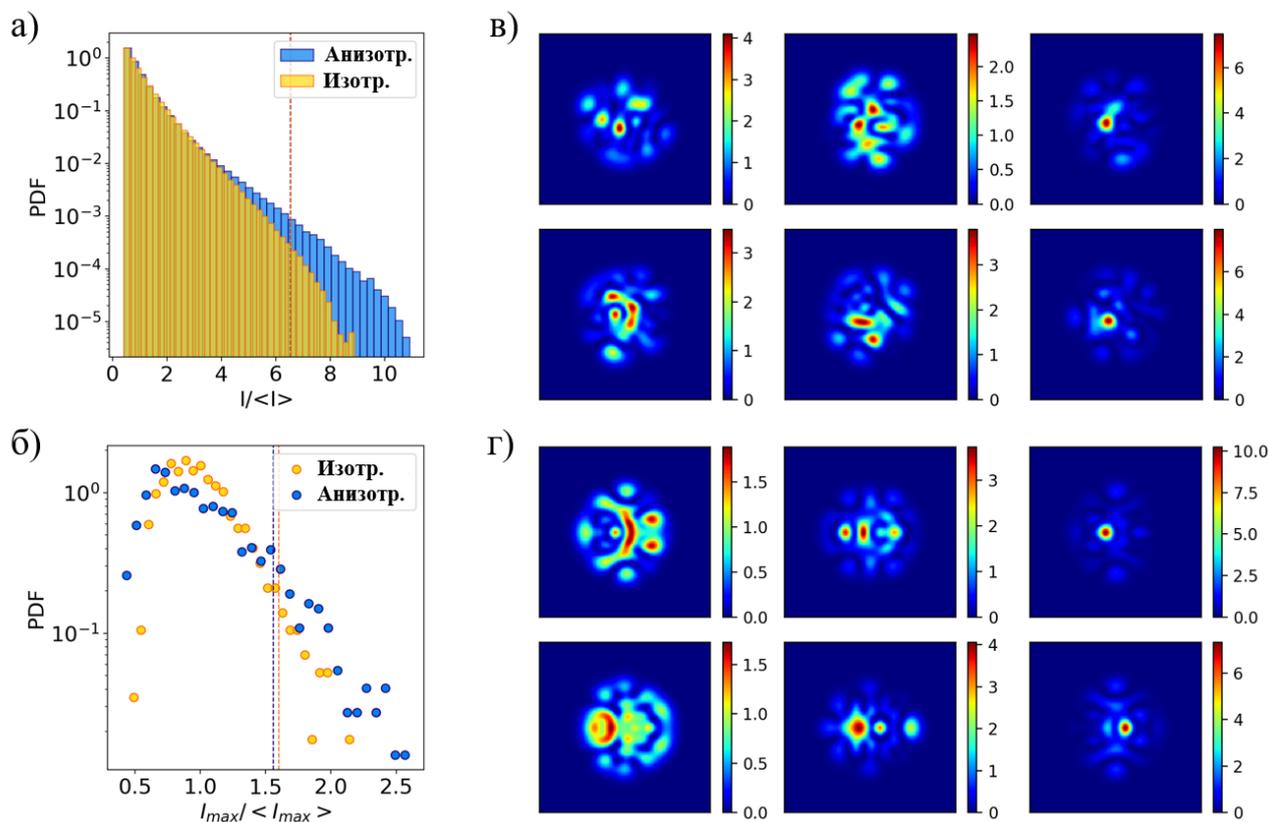
$$\nu_{mn} = (2m + |n| + 1) \Delta\nu_t,$$

где  $\Delta\nu_t$  - разность частот между поперечными модами. Она считалась свободным параметром, изменяющимся в диапазоне  $0 \leq \Delta\nu_t \leq 192$  МГц, который определяется условием устойчивости резонатора.

Начальные фазы мод считались случайными величинами, распределенными равномерно в диапазоне  $[0; 2\pi]$  и независимыми друг от друга для отдельных мод и разных реализаций гигантских импульсов.

