

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПРИКЛАДНОЙ  
ФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

№ АААА-117-117102070036-8



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора учреждения

член-корреспондент РАН

Денисов Г.Г.

«29» декабря 2018 г.

ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

«Создание элементной и технологической базы для альтернативных, экологически чистых гибридных термоядерных установок на основе сверхмощных лазерных систем.»

по теме:

Разработка элементной базы для сверхмощных лазерных систем

(промежуточный)

Этап 2

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. № 14.607.21.0196

Руководитель проекта,

член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

29.12.2018

Е.А. Хазанов

Нижний Новгород

2018

# 1. СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта,  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.



подпись

Е.А. Хазанов

Исполнители:

зав. лабораторией,  
доктор физ.-мат. наук



подпись

М.В. Стародубцев  
(разделы 5, 9-12)

зав. лабораторией,  
кандидат физ.-мат. наук



подпись

А.А. Шайкин  
(разделы 6, 7)

старший научный сотрудник,  
доктор физ.-мат. наук



подпись

С.Ю. Миронов  
(раздел 6)

старший научный сотрудник



подпись

А.К. Потемкин  
(раздел 6)

старший научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

А.А. Соловьев  
(разделы 1-9)

старший научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

И.В. Яковлев  
(разделы 6, 7)

научный сотрудник



подпись

Н.А. Айдакина  
(раздел 7)

научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

К.Ф. Бурдонов  
(раздел 7)

научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

Е.И. Гачева  
(раздел 6)

научный сотрудник



подпись

В.В. Зеленогорский  
(раздел 6)

научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

А.А. Кузьмин  
(разделы 3, 4, 7, 8)

научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук



подпись

С.Е. Стукачев  
(разделы 8-10)

младший научный сотрудник



подпись

А.С. Зуев  
(разделы 6, 7)


младший научный сотрудник



подпись

А.А. Кочетков  
(разделы 6-8)

младший научный сотрудник



подпись

И.А. Шайкин  
(разделы 4-8)

научный сотрудник



подпись

А.П. Зиновьев  
(разделы 9, 10)

Нормоконтролер



подпись

Л.А. Белоусова

## 2. Содержание

1. СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ .....	2
2. Содержание.....	4
3. Определения, обозначения и сокращения.....	6
4. Введение .....	8
5. Проведение патентных исследований.....	11
6. Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке .....	12
6.1 Разработка эскизной конструкторской документации экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке.....	13
6.2 Разработка программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке.....	14
6.3 Проведение исследовательских испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке.....	15
6.4 Анализ результатов испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке .....	16
6.4.1 Цели, преследуемые при разработке нового источника .....	16
6.4.2 Технические решения, выбранные на этапе разработки.....	17
6.4.3 Соответствие выбранных технических решений вызовам, поставленным перед проектом .....	18
6.4.4 Анализ достигнутых результатов, сопоставление с альтернативными подходами к генерации затравочных импульсов.....	19
6.4.5 Рекомендации по дальнейшему усовершенствованию источника затравочных импульсов.....	21
7. Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм.....	22
7.1 Разработка эскизной конструкторской документации экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм.....	22
7.2 Разработка программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм .....	23
7.3 Проведение исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм .....	24
7.4 Анализ результатов испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя с апертурой 150мм.....	25
7.4.1 Цели, преследуемые при разработке стержневого лазерного усилителя с активным элементом апертурой 150мм. ....	26
7.4.2 Технические решения, выбранные на этапе разработки.....	27
7.4.3 Соответствие выбранных технических решений вызовам, поставленным перед проектом. ....	27
7.4.4 Анализ достигнутых результатов, сопоставление с альтернативными подходами к усилению широкоапертурных оптических импульсов. ....	28
7.4.5 Рекомендации по дальнейшему усовершенствованию усилителя оптических импульсов.....	29

8.	Разработка метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света. ....	31
8.1	Описании метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света . ....	33
8.1.1	Цель метода.....	33
8.1.2	Требования к методу .....	33
8.1.3	Используемые средства и порядок применения метода.....	33
8.1.4	Описание метода .....	34
9.	Разработка акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия.....	38
9.1	Описание процесса разработки акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия.....	38
9.2	Описание программы и методики испытаний образцов монокристаллов KDP и DKDP акустооптическим методом неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия. ....	43
10.	Разработка метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред. ....	54
10.1	Описание процесса разработки метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред.....	54
10.2	Описание программы и методики испытаний образцов монокристаллов KDP и DKDP методом неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред. ....	58
11.	Закупка материалов и комплектующих изделий для работ Получателя, выполняемых за счет средств Индустриального партнера в 2019 году.....	68
12.	Заключение.....	69
13.	Список использованных источников.....	70

### 3. Определения, обозначения и сокращения

УТС - управляемый термоядерный синтез

Критерий Лоусона - критерий связывающий температуру концентрацию и время удержания среды в таком состоянии, при выполнении которого, должен осуществляться поджиг самоподдерживающейся реакции термоядерного синтеза.

PERAL- Parametric pErtawatt Russian Laser (Лазерная установка в ИПФ РАН)

Усиления чирпированных импульсов - технология построения сверхмощных фемтосекундных лазерных систем, позволяющая обойти ограничения на максимальную мощность, связанные с лучевой стойкостью активных элементов.

ЭО - экспериментальный образец

ЭКД - эскизная конструкторская документация

ПРИЭР - прикладные исследования и экспериментальные разработки

Nd:YLF - лазерная среда с кристаллической матрицей, допированная редкоземельным элементом - неодимом.

ТЗ - техническое задание

ЛМД-Р50П - импульсный лазерный источник на модуляции добротности, разрабатываемый в рамках проекта в качестве генератора затравки для импульса накачки параметрического лазерного комплекса PEARL.

FWHM -full width half maximum -полная ширина по полувысоте

СКО - среднеквадратичное отклонение

TEM00 - профиль излучения без перемодуляций по координатам

эталон Фабри-Перо - оптический элемент со спектральным пропусканием в форме эквидистантных узких пиков.

Параметрическое усиление света - способ лазерного усиления, основанный на нелинейном процессе обмена энергией между волной

оптической накачки и сигнальной волной внутри нелинейного оптического, часто анизотропного, элемента,

КПД - коэффициент полезного действия

ИФП 8000 - импульсная газоразрядная лампа, служащая для оптической накачке лазерных усилителей в наносекундном канале накачки комплекса PEARL

КГСС0180 - марка неодимового стекла

ДКДП или  $K*DP$  - кристаллическая нелинейная оптическая среда, в частности используемая, для преобразования излучения в излучение на второй гармонике и параметрического усиления

SLM (Spatial Light Modulator) - пространственный модулятор света с компьютерным управлением, принцип действия которого сонован на использовании оптических сред с управляемой наведенной анизотропией.

ЛИР - лазерно-индуцированное разрушение

## 4. Введение

Экспериментальная реализация поджига термоядерного топлива с положительным выходом энергии при *лазерном* обжати [1] является одной из самых амбициозных научно-технологических задач, которые когда-либо ставило перед собой человечество. Решение этой задачи невозможно без усовершенствования огромного числа технологий, лежащих в основе всех этапов процесса.

Целью проекта является обеспечение научно-технологического развития Российской Федерации путем разработки, апробации и доведения до разной степени готовности к внедрению ряда ключевых технологий и подходов для создания экологически чистого гибридного источника ядерной энергии, основанного на использовании лазерных систем высокой мощности. В рамках данного проекта планируется сфокусироваться на следующих ключевых технологиях лазерного УТС

1. Разработка методов изготовления и тестирования лучевой стойкости крупноапертурных оптических элементов, составляющих лазерные системы для лазерного УТС
2. Разработка методов дистанционной диагностики качества оптических поверхностей
3. Модернизация стартовой части петаваттного лазерного комплекса PEARL
4. Разработка технологий и модернизация лазерного наносекундного усилителя на неодимовом стекле
5. Разработка методов подавления магнитогидродинамических неустойчивостей при лазерном обжати термоядерной мишени посредством наложения сильного внешнего магнитного поля.

Все работы в рамках проекта должны лечь в основу термоядерной энергетики будущего.



На подотчетный период выполнения проекта, в соответствии с планом-графиком, заявлены следующие работы:

- *Проведение патентных исследований.*
- *Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке*
- *Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм.*
- *Разработка метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света*
- *Разработка акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия*
- *Разработка метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред.*
- *Закупка материалов и комплектующих изделий для работ Получателя, выполняемых за счет средств Индустриального партнера в 2019 году*

По окончанию этапа должны быть предоставлены следующие отчетные документы:

- промежуточный отчет о ПНИЭР, содержащий: отчет о патентных исследованиях, выбор направления исследований;
- эскизную конструкторскую документацию на изготовление экспериментального образца, акт изготовления, программа и методики, протоколы, акты проведения исследовательских испытаний

экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке;

- эскизную конструкторскую документацию на изготовление экспериментального образца, акт изготовления, программа и методики, протоколы, акты проведения исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя;

- описание метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света;

- описание процесса разработки акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия;

- описание процесса разработки метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред;

- документы, подтверждающие выполнение работ и расходование средств

## **5. Проведение патентных исследований**

В рамках исполнения обязательств по госконтракту были проведены патентные исследования. Результаты патентных исследований представлены в Отчете о патентных исследованиях, приложенном к отчетным документам.

**6. Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке**

В рамках выполнения проекта был создан экспериментальный образец (ЭО) нового лазерного источника, выполняющий функции создания затравочного импульса накачки для петаваттного параметрического лазерного источника [2]. Изготовление подтверждается актом изготовления ЭО. Лазерный источник на выходе обладает энергией импульса около 1 мДж, и длительностью 1 нс в единственной продольной моде оптического резонатора, естественным образом находящейся в полосе усиления активного элемента из Nd:YLF. Для создания экспериментального образца был разработан набор документов эскизной конструкторской документации (ЭКД) для изготовления ЭО. На основании ЭКД, ЭО был создан и протестирован. Для этих целей были разработаны программы и методики исследовательских испытаний. Результаты исследовательских испытаний, произведенных согласно программе и методике, были занесены в протокол испытаний. На основании исследовательских испытаний был проведен анализ результатов испытаний ЭО импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке.

**6.1 Разработка эскизной конструкторской документации экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке**

В ходе выполнения проекта была разработана ЭКД на лазерный источник с модуляцией добротности на диодной накачке. ЭКД приложена к отчету отдельным документом.

**6.2 Разработка программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке**

В ходе выполнения проекта были разработаны программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца. Программы и методики приложены к отчету отдельным документом.

### **6.3 Проведение исследовательских испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке**

На основании программы и методики исследовательских испытаний ЭО были проведены исследовательские испытания ЭО. Результаты исследовательских испытаний занесены в протокол, на основании которого подготовлена Акт проведения испытаний.

#### **6.4 Анализ результатов испытаний экспериментального образца импульсного лазерного источника с модуляцией добротности на диодной накачке**

Результаты тестирования, предоставленные в протоколе испытаний показывают полное соответствие исходному ТЗ. В то же время вариативность возможного достижения поставленных целей подразумевает анализ выбранных научно-технических решений и подходов на оптимальность. В исходном ТЗ не установлены требования на такие неявные характеристики разрабатываемого ЭО, как сложность настройки и требования к квалификации оператора, поскольку эти параметры с трудом поддается объективной оценке. Кроме этого существует еще такое понятие, как потенциал применимости, связанный с возможностью адаптировать ЭО к другим задачам и требованиям на выходное излучение. Забегая вперед, можно отметить, что технология лазеров на модуляции добротности обладает неудовлетворительными возможностями для оптимизации таких параметров как энергетика и длина волны. Это обстоятельство связано с тем что такой лазер является сложной динамической системой. Изменение мощность накачки, например, приводит не только к увеличению энергии на в импульсе но к изменению всех характерных времен в системе. Изменение характерных времен требует перестройки всех электрооптических затворов, и кроме этого, поднимает требования на радиотехнический джиттре, которые и так уже находятся на значениях близких к предельному. В связи с этим анализ полученных результатов тестирования необходим в первую очередь для сравнения с альтернативными подходами к созданию затравочных импульсов для стеклянного лазера накачки параметрического усиления, в частности к подходам, разрабатываемым в рамках данного проекта.

