

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Оптимизация стартовой системы петаваттного лазерного комплекса PEARL»**

**Аспирант:** Маркова Анастасия Петровна

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Шайкин Андрей Алексеевич, к.ф.-м.н.,  
Зав. лаб. № 371

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.21 Лазерная физика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Во многих оптических системах с высокими требованиями к качеству излучения, например, в фемтосекундных комплексах независимо от принципа работы, СРА [1] или ОРСРА [2], для формирования импульса накачки усилителей требуется одномодовый одночастотный источник, обеспечивающий гладкий импульс лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности в пучке. Селекция поперечных мод обычно не вызывает трудностей и решается подбором диафрагмы нужного размера. Однако получение генерации на частоте, соответствующей одной из продольных мод резонатора, является одной из основных задач при создании таких лазеров.

Подобные требования применяются и к генератору [3], который служит источником наносекундных импульсов, которые в свою очередь после усиления обеспечивают накачку всех каскадов параметрического усиления петаваттного лазерного комплекса PEARL (PEtawatt pARametric Laser) (ИПФ РАН, Нижний Новгород) [4]. Данная установка позволяет получать ультракороткие лазерные импульсы до 12 фс мощностью до 1 петаватта. Сейчас в мире несколько лабораторий [5-7] имеют в своём распоряжении лазерные установки петаваттного уровня мощности, некоторые находятся в процессе создания подобных систем [8-13]. Ультракороткие импульсы петаваттного уровня мощности используются для исследования взаимодействия мощного оптического излучения с твердотельными и газовыми мишенями, позволяют реализовывать в экспериментах новые эффективные методы ускорения заряженных частиц, генерации рентгеновского и гамма-излучения с уникальными характеристиками, а также моделировать астрофизические процессы. Мощные лазеры работают при интенсивностях близких к порогу разрушения, поэтому любая нестабильность генерации может привести к превышению над порогом и повлечь за собой разрушение оптических элементов. Главной проблемой является возникновение паразитной генерации на другой длине волны. При одновременной генерации лазерных импульсов на двух частотах, их интерференция приводит к модуляции импульсов во времени и значительному возрастанию пиковой интенсивности излучения. Такой режим работы может стать причиной возникновения пробоев оптических элементов, как генератора, так и последующих усилителей.

В основе большинства способов реализации одномодового и одночастотного режимов генерации лежит селекция мод с помощью эталона Фабри – Перо (ЭФП). Один из вариантов стабилизации данного режима основан на удержании частоты одной из мод резонатора вблизи максимума пропускания ЭФП с помощью обратной связи и активного смещения максимума кривой зависимости коэффициента пропускания от частоты путем изменения угла наклона

ЭФП. Основной проблемой при этом является получение информации о положении мод резонатора.

В настоящем петаваттном лазерном комплексе PEARL, основанном на принципе ОРСПА, все каскады усиления работают на высоком уровне мощности. При усилении импульса с энергией, близкой к энергии насыщения активной среды, велики искажения временного профиля импульса. Чтобы на выходе каскадов усиления иметь импульс стэп-образной формы, необходимо предусмотреть внесение предискажений во временную форму импульса на входе в систему. Ранее были попытки внесения предискажения воздействием на импульс во временной области, однако они не увенчались успехом. Альтернативным способом является управление интенсивностью спектральных компонент импульса.

В лазерном комплексе PEARL существует два каскада оптического параметрического усиления чирпированного импульса. На каждом из параметрических усилителей импульс накачки должен приходиться одновременно с сигнальным импульсом. Из-за большой разницы оптических длин усилителей импульсов накачки перед непосредственно их приходом в параметрические усилители, возникает необходимость в создании линии задержки для одного из импульсов накачки. К данной линии задержки предъявляется ряд требований, в их числе компенсация оптической длины около 100 м и при этом ограничение в габаритах.