В предложенной модели разность частот между поперечными модами и анизотропия модовой структуры излучения представляют собой два основных параметра, которые могут определять профиль выходного пучка и вероятность генерации пространственных аномальных волн. В результате теоретического моделирования установлено, что в случае, когда период биений между модами становится больше длительности гигантского импульса ( $\Delta\nu_t < \sim 5$  МГц,  $T_t > \sim 200$  нс), возможна генерация пространственных аномальных волн в усредненном по времени профиле интенсивности выходного пучка за счет эффекта спонтанной синхронизации мод при некоторых значениях случайных начальных фаз. Для значений разности частот между модами  $\Delta\nu_t > \sim 5$  МГц, соответствующих периоду биений меньшему длительности гигантского импульса ( $T_t < \sim 200$  нс), пространственные аномальные волны не возникают, т.к. случайные флуктуации интенсивности в поперечном сечении пучка, возникающие при спонтанной синхронизации мод, усредняются за время длительности гигантского импульса. На рисунке 3 показаны примеры усредненных по времени профилей выходного пучка и статистика интенсивности для разности частот между модами в 1 МГц в случае изотропной модовой структуры излучения (одинаковые интенсивности импульсов для cos- и sin-мод) и предельно анизотропной модовой структуры излучения (в генерации задействованы только cos-моды).

Таким образом, в результате теоретического моделирования установлено, что спонтанная синхронизация поперечных мод является одним из факторов, приводящим к возникновению пространственных аномальных волн в лазерной системе с низкой нелинейностью. При этом важный сопутствующий фактор – это анизотропия модовой структуры излучения, которая является одним из механизмов нарушения пространственной симметрии в системе, что создает благоприятные условия для возникновения аномальных волн.



**Рисунок 3 – Рассчитанные распределения интенсивности и примеры усредненных по времени профилей выходного пучка для предельных случаев изотропной и анизотропной модовой структуры излучения при разности частот между поперечными модами  $\Delta\nu_t=1$  МГц:**

**а) статистика 2D интенсивностей по профилю пучка  $\{I_{2D}\}$ ; б) статистика пиковых интенсивностей по профилю пучка  $\{I_{max}\}$  (штриховыми линиями показаны лимиты аномальных волн); в) профили пучка для изотропной модовой структуры излучения; г) профили пучка для анизотропной модовой структуры излучения (интенсивность нормирована на среднюю)**

В главе 4 экспериментально и теоретически исследованы пространственно-временные свойства аномальных волн в многомодовом твердотельном лазере с активной модуляцией добротности и взаимосвязь между возникновением пространственных и временных аномальных волн.

Экспериментально показано, что между полной энергией гигантских импульсов и пиковой интенсивностью “горячих точек” отсутствует прямая корреляция. Это свидетельствует о том, что формирование пространственных аномальных волн происходит не за счет увеличения полной энергии гигантского импульса, а за счет перераспределения энергии между модами и их взаимодействия между собой.

С помощью модификации установки для регистрации аномальных волн в поперечном сечении выходного лазерного пучка была исследована временная

