

На правах рукописи



Овчаренко Борис Дмитриевич

**УПРАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ГИБРИДНОМ ЛАЗЕРНОМ ИСТОЧНИКЕ**

1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

**Научный руководитель:**

**Камынин Владимир Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Степанов Андрей Николаевич** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией сверхсильных полей отдела сверхбыстрых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

**Морозов Вячеслав Борисович** – кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита диссертации состоится 08 июня 2026 года в 15:00

на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте

<https://diss.gpi.ru/all>

Автореферат диссертации разослан

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.03

канд. физ.-мат. наук

тел.: +7 (499) 503-8780

Осадчий Александр Валентинович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Развитие технологий твердотельных лазеров с высокой пиковой мощностью обеспечивает возможность решения широкого круга задач в интересах различных отраслей науки и техники (лазерный термоядерный синтез, обработка материалов, малоинвазивная хирургия и др.) [1-5]. Лазерные системы, используемые для решения перечисленных задач, строятся по схеме «задающий генератор-усилитель» и обладают высокой пиковой мощностью, которая непосредственно связана с высокой выходной энергией и короткой (единицы наносекунд) длительностью импульсов [6-9]. Основными факторами, влияющими на эффективность применения указанных систем, являются снижение мощности и искажение временной формы выходного импульса за счет уменьшения коэффициента усиления лазера под влиянием усиленного спонтанного излучения (УСИ), возникающего при высоких мощностях накачки, и насыщения активных сред лазерных усилителей. Применение гибридных лазерных источников (ГЛИ), задающий генератор и усилитель которых строятся на различных типах активных сред [10], потенциально обеспечивает более высокую эффективность и гибкость лазерных систем, что позволяет расширить возможности по увеличению пиковой мощности лазерного излучения [11- 15]. Управление излучением в таких системах является сложной и актуальной задачей лазерной физики и имеет важное значение для создания мощных лазерных комплексов и систем, используемых в различных областях науки и техники.

### **Степень разработанности темы**

Повышение интереса к лазерным излучателям с высокой пиковой мощностью для использования в различных приложениях диктует необходимость снижения отмеченных негативных факторов и совершенствования методов управления лазерным излучением. В диссертации рассмотрены и проанализированы известные методы управления излучением в лазерах с высокой пиковой мощностью для систем различного назначения. Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что используемые в настоящее время методы управления излучением в таких лазерах (адаптивные оптические системы, ячейки Погкельса, объемные брэгговские решетки и др.) обладают рядом недостатков и зачастую оказываются малоэффективными из-за различных физических ограничений (быстродействие, лучевая стойкость, габаритные размеры и др.) [16-19].

Диссертационная работа посвящена разработке метода управления лазерным излучением ГЛИ с выходной энергией 1 Дж, длительностью 20 нс (50 МВт пиковой мощности) и длиной волны излучения 1064 нм, разработанного для перспективной экспериментальной установки лазерного термоядерного синтеза [20]. В качестве задающего генератора в ГЛИ применялся волоконный лазер с управлением параметрами импульса излучения (длительность импульса, фронты нарастания и спада, нестабильность амплитуды и формы, джиттер и т.д.) [21, 22], а в качестве усилителя – твердотельный усилитель на базе квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой и активными элементами из  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  [23-25]. Для созданного ГЛИ разработан алгоритм управления формой импульса, работоспособность и эффективность которого подтверждена результатами физического моделирования.

Определение путей снижения влияния УСИ на величину коэффициента усиления проводилось путем расчетно-экспериментальных исследований квантрона-усилителя с импульсной поперечной диодной накачкой. На основе полученных результатов был разработан метод повышения коэффициента усиления за счет оптимизации геометрических параметров оптической диодной накачки, позволивший улучшить энергетические параметры лазерной системы.

В ходе диссертационных исследований теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность создания ГЛИ с высокой пиковой мощностью и управлением лазерным излучением.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью работы является разработка метода управления излучением в ГЛИ с высокой пиковой мощностью.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование влияния УСИ на коэффициент усиления слабого сигнала в квантронах с импульсной поперечной диодной накачкой.
2. Разработка метода повышения коэффициента усиления слабого сигнала за счет уменьшения влияния УСИ в квантронах с импульсной поперечной диодной накачкой.
3. Экспериментальное исследование влияния эффекта насыщения в твердотельных усилителях ГЛИ на форму лазерного импульса, исследование процесса образования формы импульса и разработка алгоритма управления лазерным излучением.

4. Экспериментальное исследование алгоритма управления формой импульса лазерного излучения с получением прямоугольного или ступенчатого профилей при выходной энергии до 1 Дж, длительности импульсов 20 нс и длине волны излучения 1064 нм в ГЛИ.

### **Научная новизна**

1. Впервые разработан метод повышения коэффициента усиления лазерной системы за счет подавления УСИ в квантронах с импульсной поперечной диодной накачкой и активным элементом из  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  до  $\text{Ø}10$  мм путем оптимизации геометрических параметров диодной накачки в виде разнесения друг от друга лазерных диодных решеток (ЛДР) и создания прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента. Метод обеспечивает увеличение коэффициента усиления слабого сигнала в ГЛИ.

2. Впервые продемонстрировано управление формой лазерных импульсов в ГЛИ, состоящим из волоконного задающего генератора и твердотельного двухкаскадного усилителя на основе двух квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой. На выходе ГЛИ реализованы импульсы с длиной волны излучения 1064 нм, длительностью 20 нс и энергией до 1 Дж с управляемым прямоугольным или ступенчатым профилями лазерного излучения.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. УСИ, образованное в усилителе ГЛИ, оказывает существенное влияние на коэффициент усиления, что приводит к ухудшению энергетических параметров лазерного излучения.

2. Найдены условия, которые минимизируют влияние УСИ на коэффициент усиления, повышают коэффициент усиления и улучшают энергетические параметры выходного лазерного излучения ГЛИ.

3. Заданная форма импульса задающего генератора позволяет существенно компенсировать насыщение усиления в ГЛИ, которое оказывает негативное влияние на форму выходного лазерного импульса и приводит к снижению эффективности лазерной системы.

4. Применение разработанного алгоритма управления позволяет формировать на основе предварительно заданной формы импульса и эффекта насыщения усиления широкий набор форм лазерных импульсов с выходной энергией лазерного излучения до 1 Дж, что обеспечивает повышение эффективности воздействия лазерного излучения.

Практическая значимость и новизна результатов работы подтверждается 5 патентами Российской Федерации.

## **Методология и методы исследований**

В ходе выполнения диссертационного исследования использовалось современное оборудование и методы обработки результатов. Методология исследований основывалась на системном подходе решения проблем для повышения эффективности разрабатываемых методов, объединяющих в себе расчетные оценки с их экспериментальной верификацией. Решение поставленных задач проводилось на основе анализа влияния негативных факторов на параметры лазерных импульсов с высокой пиковой мощностью, расчетно-теоретических и экспериментальных исследований ГЛИ, его составных частей и оценки полученных результатов. В задачах моделирования применялись апробированные методы лазерной физики и оптики. Измерение энергетических параметров проводилось с помощью современных пироэлектрических и тепловых детекторов высокой точности. Временные характеристики контролировались при помощи осциллографов с полосой пропускания 1 ГГц. Спектральные характеристики излучения детектировались при помощи спектрометра с разрешением 0,05 нм. Пространственное распределение фиксировалось высококачественной монохромной КМОП-камерой с размером сенсора 12x12 мм<sup>2</sup> и разрешением 20 МП. Измерения исследуемых параметров осуществлялись в соответствии или по аналогии со стандартными методиками.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный метод повышения коэффициента усиления за счет подавления УСИ, включающий в себя оптимизацию геометрических параметров диодной накачки в виде разнесения друг от друга ЛДР и создания прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента, позволяеткратно увеличить коэффициент усиления слабого сигнала в квантронах с импульсной поперечной диодной накачкой.

2. Управление излучением ГЛИ с высокой выходной энергией импульса и наносекундной длительности осуществляется путем анализа искажений формы усиленных импульсов, вносимых насыщенным усилителем, и последующей коррекцией функции пропускания.