##### **6.4.1 Цели, преследуемые при разработке нового источника**

ЭО ЛМД-Р50П созданный в рамках выполнения проекта удовлетворяет следующим целям. Он должен быть способен генерировать затравочный импульс для дальнейшего усиление в стеклянном лазере накачки. На затравочный импульс выставляются требования согласно ТЗ:



Длительность оптического импульса (FWHM) - 1нс

Центральная длина волны излучения - 1053.5 нм

Энергия в импульсе >0.5 мДж

Метод накачки активного элемента - оптически, диодный

Стабильность по энергии (СКО) не хуже 2% на временных масштабах  
10 мин

Ширина спектра импульса <0.01 нм

Время срабатывания относительно прихода синхроимпульса - не более  
0.5 мкс

Джиттер оптического импульса относительно синхроимпульса - не  
более 50 пс

Поперечный модовый состав - одна мода TEM00

При выполнении этих требований ЭО может заменить существующий источник на модуляции добротности, который генерирует затравочный импульс накачке в комплексе PEARL. При этом будет достигнута более высокая стабильность относительно существующего источника затравочных импульсов, работающего на широкополосной ламповой оптической накачке и по отличающемуся алгоритму срабатывания электрооптических затворов.

#### **6.4.2 Технические решения, выбранные на этапе разработки**

На этапе разработки были выбраны следующие технические решения.

- Устойчивый оптический резонатор с длиной 30 см
- Кристаллический активный элемент Nd:YLF
- Торцевая диодная накачка
- Схема работы “с разгрузкой”
- Селекция продольных мод на основе эталонов Фабри-Перо
- Селекция поперечной моды при помощи диафрагмы и за счет локализации области с инверсией в активном элементе
- Сборка на отдельной плите с возможностью термостабилизации
- Данные решения призваны поднять стабильность работы и уменьшить джиттер относительно сигнального импульса, который

параметрически усиливается за счет нелинейного взаимодействия с импульсом накачки внутри нелинейного кристалла.

#### **6.4.3 Соответствие выбранных технических решений вызовам, поставленным перед проектом**

Устойчивость оптического резонатора привела к повышению стабильности частоты, поперечной моды и энергии лазерного импульса.

Использование активного элемента на Nd:YLF позволила избежать рассогласования длин волн с существующим предусилителем в лазерной системе PEARL, кроме этого кристаллическая среда менее чувствительна к тепловой нагрузке при работе с высокой частотой повторения и высокими средними мощностями излучения

Торцевая диодная накачка, по сравнению с продольной ламповой, позволяет существенно снизить длину активного элемента, а значит и всего лазерного источника, поднять КПД “от розетки” за счет повышения эффективности перекачки энергии ламп в инверсию населенностей в активном элементе, упростить селекцию поперечных мод за счет локализации накачки, снизить вибрации при срабатывании накачки и тем самым поднять стабильность источника, снизить тепловые эффекты в активном элементе. Все эти обстоятельства повышают стабильность лазерного источника. Кроме этого переход на диодную накачку позволяет существенно поднять частоту повторения импульсов вплоть до сотен Герц, что значительно упрощает все настроечные процедуры на комплексе PEARL в целом.

Алгоритм работы “с разгрузкой” позволяет перейти на режим с меньшей инверсией, что допускает с одной стороны переход на дисковые активные элементы, в отличии от стержневых, используемых ранее, а также, приводит к повышению стабильности самого лазерного источника, за счет увеличения характерных времен системы в условиях меньшей (по сравнению с ламповой схемой используемой ранее и описанной в статье [Катин и др. Квантовая Электроника, 2003]) инверсии.

Селекция поперечных мод при помощи локализации накачки позволяет снизить потери внутри резонатора, тем самым достигается повышение КПД источника и стабильность

Сборка на отдельной плите с термостабилизацией также позволяет поднять стабильность работы источника, особенно на больших временных масштабах.

#### **6.4.4 Анализ достигнутых результатов, сопоставление с альтернативными подходами к генерации затравочных импульсов**

Согласно данным, предоставленным в протоколе исследований, лазерный источник продемонстрировал следующие параметры лазерных импульсов:

Энергия в импульсе  $>1$  мДж

Частота повторения импульсов до  $>50$  Гц

Центральная длина волны -  $1053,5$  нм

Ширина спектральной полосы импульса  $<0.1$  нм

Модовый состав: TEM<sub>00</sub>

Стабильность энергии импульса:  $0.5\%$  за 10 мин

Таким образом, ЭО ЛМД-Р50П удовлетворяет всем требованиям ТЗ, и обладает всеми заявленными преимуществами диодной накачки и остальных технических решений.

В то же время сам подход с использованием источника на принципах модуляции добротности обладает рядом недостатком по сравнению с возможными альтернативами, в частности, по сравнению с усилением импульса созданным вырезанием из непрерывного излучения на основе быстрого электрооптического модулятора и подходов с оптической синхронизацией на основе нелинейного обогащения спектра одного источника. Исследования показали, что основным недостатком является сложность синхронизации с внешним источником.

Лазеры на модуляции добротности представляют собой сложные автоколебательные системы с положительной обратной связью. За один цикл

срабатывания лазерный импульс пробегает по резонатору десятки и даже сотни раз, развиваясь из спонтанной затравки в несколько фотонов. В связи с этим малейшее изменение параметров резонатора приводит к многократно усиленному эффекту. Именно поэтому развитие генерации так чувствительно к малейшим колебаниям и параметров, в частности к температурным и связанным с вибрацией. Для того чтобы генерация развилась должно пройти довольно большой промежуток времени, равный времени на необходимые обходы по резонатору. В этом смысле источники на модуляции добротности являются самыми медленными из возможных, что существенно затрудняет синхронизацию, например с лазером на синхронизации мод (мастер-осциллятором). Иными словами лазер на модуляции добротности должен быть запущен задолго до всех остальных элементов схемы, что полностью изменяет алгоритм срабатывания всей лазерной системы. В каком-то смысле источник на модуляции добротности подчиняет себе все остальные элементы, поскольку чисто технически, в силу своей принципиально низкой стабильности по сравнению с другими элементами схемы, необходимо все остальные элементы запускать от него. Более того, ситуацию осложняет большая задержка между запускающим импульсом на лазер с модуляцией добротности и остальными электрооптическими элементами всего лазера. Большую задержку, чисто технически, сложнее контролировать с заданной абсолютной точностью.

На наш взгляд, основным недостатком подхода является использование электрооптических методов для синхронизации импульсов накачки и сигнального импульса. Точность синхронизации имеет принципиальное значение при параметрическом усилении, потому что, в процессе нелинейного взаимодействия в нелинейном кристалле, сигнальный импульс должен с высокой точностью перекрываться с импульсом накачки, как во временном так и в пространственном смысле. При нарушении этого условия начинает искажаться спектральная амплитуда усиленного импульса, в пределе приводящая к полному отсутствию усиления при больших значениях

временного рассогласования. Дело в том, что точность электрической синхронизации естественным образом ограничена полосой пропускания электротехнических элементов и составляет в лучшем случае, десятки пс. В то же время, технология генерации оптических импульсов допускает синхронизацию до фс, что на несколько порядков более точно. Мы полагаем, что наиболее правильным подходом к синхронизации сигнального импульса с импульсом накачки при параметрическом усилении является подход с использованием оптической синхронизации. Кроме этого электротехническая синхронизация подвержена электрическим наводкам, которые неизбежны при использовании ламповой накачки, которая является безальтернативной для современных килоджоульных и субкилоджоульных лазерных систем по экономическим соображениям. Все эти обстоятельства приводят к существенному снижению удобства использования и прикладной ценности всех систем в основе которых лежит электротехническая синхронизация.

#### **6.4.5 Рекомендации по дальнейшему усовершенствованию источника затравочных импульсов.**

На основании анализа достигнутых результатов, приведенного в п. 5.4.4. отчета предлагается перейти на альтернативный подход к построению генераторов затравочных импульсов накачки, основанный на использовании оптической синхронизации с сигнальным импульсом. В этом случае затравки как для сигнального импульса так и для импульса накачки формируются на основе нелинейного обогащения спектра и рождаются из одного и того же лазерного импульса. Такой подход приведет к существенному повышению стабильности лазера PEARL в целом, и появлению возможности реализации таких решений, как когерентное сложение нескольких импульсов и стабилизация фазы сигнального импульса. В настоящий момент такие возможности для лазерного комплекса принципиально недоступны.

**7. Разработка эскизной конструкторской документации, изготовление экспериментального образца, разработка программы и методики исследовательских испытаний, проведение испытаний, анализ результатов испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм.**

**7.1 Разработка эскизной конструкторской документации экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм**

В ходе выполнения проекта была разработана ЭКД на экспериментальный образец стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм. ЭКД приложена к отчету отдельным документом.

**7.2 Разработка программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм**

В ходе выполнения проекта были разработаны программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм. Программы и методики приложены к отчету отдельным документом.

### **7.3 Проведение исследовательских испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм**

На основании программы и методики исследовательских испытаний ЭО были проведены исследовательские испытания ЭО стержневого лазерного усилителя на неодимовом стекле апертурой 150 мм. Результаты исследовательских испытаний занесены в протокол, на основании которого подготовлен Акт проведения испытаний.



#### 7.4 Анализ результатов испытаний экспериментального образца стержневого лазерного усилителя с апертурой 150мм.

Результаты тестирования, представленные в протоколе испытаний, показали, что экспериментальный образец стержневого лазерного усилителя с апертурой 150мм «Квантрон D150» полностью соответствует исходному ТЗ.

Широкоапертурные усилители на основе фосфатного стекла, допированного неодимом, являются ключевым элементом лазерных систем с высокой энергией импульса. Для лазеров с килоджоульным уровнем энергии единственным решением является использование слэбов. В лазерных установках с меньшей энергией – сотни Джоулей – использование стержней предпочтительнее, благодаря однопроходной геометрии усиления, лучшему качеству выходного излучения, компактности, большей частоте повторения импульсов.

Наибольший коммерчески доступный на данный момент диаметр стержневых активных элементов составляет 100мм. Однако существуют единичные экземпляры большего диаметра. Апертура 150 мм, по-видимому, является максимально возможной для случая стержневой геометрии усилителей.

Серьезной задачей стала разработка отражателей для газоразрядных ламп оптической накачки. Дело в том, что для прокачки активного элемента столь большой апертуры необходимо большее количество ламп, вследствие чего лампы оказываются расположенными на меньшем расстоянии друг от друга. Это повышает поглощение излучения одной лампы соседней и приводит к их разрушению. По этой причине пришлось снизить электрическую энергию накачки, приходящуюся на одну лампу, по сравнению с усилителями меньшей апертуры.

#### **7.4.1 Цели, преследуемые при разработке стержневого лазерного усилителя с активным элементом апертурой 150мм.**

Лазерный усилитель «Квантрон D150», созданный в рамках выполнения проекта удовлетворяет следующим целям. Он должен быть способен усиливать оптический пучок апертурой до 148мм до энергий сотни Джоулей. Ниже приведены параметры импульса:

Длительность оптического импульса (полная длительность по полувысоте): 1нс - 25 нс.

Центральная длина волны излучения: 1052нм – 1056нм.

Ширина спектра излучения: менее 0.1 нм.

Апертура пучка до 148 мм

Энергия в импульсе на выходе усилителя до 500 Дж, для импульса длительностью более 1 нс и апертурой более 144мм.

Параметры усилителя:

Метод накачки активного элемента - оптический, импульсные газоразрядные лампы ИФП8000.

Поджиг ламп накачки внутренний.

Коэффициент усиления малого сигнала не менее 2.

Неоднородность коэффициента усиления малого сигнала по радиусу не более 10% (СКО).

Время срабатывания относительно прихода синхроимпульса - не более 10 мкс.

При выполнении этих требований «Квантрон D150» может быть расположен на выходе существующего восьмикаскадного оптического усилителя. Это позволит увеличить энергию оптического импульса длительностью 1нс на длине волны 1054 нм с 300 до 500 Дж. Данный импульс может быть использован для накачки оконечного каскада параметрического усилителя (после генерации второй гармоники). Также

возможно его прямое использование в экспериментах по взаимодействию наносекундного излучения с веществом, проводимых на лазерном комплексе.

#### **7.4.2 Технические решения, выбранные на этапе разработки.**

На этапе разработки были выбраны следующие технические решения.

- Активный элемент из фосфатного стекла марки КГСС0180, допированного ионами Nd с концентрацией  $0,33 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Пузырность, бессвильность и включения по ОСТ 3-30-77. Апертура элемента 150 мм, длина 300 мм, угол наклона торцов к образующей 85 градусов.
- Отражатели из анодированного алюминия MIRRO-4 Silver, толщиной 0,4 мм. Коэффициент отражения 0,95 - 0,97 в спектральном диапазоне 400 – 1100 нм.
- Охлаждение проточной дистиллированной водой.
- Оптическая накачка с помощью шестнадцати ламп вспышек ИФП 8000 расположенных вдоль образующей активного элемента.
- Электрическая накачка с помощью двух имеющихся источников питания 8ИФП-8000.
- Сборка на отдельном оптическом столике с возможностью 4-х координатной юстировки (две по углу и 2 по ортогональным координатам поперёк образующей).