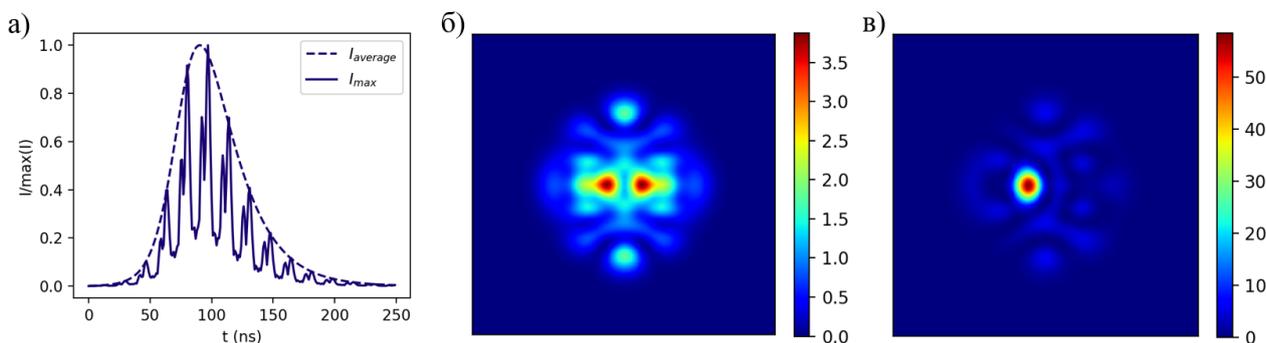
динамика аномальных волн в лазере с активной модуляцией добротности. Зарегистрированные профили гигантских импульсов, соответствующие областям пучка с аномальными волнами, имели структуру с более выраженным одним или несколькими максимумами с длительностью порядка 10-15 нс. Это говорит о том, что время жизни “горячих точек” может быть порядка нескольких периодов обхода резонатора (период двойного прохода резонатора  $T_c = 5.2$  нс), что меньше полной длительности гигантского импульса, и профиль пучка в поперечном сечении динамически изменяется в течение генерации. Кроме этого, в случае гигантских импульсов, соответствующих области пучка с аномальной волной, расстояние между отдельными максимумами равно  $T_c$  или  $2T_c$ . Такая временная динамика указывает на возможное проявление спонтанной пространственно-временной синхронизации мод как одного из механизмов генерации пространственных аномальных волн.

Для измерения пространственной когерентности выходных лазерных пучков с “горячими точками” была использована экспериментальная установка на основе интерферометра Маха-Цендера. В результате данного экспериментального исследования установлено, что области пучка с “горячими точками” чаще всего характеризуются высокой видностью интерференционной картины. Это свидетельствует о том, что в большинстве случаев формирование пространственных аномальных волн происходит в результате когерентной суперпозиции поперечных мод.

Для более подробного изучения динамики аномальных волн и их свойств было проведено теоретическое моделирование генерации пространственно-временных аномальных волн за счет спонтанной синхронизации поперечных мод на основе модели, рассмотренной в главе 3.

Теоретически показано, что временная динамика интенсивности в поперечном сечении пучка определяется разностью частот между поперечными модами. В случае разности частот, соответствующей периоду биений между модами большому длительности гигантского импульса ( $\Delta\nu_t < \sim 5$  МГц,  $T_t > \sim 200$  нс для Nd:YAG лазера), пространственные аномальные волны существуют в течение всей длительности гигантского импульса и профиль интенсивности в поперечном сечении пучка незначительно изменяется со временем. При большей разности частот между модами период биений становится меньше длительности гигантского импульса и эффекты спонтанной синхронизации мод приводят к периодической динамике пиковой интенсивности по профилю пучка, отличной от временной динамики средней интенсивности. При этом профиль пучка не является стационарным и значительно изменяется в течение генерации гигантского импульса, что показано на рисунке 4 для разности частот между поперечными модами в 29.6 МГц. Пространственная аномальная волна, наблюдаемая в мгновенном

профиле пучка, отсутствует в усредненном по времени профиле пучка. В таком случае возможна генерация пространственно-временных аномальных волн, которые существуют в определенные моменты времени и имеют времена жизни менее десятка наносекунд.



**Рисунок 4 – Рассчитанные характеристики для разности частот между поперечными модами  $\Delta\nu_t=29.6$  МГц:**

- а) зависимость от времени пиковой и средней интенсивности по профилю пучка, нормированных на максимальные значения; б) профиль выходного пучка, усредненный по времени за длительность гигантского импульса; в) профиль выходного пучка в момент времени  $t=97$  нс, соответствующий максимальному значению пиковой интенсивности**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально получена и исследована генерация пространственных аномальных волн в неодимовом лазере с пассивной или активной модуляцией добротности. Экспериментально показано, что с помощью изменения конфигурации резонатора за счет юстировки зеркал резонатора и изменения размера внутрирезонаторной диафрагмы можно получить или устранить генерацию пространственных аномальных волн [5, 6, 15, 16].