### **Цель работы**

Цель работы состоит в нахождении способов подавления двухчастотной генерации, неизбежно возникающей при неконтролируемых изменениях параметров системы, а также в исследовании способов управления временной огибающей наносекундного импульса. Еще одной целью является исследование способов построения протяженных линий задержки, не искажающих пространственную форму оптического импульса. Основными задачами являются:

1. Построение математической модели, адекватно описывающей развитие генерации и изменение инверсии населенностей в активном элементе (АЭ) лазера с модуляцией добротности.
2. Реализация нового способа автоматизированного подавления режима двухчастотной генерации в исследуемом твердотельном генераторе с модуляцией добротности.
3. Исследование способов управления временной огибающей наносекундного импульса накачки всех каскадов лазерного усиления комплекса PEARL.
4. Моделирование процесса распространения импульса в протяженных линиях задержки и исследование влияния параметров системы на качество пучка.

## **Научная новизна, основные результаты и практическая значимость**

Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы определяются полученными оригинальными результатами, а именно:

1. Создана математическая модель, позволяющая описывать развитие генерации в лазере с модуляцией добротности. В данной модели используются реальные значения всех параметров настоящего твердотельного генератора, работающего в соответствующем режиме: коэффициенты пропускания селекторов продольных мод, а именно двух эталонов Фабри-Перо, потери, вносимые модулятором добротности и другими оптическими элементами системы, значение параметра накачки, а также начальные значения интенсивности излучения и инверсии населенности в АЭ.

2. Предложен новый способ подавления нежелательного режима двухчастотной генерации в генераторе импульсов накачки, который является одним из ключевых частей петаваттного комплекса PEARL. Данный способ основан на исследовании впервые обнаруженного эффекта генерации пост-импульса.

3. Проведен эксперимент по формированию огибающей наносекундного чирпированного импульса и дальнейшему его усилению в одном из твердотельных предусилителей импульса накачки комплекса PEARL, и исследована возможность управления временной огибающей импульса путем внесения предискажений.

4. Исследовано распространение наносекундного импульса в компактной линии задержки с оптической длиной более 100 метров. Предложена новая конструкция линии задержки в комплексе PEARL, упрощающая юстировку системы зеркал и уменьшающая влияние aberrаций на качество пучка.

## **Достоверность научных результатов**

Все полученные в диссертации результаты достоверны и обоснованы. Теоретические расчеты, базирующиеся на хорошо известных из литературы моделях, подтверждаются экспериментальными результатами, полученными с помощью апробированных методов. Экспериментальные данные показывают высокую повторяемость. Основные положения диссертации опубликованы в рецензируемом научном журнале и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях.

## **Апробация результатов**

Материалы диссертации опубликованы в статье в реферируемом журнале [A1], докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в тезисах этих конференций [A2-A5].

## Личный вклад автора

Научным руководителем были поставлены задачи и определены основные направления научных исследований.

Описываемый эффект генерации пост-импульса был обнаружен коллективом сотрудников комплекса PEARL, исследование данного эффекта было предложено научным руководителем и осуществлено автором. Построение математической модели, экспериментальные исследования для расчета всех параметров данной модели и все расчеты, приведенные в главе 1, сделаны лично автором. В обсуждениях результатов активное участие принимали Е.А.Хазанов и И.А.Шайкин.

Способы управления временной огибающей импульса накачки комплекса PEARL обсуждались большим коллективом на протяжении длительного промежутка времени. Автором были сделаны первые шаги в реализации одного из предложенных способов формирования подобного импульса при активном участии И.Б. Мухина. Полученные результаты исследований, описанных в главе 2, сделаны лично автором.

Макет линии задержки для одного из импульсов накачки комплекса PEARL был создан ранее. Научным руководителем было предложено исследовать влияния параметров системы на искажения импульса при распространении внутри данной системы, с целью улучшения существующей или построения новой стабильной компактной и удобной в юстировке линии задержки с большой оптической длиной. Моделирование и расчеты, представленные в главе 3, произведены лично автором.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 50 страниц, 30 рисунков, 8 таблиц, 23 ссылок на литературу.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность и научная новизна диссертации, сформулированы цель и основные задачи, представлены результаты работы и положения, выносимые на защиту, определена практическая значимость результатов, кратко изложено содержание диссертации, приведены данные по апробации результатов и описан личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена исследованию процесса развития генерации лазерных импульсов и изменения инверсии населенностей в активном элементе генератора с модуляцией добротности [14], на основании чего был предложен способ повышения стабильности работы подобных генераторов, в том числе и генератора импульсов накачки комплекса PEARL.