3. Разработанный алгоритм управления формой лазерного излучения в ГЛИ позволяет формировать прямоугольный и ступенчатый профили с амплитудными отклонениями до 15% от целевой формы огибающей при высокой выходной энергии импульса и наносекундной длительности.

**Личный вклад соискателя** в диссертационную работу заключается в непосредственном участии в постановке задач, определении способов их решения, проведения экспериментальной работы, анализе и интерпретации полученных данных, написании статей, получения патентов,

апробации результатов, а также разработки принципиальных оптических схем и принятии конструкторских решений. Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично или при его определяющем участии.

### **Степень достоверности**

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается:

- учетом основных фундаментальных положений лазерной физики и оптики;
- значительным объемом экспериментальных исследований, проведенных с использованием корректных апробированных и аттестованных методик, сертифицированного измерительного оборудования, а также современных средств обработки и верификации полученных результатов;
- хорошей сходимостью расчетно-теоретических и экспериментальных результатов;
- сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными; публикациями материалов исследования в высокорейтинговых научных журналах и докладами на всероссийских и международных конференциях.

### **Апробация результатов**

Результаты работы были представлены на Десятой, Одиннадцатой и Двенадцатой всероссийских школах студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (г. Саров, май 2016, апрель 2017 и июнь 2019), Школе–конференции молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели» (г. Москва, октябрь 2018), 9-ый Международный семинар по волоконным лазерам (г. Новосибирск, сентябрь 2020), International Conference on Laser Optics «ICLO» (г. Санкт-Петербург, июнь 2022); Десятая международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз (г. Москва, март 2024).

### **Публикации по теме диссертации**

Результаты по теме диссертации изложены в 3 научных работах (3 статьи в научных рецензируемых журналах из перечня ВАК, SCOPUS или WOS) и 5 патентах Российской Федерации.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, включая 48 рисунков и 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации содержит результаты литературного анализа проблем современного уровня мощных лазерных систем. Основные проблемы связаны с эффективностью методов управления лазерным излучением высокой мощности.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию влияния УСИ на коэффициент усиления слабого сигнала, нахождению условий минимизации влияния УСИ и разработке нового метода по уменьшению влияния УСИ в активном элементе из  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой для увеличения коэффициента усиления.

В п. 2.1 описаны разработанные основные элементы квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой.

В п. 2.1.1 описываются конструкции лазерных диодных решеток (ЛДР) с оптической энергией излучения до 0,5 Дж при длительности импульсов 250 мкс (пиковая мощность до 2 кВт), приводятся их измеренные пространственные распределения излучения (рисунок 1) и спектр излучения, а также даются сведения по способам теплоотвода, термостабилизации и электрического питания.

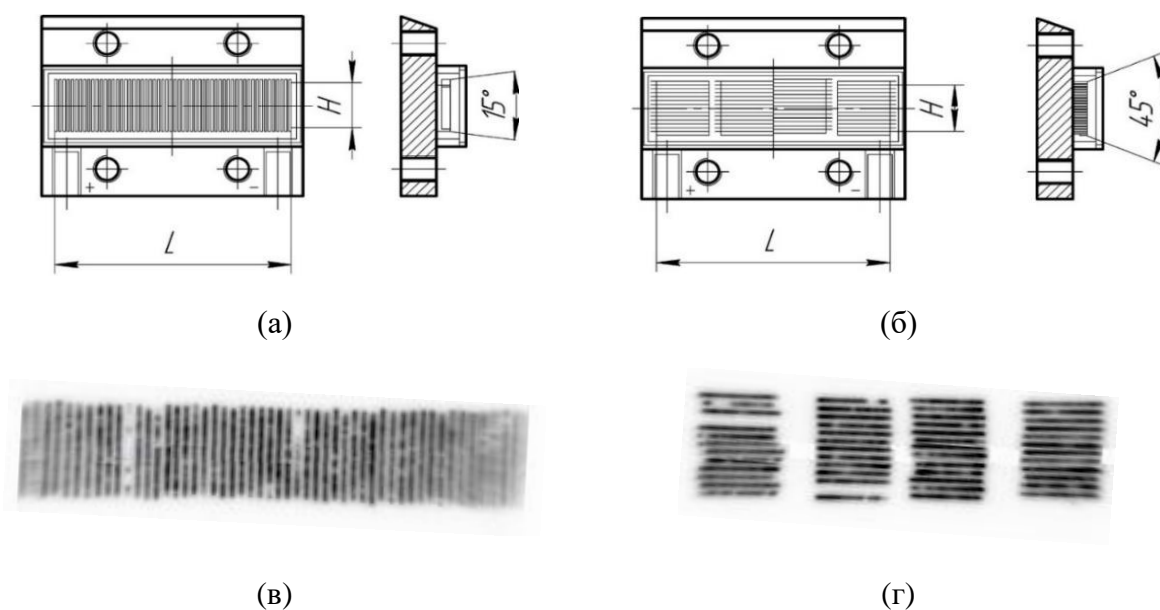


Рисунок 1 – ЛДР с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением диодов с измеренными пространственными распределениями излучения (в, г) при амплитуде

импульсов тока накачки 45 А, длительности импульсов тока накачки 250 мкс, частоте повторения 25 Гц и температуре термостабилизации 25 °С

В п. 2.1.2 приводится описание твердотельных активных элементов и их конструктивных особенностей, связанных коэффициентом усиления.

В п. 2.2 представлены результаты оптимизации распределения люминесценции по сечению активного элемента квантрона, полученные расчетным путем оптической схемы накачки. На рисунке 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных распределений люминесценции по сечению активного элемента с профилями однородности на примере разных диаметров активных элементов из  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ . Показано, что расчетные распределения согласуются с экспериментальными данными, в которых реализуется однородность распределения люминесценции по сечению активного элемента на уровне 90% и более.

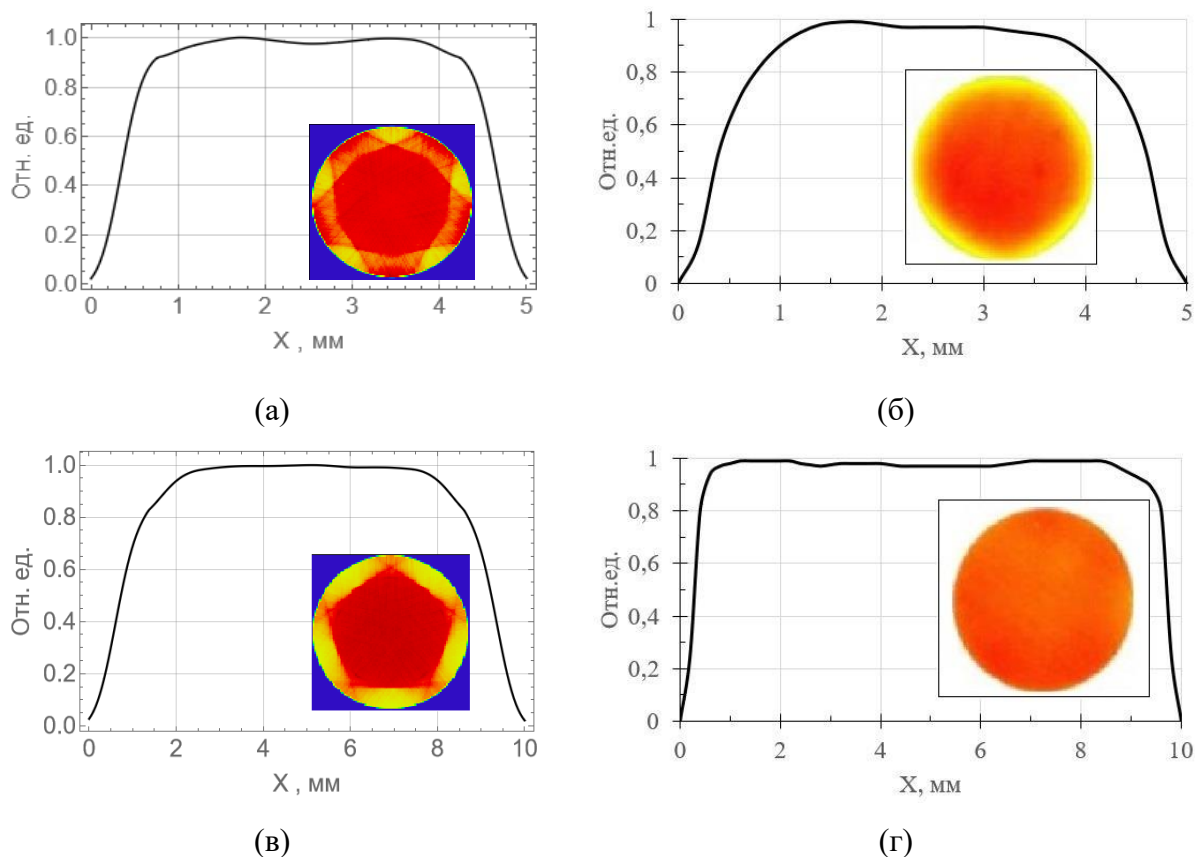


Рисунок 2 – Сравнение расчетного (а, в) и экспериментального (б, г) распределений люминесценции по сечению активного элемента при пятилучевой (угловой шаг 72°) схеме накачки для Ø5 и Ø10 мм с концентрациями атомов неодима 1% и 0,6%, соответственно