Данные решения призваны увеличить энергию импульса оптической накачки параметрического усилителя со 180 до 250 Дж на длине волны 527 нм, при использовании двух последовательно расположенных усилителей «Квантрон D150».

#### **7.4.3 Соответствие выбранных технических решений вызовам, поставленным перед проектом.**

Разработанный и изготовленный усилитель «Квантрон D150» позволит увеличить энергию импульса оптической накачки оконечного каскада параметрического усилителя (1нс @ 527 нм) до значений 250 Дж. Это даёт надежду на увеличение энергии сигнального импульса до 60 Дж и переходу через петаваттный рубеж.

Использование стержневой геометрии позволяет обойтись без дорогостоящих и сложных в настройке компенсаторов аберраций, возникающих в случае отсутствия осевой симметрии, как присущих используемым оптическим элементам, так и появляющимся вследствие нагрева активных элементов.

Так же это позволяет без существенного перестроения существующей оптической схемы значительно повысить энергию выходного импульса.

Из дополнительных элементов требуется только согласующий телескоп и новый нелинейный элемент из ДКДП для генерации второй гармоники.

Разработанная система охлаждения позволит использовать усилитель при частоте следования импульсов накачки 1 импульс в час, а не 3 импульса в день, как на других лазерных системах с соответствующей и даже меньшей энергией.

#### **7.4.4 Анализ достигнутых результатов, сопоставление с альтернативными подходами к усилению широкоапертурных оптических импульсов.**

Согласно данным, предоставленным в протоколе исследований, лазерный источник продемонстрировал следующие параметры лазерных импульсов:

средний по апертуре коэффициент малого сигнала 2,14;

нормированное на среднее значение среднеквадратичное отклонение для радиальной зависимости коэффициента усиления малого сигнала 9,8 %.

Таким образом, усилитель «Квантрон D150» удовлетворяет всем требованиям ТЗ, и обладает всеми заявленными параметрами для получения оптических импульсов длительностью 1нс, энергией 500 Дж на длине волны 1054нм.

Однако следует отметить, что большая апертура усилителя усложняет отвод тепла от активного элемента и ограничивает частоту следования импульсов накачки на уровне 1 импульс в час.

Другим недостатком используемого подхода является относительно малый коэффициент усиления слабого сигнала. Что приводит к большим искажениям временной формы оптического импульса (так как приходится работать в режиме сильного насыщения), а так же увеличивает вероятность оптического пробоя при больших значениях интеграла распада (т.к. длина распространения оптического импульса большой интенсивности достаточно велика).

Альтернативный способ усиления оптических импульсов – использование слэбов – позволяет усиливать пучки апертурой 300 – 400 мм [3]. И погонный коэффициент усиления слабого сигнала у них в разы выше. Однако платой за это является более сложная конструкция усилителей, а так же появление оптических aberrаций высших порядков из-за отсутствия аксиальной симметрии усилителей.

Таким образом, выбор в пользу тех или иных геометрических форм усилителей каждый раз зависит от предполагаемых задач.

На наш взгляд для импульсов длительностью 1 нс с энергиями до 500 Дж стержневые усилители в настоящее время являются безальтернативными. Но использование элементов с диаметром более 150 мм нецелесообразно.

#### **7.4.5 Рекомендации по дальнейшему усовершенствованию усилителя оптических импульсов.**

Дальнейшим усовершенствованием разработанного усилителя может стать повышение эффективности системы охлаждения активного элемента. Это по некоторым оценкам позволит увеличить частоту следования импульсов в два раза.

Логичным развитием схемы усиления импульсов накачки должно явиться изготовление второго усилителя «Квантрон D150», при наличии активного элемента диаметром 150 мм и генератора второй гармоники – кристалла KD\*P апертурой 155 мм. А так же расчёт и изготовление Кеплерова телескопа – пространственного фильтра для согласования с предыдущим усилителем апертурой 100 мм. Для интеграции в

существующую схему, придётся также изготовить сужающий телескоп на длину волны 527нм, для согласования с параметрическим усилителем.

Достигнутое увеличение энергии наносекундного импульса лазера накачки позволит провести лабораторное моделирование плазменных процессов, развивающихся при облучении «замагниченного» хольраума (т.е. хольраума, помещенного в сильное внешнее магнитное поле напряженностью несколько десятков Тесла и выше) и сравнить полученные результаты с масштабным экспериментом, проведенным в 2018 году в рамках выполнения настоящего проекта [Айдакина и др., Письма в ЖЭТФ (2018)]. В частности, использование полученных высокоэнергичных лазерных пучков наносекундной длительности, позволит достичь интенсивностей порядка  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> (т.е. характерных интенсивностей лазерного излучения на поверхности хольраума в экспериментах по ЛТС) на достаточно большой поверхности мишени (в пятне диаметром порядка 200-300 мкм), что позволит детально исследовать плазменные процессы методами фемтосекундной оптической интерферометрии.

## **8. Разработка метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света.**

В рамках проекта, согласно плану-графику выполнения обязательств был разработан новый метод компенсации деполяризации, основанный на использовании пространственных модуляторов света SLM (Spatial Light Modulator). SLM – коммерчески доступные приборы, основным компонентом которых является жидкокристаллическая матрица.

Паразитные тепловые эффекты, связанные с тепловыделением в активной среде, ухудшают качество пучка, а также ограничивают среднюю мощность непрерывных и импульсно-периодических твердотельных лазеров и частоту повторения импульсных. На практике наиболее важными тепловыми эффектами являются термонаведенная деполяризация и тепловая линза. Оба эти эффекта подробно исследовались как теоретически, так и экспериментально, начиная с момента появления лазеров [4] [5] [6].

Термонаведенная деполяризация в лазере накачки для финального каскада параметрического усиления чирпированных импульсов в установке PEARL ограничивает частоту следования импульсов значением 0.001 Гц. Накачка стержневых активных элементов производится лампами-вспышками, расположенными вдоль образующей цилиндра. Нагрев активного элемента лампами, более интенсивный вблизи образующей, приводит к градиенту температуры, что, в свою очередь приводит к ряду термооптических эффектов, наиболее заметным из которых является термонаведенное двулучепреломление.

Существуют различные способы компенсации деполяризации. Большинство из них основано на использовании дополнительных оптических элементов, которые изменяют поляризацию таким образом, чтобы суммарная деполяризация стала меньше. В качестве таких дополнительных элементов используются, например, кристаллические 90-градусные вращатели

поляризации, располагаемые между идентичными элементами [7], или фарадеевские зеркала [8]. Однако такие способы обладают рядом недостатков. Если используются 90-градусные вращатели, то любая неидентичность элементов приводит к неполной компенсации деполяризации. Если используются иные элементы, требуется их юстировка в зависимости от интегральной степени деполяризации и ее пространственного распределения. То есть при изменении средней мощности требуется значительное изменение схемы.

Разработанный нами метод лишен вышеописанных недостатков. Показано, что использование одного SLM позволяет значительно (в разы) уменьшить термонаведенную деполяризацию практически независимо от радиальной зависимости термонаведенного двулучепреломления. Ось SLM должна быть наклонена относительно поляризации падающего излучения на 45 градусов. Данный метод эффективен для относительно малых значений интегральной степени деполяризации.

Использование двух SLM позволяет полностью устранить термонаведенную деполяризацию, если оси SLM расположены под углами 45 и 0 градусов к поляризации падающего излучения. Данный метод может быть использован не только для подавления тепловых эффектов, но для компенсации деполяризации, вызванной другими причинами, например, остаточными механическими напряжениями в оптических элементах.



## **8.1 Описание метода компенсации термонаведенной деполяризации излучения при помощи пространственного модулятора света .**

### **8.1.1 Цель метода**

Уменьшение степени деполяризации лазерного излучения, вызванной термонаведенным двулучепреломлением в активных элементах.

### **8.1.2 Требования к методу**

Уменьшение интегральной степени деполяризации до значений, не превышающих 1%, для систем с цилиндрической симметрией из изотропных оптических сред (стекла).

Эффективность метода не должна зависеть от состава системы (идентичности элементов) и от режима работы усилителей (средней мощности).

### **8.1.3 Используемые средства и порядок применения метода**

В рассматриваемом методе компенсация деполяризации осуществляется пространственным модулятором света (SLM)

SLM – коммерчески доступный прибор, основным компонентом которого является жидкокристаллическая матрица. Характерное разрешение составляет порядка 1000 пикселей по стороне, характерный размер одного пикселя – около 10 мкм. При этом в каждом пикселе матрицы можно независимо управлять набегом фазы одной из собственных поляризаций, а фаза ортогонально поляризованного излучения остается неизменной. Направления собственных поляризаций для всех пикселей одинаковы и параллельны сторонам матрицы.

Пространственный модулятор света применяется в качестве одного из зеркал, заводящих лазерный импульс в систему усиления. Такой порядок применения обусловлен размерами матриц пространственных модуляторов (10–15 мм) и их оптической стойкостью (10 мДж/см<sup>2</sup>). Также применение

SLMограничено их быстродействием – характерное время отклика составляет 10 – 50 мс.

#### 8.1.4 Описание метода

В простейшем случае цилиндрической симметрии оптических элементов из стекла и изотропных кристаллов с ориентацией [111]собственные оси термонаведенного двулучепреломления в каждой точке оптического элемента направлены радиально и тангенциально. Набег фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами приводит к искажению исходной (пусть линейной) поляризации и появлению ортогонально поляризованной компоненты излучения. Рассмотрим произвольную точку на апертуре пучка (Рис. 1а).

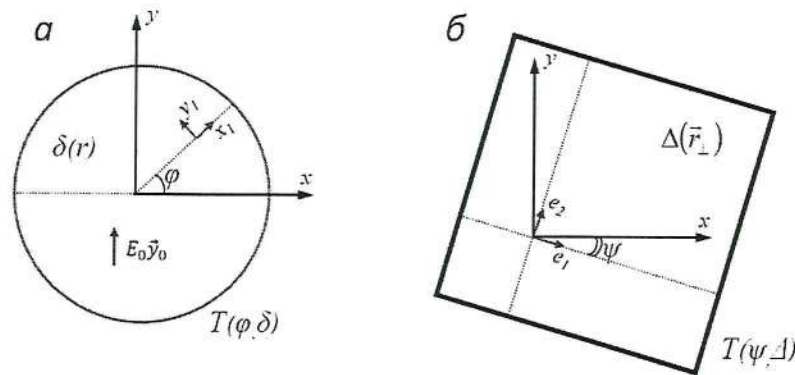


Рис1. а - направление собственных осей термонаведенного двулучепреломления в некоторой точке оптического элемента с цилиндрической симметрией, б - направление собственных осей в матрице SLM.

Изменение поляризации в этой точке будет описываться соотношением

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = T(\varphi, \delta) \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$T(\varphi, \delta) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

- матрица Джонса ( $\varphi$  – полярная координата точки,  $\delta = \delta(r)$  – набег фаз между термонаведенными собственными поляризациями нагретого элемента).

В качестве характеристики деполаризованного излучения будем использовать локальную степень деполаризации  $\Gamma(r)$ , равную отношению интенсивности излучения, поляризованного ортогонально исходной поляризации, к полной интенсивности:

$$\Gamma(r) = \frac{|E_x|^2}{|E_y|^2 + |E_x|^2} \quad (3)$$

и интегральную степень деполаризации  $\gamma$ , равную отношению мощности излучения, поляризованного ортогонально исходной поляризации, к полной мощности:

$$\gamma = \frac{\int |E_x|^2 dS}{\int |E_y|^2 dS + \int |E_x|^2 dS} \quad (4)$$

На рис.2 приведено распределение локальной степени деполаризации  $\Gamma(r)$  для активного элемента диаметром 100мм для в момент 25ой вспышки ламп в режиме работы 1 вспышка раз в 3 минуты, а так же зависимость интегральной степени деполаризации  $\gamma$  от времени при работе в таком режиме.