Была построена математическая модель, основанная на балансных уравнениях [15-16]:

$$\begin{cases} \frac{dm_i}{d\tau} = Gm_i \left( g_i \int_{z_0}^{z_0+l} n \Psi_i^2(z) dz - 1 - \beta_i \right) \\ \frac{dn}{d\tau} = A - n \left( 1 + \sum_{i=1}^{N_m} g_i m_i \Psi_i^2(z) \right) \end{cases}$$

где  $m_i$  – интенсивность поля  $i$ -ой моды резонатора, нормированная на интенсивность насыщения,  $n$  – инверсия населенностей в АЭ,  $\tau=t/\tau_{21}$  – время, нормированное на время релаксации разности населенностей  $\tau_{21}$ ,  $z_0$  – координата начала активного элемента (АЭ),  $l$  – длина АЭ,  $\Psi_i(z)$  – собственная функция  $i$ -ой продольной моды резонатора,  $g_i$  – отношение коэффициента усиления  $i$ -ой моды к коэффициенту усиления моды, ближайшей к центру линии ( $g_i \leq 1$ ),  $\beta_i$  – дополнительные потери для  $i$ -ой моды, относительно потерь для центральной,  $N_m$  – количество рассматриваемых продольных мод резонатора,  $G = \tau_{21}/\tau_{th}$  – нормировочный коэффициент, где  $\tau_{th}$  – время жизни фотона в резонаторе.

Для упрощения модели АЭ был разделен на слои шириной много меньше длины волны, в каждом из которых волновую функцию  $\Psi_i$  можно считать постоянной. В результате получалась система, состоящая из нескольких сотен тысяч дифференциальных уравнений. Для расчета данной задачи использовался широко известный метод Рунге-Кутты 4-го порядка [17], который представляет собой численный метод решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и их систем.

Были проведены измерения всех параметров реального твердотельного генератора комплекса PEARL, работающего в соответствующем режиме, а именно коэффициентов пропускания селекторов продольных мод – двух эталонов Фабри-Перо, потерь, вносимых модулятором добротности и другими оптическими элементами системы, коэффициента, отвечающего за накачку. Схема генератора, изображена на рис. 1.