2. Установлено, что одним из факторов, существенно влияющих на вероятность возникновения пространственных аномальных волн в многомодовом лазере с модуляцией добротности при низкой энергии накачки, является модовая структура излучения лазера. Экспериментально показано, что получить аномальные волны возможно только тогда, когда в лазерной генерации задействовано достаточно большое количество поперечных мод высокого порядка. В случае, когда генерация осуществляется на одной или нескольких модах низкого порядка, пространственные аномальные волны не возникают [5, 6, 15, 16].

3. Экспериментально исследовано влияние нелинейности в резонаторе на вероятность возникновения аномальных волн и их свойства. Пространственные аномальные волны возникали в режимах как пассивной, так и активной модуляции добротности, что указывает на то, что нелинейность, вносимая пассивным затвором, не является необходимой для получения пространственных аномальных волн. Кроме этого, аномальные волны были получены при сравнительно низких энергиях накачки и мощностях генерации значительно меньших минимальной мощности, при которой возникает эффект самофокусировки в резонаторе лазера, что также указывает на не определяющую роль эффекта Керра в процессе формирования пространственных аномальных волн в твердотельном лазере [6, 15, 16].

4. Экспериментально исследованы пространственно-временные характеристики аномальных волн, наблюдаемых в неодимовом лазере с модуляцией добротности. Пространственные аномальные волны могут иметь временную динамику с периодической структурой, отличную от динамики, усредненной по профилю пучка. Области пучка с “горячими точками” в основном имеют высокую пространственную когерентность и времена жизни меньшие полной длительности гигантского импульса. Данные характеристики наблюдаемых аномальных волн указывают на то, что предполагаемым механизмом их образования является спонтанная синхронизация мод. [6, 16].

5. Разработана теоретическая модель для расчета генерации пространственных и пространственно-временных аномальных волн в многомодовом твердотельном лазере с активной модуляцией добротности в результате спонтанной синхронизации поперечных мод [7, 1–4, 8–14, 17].

6. Теоретически показано, что в случае отсутствия нелинейного взаимодействия между модами в активной среде и других нелинейных эффектов в резонаторе основными параметрами, влияющими на генерацию пространственных и пространственно-временных аномальных волн, являются разница между частотами поперечных мод и пространственная анизотропия модовой конфигурации. Эти параметры определяются конфигурацией резонатора и могут быть использованы для получения либо устранения аномальных волн на выходе лазера [7, 17].

7. Установлено, что вероятность возникновения пространственных аномальных волн в усредненном по времени профиле лазерного пучка увеличивается при уменьшении разности частот между поперечными модами. Также вероятность их генерации выше при наличии более сильной пространственной анизотропии в модовой структуре излучения лазера, т.к. в таком случае при конструктивной интерференции мод с большей вероятностью возникают “горячие точки” в определенных областях

в пространственном сечении пучка, соответствующих максимумам взаимодействующих мод [7, 17].

8. С помощью теоретического моделирования показано, что при разности частот между поперечными модами большей примерно 5 Гц, когда период биений становится меньше длительности гигантского импульса в Nd:YAG лазере с активной модуляцией добротности, происходит генерация пространственно-временных аномальных волн в результате спонтанной синхронизации поперечных мод. В таком случае временная динамика интенсивности в поперечном сечении пучка имеет периодическую структуру, причем период и время жизни аномальных волн определяются разностью частот между поперечными модами [7].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты исследования применимы для решения исследовательских и прикладных задач в области лазерной физики. Анализ лазерной системы на предмет возможной генерации аномальных волн важен для избежания неустойчивых режимов генерации и оптического пробоя элементов в резонаторе за счет спонтанно возникающих горячих точек. Это особенно актуально при проектировании лазерных установок большой мощности и/или с короткой длительностью импульса (например, твердотельные лазеры с модуляцией добротности и/или синхронизацией мод), а также многомодовых лазеров, в которых в генерации задействовано большое количество поперечных мод. Кроме этого, возможно практическое применение генерации пространственных и пространственно-временных аномальных волн в лазерах, например, для формирования определенной конфигурации выходного пучка. Разработка многомодовых твердотельных лазеров с синхронизацией поперечных мод или полной синхронизацией поперечных и продольных мод имеет потенциал как для фундаментального исследования пространственно-временных эффектов в лазерах, так и для практического использования в случаях, когда необходимо получить лазерное излучение высокой интенсивности, локализованное определенным образом во времени и пространстве.