Также в п. 2.2 приводится полученная в результате проведения экспериментов зависимость запасенной энергии в активном элементе от электрической энергии накачки при

условии равномерного распределения люминесценции по сечению активного элемента (90% и более), которая не зависит от типа квантрона и его геометрических параметров.

$$W_{\text{зап.}} = 0,1 \cdot W_{\text{эл.}} \quad (1)$$

В п. 2.3 приводятся результаты исследования влияния УСИ на коэффициент усиления слабого сигнала, результатом которого является разработанный метод повышения коэффициента усиления слабого сигнала, включающий в себя оптимизацию геометрических параметров диодной накачки в виде разнесения друг от друга ЛДР и создания прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента. Предложенный метод позволяеткратно увеличить коэффициент усиления слабого сигнала. Полученные в результате проведения исследования зависимости представлены на рисунке 3.

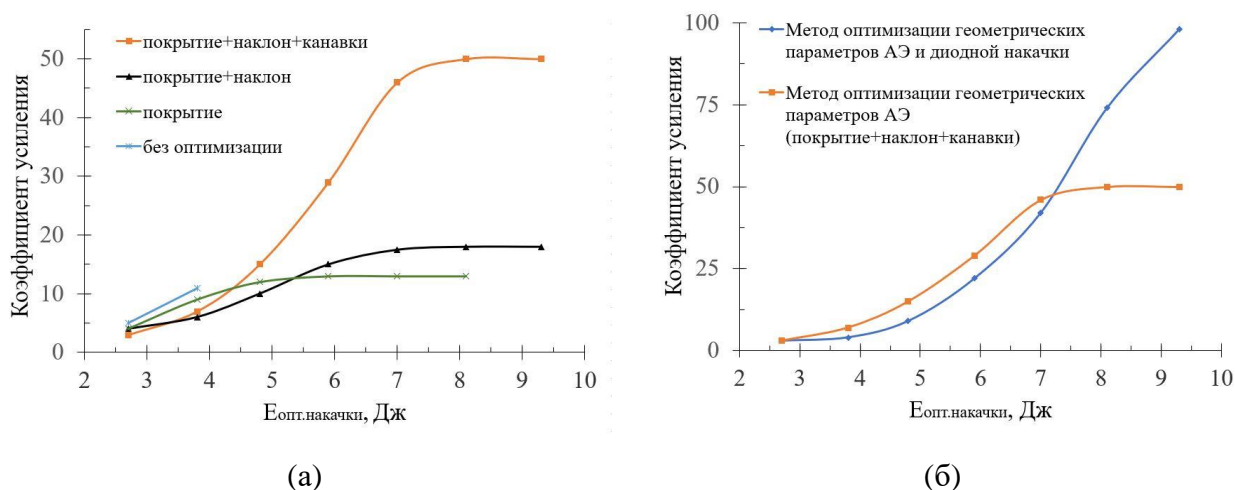
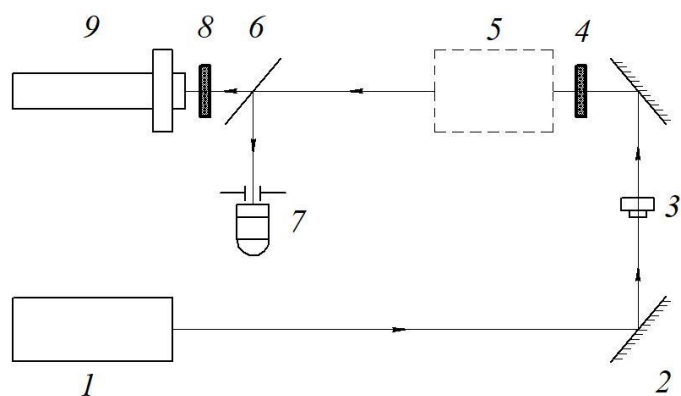


Рисунок 3 – Этапы метода оптимизации геометрических параметров активного элемента (а) и его сравнение с методом, включающего в себя оптимизацию геометрических параметров активного элемента и диодной накачки (б)

В п. 2.3.1 представлены поперечная оптическая схема накачки для квантрона с активным элементом Ø 10 мм и две продольные оптические схемы с разным расстоянием между соседними ЛДР для непрерывной и прерывистой областей накачек.

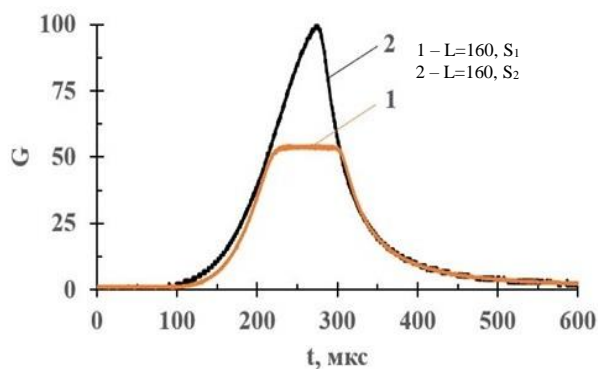
В п. 2.3.2 представлена схема экспериментальной установки для измерения приосевого коэффициента усиления слабого сигнала и распределения люминесценции по сечению активного элемента квантрона (рисунок 4), а также описана методика измерения этих параметров.



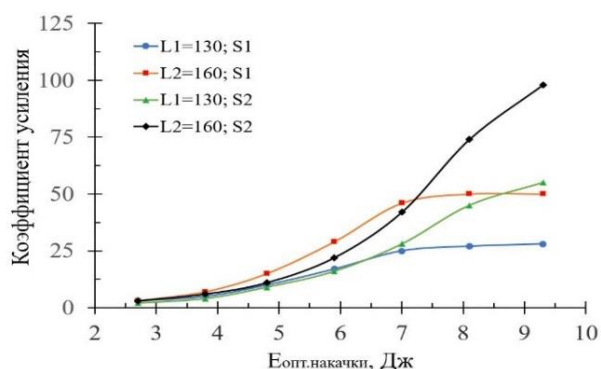
- 1 – непрерывный лазерный источник DPSS-лазер Compact (P=100 мВт, 1064 нм);  
 2 – поворотное глухое зеркало (R99,8%, 1064 нм); 3 – ослабляющие светофильтры;  
 4 – заглушка №1; 5 – квантрон; 6 – светоделитель 50:50 (1064 нм); 7 – фотодиод DET08C с диафрагмой и набором светофильтров; 8 – заглушка №2; 9 – КМОП-камера Basler acA2040-90umNIR с объективом

Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

В п. 2.3.3 приведены результаты исследования влияния УСИ на коэффициент усиления слабого сигнала; описывается разработанный метод для уменьшения влияния УСИ, включающий в себя оптимизацию как геометрических параметров активного элемента, так и диодной накачки в виде разнесения друг от друга ЛДР и создания прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента; приведены характерные временные и пиковые зависимости коэффициента усиления слабого сигнала при различных зонах оптической накачки ( $S_1$  и  $S_2$ ) и длинах ( $L=130$  мм и  $L=160$  мм) активных элементов (рисунок 5).