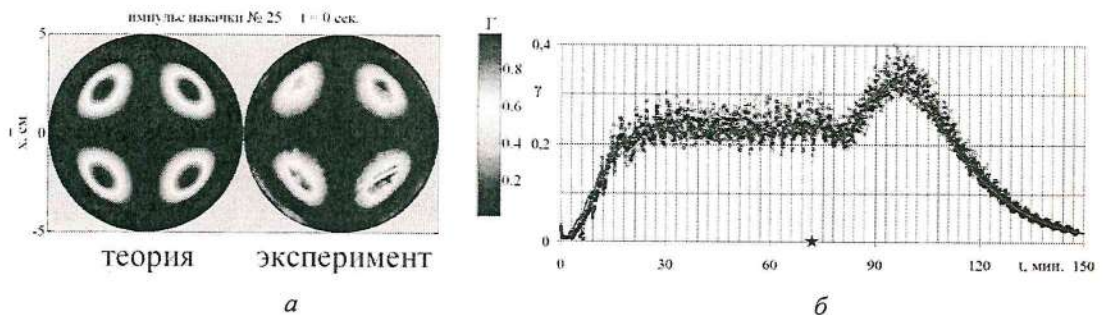


Рис. 2 *а* - теоретическое и экспериментальное распределение локальной степени деполаризации  $\Gamma(r)$  для активного элемента диаметром 100мм для в момент 25ой вспышки ламп в режиме работы 1 вспышка раз в 3 минуты, *б* - зависимость интегральной степени деполаризации  $\gamma$  от времени при работе в таком режиме (красная линия – теория, синие точки - эксперимент).

Рассмотрим возможность уменьшения интегральной деполаризации излучения при помощи одного SLM. Электрическое поле в произвольной точке пучка после прохождения пучка через SLMи оптический элемент можно записать как

$$\begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} = T(\varphi, \delta) F(\psi_1, \Delta_1) \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Подставляя (5) в правую часть (4), получим степень интегральной деполяризации  $\gamma_1$  при компенсации с помощью одного SLM. Значения угла наклона SLM  $\psi_1$  и фазы  $\Delta_1(\mathbf{r})$ , вносимой SLM, подбирались численно таким образом, чтобы минимизировать значение  $\gamma_1$ . Численное моделирование показало, что наилучшая компенсация интегральной деполяризации, т.е. минимальное значение  $\gamma_1$ , достигается при  $\psi_1 = \pi/4$ . На рис.3 приведены зависимости минимальных значений  $\gamma_1$  от степени интегральной деполяризации без компенсации  $\gamma$  при различных формах зависимости  $\delta(r)$  (линейной, квадратичной и кубической).

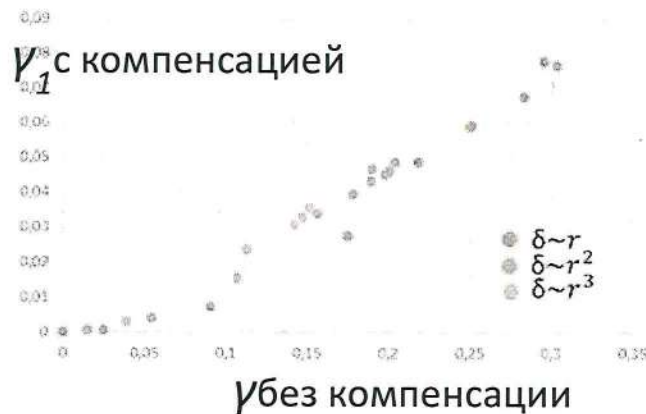


Рис. 3. Зависимость интегральной деполяризации  $\gamma_1$  после компенсации от интегральной деполяризации  $\gamma$  без компенсации. Разный цвет точек соответствует различным формам зависимости  $\delta(r)$ .

Эффективность компенсации, практически не зависит от формы зависимости  $\delta(r)$ . Как видно из рис. 3, один SLM при значениях  $\gamma < 0.1$  позволяет уменьшить деполяризацию более чем на порядок. Таким образом остаточная деполяризация  $\gamma_1 < 0.01$ , что делает ее пренебрежимо малой для большинства практических приложений. В тоже время, при больших значениях ( $\gamma > 0.2$ ) деполяризация уменьшается лишь в 4 раза, и значения  $\gamma_1 > 0.05$  могут оказаться неприемлемо большими для некоторых приложений. В этом случае целесообразно использовать два SLM.

Для двух SLM по аналогии с предыдущим случаем можно записать

$$\begin{pmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = T(\varphi, \delta) \Gamma(\psi_2, \Delta_2) \Gamma(\psi_1, \Delta_1) \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – углы наклона осей SLM-матриц относительно исходной поляризации пучка,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – фазы, вносимые SLM - произвольные функции от поперечных координат.

Подставляя (6) в правую часть (4), получим степень интегральной деполяризации  $\gamma_2$  при компенсации с помощью двух SLM. Значения углов наклона SLM  $\psi_{1,2}$  и фаз  $\Delta_{1,2}(r)$ , вносимых SLM, подбирались численно таким образом, чтобы минимизировать значение  $\gamma_2$ . Численное моделирование показало, что при  $\psi_1 = \pi/4$  и  $\psi_2 = 0$  для любых значений  $\varphi, \delta$  существуют такие функции  $\Delta_{1,2}(r)$  при которых  $E_{2x} = 0$ , т.е.  $\gamma_2 = 0$ . Таким образом, использование двух последовательно расположенных SLM с направлениями собственных осей  $\psi_1 = \pi/4$  и  $\psi_2 = 0$  позволяет полностью компенсировать локальную деполяризацию  $\Gamma$  в любой точке пучка, что невозможно сделать иными способами.

Таким образом, использование одного SLM позволяет значительно (в разы) уменьшить термонаведенную деполяризацию практически независимо от радиальной зависимости термонаведенного двулучепреломления. Ось SLM должна быть наклонена относительно поляризации падающего излучения на 45 градусов. Данный метод эффективен для относительно малых значений интегральной степени деполяризации. Использование двух SLM позволяет полностью устранить термонаведенную деполяризацию, если оси SLM расположены под углами 45 и 0 градусов к поляризации падающего излучения. Данный метод может быть использован не только для подавления тепловых эффектов, но для компенсации деполяризации, вызванной другими причинами, например, остаточными механическими напряжениями в оптических элементах. [6] [7] [8]

## **9. Разработка акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия.**

В рамках выполнения обязательств был разработан метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия.

### **9.1 Описание процесса разработки акустооптического метода неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия**

Определение порога лазерно-индуцируемого разрушения (ЛИР) прозрачных диэлектрических материалов [9] без разрушения оптического элемента является основной целью предложенной методике.

Главное требование, которое предъявляется к методике - отсутствие разрушения структуры исследуемых прозрачных диэлектрических сред оптического качества.

Для применения метода предлагается использовать: лазерную систему, которая обеспечивает параметры излучения по ТЗ, приёмник(и) звуковых колебаний, регистрирующую аппаратуру (осциллограф и/или персональный компьютер с соответствующей комплектацией и программным обеспечением, измеритель энергии светового излучения, измеритель профиля поперечного распределения пучка).

Приёмник(и) звуковых колебаний размещаются на плоскостях, перпендикулярных направлению облучения ЭО (по возможности). Воздействие на ЭО производится лазерной системой с последующей регистрацией параметров соответствующим оборудованием. Обработка результатов производится персональным вычислительным устройством.

Предпосылка к созданию данной методики является факт поглощения излучения в среде примесями (включениями в структуру материала). То есть при распространении интенсивного лазерного излучения через ЭО происходит потеря энергии (без учёта потери энергии на границе раздела сред и потери на рассеяние). Примесь (частица инородного материала)

поглощает энергию и увеличивается в размерах. Что приводит к возникновению перепадов давления во внутренней структуре материала и, как следствие, распространению звуковой волны. Если давление расширения не приводит к фатальным результатам (разрушению структуры материала), то можно утверждать, что ЭО выдерживает пропускание через среду излучения с фиксированной энергией. Соответственно, для определения порога ЛИР надо принимать во внимание частотный спектр звуковых колебаний, образующихся при поглощении энергии примесями.

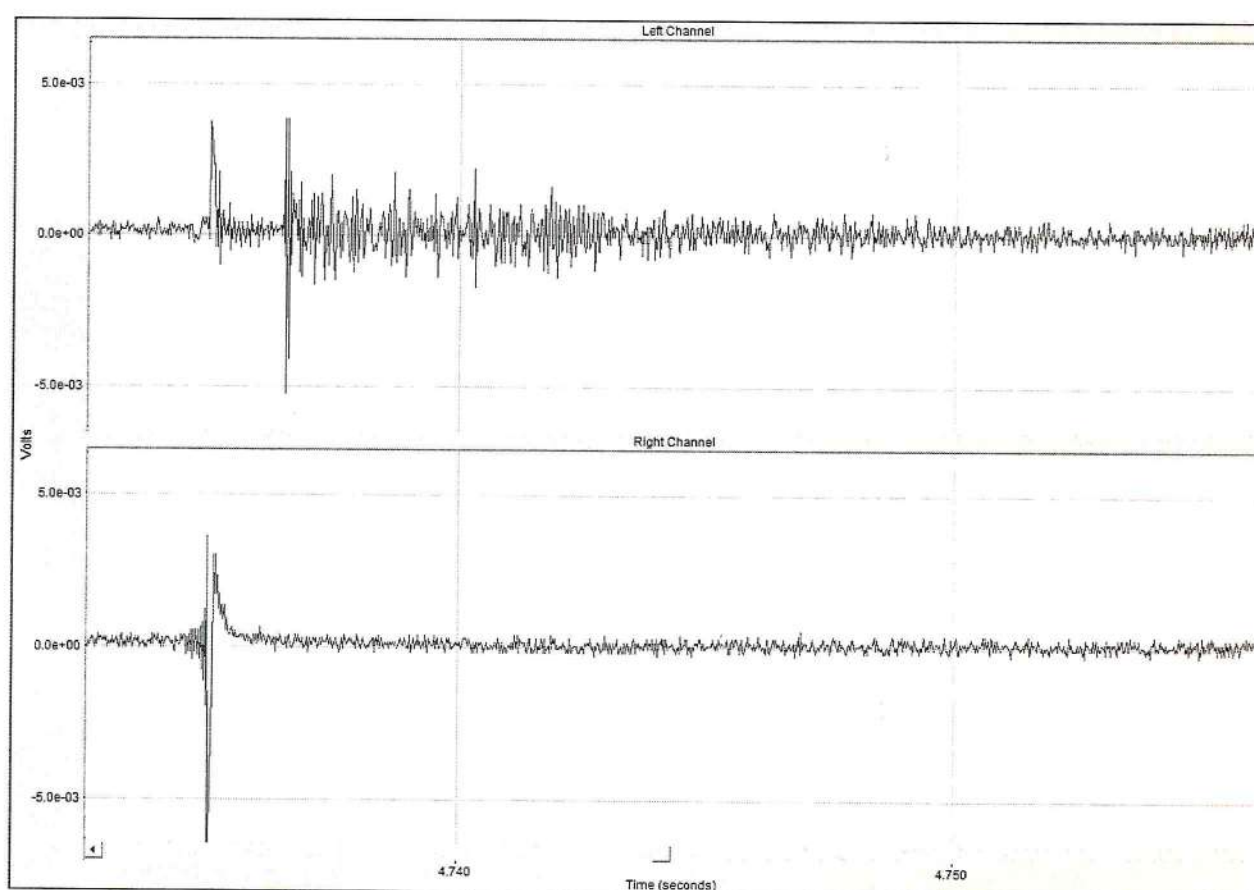


Рис. 4 Характерная осциллограмма регистрируемого звукового колебания (верхняя осциллограмма) и импульса синхронизации с фотодетектора (нижняя осциллограмма).

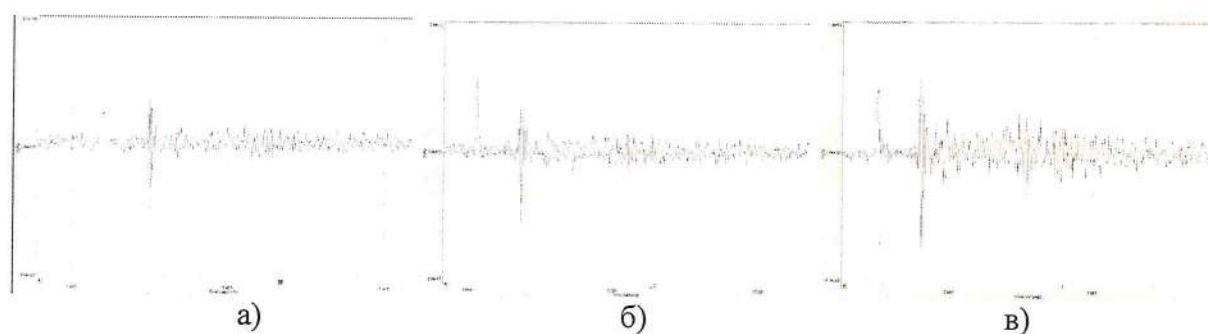


Рис. 5 Характерные осциллограммы регистрируемого звукового колебания с энергией тестового импульса задолго до ЛИР (а), перед ЛИР (б) и после ЛИР (в).