Полученные результаты внедрены в образовательный процесс физического факультета БГУ и используются при чтении лекций по учебной дисциплине «Современные лазерные системы. Расчет оптико-лазерных систем» для студентов по специальностям 1-31 04 01 Физика (по направлениям), направления 1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность) и 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий, имеется один акт о практическом использовании.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях**

1. Сташкевич, И.В. Генерационные характеристики квази трехуровневого Nd:KGW лазера с диодным возбуждением / И.В. Сташкевич, Р.И. Новицкая // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2016. – № 3. – С. 71-75.

2. Горбацевич, А.С. Разгрузка резонатора посредством генерации второй гармоники / А.С. Горбацевич, Р.И. Новицкая, И.В. Сташкевич // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. - № 2. – С. 57-62.

3. Navitskaya, R.I. Cavity Dumping by the Second Harmonic Generation in the Mode-Locked Nd:YAG Laser / R.I. Navitskaya, I.V. Stashkevitch // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2019. – Vol. 22, № 2. – P. 177-189.

4. Navitskaya, R.I. Cavity Dumping by the Second Harmonic Generation in the Q-Switched Nd:YAG Laser / R.I. Navitskaya, I.V. Stashkevitch, E.S. Varapay // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. - № 1. – С. 28-33.

5. Experimental demonstration of spatial rogue waves in the passively Q-switched Nd:YAG laser / R. Navitskaya, I. Stashkevich, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // Optics Letters. – 2021. – Vol. 46, № 15. – С. 3773-3776.

6. Spatial rogue waves in the actively Q-switched Nd:YAG laser under low Kerr nonlinearity / R. Navitskaya, I. Stashkevich, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // Optics Express. – 2022. – Vol. 30, № 20. – P. 37076-37084.

7. Simulation of spatial rogue waves in actively Q-switched solid state laser with transverse mode locking / R. Navitskaya, I. Stashkevich, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // Optics and Laser Technology. – 2024. – Vol. 171. – P. 110458 (1-9).

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

8. Navitskaya, R.I. Simulation of cavity dumping by the second harmonic generation [Electronic resource] / R.I. Navitskaya, I.V. Stashkevitch // Актуальные вопросы физики и техники: материалы V Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 21 апреля 2016 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «ГГУ имени Ф. Скорины»; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 6-7. – 1 электрон. опт. диск (CD ROM).

9. Navitskaya, R. Cavity dumping by the second harmonic generation in Nd:YAG laser / R. Navitskaya, I. Stashkevich, A. Gorbatshevich // Прикладные

проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы четвертой Междунар. науч. практич. конф., Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко» Бел. гос. ун-та; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 109-110.

10. Новицкая, Р.И. Моделирование разгрузки резонатора посредством генерации второй гармоники / Р.И. Новицкая // Физика конденсированного состояния : материалы XXV Междунар. науч. практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 20 апреля 2017 г. / УО «Гроднен. гос. ун-т имени Я. Купалы»; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2017. – С. 150-152.

11. Новицкая, Р.И. Разгрузка резонатора посредством генерации второй гармоники в режиме модуляции добротности / Р.И. Новицкая, И.В. Сташкевич // Квантовая электроника : материалы XI Междунар. науч. технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Бел. гос. ун-т, НИИ приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 25-26.