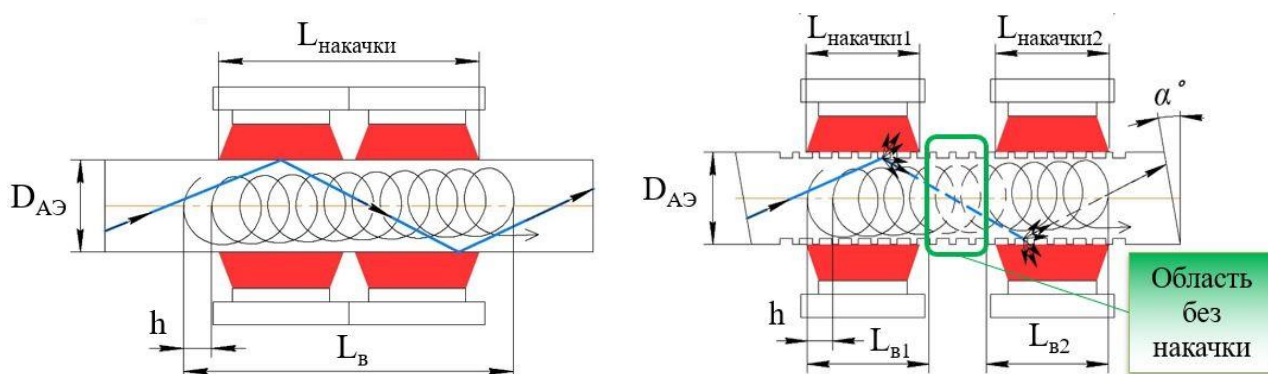
(а)



(б)

Рисунок 5 – Форма коэффициента усиления слабого сигнала (а) и зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от оптической энергии накачки (б)

В этом же пункте описан механизм развития УСИ и разработанный метод его подавления (рисунок 6). УСИ образуется в зоне накачки активного элемента и распространяется преимущественно внутри его объема в продольно-поперечном (по винтовой линии) направлении, усиливаясь и поглощая значительную часть инверсии населенности. При увеличении оптической энергии накачки коэффициент усиления ограничивается и перестает расти. Суть разработанного метода подавления УСИ заключается в поиске условий, при которых влияние УСИ на коэффициент усиления минимально. Физический смысл метода заключается в оптимизации как геометрических параметров активного элемента, так и диодной накачки в виде разнесения друг от друга ЛДР, и создания прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента. Нанесение кольцевых (или винтовых) канавок на боковую поверхность активного элемента, наклон торцов и нанесение просветляющего покрытия на торцевые поверхности помогают замедлить распространение и ослабить за счет многократного отражения УСИ, но полностью не подавляют его. Оптимизация геометрических параметров диодной накачки в виде создания областей без накачек вдоль активного элемента помогает значительно ослабить распространяющееся в продольно-поперечном направлении УСИ. Тем самым, разработанный метод подавления УСИ позволяет снять ограничение коэффициента усиления и кратно увеличить его.



$D_{АЭ}$  – диаметр активного элемента;  $L_{накачки1,2}$  – длина накачки;  $h$  – шаг винтовой линии;

$L_{в1,2}$  – длина винтовой линии;  $\alpha$  – угол наклона торца

(а) – без оптимизации

(б) – с оптимизацией геометрических параметров активного элемента и диодной накачки

Рисунок 6 – Механизм развития УСИ и его подавление в квантоне при различных схемах

**Третья глава** посвящена разработке компактного ГЛИ с профилированной формой (ступенчатый и прямоугольный профили) лазерного излучения, выходной энергией до 1 Дж, длительностью 20 нс и длиной волны 1064 нм. Продемонстрирована возможность управления формой импульсов при прямоугольном и ступенчатом профилях. Представлен алгоритм

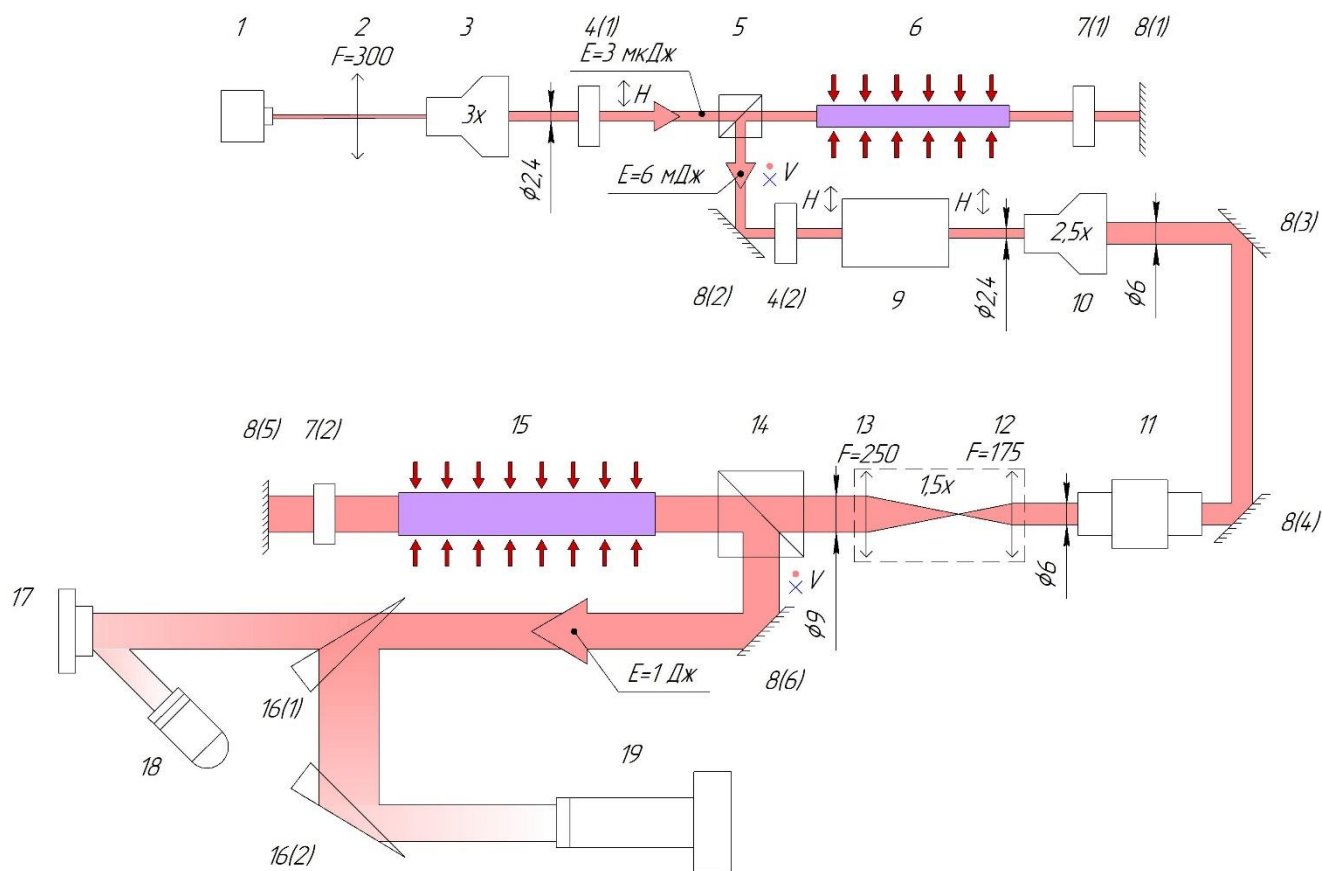
управления формой, позволяющий получать профили импульсов с амплитудными отклонениями от целевой формы огибающей (эталон) до 15%.

В п. 3.1 приведены предварительные расчетные оценки формы лазерного излучения для получения ступенчатого и прямоугольного профилей с выходной энергией импульса 1 Дж и длительностью 20 нс.

В п. 3.2 представлено описание разработанного экспериментального ГЛИ и его физико-техническая характеристика.

В п. 3.2.1 описан волоконный задающий генератор, формирующий излучение с гауссовым пространственным распределением, выходной энергией 3 мкДж и возможностью задания формы с определенным профилем.