Предложен акустооптический метод неразрушающего контроля лазерной стойкости оптических диэлектрических сред, в основе которого лежит регистрация звуковой волны от поглощающего центра, облучённого лазерным излучением с параметрами по ТЗ (Программа и метод по определению порога лазерно-индуцированного разрушения кристаллических материалов типа KDP и DKDP с помощью регистрации звуковых колебаний приложены к отчету).

Данная методика позволяет определить нижнюю энергетическую границу порога оптического разрушения кристаллических диэлектрических материалов без непосредственного влияния (разрушения) на структуру образца. Для регистрации звуковых колебаний были использованы высокочувствительные пьезокерамические датчики, которые крепились к боковым граням оптических образцов через тонкий пластичный звукопроводящий слой (Рис. 4 и Рис. 5).

По результатам спектральной обработки акустического сигнала определялась критическая предпороговая энергия излучения (Рис. 6). При обработке звуковых спектров выявлено, что при приближении энергии лазерного импульса к порогу разрушения изменение спектра звуковых колебаний несло характерное увеличение амплитуды спектра в области 9,5 и 12 кГц.



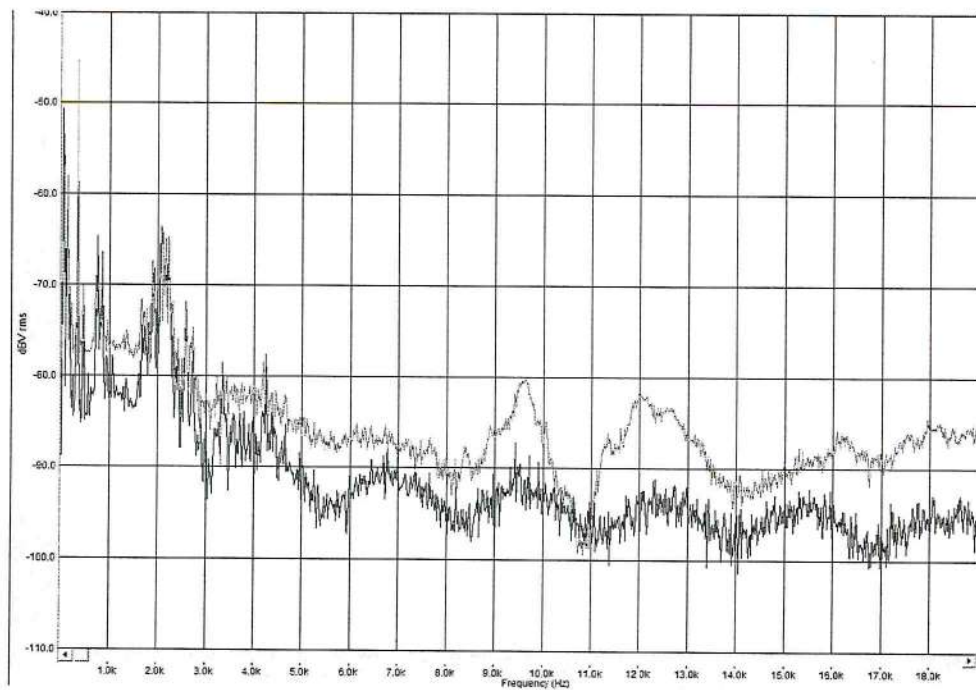


Рис. 6. Характерные спектры регистрируемого звукового колебания с энергией тестового импульса задолго до ЛИР (черный), пред ЛИР (лиловый).

Выполнены серии исследований определения порога оптической стойкости диэлектрических материалов с кристаллической структурой среды. Для уточнения порога ЛИР было проведено сравнение с методом по "свидетелю" (см. п.10 отчета о ПНИЭР) (Рис. 7). Разрушение образцов дополнительно контролировалось с помощью микроскопа (Рис. 8) и методами цифровой голографии.

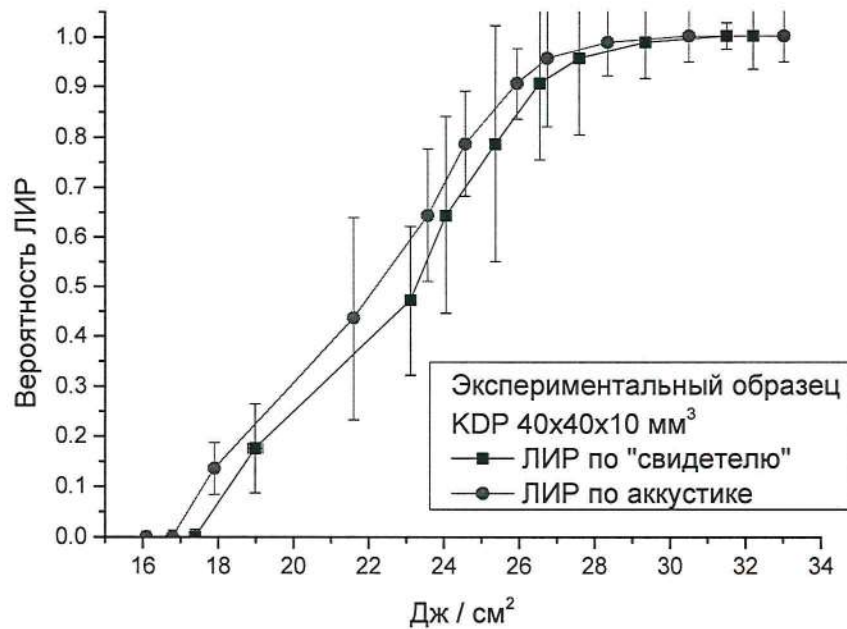


Рис. 7. Вероятность ЛИР от плотности мощности падающего лазерного излучения: исследование ЭО по предложенной методике (кружки) и по методике по "свидетелю" (квадратики).



Рис. 8. Микроскопическая фотография характерных разрушений, возникающих при малом превышении порога ЛИР. Размер изображения 1x1 мм<sup>2</sup>.

Сравнение методов определения порога ЛИР показало, что при регистрации только звуковых колебаний порог ЛИР занижается на 8-12%. Но при этом предложенный метод позволил отказаться от применения других

оптических методов контроля (микроскоп, цифровая голография, регистрация рассеянного излучения) и не наносит ущерб исходному ЭО.

## **9.2 Описание программы и методики испытаний образцов монокристаллов KDP и DKDP акустооптическим методом неразрушающего контроля лазерной стойкости оптической среды в процессе предпорогового воздействия.**

### **1 Программа испытаний**

#### **1.1 Объект испытаний, его состав и назначение**

1.1.1 Объект испытаний: экспериментальный образец монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP) с габаритами 180x180x10 мм или 410x410x10 мм или 410x410x15 мм в количестве 1 шт.

1.1.2 Число испытываемых объектов – 1 шт. или 100% от общего количества.

1.1.3 Назначение изделия: Основной элемент устройства вращения плоскости поляризации излучения (ячейка Поккельса) или преобразователь частоты согласно ТЗ.

#### **1.2 Цель и задачи испытаний**

##### **1.2.1 Цель испытаний:**

- оценка соответствия экспериментального образца изделия требованиям технического задания.

##### **1.2.2 Задачи испытаний:**

определение порога лазерно-индуцируемого разрушения образца без нанесения вреда целостности кристаллической структуре.

#### **1.3 Общие положения**

1.3.1 Перечень документов, на основании которых проводятся испытания:

- техническое задание на оптическую стойкость экспериментальных образцов для ячеек Поккельса или преобразователей частоты;
- соглашение № 13-353 дсп, дополнение №6.

1.3.2 Место и продолжительность испытаний:

- место испытаний – лаборатория 392 отдела 390 ИПФ РАН;
- продолжительность испытаний – 1 месяц.

1.3.3 Организации (предприятия) участвующие в испытаниях:

Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН) и ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (при необходимости).

1.3.4 Перечень представляемых на испытания документов:

- 1) ТЗ на оптическую стойкость нелинейно-оптических элементов для лазера, с активными элементами из неодимового стекла;
- 2) комплект РКД на опытный образец изделия (инд. А 1317-Л 2800.35.01.100; А 1317-Л 2800.36.01.100, А 1317-Л 2800.39.01.100, Э 390-423 );
- 3) программа и методики испытаний (настоящий документ).

1.3.5 Порядок внесения изменений в программу испытаний

1.3.5.1 Программа и методика предварительных испытаний может корректироваться в зависимости от изменений места и условий проведения испытаний по взаимному согласованию сторон и отражаться в протоколах предварительных испытаний.

1.3.5.2 При выполнении цикла испытаний по нескольким параметрам или однотипных параметрах допускается оформление совместного протокола.

## **1.4. Объём испытаний**

1.4.1 Количество объектов, поставляемых на испытания: экспериментальный образец монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP) с габаритами

180x180x10 мм или 410x410x10 мм или 410x410x15 мм в количестве 1 шт.

1.4.2 Порядок и последовательность подтверждения требований ТЗ, последовательность проведения и режимы испытаний, а также объем испытаний приведен в Таблице 1.

**Таблица 1 – Объем испытаний**

	Виды испытаний	Пункты требований		Примечание
		ТЗ	раздела "Методики испытаний"	
1.	Проверка комплектности экспериментального образца	3.1	2.1.1.1	Протокол 1
2.	Проверка геометрических параметров экспериментального образца	3.2.4.6, 3.14.1.1	2.1.1.2	Протокол 1
3	Проверка параметров тестового импульса	3.1.1.4, 3.1.1.5	2.1.2	
4.	Проверка спектрального состава тестового импульса	3.2.1.6	2.1.6	Протокол 1
5.	Проверка энергии в импульсе	3.2.1.6	2.1.2	Протокол 1
6.	Проверка стабильности параметров тестовой генерации	-	2.1.5	Протокол 1
7.	Проверка поперечного состава моды тестового импульса	-	2.1.2	Протокол 1
8.	Определение порога лазерно-индуцируемого разрушения	3.2.1.6 3.2.4.9	2.1.4	Протокол 1

**1.5 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний.**

### 1.5.1 Условия окружающей среды

Все измерения, за исключением специально оговоренных, проводятся в нормальных условиях применения:

- температура воздуха :  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха :  $50 \pm 10 \%$ ;
- атмосферное давление : от 84 до 106 кПа ( от 630 до 795 мм рт. ст.).

### 1.6 Материально – техническое обеспечение испытаний

При проведении испытаний используются материальные и технические средства согласно таблице 2.

Таблица 2– Материально-технические средства

Наименование Прибора	Рекомендуемый тип	Используемые характеристики
Стенд контроля ориентации и определения порога пробоя НЭ №3	Лазерный специальный	Согласно документации на стенд
Приёмник звуковых колебаний	Пьезокерамический датчик ЦТС-19	Согласно документации на датчик ЦТС-19
Видеокамера ПЗС	Цифровая с SDU-285 USB	Согласно документации на камеру SDU-285 USB
Осциллограф		Согласно документации на KYESIGHT DSO-X 3102T
Фотодиод быстрый (500 пс)	THORLABS DET025AFC/M	Согласно документации на THORLABS DET025AFC/M
Измеритель энергии оптического импульса	OPHIR PE50-C	Согласно документации на OPHIR PE50-C

### 1.7 Метрологическое обеспечение испытаний

При проведении испытаний используются средства измерений и испытательное оборудование в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Средства измерения и испытательное оборудование

Наименование Прибора	Рекомендуемый тип	Используемые характеристики	Погрешность
----------------------	-------------------	-----------------------------	-------------

Штангенциркуль	ШЦЦ II-500мм	Согласно документации на ШЦЦ II-500мм	0.01мм
Гигрометр		Согласно документации на гигрометр	
Барометр		Согласно документации на барометр	

### **1.8. Обеспечение защиты государственной тайны.**

Не предъявляется.

### **1.9 Отчётность**

1.9.1 Перечень первичных учетных и отчетных документов:

- Протокол исследовательских испытаний экспериментального монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP) в количестве 1 шт.

- Ведомость соответствия ТЗ.

## **2 Методика испытаний**

### **2.1 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения**

2.1.1 Общие характеристики.

2.1.1.1 Испытываемый экспериментальный образец нелинейно-оптического элемента должен иметь следующую комплектность:

монокристалл дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP) (1шт).

2.1.1.2 Геометрические параметры экспериментального образца должны удовлетворять следующим требованиям:

– размер экспериментального образца согласно ТЗ (180x180x10 мм; 410x410x10 мм; 410x410x15 мм);

2.1.2 Тестовый оптический импульс должен удовлетворять следующим требованиям:

-длительность импульса должна составлять  $3,5 \pm 0,5$  нс;

- плотность мощности тестового излучения должно составлять не менее  $60 \text{ Дж/см}^2$  иметь возможность плавной регулировки в диапазоне от  $5 \text{ Дж/см}^2$  до  $60 \text{ Дж/см}^2$ ;

- поперечное распределение тестового излучения (модовый состав) в области образца должен быть TEM00.