12. Navitskaya, R. Dual-polarization generation in the Nd:YAG laser [Electronic resource] / R. Navitskaya, I. Stashkevich // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы V Междунар. науч. конф., Гомель, 14-16 ноября 2018 г. В 2 ч. / Мин. обр. Респ. Бел., ГГУ имени Ф. Скорины, НИУ «Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», БРФФИ; редкол.: Д.Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2018. – Ч. 1. – С. 40-45. – Режим доступа: <https://elib.gsu.by/bitstream/123456789/36928/1/Roza%20Navitskaya.pdf>. – Дата доступа: 18.04.2024.

13. Navitskaya, R. Polarization coupling on dual-polarization generation in a pulsed Nd:YAG laser [Electronic resource] / R. Navitskaya, I. Stashkevich // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы V Междунар. науч. практич. конф., Минск, 16-17 мая 2019 г. / НИИ приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко БГУ. – Минск, 2019. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/235960>. – Дата доступа: 18.04.2024.

14. Stashkevich, I. Passively Q-switched Nd:YAG laser with direct bleaching of a saturable absorber / I. Stashkevich, R. Navitskaya // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-22 нояб. 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Науч.-технич. асс. «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 118-120.

15. Generation of spatial rogue waves in the actively Q-switched solid-state laser [Electronic resource] / R.I. Navitskaya, I.V. Stashkevich, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч. технич. конф., Минск, 22-26 ноября 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Бел. гос. ун-т, НИИ приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 185-187. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/271741/1/185-187.pdf>. – Дата доступа: 18.04.2024.

16. Generation of spatial rogue waves in a Q-switched Nd:YAG laser [Electronic resource] / R. Navitskaya, I. Stashkevitch, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // META 2023: proc. of the 13th Internat. Conf. on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Paris, France, 18-21 July 2023 / Philippe Lalanne, Institut d'Optique d'Aquitaine – CNRS, France Said Zouhdi, Paris-Saclay University, France. – Mode of access: <https://cris.bgu.ac.il/en/publications/generation-of-spatial-rogue-waves-in-a-q-switched-nd-yag-laser>. – Date of access: 18.04.2024.

17. Spatial rogue waves in a Q-switched solid state laser with transverse mode locking [Electronic resource] / R.I. Navitskaya, I.V. Stashkevich, S. Derevyanko, A. Karabchevsky // Квантовая электроника : материалы XIV Междунар. науч. технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / Белорус. гос. ун-т, Ин-т приклад. физич. проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 180-183. – 1 электрон. опт. диск (CD ROM).



## РЕЗЮМЕ

Новицкая Роза Игоревна

### АНОМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ С МНОГОМОДОВОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Ключевые слова: пространственная аномальная волна, твердотельный лазер, модуляция добротности, синхронизация мод, поперечные моды лазера, модовая структура излучения.

Цель работы: исследование свойств и условий возникновения пространственных и пространственно-временных аномальных волн в импульсных лазерах с многомодовой поперечной структурой.

Методы исследования: экспериментальный и теоретический анализ пространственной и временной структуры выходных лазерных пучков.

Полученные результаты и их новизна. Экспериментально получена и исследована генерация пространственных аномальных волн в неодимовом лазере с несколькими поперечными модами, работающем в режиме активной или пассивной модуляции добротности при низкой энергии накачки. Изучена зависимость вероятности возникновения аномальных волн от модовой структуры излучения лазера и степени нелинейности в резонаторе. Разработана теоретическая модель, позволяющая описать генерацию пространственных аномальных волн в многомодовом твердотельном лазере с активной модуляцией добротности в результате спонтанной синхронизации поперечных мод в отсутствие нелинейных эффектов в резонаторе. Экспериментально и теоретически исследованы статистические и пространственно-временные характеристики наблюдаемых аномальных волн.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты исследования применимы для решения исследовательских и прикладных задач в области лазерной физики, включая анализ лазерной системы на предмет возможной генерации аномальных волн, проектирование лазерных установок большой мощности, а также разработку многомодовых твердотельных лазеров с синхронизацией поперечных мод или полной синхронизацией поперечных и продольных мод.