В п. 3.2.2 описан твердотельный двухкаскадный усилитель на базе квантронов с импульсной диодной накачкой, представлена оптическая схема экспериментальной установки ГЛИ с системой контроля временных, пространственных и энергетических параметров (рисунок 7).



Основные оптические элементы ГЛИ: 1 – выход волоконного задающего генератора с оптическим изолятором Фарадея ( $E=3$  мкДж); 2 – линза  $F=300$  мм;

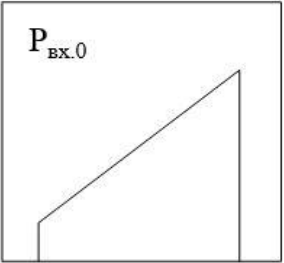
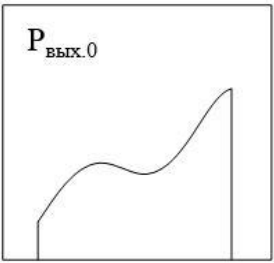
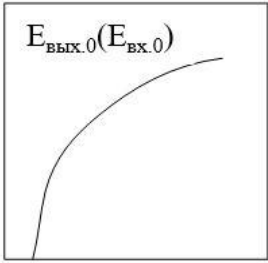
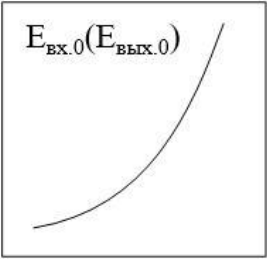
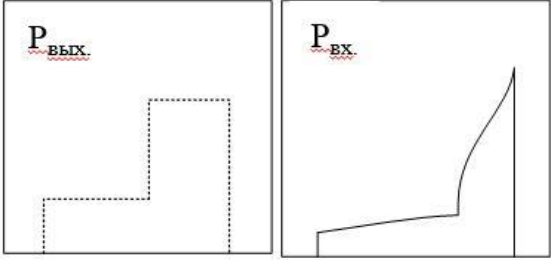
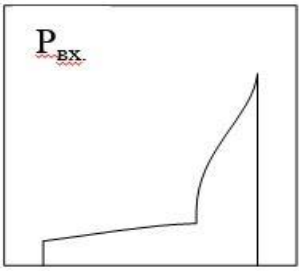
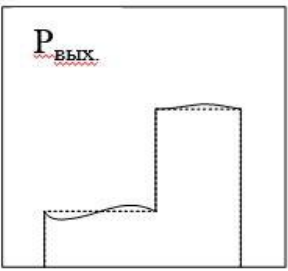
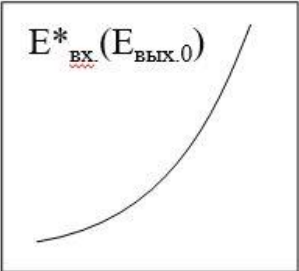
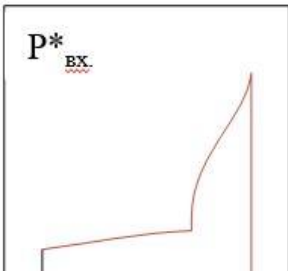
3 – коллиматор с 3х увеличением; 4 — полуволновая пластинка  $\lambda/2$ ; 5 – куб поляризационный 15x15x15 мм; 6 – квантрон с активным элементом  $\varnothing 5 \times 120$ ; 7 – четвертьволновая пластинка  $\lambda/4$ ;  
8 – зеркало с отражающим покрытием ( $R=99,9\%$ ,  $\lambda=1064$  нм);  
9 – оптический изолятор Фарадея PAVOS; 10 – телескоп с 2,5х увеличением;  
11 – формирователь пучка AdlOptica Pi-shaper; 12 – линза собирающая  $F=175$  мм с просветлением на  $\lambda=1064$  нм; 13 – линза собирающая  $F=250$  мм с просветлением на  $\lambda=1064$  нм; 14 – куб поляризационный 25x25x25 мм; 15 – квантрон с активным элементом  $\varnothing 10 \times 160$   
Дополнительные оптические элементы ГЛИ (система регистрации выходных характеристик):  
16 – клиновидное зеркало; 17 – пьезоэлектрическая головка с диффузором и поглотителем типа BF Ophir PE25BF-DIF-C; 18 – фотодиод кремниевый Thorlabs;  
19 – КМОП камера Basler acA2040-90umNIR с телескопической системой

Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки ГЛИ

Также в разделе приведено описание двух квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой. В первом каскаде усиления использовался квантрон на базе 10 ЛДР производства НПП «Инжект» мощностью по 2 кВт каждой, с размером активного элемента  $\varnothing 5 \times 120$  мм<sup>2</sup>, концентрацией атомов неодима 1% и максимальным коэффициентом усиления слабого сигнала за один проход  $G=400$ . Во втором каскаде усиления был квантрон, состоящий из 20 ЛДР, с размером активного элемента  $\varnothing 10 \times 160$  мм<sup>2</sup>, концентрацией атомов неодима 0,6% и максимальным коэффициентом усиления слабого сигнала за один проход  $G=100$ . В обоих квантронах было реализовано равномерное распределение люминесценции по сечению активного элемента с однородностью более 90 % (рисунок 2 (б, г)).

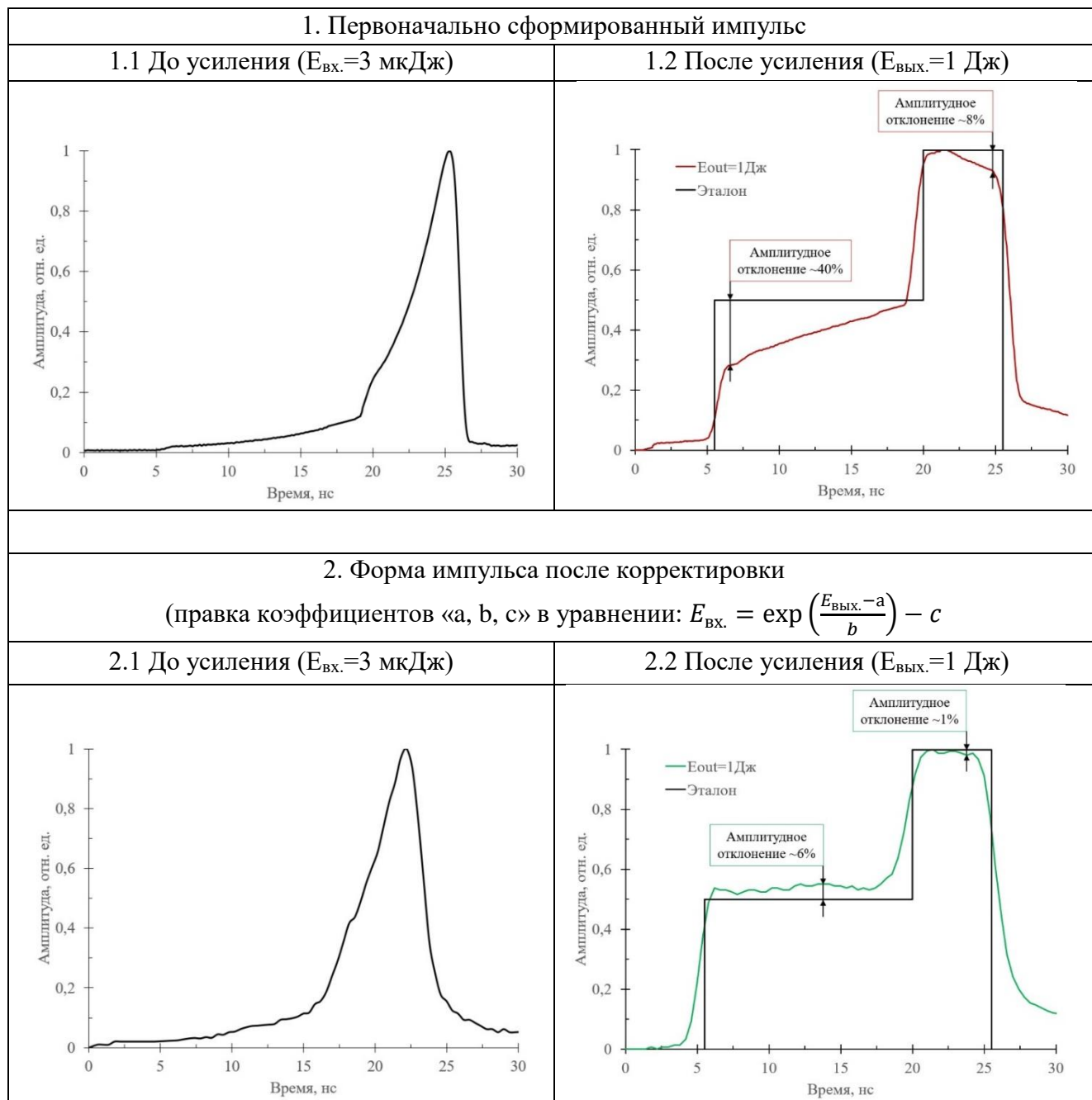
В п. 3.3 представлен алгоритм управления формами в ГЛИ, который состоит из 4 основных этапов: формирование пробного импульса с расчетом функции пропускания, формирование предварительного импульса по заданной форме (эталон), тестирование предварительной формы импульса при усилении и коррекция функции пропускания с формированием нового импульса. Детализация каждого этапа алгоритма управления формой на примере получения ступенчатого профиля представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы формирования импульса формы со ступенчатым профилем