2.1.3. Разность потенциалов с выхода пьезокерамического датчика должна удовлетворять следующим требованиям:

- шумовые колебания при условиях пункта 1.5.1 программы не должны превышать  $0,01 \pm 0,005 \text{ мВ}$ .

2.1.4. Порог лазерно-индуцируемого разрушения образца без нанесения вреда целостности кристаллической структуре должен удовлетворять требованиям ТЗ для конкретного образца.

2.1.5 Стабильность всех параметров генерации, включая энергию импульса, поляризацию излучения и поперечную моду, не должна быть хуже 5% СКО.

2.1.6 Центральная длина волны должна находиться в полосе усиления неодимового стекла в диапазоне 1050 - 1060 нм.

## **2.2 Условия, режимы, порядок, виды и этапы испытаний**

Испытания проводятся по приведенной ниже методике, порядок проведения не регламентирован.

2.2.1 Проверка общих характеристик. В частности в частности проводится визуальный контроль всех элементов на наличие механических повреждений. Проверяется подключения всех электрических соединений.

2.2.1.1 Проверка комплектности экспериментального образца проводится сличением действительной комплектности с перечнем, приведенным в п. 3.1 ТЗ или п. 2.1.1.1 данной методики. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если действительная



комплектность соответствует перечню.

2.2.2 Проверка геометрических параметров экспериментального образца проводится с помощью поверенного штангенциркуля ШЦЦ II-500мм, точность 0.01мм. Каждый размер измеряется 3 раза. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если они соответствуют РКД с точностью в диапазоне  $+0,2 \div -0,8$  мм.

2.2.3 Проверка параметров импульса тестового излучения осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности. Излучение направляется на входную апертуру измерителя, минуя все дополнительные элементы. Угол падения на поглотитель отраженной энергии должен составлять не более 10 градусов. В то же время, при включении максимальной мощности необходимо поддерживать размер пятна не менее 1 см, во избежание повреждения прибора и следить, чтобы пучок полностью помещался внутри апертуры измерителя, согласно требованиям инструкции по эксплуатации. Уменьшение размера пятна на входной апертуре датчика приведет к дополнительной, неучтенной погрешности измерений.

2.2.4 Проверка геометрических размеров образца осуществляется при помощи поверенного штангенциркуля ШЦЦ II-500мм.

2.2.5 Проверка спектрального состава тестового излучения осуществляется при помощи калиброванного спектрометра.

2.2.6 Проверка энергии в тестовом импульсе осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности ОРНІR PE25BF-C. Процедура проведения измерений аналогична процедуре, описанной в пункте 2.2.4 Программы.

2.2.7 Проверка стабильности параметров генерации осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности и осциллографа.

2.2.7.1. В рамках подготовки к измерению оптические импульсы заводятся на пирометрический измеритель мощности через клиновую пластинку с клином порядка 1 градуса, расположенную под углом 20 – 30

градусов по отношению к направлению распространения тестирующего излучения. Ослабленный блик с другой грани клина заводится на быстрый фотоприёмник, сигнал с которого подается на осциллограф. Лазерный источник настраивается на оптимум по энергии и пространственному распределению излучения в моде, которое фиксируется при помощи индивидуальных визуализаторов излучения. Частота следования импульсов устанавливается равной частоте тестового стенда.

2.2.7.2. Данные пирометрического измерителя фиксируются на протяжении 30 минут. За это время записывается энергия каждого импульса. Экспериментальные данные затем подвергаются статистическому анализу, в результате которого находится среднеквадратичное значение отклонение значений от среднего на коротких (десятки секунд) и длинных (десятки минут) временных масштабах.

2.2.7.3 Результаты измерений СКО заносятся в протокол. Стабильность источника считается удовлетворительной, если она удовлетворяет требованиям соответствующих пунктов ТЗ.

2.2.8. Поперечный состав моды тестового излучения регистрируется с помощью цифровой видеокамеры.

2.2.8.1 Цифровая камера располагается в месте эквивалентного расположения образца. Видеокамера закрепляется таким образом, что на неё приходит излучение от тестового стенда ослабленное и отраженное от клиновой пластинки.

2.2.8.2. Рабочей модой тестового излучения является TEM<sub>00</sub> мода, которая обладает ярко выраженной радиальной симметрией - пятно является круглым. Таким образом, в случае, когда в излучении присутствуют другие моды, то пятно на визуализаторе теряет свою симметрию, т.е. оно перестает быть круглым, или на круге появляются угловые неоднородности.

Регистрация осуществляется с помощью цифровой видеокамеры. Обработка осуществляется по полиномам Цернике, по результатам которой выдаётся решение о модовом составе.

2.2.8.3 Результаты поперечного модового состава тестового излучения вносятся в протокол. Удовлетворительной считается ситуация, в которой профиль излучения является круглым, без каких либо пространственных неоднородностей, что соответствует генерации на единственной TEM<sub>00</sub> моде.

2.2.9. Проверка амплитуды шумовых колебаний чувствительного пьезокерамического приёмника при условиях пункта 1.5.1 программы осуществляется креплением датчика к одной из боковых граней образца и подключением его к осциллографу. Удовлетворительным результатом считается, если регистрируемые параметры превышают указанные в пункте 2.1.3 не более чем на 5%.

2.2.10. Порог лазерно-индуцируемого разрушения образца определяется с помощью регистрации звуковых колебаний и вычисления их спектра при воздействии тестового излучения на образец. Энергию тестового импульса фиксировать одновременно с амплитудой звуковых колебаний. Область тестирования выбрать в произвольном порядке, но достаточном для последующих действий.

2.2.10.1. Приёмник(и) звукового излучения помещаются на поверхность(и) образца, через которую не будет проходить тестирующее излучение (желательно - перпендикулярные); Возможное размещение приёмников продемонстрировано на рисунке номерами 1-4;

2.2.10.2. Регистрация звукового колебания выполняется следующим образом:

2.2.10.2.1. Однократным лазерным импульсом с плотностью энергии заведомо не достигающей порога оптического разрушения облучить образец;

2.2.10.2.2. Зарегистрировать звуковые колебания в образце с датчиков звукового колебания с помощью осциллографа и персонального электронного вычислительного устройства (ПЭВМ);

2.2.10.2.3. Спектр звуковых колебаний вычислитель с помощью ПЭВМ и произвести визуальную оценку спектра в районе 9 и 11 кГц. Удовлетворительным считается отсутствие 20% превышения амплитуды спектральных компонент.;

2.2.10.2.4. Выполнить горизонтальное перемещение свидетеля на 2-3 диаметра пучка тестового излучения;

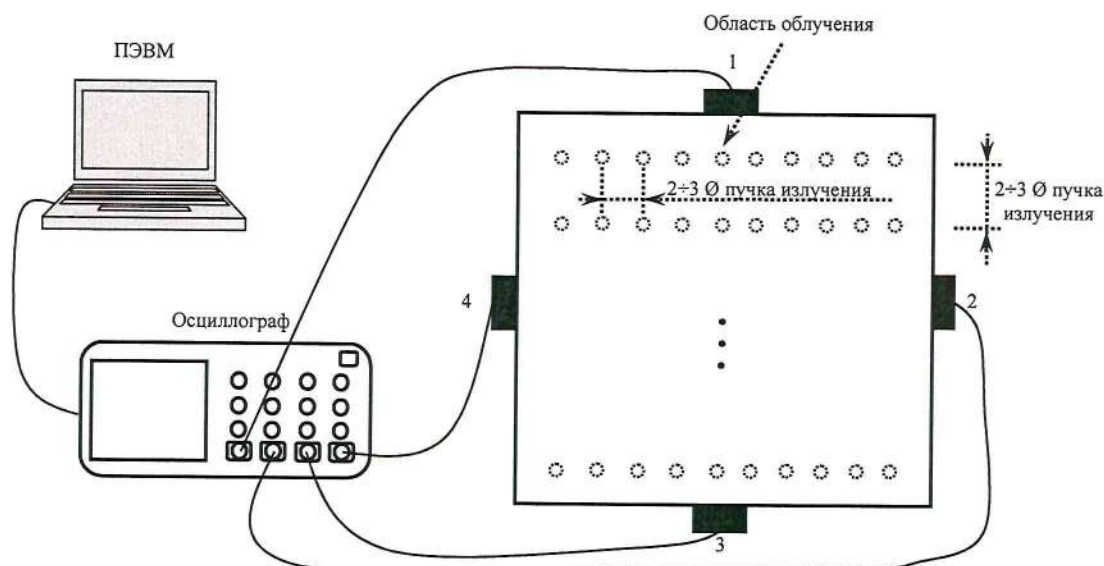
2.2.10.2.5. Повторить пункты 2.2.12.2.1 - 2.2.12.2.4 необходимое количество раз (не менее 10)

2.2.10.2.6. Осуществить повышение энергии тестового импульса на  $0,5 \text{ Дж/см}^2$ .

2.2.10.2.7. Произвести вертикальное перемещение образца на 2-3 диаметра лазерного пучка и вернуться к исходной точке по горизонтали для более ранней серии горизонтальным перемещением.

2.2.10.2.8. Повторить пункты 2.2.12.2.6 - 2.2.12.2.7.

2.2.10.2.9. Прекратить повторять пункт 2.2.12.2.8 программы при превышении амплитуды спектральных компонент в районе 9 кГц и 11 кГц на 25% включительно.



2.2.10.3. На основании полученных данных произвести статистическую обработку результатов спектров звуковых колебаний и энергии тестового импульса согласно ГОСТ Р 50779.21-2004.

2.2.10.4. Результаты пункта 2.2.12.3 программы оформить в таблицу и выполнить графическое отображение результатов определения порога лазерно-индуцируемого пробоя. Данные внести в протокол. Удовлетворительной считается ситуация, при которой порог лазерно-индуцируемого пробоя образца равен или превышает значения по техническому заданию.

## **10. Разработка метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред.**

В рамках исполнения обязательств по контракту была проведена разработка метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред

### **10.1 Описание процесса разработки метода неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред**

Основной целью предложенного метода является определение порога лазерно-индуцируемого разрушения (ЛИР) прозрачных монокристаллических диэлектрических материалов без разрушения изготавливаемого оптического элемента из заготовки, выращенной методом профилированного скоростного роста.

Отсутствие разрушения как поверхностной, так и объёмной структуры исследуемых прозрачных диэлектрических изделий оптического качества выступает в качестве главного требования предложенной методики.

Метод предполагает использование: лазерной системы, которая обеспечивает параметры излучения по ТЗ, регистрирующей аппаратуры (осциллограф и/или персональный компьютер с соответствующей комплектацией и программным обеспечением, измеритель энергии светового излучения, измеритель профиля поперечного распределения пучка) и образцов, изготовленных из остатков заготовки в количестве от 1 до 3 штук. Так называемые "свидетели", которые имеют физические параметры (кроме размеров), идентичные изготовленным ЭО из данной заготовки, потому что являются частью той же заготовки (Программа и методика по определению порога лазерно-индуцированного разрушения кристаллических материалов типа KDP и DKDP приложены к отчету).

Предложен метод определения лазерно-индуцированного порога разрушения кристаллических сред по «свидетелям». Что позволяет определить нижнюю границу лазерной прочности нелинейно оптического образца без его разрушения. Из выращенной кристаллической заготовки,

наряду с (экспериментальными) образцами нелинейно-оптического элемента, изготавливались образцы меньшего размера по апертуре («свидетели») в количестве от 1 до 3 на одну заготовку. Далее по модернизированному методу на основе ИСО 11254-1 производится облучение «свидетелей» лазерным излучением с параметрами по ТЗ (Рис. 10.1). По результатам лазерного воздействия на «свидетель» делается статистическое заключение о величине нижней границы лазерной прочности образца нелинейно-оптического элемента.