## РЭЗІЮМЭ

Навіцкая Роза Ігараўна

### АНАМАЛЬНЫЯ ХВАЛІ Ў ІМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ З ШМАТМОДАВАЙ ПАПЯРОЧНАЙ СТРУКТУРАЙ

Ключавыя словы: прасторавая анамальная хваля, цвёрдацельны лазер, мадуляцыя дыхтоўнасці, сінхранізацыя мод, папярочныя моды лазера, модавая структура выпраменьвання.

Мэта працы: даследванне ўласцівасцяў і ўмоў узнікнення прасторавых і прасторава-часавых анамальных хваляў у імпульсных лазерах з шматмодавай папярочнай структурай.

Метады даследавання: эксперыментальны і тэарэтычны аналіз прасторавай і часовай структуры выходных лазерных пучкоў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Эксперыментальна атрымана і даследавана генерацыя прасторавых анамальных хваляў у неадымавым лазеры з некалькімі папярочнымі модамі, які працуе ў рэжыме актыўнай ці пасіўнай мадуляцыі дыхтоўнасці пры нізкай энергіі накачкі. Вывучана залежнасць верагоднасці ўзнікнення анамальных хваляў ад модавай структуры выпраменьвання лазера і ступені нелінейнасці ў рэзанатары. Распрацавана тэарэтычная мадэль, якая дазваляе апісаць генерацыю прасторавых анамальных хваляў у шматмодавым цвёрдацельным лазеры з актыўнай мадуляцыяй дыхтоўнасці ў выніку спантаннай сінхранізацыі папярочных мод пры адсутнасці нелінейных эфектаў ў рэзанатары. Эксперыментальна і тэарэтычна даследаваны статыстычныя і прасторава-часавыя характарыстыкі назіраных анамальных хваляў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: вынікі даследавання дастасавальныя для вырашэння даследчых і прыкладных задач у галіне лазернай фізікі, у тым ліку аналізу лазернай сістэмы на прадмет магчымай генерацыі анамальных хваляў, праектавання лазерных устаноў вялікай магутнасці, а таксама распрацоўкі шматмодавых цвёрдацельных лазераў з сінхранізацыяй папярочных мод або поўнай сінхранізацыяй папярочных і падоўжных мод.

## SUMMARY

Novitskaya Roza Igorevna

### ROGUE WAVES IN PULSED LASERS WITH MULTIMODE TRANSVERSE STRUCTURE

Keywords: spatial rogue wave, solid-state laser, Q-switching, mode-locking, transverse laser modes, mode configuration.

Objective: study of properties and conditions of spatial and spatio-temporal rogue waves emergence in pulsed lasers with multimode transverse structure.

Research methods: experimental and theoretical analysis of spatial and temporal structure of output laser beams.

Obtained results and novelty. The generation of spatial rogue waves has been experimentally obtained and investigated in an actively or passively Q-switched neodymium laser with several transverse modes under low pump power. The dependence of probability of the rogue waves emergence on the laser mode configuration and nonlinearity in the cavity has been studied. A theoretical model has been developed to simulate the generation of spatial rogue waves in an actively Q-switched multimode solid-state laser as a result of spontaneous transverse mode-locking under the absence of nonlinear effects in the cavity. Statistical and spatio-temporal properties of the observed rogue waves have been investigated experimentally and theoretically.

Recommendations for applications and application area: the results of the performed study are applicable for solving various research and development tasks in the area of laser physics, including analysis of a laser system in terms of probability of the rogue waves emergence, design of high-power laser setups, and development of multimode lasers with transverse mode locking or simultaneous transverse and longitudinal mode locking.