1. Формирование пробного импульса с расчетом функции пропускания		
<p>1.1 Запуск трапецевидного импульса на задающий генератор</p> 	<p>1.2 Получение выходного усиленного сигнала</p> 	<p>1.3 Расчет функции пропускания на основании уравнения Франца-Нодвика: <math>E_{\text{ввых.}} = a + b \cdot \ln(E_{\text{вх.}} + c)</math></p> 
2. Формирование предварительного импульса по заданной форме (эталон)		
<p>2.1 Расчет обратной функции:</p> $E_{\text{вх.}} = \exp\left(\frac{E_{\text{ввых.}} - a}{b}\right) - c$ 	<p>2.2 Расчет выходного импульса по заданной форме (эталон) и обратной функции</p> 	
3. Тестирование предварительной формы импульса при усилении		
<p>3.1 Запуск рассчитанного импульса</p> 	<p>3.2 Получение импульса на выходе и сравнение с эталоном</p> 	
4. Коррекция функции пропускания с формированием нового импульса		
<p>4.1 Создание нового выходного импульса</p> 	<p>4.2 Обновление обратной функции по результатам сравнения</p> 	

Также в этом пункте представлен этап коррекции формы импульсов на примере ступенчатого профиля (таблица 2), в результате которого продемонстрирована возможность уменьшения амплитудных отклонений отдельных горизонтальных участков полученной формы относительно целевой (эталон). Вертикальные участки (фронты) не подвергались корректировке и зависели от используемых генераторов и блоков питания волоконного задающего генератора.

Таблица 2 – Этап коррекции формы со ступенчатым профилем



В п. 3.4 описывается экспериментальное исследование ГЛИ с последовательным формированием прямоугольного и ступенчатого профилей лазерного излучения (рисунок 8)

и представлены результаты измерения пространственного распределения в ближней зоне, расходимости излучения, рассчитанной по измерению пучка в дальней зоне, и стабильности выходной энергии (рисунок 9). Ближняя зона имела форму пространственного излучения близкую к супераугуссовой с модуляцией не более 20%, расходимость составила 0,15 мрад, нестабильность выходной энергии не более 0,5%.

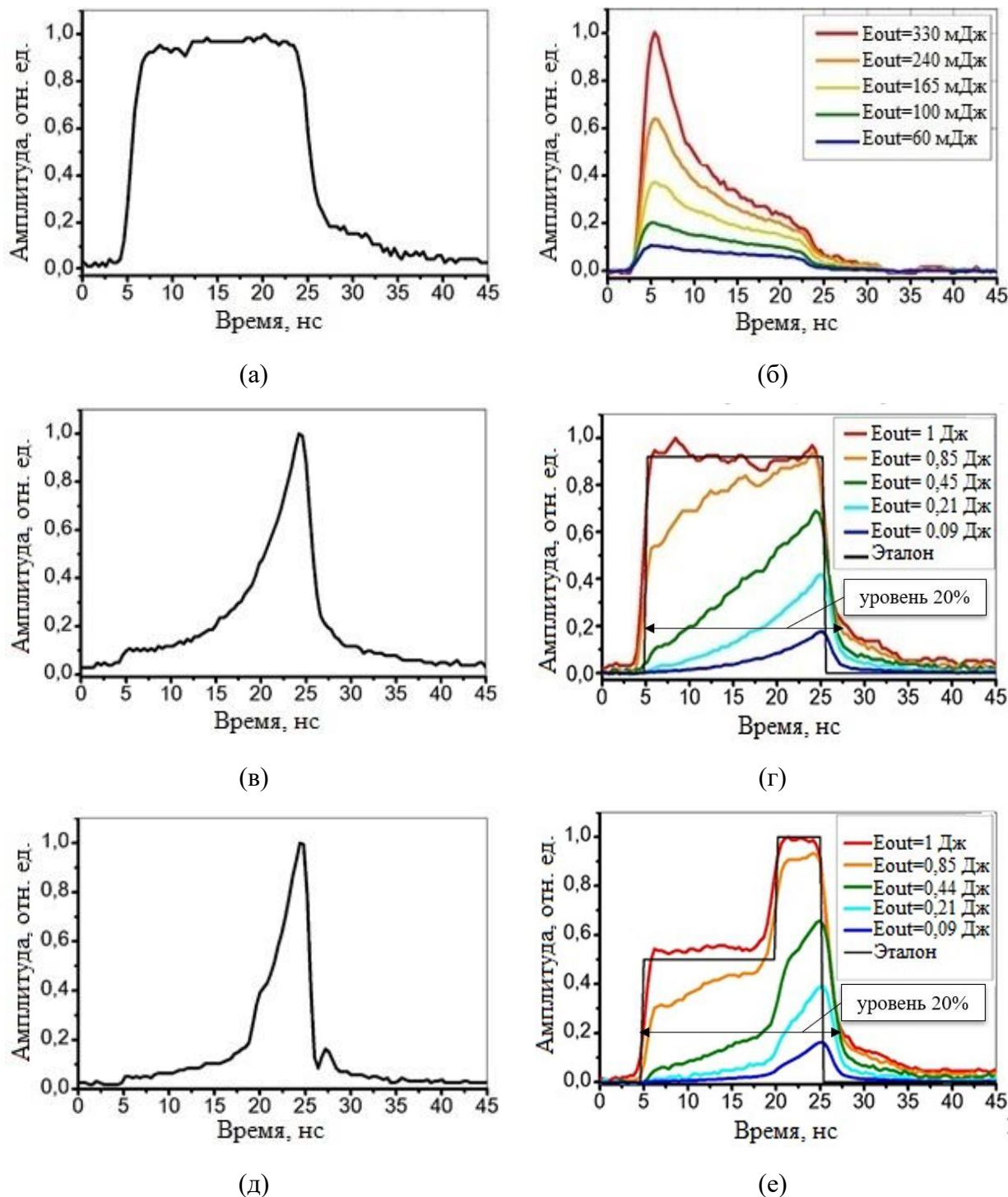
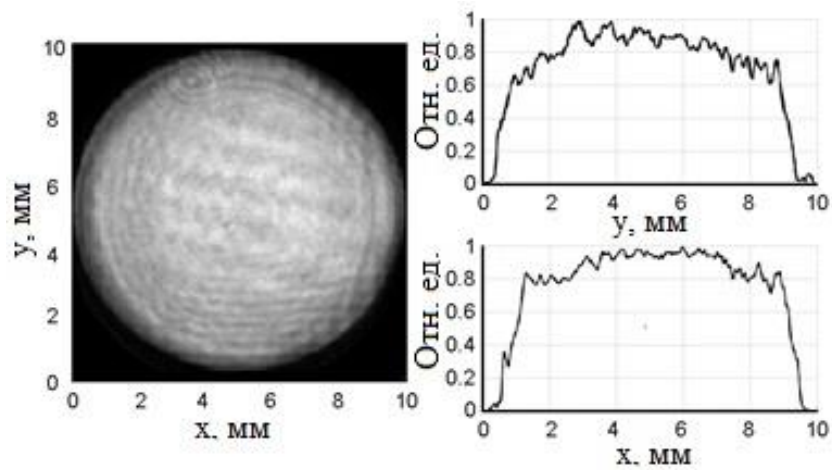
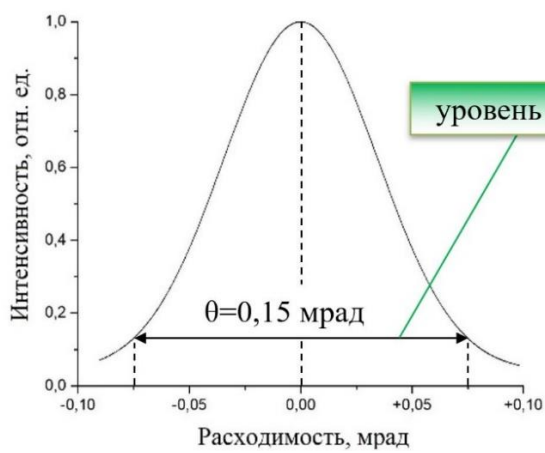