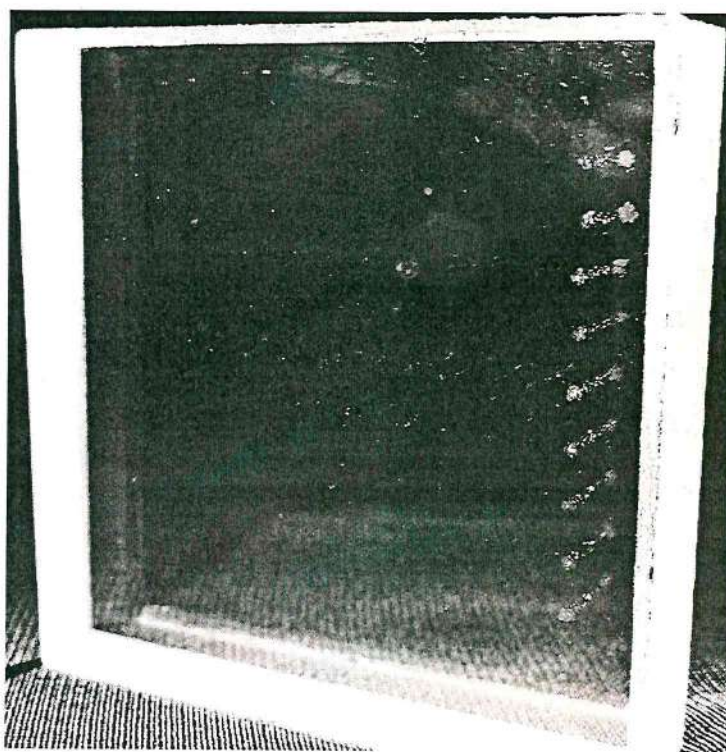


Рисунок 10.1 Фотография образца ("свидетеля") после тестирования

Проведены экспериментальные исследования определения лазерно-индуцируемого порога разрушения прямым методом для образца нелинейно-оптического элемента и по предложенной методике (по «свидетелю») (Рис. 10.2). Сравнительный анализ полученных данных показал совпадение величины порога оптического разрушения кристаллических сред из одной заготовки в пределах экспериментальной погрешности.

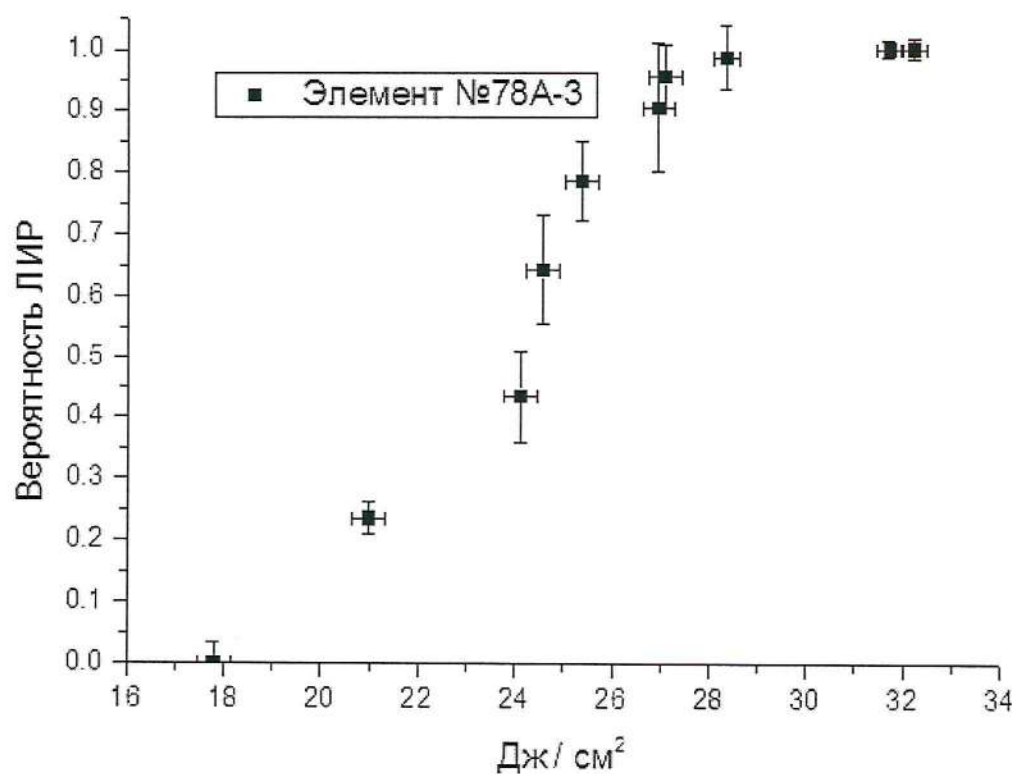


Рисунок 10.2 График зависимости вероятности ЛИР образца от плотности мощности лазерного импульса

На основе методов цифровой голографии проведена регистрация областей лазерного воздействия кристаллических материалов (образцов, «свидетелей») для определения наличия разрушения среды. Разработано программное обеспечение, которое позволило в полуавтоматическом режиме выполнить реконструкцию данных, зарегистрированных на цифровой голограмме, не только на заданной поверхности образца, но и по его объёму. Проведено экспериментальное сравнение результатов обнаружения разрушений облучённых областей с помощью микроскопа и методами цифровой голографии. Выявлено, что при использовании микроскопа обнаружение разрушений в объёме затруднено. Метод на основе цифровой голографии позволил реконструировать положение лазерно-индуцированных дефектов кристаллической решётки по глубине в наглядном виде.





Рисунок 10.3 Пример восстановленного изображения разрушения поверхности из цифровой голограммы ( $J = 31,70 \text{ Дж/см}^2$ , масштаб изображения –  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , поверхность ЭО)



Рисунок 10.4 Пример восстановленного изображения разрушения в объёме из цифровой голограммы ( $J = 24,11 \text{ Дж/см}^2$ , масштаб изображения –  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , глубина - 1,37 мм)

## 10.2 **Описание программы и методики испытаний образцов монокристаллов KDP и DKDP методом неразрушающего тестирования лазерной прочности кристаллических сред.**

### **1 Программа испытаний**

#### **1.1 Объект испытаний, его состав и назначение**

1.1.1 Объект испытаний: часть кристаллической заготовки монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP), изготовленной с габаритами 40x40x10 мм или 40x40x20 мм (толщина определяется по ТЗ) в количестве 1 шт.

1.1.2 Число испытываемых объектов – 1 шт. или 100% от общего количества.

1.1.3 Назначение изделия: Является частью кристаллической заготовки, из которой изготавливают основной элемент устройства вращения плоскости поляризации излучения (ячейка Поггеля) или преобразователь частоты согласно ТЗ.

#### **1.2 Цель и задачи испытаний**

1.2.1 Цель испытаний:

- оценка соответствия экспериментального изделия требованиям технического задания.

1.2.2 Задачи испытаний:

- определение порога лазерно-индуцируемого разрушения образца.

#### **1.3 Общие положения**

1.3.1 Перечень документов, на основании которых проводятся испытания:

– техническое задание № 13-353 дсп;

– дополнение №6.

1.3.2 Место и продолжительность испытаний:

– место испытаний – лаборатория 392 отдела 390 ИПФ РАН;

– продолжительность испытаний – 1 месяц.

1.3.3 Организации (предприятия) участвующие в испытаниях:

Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН) и ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (при необходимости).

1.3.4 Перечень представляемых на испытания документов:

1) ТЗ на оптическую стойкость нелинейно-оптических элементов для лазера, с активными элементами из неодимового стекла;

2) комплект РКД на кристаллические заготовки (инд. Э 390-424; Э 390-425);

3) программа и методики испытаний (настоящий документ).

1.3.5 Порядок внесения изменений в программу испытаний

1.3.5.1 Программа и методика предварительных испытаний может корректироваться в зависимости от изменений места и условий проведения испытаний по взаимному согласованию сторон и отражаться в протоколах предварительных испытаний.

1.3.5.2. При выполнении цикла испытаний по нескольким параметрам или однотипных параметрах допускается оформление совместного протокола.

#### 1.4. Объём испытаний

1.4.1 Количество объектов, поставляемых на испытания: часть кристаллической заготовки монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP), изготовленной с габаритами 40x40x10 мм или 40x40x20 мм в количестве 1 шт.

1.4.2 Порядок и последовательность подтверждения требований ТЗ, последовательность проведения и режимы испытаний, а также объём испытаний приведен в Таблице 1.

Таблица 1 – Объём испытаний

	Виды испытаний	Пункты требований	Примечание
--	----------------	-------------------	------------

		ТЗ	раздела "Методики испытаний"	
1.	Проверка комплектности экспериментального образца	3.1	2.1.1.1	Протокол 1
2.	Проверка геометрических параметров экспериментального образца	-	2.1.1.2	
3	Проверка параметров тестового импульса	3.1.1.4, 3.1.1.5	2.1.2	
4.	Проверка спектрального состава тестового импульса	3.2.1.6	2.1.6	Протокол 1
5.	Проверка энергии в импульсе	3.2.1.6	2.1.2	Протокол 1
6.	Проверка стабильности параметров тестовой генерации	-	2.1.5	Протокол 1
7.	Проверка поперечного состава моды тестового импульса	-	2.1.2	Протокол 1
8.	Определение порога лазерно- индуцируемого разрушения	3.2.1.6 3.2.4.9	2.1.4	Протокол 1

### **1.5 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний.**

#### **1.5.1 Условия окружающей среды**

Все измерения, за исключением специально оговоренных, проводятся в нормальных условиях применения:

- температура воздуха :  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха :  $50 \pm 10 \%$ ;
- атмосферное давление : от 84 до 106 кПа ( от 630 до 795 мм рт. ст.).

## 1.6 Материально – техническое обеспечение испытаний

При проведении испытаний используются материальные и технические средства согласно таблице 2.

Таблица 2– Материально-технические средства

Наименование Прибора	Рекомендуемый тип	Используемые характеристики
Стенд контроля ориентации и определения порога пробоя НЭ №3	Лазерный специальный	Согласно документации на стенд
Видеокамера ПЗС	Цифровая с SDU-285 USB	Согласно документации на камеру SDU-285 USB
Осциллограф		Согласно документации на KYESIGHT DSO-X 3102T
Фотодиод быстрый (500 пс)	THORLABS DET025AFC/M	Согласно документации на THORLABS DET025AFC/M
Измеритель энергии оптического импульса	OPHIR PE50-C	Согласно документации на OPHIR PE50-C

## 1.7 Метрологическое обеспечение испытаний

При проведении испытаний используются средства измерений и испытательное оборудование в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Средства измерения и испытательное оборудование

Наименование Прибора	Рекомендуемый тип	Используемые характеристики	Погрешность
Штангенциркуль	ШЦЦ II-500мм	Согласно документации на ШЦЦ II-500мм	0.01мм
Гигрометр		Согласно документации на гигрометр	
Барометр		Согласно документации на барометр	

## 1.8. Обеспечение защиты государственной тайны.

Не предъявляется.

## 1.9 Отчётность

1.9.1 Перечень первичных учетных и отчетных документов:

- Протокол исследовательских испытаний части кристаллической заготовки монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP), изготовленной с габаритами 40x40x10 мм или 40x40x20 мм в количестве 1 шт.

- Ведомость соответствия ТЗ.

## **2 Методика испытаний**

### **2.1 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения**

2.1.1 Общие характеристики.

2.1.1.1 Испытываемый экспериментальный образец нелинейно-оптического элемента должен иметь следующую комплектность:

– часть заготовки монокристалла дигидрофосфата калий (KDP) или дейтерированного дигидрофосфата калий (DKDP) (1шт).

2.1.1.2 Геометрические параметры экспериментального образца должны удовлетворять следующим требованиям:

– размер тестового образца (40x40x10 мм; 40x40x20 мм);

2.1.2 Тестовый оптический импульс должен удовлетворять следующим требованиям:

- длительность импульса должна составлять  $3,5 \pm 0,5$  нс;

- плотность мощности тестового излучения должно составлять не менее  $60 \text{ Дж/см}^2$  иметь возможность плавной регулировки в диапазоне от  $5 \text{ Дж/см}^2$  до  $60 \text{ Дж/см}^2$ ;

- поперечное распределение тестового излучения (модовый состав) в области образца должен быть TEM00.

2.1.3. Порог лазерно-индуцируемого разрушения образца должен удовлетворять требованиям ТЗ.

2.1.4 Стабильность всех параметров генерации, включая энергию импульса, поляризацию излучения и поперечную моду, не должна быть хуже

5% СКО.

2.1.5 Центральная длина волны должна находиться в полосе усиления неодимового стекла в диапазоне 1050 - 1060 нм.

## **2.2 Условия, режимы, порядок, виды и этапы испытаний**

Испытания проводятся по приведенной ниже методике, порядок проведения не регламентирован.

2.2.1 Проверка общих характеристик. В частности проводится визуальный контроль всех элементов на наличие механических повреждений. Проверяется подключения всех электрических соединений.

2.2.1.1 Проверка комплектности экспериментального образца проводится сличением действительной комплектности с перечнем, приведенным в п. 2.1.1.1 данной методики. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если действительная комплектность соответствует перечню.