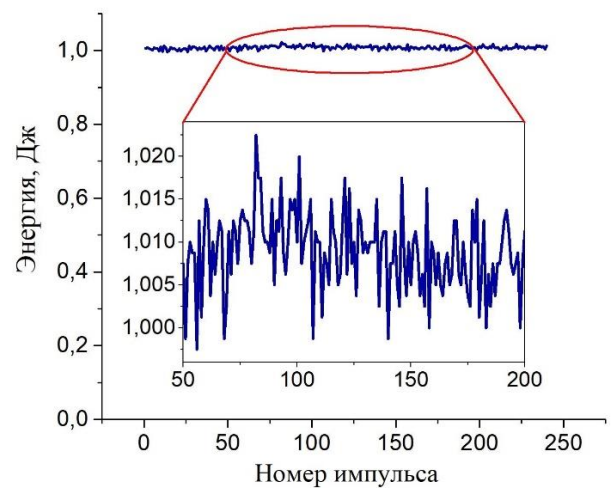
Рисунок 8 – Формы лазерного импульса (предварительная, прямоугольная и ступенчатая) волоконного задающего генератора (а, в, д) и ГЛИ (б, г, е)



(а)



(б)



(в)

Рисунок 9 – Пространственное распределение ГЛИ в ближней зоне с профилями в горизонтальном (по оси X) и вертикальном (по оси Y) сечениях (а), расходимость излучения (б), стабильность выходной энергии (в)

В **заключении** диссертации представлены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит решение актуальной научной задачи – разработка метода управления излучением в ГЛИ с высокой пиковой мощностью, имеющей важное значение для создания лазерных комплексов и систем нового поколения, используемых в различных областях науки и техники.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Исследовано влияние УСИ в активном элементе квантронов лазерных усилителей на величину коэффициента усиления слабого сигнала. Найдены условия, при которых УСИ подавлено или оказывает минимальное влияние на коэффициент усиления слабого сигнала. Разработан метод повышения коэффициента усиления слабого сигнала за счет подавления УСИ в активном элементе квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой. Разработанный метод заключался в разнесении соседних ЛДР друг от друга и создании прерывистой зоны накачки вдоль активного элемента. Метод позволилкратно повысить коэффициент усиления слабого сигнала.

2. Разработана схема оптической накачки квантрона с подавлением УСИ, коэффициентом усиления слабого сигнала  $G=100$  и максимальной эффективностью преобразования оптической энергии в запасенную 26%.

3. Разработан метод управления излучением в гибридном лазерном источнике на основе алгоритма профилирования импульсов, который позволяет формировать практически любые профили форм с высокой выходной энергией лазерного излучения (до 1 Дж) и амплитудными отклонениями от целевой формы огибающей до 15%.

4. Экспериментально продемонстрирована возможность управления формой лазерного излучения с прямоугольным и ступенчатым профилями в созданном гибридном лазерном источнике с высоким уровнем выходной энергии 1 Дж при длительности импульсов 20 нс.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Moses E. Ignition on the National Ignition Facility: A path towards inertial fusion energy / E. Moses // *Nuclear Fusion*. – 2009. – V.49, No.10. – pp. 1004022.
2. Surface hardening of CP Ti by laser hardening and development of Ti/TiC surface composite by laser sintering technique for wear resistant surface / R. Chaudhari, A. Shete, G. Mane [et al.] // *Solid State Phenomena*. – 2023. – V.350, No.6. – pp. 51-61.
3. Lach L. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches and industrial applications / L. Lach // *Crystals*. – 2024. – V.14, No.8. – P. 726.
4. Diode laser lithotripsy of urinary calculi using controlled fragmentation technique / O.S. Streltsova, E.V. Grebenkin, V.I. Bredikhin [et al.] // *Modern Technologies in Medicine*. – 2019. – V. 11, No 2. – pp. 103-109.
5. Двухимпульсная лазерная фрагментация/лазерно-индуцированная флуоресценция следов органофосфатов / С.М. Бобровников, Е.В. Горлов, В.И. Жарокв [и др.] // *Оптический журнал*– 2025. – Т. 92, №2. – С. 106-115.
6. Experimental observation of the effect of pulse duration on optical properties in ultrafast laser micro-processing of polymers / A. Rahaman, X. Du, A. Kar [et al.] // *Journal of Laser Applications*. – 2021. – V.33, No.3. – pp. 042003.
7. Influence of pulse duration on X-ray emission during industrial ultrafast laser processing / J. Holland, R. Weber, M. Sailer [et al.] // *Materials*. – 2022. – V.15, No.6. – pp. 2257.
8. Effects of pulse duration and heat on laser-induced periodic surface structures / S. Kodama, K. Shimada, M. Mizutani [et al.] // *Int. J. Automation Technol.* – 2020. – V.14, No.4. – pp. 552-559.
9. Evaluation of laser-induced plasma ablation focusing on the difference in pulse duration / K. Akimoto, S. Tsuichihara, T. Takamatsu [et al.] // *2019 41<sup>st</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Berlin. Germany. – 2019. – pp. 6987-6990.
10. Kozlyakov M. Widely tunable pulse duration 100 mJ single-mode MOPA system based on Yb-doped tapered double-clad fiber and Nd:YAG solid-state amplifiers / M. Kozlyakov, A. Petrov, G. Mikhailovskiy // *Photonics*. – 2024. – V.11, No.1. – P.84.
11. Горбунов И.А. Пикосекундный гибридный лазер на основе полупроводникового лазера, волоконного и Nd:YVO<sub>4</sub> – усилителей – исследование эффектов, ограничивающих пиковую мощность // И.А. Горбунов, О.В. Кулагин // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 51, №10. – С. 886-893.
12. The shaped pulses control and operation on the SG-III prototype facility / L. Ping, W. Wei, J. Sai [et al.] // *Laser Phys*. – 2018. – V.28. – pp. 045004.

13. Laser pulse shape designer for direct-drive inertial confinement fusion implosions / T. Tao, G. Zheng, Q. Jia [et al.] // High Power Laser Science and Engineering. – 2023. V.11. – pp 1-25.
14. Microstructural formations resulting from nanosecond and picosecond laser irradiation of a Ti-based alloy under controlled atmospheric conditions and optimization of the irradiation process / D. Milovanovic, B. Rajcic, D. Rankovic [et al.] // Micromachines. – 2023. – V.15, No.1. – P.5.
15. Hendow S.T. Structuring materials with nanosecond laser pulses / S.T. Hendow, S. A. Shakir // Optics Express. – 2010. – V.18, No.10. – pp. 10188-10199.
16. Временное профилирование сверхкоротких лазерных импульсов с использованием объемных брэгговских решеток / Н.С. Воробьев, А.А. Маненков, А.А. Муравьев [и др.] // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, №6. – С. 501-503.
17. Пространственно-временное профилирование лазерных импульсов для фотокатодов линейных ускорителей электронов / С.Ю. Миронов, А.В. Андрианов, Е.И. Гачева [и др.] // УФН. – 2017. – Т. 187, №10.
18. Compact 0,56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystal / V.V. Lozhkarev, G.I. Freidman, V.N. Ginzburg [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2007. – V.4, No.6. – P.421.
19. Хазанов Е.А. Петаваттные лазеры на основе оптических параметрических усилителей: состояние и перспективы / Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев // УФН. – 2008. – Т. 178. – С.1006-1011.
20. Гаранин С.Г. Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии // С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, А.М. Сергеев [и др.] // Вестник РАН. – 2021. – Т. 91, №5. – С. 435-445.
21. Controllable multi-stable-state operation in an AOM actively Q-switched all-fiber laser system / X. Chen, N. Wang, C. He [et al.] // Opt. Express. – 2023. – V.31, No.10. – pp. 16845.
22. Actively Q-switching an all polarization-maintaining erbium-doped fiber laser using an intracavity electro-optic modulator / М.М. Fadhel, R. Muda, А.Е. Hamzah [et al.] // Microwave and Optical Technology letters. – 2023.
23. Analysis and modeling of a high-power side diode pumped solid state laser system / T. Kashef, S. Ghoniemy, A. Mokhtar [et al.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optics Engineering. – 2015. – V.9466. – P. 9466.
24. Гречин С.Г. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой / С.Г. Гречин, П.П. Николаев // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, №1. – С. 1-17.
25. Исследование однородности распределения накачки в активном элементе в виде стержня мощных квантронов с диодной накачкой / С.Д. Таривердиев, А.Е. Дракин, О.В. Пагаев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49, №13. – С. 43-46.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ВАК, SCOPUS или WOS

1. 1 Joule arbitrary pulse shape hybrid laser source / **В. Ovcharenko**, V. Kamynin, V. Bagdasarov, T. Dolmatov, A. Trikshev, M. Ponarina, V. Tsvetkov, S. Garnov // Applied Opt. – 2025. – V. 64, No 4. – pp.757-763 (DOI: 10.1364/AO.544196).
2. Laser gain module small-signal gain increase due to suppression of parasitic generation with pump geometry optimization / **В.Д. Ovcharenko**, V.K. Bagdasarov, V.V. Bukin, T.V. Dolmatov, D.D. Chesalin, V.B. Tsvetkov, S.V. Garnov // Laser Phys. – 2020. – V. 30, №9. – P. 095003 (DOI: 10.1088/1555-6611/aba59e).
3. Comparison of Techniques for Measuring the Gain of Weak Signals of Solid-State Diode-Pumped Laser Gain Modules in a Nd:YAG Active Medium / D.D. Chesalin, V.Kh. Bagdasarov, V.V. Bukin, T.V. Dolmatov, **В.Д. Ovcharenko** // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2020. – V. 47. – P. 171–175 (DOI: 10.3103/ S1068335620060044).

## СПИСОК ПАТЕНТОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Патент №2800194С1 РФ, МПК H01S 3/10. Способ формирования пачек импульсов в оптическом усилителе с импульсной накачкой / С.А. Филатова, В.А. Камынин, А.И. Трикшев, **Б.Д. Овчаренко**, Т.В. Долматов, В.В. Букин, В.Б. Цветков // Заявитель и патентообладатель – ИОФ РАН; завял. 14.12.2022; опубл. 19.07.2023, Бюл. №20 – 9 с.
2. Патент №214037U1 РФ, МПК А61В 17/22. Лазерная установка для литотрипсии / С.В. Гвоздовский, В.М. Елисеенков, Р.В. Скородумов, С.В. Гарнов, Д.Г. Кочиев, В.Х. Багдасаров, Ю.А. Сучков, А.Л. Бондаренко, **Б.Д. Овчаренко**, А.Н. Шариков // Заявитель и патентообладатель – АО «Наука и инновация»; завял. 12.10.2021; опубл. 11.10.2022, Бюл. №29 – 12 с.
3. Патент №188170 РФ, МПК G01R 15/24. Установка для измерения характеристик оптических диодных усилителей / В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Т.В. Долматов, Н.А. Кудашева, **Б.Д. Овчаренко**, В.Б. Цветков Заявитель и патентообладатель – ИОФ РАН; завял. 21.11.2018; опубл. 02.04.2019, Бюл. №10 – 8 с.
4. Патент №184832 РФ, МПК H01S 3/09. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой / В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Н.А. Кудашева, **Б.Д. Овчаренко**, В.Б. Цветков // Заявитель и патентообладатель – ИОФ РАН; завял. 01.02.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. №32 – 8 с.
5. Патент №166589 РФ, МПК H01S 3/042. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой / В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Н.А. Кудашева,

**Б.Д. Овчаренко**, А.А. Сироткин, В.Б. Цветков // Заявитель и патентообладатель – ИОФ РАН; завял. 15.04.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34 – 8 с.

### СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Генерация лазерных импульсов микросекундной длительности в Nd:YAG – лазере с использованием длинного резонатора / Г.С. Рыбаков, А.А. Ушаков, **Б.Д. Овчаренко** // X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз: Сборник научных трудов. – 2024. – С.62.

2. Externally-triggered joule-level nanosecond pulses hybrid laser source / A.I. Trikshev, V.A. Kamynin, **B.D. Ovcharenko**, V.Kh. Bagdasarov, T.V. Dolmatov, V.V. Bukin, V.B. Tsvetkov, S.V. Garnov // International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation, – 2022. – pp. 1-1 (DOI: 10.1109/ICLO54117. 2022. 9839977).

3. Variable envelope shape and width hybrid pulse-burst laser source / V.A. Kamynin, A.I. Trikshev, **B.D. Ovcharenko**, V.Kh. Bagdasarov, T.V. Dolmatov, V.V. Bukin, V.B. Tsvetkov, S.V. Garnov // International Conference Laser Optics (ICLO). Saint Petersburg, Russian Federation, – 2022. – pp. 1-1 (DOI: 10.1109/ICLO54117. 2022. 9840300).

4. Гибридный источник наносекундных импульсов произвольной формы с энергией до 50 мДж / А.И. Трикшев, В.А. Камынин, В.Б. Цветков, В.В. Букин, Т.В. Долматов, **Б.Д. Овчаренко** // 9й Международный семинар по волоконным лазерам, Академгородок, Новосибирск. 2020, – С. 175-176 (DOI: 10.31868/RFL2020.175-176).

5. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой / В.Х. Багдасаров, В.В. Букин, С.В. Гарнов, Т.В. Долматов, Н.А. Кудашева, **Б.Д. Овчаренко**, В.Б. Цветков // Сборник тезисов Двенадцатая Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2019. – С. 20-23.

6. Измерение высоких значений коэффициентов усиления слабого сигнала лазерных модулей / Д.Д. Чесалин, В.Х. Багдасаров, В.В. Букин, С.В. Гарнов, Т.В. Долматов, **Б.Д. Овчаренко**, А.А. Ушаков // Сборник тезисов Двенадцатая Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2019. – С. 159-162.

7. Методы оценки эффективности использования лазерных головок с помощью поперечной диодной накачки / Д.Д. Чесалин, В.Х. Багдасаров, В.В. Букин, Т.В. Долматов, **Б.Д. Овчаренко**, А.А. Ушаков // Наука, технологии и бизнес: Сборник материалов конференции. Москва, – 2019. С. 93-98.

8. Методы увеличения коэффициента усиления в неодимовых квантронах с диодной накачкой / **Б.Д. Овчаренко**, В.Х. Багдасаров, Н.А. Кудашева, В.В. Букин, В.Б. Цветков, С.В. Гарнов // Сборник тезисов школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели». – Москва, 2018. – С. 21-22.

9. Определение параметров модуля диодной накачки / В.Х. Багдасаров, В.В. Букин, С.В. Гарнов, Т.В. Долматов, Н.А. Кудашева, **Б.Д. Овчаренко**, В.Б. Цветков // Сборник тезисов Одиннадцатая Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2018. – С. 161-165.

10. Особенности разработок по созданию твердотельных лазеров с диодной накачкой (квантроны) / В.Х. Багдасаров, В.В. Букин, С.В. Гарнов, Н.А. Кудашева, **Б.Д. Овчаренко**, А.А. Сироткин, В.Б. Цветков // Сборник тезисов Десятая Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2017. – С. 196-202.