2.2.2 Проверка геометрических параметров экспериментального образца проводится с помощью поверенного штангенциркуля ШЦЦ П-500мм, точность 0.01мм. Каждый размер измеряется 3 раза. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если они соответствуют с точностью  $\pm 0,5$  мм.

2.2.3 Проверка параметров импульса тестового излучения осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности. Излучение направляется на входную апертуру измерителя, минуя все дополнительные элементы. Угол падения на поглотитель отраженной энергии должен составлять не более 10 градусов. В то же время, при включении максимальной мощности необходимо поддерживать размер пятна не менее 1 см, во избежание повреждения прибора и следить, чтобы пучок полностью помещался внутри апертуры измерителя, согласно требованиям

инструкции по эксплуатации. Уменьшение размера пятна на входной апертуре датчика приведет к дополнительной, неучтенной погрешности измерений.

2.2.4 Проверка геометрических размеров образца осуществляется при помощи поверенного штангенциркуля ШЦЦ II-500мм.

2.2.5 Проверка спектрального состава тестового излучения осуществляется при помощи калиброванного спектрометра.

2.2.6 Проверка энергии в тестовом импульсе осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности OPHIR PE50-C. Процедура проведения измерений аналогична процедуре, описанной в пункте 2.2.3 программы.

2.2.7 Проверка стабильности параметров генерации осуществляется при помощи пирометрического измерителя мощности и осциллографа.

2.2.7.1. В рамках подготовки к измерению оптические импульсы заводятся на пирометрический измеритель мощности через клиновую пластинку с клином порядка 1 градуса, расположенную под углом 20 – 30 градусов по отношению к направлению распространения тестирующего излучения. Ослабленный блик с другой грани клина заводится на быстрый фотоприёмник, сигнал с которого подается на осциллограф. Лазерный источник настраивается на оптимум по энергии и пространственному распределению излучения в моде, которое фиксируется при помощи индивидуальных визуализаторов излучения. Частота следования импульсов устанавливается равной частоте тестового стенда.

2.2.7.2. Данные пирометрического измерителя фиксируются на протяжении 30 минут. За это время записывается энергия каждого импульса. Экспериментальные данные затем подвергаются статистическому анализу, в результате которого находится среднеквадратичное значение отклонение значений от среднего на коротких (десятки секунд) и длинных (десятки минут) временных масштабах.



2.2.7.3 Результаты измерений СКО заносятся в протокол. Стабильность источника считается удовлетворительной, если она удовлетворяет требованиям соответствующих пунктов ТЗ.

2.2.8. Поперечный состав моды тестового излучения регистрируется с помощью цифровой видеокамеры.

2.2.8.1 Цифровая камера располагается в месте эквивалентного расположения исследуемого образца. Видеокамера закрепляется таким образом, что на неё приходит излучение от тестового стенда ослабленное и отраженное от клиновой пластинки.

2.2.8.2. Рабочей модой тестового излучения является TEM<sub>00</sub> мода, которая обладает ярко выраженной радиальной симметрией - пятно является круглым. Таким образом, в случае, когда в излучении присутствуют другие моды, то пятно на визуализаторе теряет свою симметрию, т.е. оно перестает быть круглым, или на круге появляются угловые неоднородности. Регистрация осуществляется с помощью цифровой видеокамеры. Обработка осуществляется по полиномам Цернике, по результатам которой выдаётся решение о модовом составе.

2.2.8.3 Результаты поперечного модового состава тестового излучения вносятся в протокол. Удовлетворительной считается ситуация, в которой профиль излучения является круглым, без каких либо пространственных неоднородностей, что соответствует генерации на единственной TEM<sub>00</sub> моде.

2.2.9. Порог лазерно-индуцируемого разрушения образца определяется непосредственным воздействием лазерного излучения на кристаллический материал. Энергию тестового импульса необходимо фиксировать при каждом лазерном воздействии. Начало области тестирования определить в левом верхнем углу образа, отступив от края на 2 - 3 диаметра поперечного распределения пучка тестирующего излучения. Установить плотность мощности тестирующего излучения на уровне  $35 \text{ Дж/см}^2$ .

2.2.10. Произвести облучение исследуемого образца по следующей методике:

2.2.10.1. Однократным лазерным импульсом с плотностью мощности 45 - 50 Дж/см<sup>2</sup> осуществить разрушение кристаллической структуры образца, которое будет видно глазом и являться точкой отсчёта новой серии воздействий («репер»);

2.2.10.2. Уменьшить плотность мощности тестового излучения до фиксированного значения для данной серии.

2.2.10.3. Новое место облучения в серии определяется горизонтальным перемещением образца на 2-3 диаметра пучка тестового излучения;

2.2.10.4. Однократно облучить образец лазерным импульсом с фиксированной плотностью энергии для данной серии.

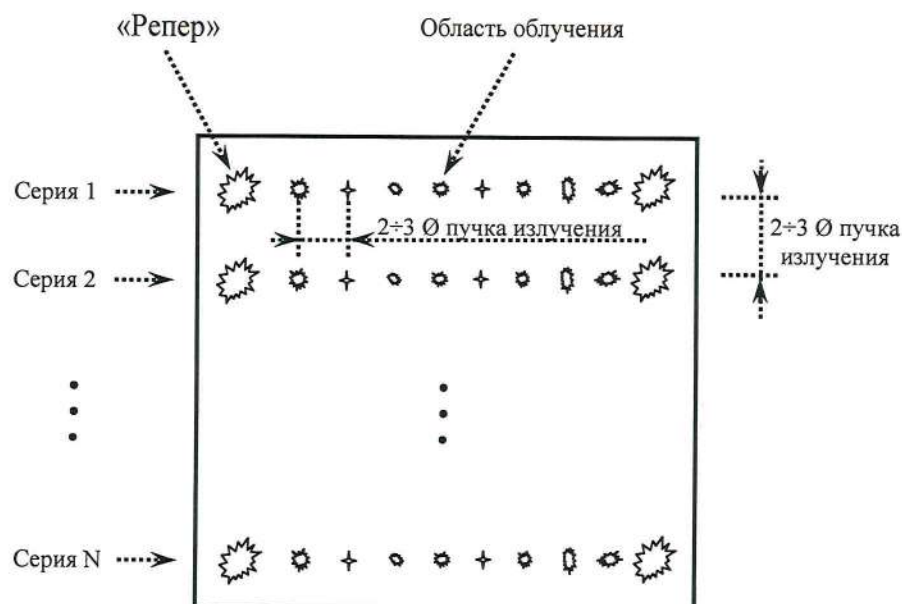
2.2.10.5. Повторить пункты 2.2.10.3 и 2.2.10.4 программы до расстояния от грани образца равной или близкой 5-6 диаметров пучка тестового излучения.

2.2.10.6. Выполнить пункты 2.2.10.3 и 2.2.10.1.

2.2.10.7. Осуществить вертикальное перемещение образца на 2-3 диаметра лазерного пучка и горизонтальным перемещением вернуться к исходной («реперной») точке для предыдущей серии.

2.2.10.8. Уменьшить плотности энергии оптического импульса на 1 ÷ 5 Дж/см<sup>2</sup>.

2.2.10.9. Повторить пункты 2.2.10.1 - 2.2.10.8 программы до достижения плотности оптической энергии менее 15 Дж/см<sup>2</sup>.



2.2.11. Регистрация разрушения кристаллической структуры в области облучения контролируется визуально с помощью микроскопа МБС-1, входящего в состав тестового стенда.

2.2.12. Применить метод цифровой голографии по схеме Габора для фиксации разрушений внутреннего объёма образца. С помощью персонального электронного вычислительного устройства выполнить реконструкцию разрушений в объёме образца.

2.2.13. Статистическую обработку полученных результатов осуществить согласно ГОСТ Р 50779.21-2004.

2.2.14. Результаты пункта 2.2.13 программы оформить в таблицу и выполнить графическое отображение результатов определения порога лазерно-индуцируемого пробоя. Данные внести в протокол. Удовлетворительной считается ситуация, при которой порог лазерно-индуцируемого пробоя образца не превышает значения по техническому заданию.

## 11. Закупка материалов и комплектующих изделий для работ Получателя, выполняемых за счет средств Индустриального партнера в 2019 году

В 2019 году была произведена закупка материалов и комплектующих изделий, необходимых для выполнения работ, указанных в Плане-графике за 3 этап настоящего проекта: «Разработка метода повышения лазерной прочности оптических материалов».

Предлагаемый метод повышения лазерной прочности оптических материалов заключается в следующем. На оптический элемент оказывается воздействие серией лазерных импульсов подпороговой интенсивности, т.е. с интенсивностью несколько ниже порога разрушения материала (с постепенным увеличением интенсивности излучения). Длительное подобное нагружение оптического материала приводит к релаксации существующих в нем дислокаций, что существенно повышает порог его лазерной прочности.

Разработка метода требует создания специализированного лазерного стенда с управляемыми (программируемыми) параметрами лазерных импульсов, для чего в 2018 году были приобретены следующие материалы и комплектующие изделия:

Наименование	Дата	Сумма
Цифро-аналоговый преобразователь; 8 шт.	02.07.2018	4 410 400,00
Полупроводниковый лазер; 8 шт.	27.07.2018	3 696 000,00
Драйвер программируемый для полупроводникового лазера; 8 шт.	05.10.2018	11 692 893,76
Трубка силиконовая; 220 м	17.10.2018	28 540,00
Изолятор; 2 шт.	19.10.2018	100 562,15
Итого:		19 928 395,91

Список подтверждающих документов приложен в виде отдельного файла.

## 12. Заключение

Среди основных результатов проведения исследований, исходя из их фундаментальной и прикладной научной значимости, можно выделить следующие. На основе обработки экспериментальных данных был сделан вывод о фактической безальтернативности подходов основанных на оптической синхронизации импульсов для генерации затравок сигнального импульса и импульса накачки в системах построенных на параметрическом усилении чирпированных импульсов. Связано это, в первую очередь, с технологической сложностью синхронизации двух разнородных лазерных источников с необходимым джиттером не более 50 пс. В случае оптической синхронизации очевидна возможность получения субпикосекундного джиттера без применения активных систем стабилизации оптического пути в каналах, что является фактически недостижимым результатом для систем с электрической синхронизацией. В то же время подходы, к разработке изоляторов Фарадея и широкоапертурных стеклянных лазерных усилителей, а также систем подавления термонаведенной деполяризации, заявленные в проекте, себя полностью оправдали. Таким образом, наиболее целесообразно развивать подходы к модернизации стартовой части петаваттного лазерного комплекса PEARL, основанные на оптической синхронизацией, заявленные в третьем году выполнения проекта.

В ходе выполнения ПНИЭР за отчетный период были исполнены все работы согласно календарному плану выполнения обязательств. Информация о выполняемой ПНИЭР представлена на сайте получателя субсидий <https://www.iapras.ru/science/goscontract/result.html>

### 13. Список использованных источников

- [1] R. Betti и О. А. Hurricane, «Inertial-confinement fusion with lasers,» *Nature Physics*, т. 12, 2016.
- [2] V. Lozhkarev и и. др., «Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals,» *Laser Phys. Lett*, т. 4, № 6, 2007.
- [3] M. L. Spaeth, K. R. Manes, D. H. Kalantar, P. E. Miller, J. E. Heebner, E. S. Bliss, D. R. Spec, T. G. Parham, P. K. Whitman, P. J. Wegner, P. A. Baisden, J. A. Menapace, M. W. Bowers, S. J. Cohen, T. I. Suratwala, J. M. D. Nicola, M. A. Newton и J. J. Ada, «Description of the NIF Laser,» *Fusion Science and Technology*, т. 69, 2016.
- [4] Ю. Ананьев, Н. Козлов, А. Мак и А. Степанов, «Термическая деформация резонатора твердотельного ОКГ,» *Журнал прикладной спектроскопии*, т. 5, 1966.
- [5] F. Quelle, «Thermal distortion of diffraction-limited optical elements,» *Applied Optics*, т. 5, 1966.
- [6] J. Foster и L. Osterin, «Thermal effects in a Nd:YAG laser,» *Journal of Applied Physics*, т. 41, 1970.
- [7] W. Scott и M. d. Wit, «Birefringence compensation and TEM00 mode enhancement in a Nd:YAG laser,» *Applied Physics Letters*, т. 18, 1971.
- [8] G. Giuliani и P. Ristori, «Polarization flip cavities: a new approach to laser resonators,» *Optics Communications*, т. 35, 1980.
- [9] Н. Е. Каск, Л. С. Корниенко и О. В. Федорович, «Термохимическая модель оптического разряда в стеклах,» *Квантовая электроника*, т. 12, № 1, 1985.