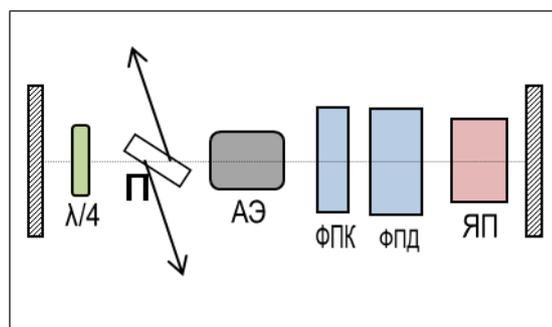
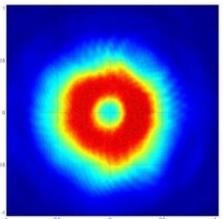
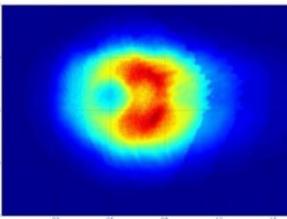
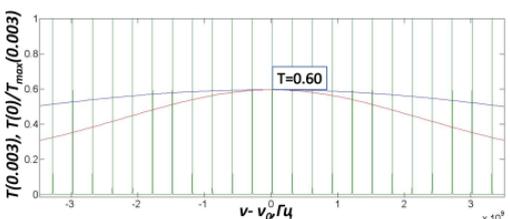
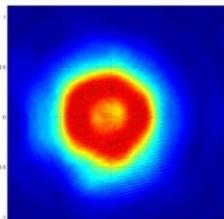
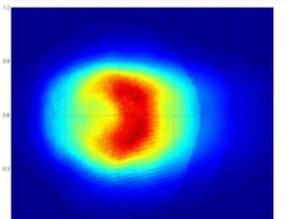
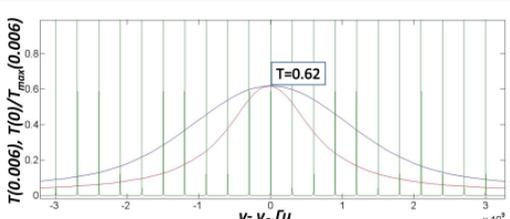
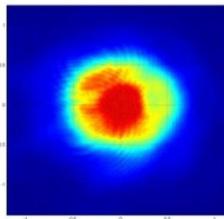
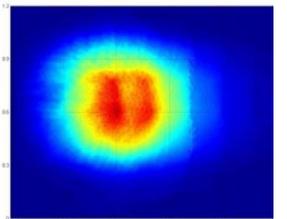
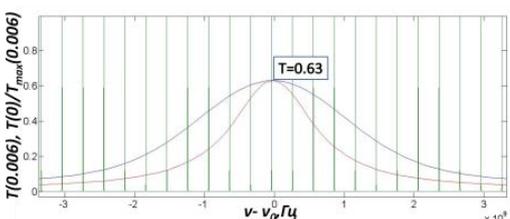
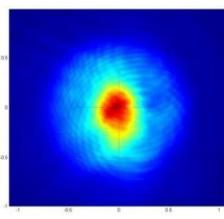
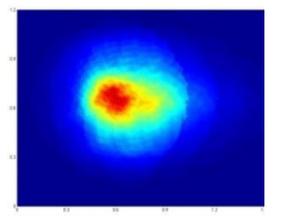
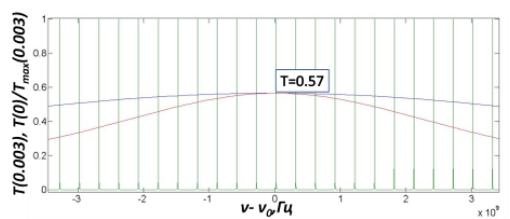


Рис 1. Схема генератора импульсов накачки комплекса PEARL. П – поляризатор,  $\lambda/4$  – четверть волновая пластинка, А – активный элемент, ФПК и ФПД – короткий и длинный ЭФП, ЯП – ячейка Поккельса.

Для более точного расчета значения коэффициента пропускания ЭФП [15], которое бы соответствовало значению в реальной установке, использовались измеренные CCD камерой размер и форма пучка, вблизи обеих стенок каждого из ЭФП в отдельности. В таблице 1 показаны результаты распространения пучка отдельно через короткий и длинный ЭФП при измеренных камерой распределениях интенсивности падающего пучка, а также рассчитанные интегральные зависимости коэффициентов пропускания от частоты.

Таблица 1. Распределение интенсивности падающего на эталон ФП пучка (*a,d,g,j*).

Распределение интенсивности пучка после прохода через эталон ФП (*b,e,h,k*). Зависимость коэффициента пропускания эталона Фабри-перо от частоты при различных значениях длины эталона и угла падения излучения на него (*c,f,i,l*). Зависимость коэффициента пропускания при нормальном падении с учетом нормировки на максимум пропускания при ненулевом угле падения (красная линия). В качестве входных параметров выступают:  $L$  – длина ЭФП,  $\theta$  – угол наклона ЭФП.

Параметры ЭФП	Начальное распределение	Распределение после прохода ЭФП	Зависимость коэффициента пропускания $T$ от частоты $\nu$
$L=3\text{мм}$ $\theta = 0.003$ рад (падение слева)			
$L=15\text{мм}$ $\theta = 0.006$ рад (падение слева)			
$L=15\text{мм}$ $\theta = 0.006$ рад (падение справа)			
$L=3\text{мм}$ $\theta = 0.003$ рад (падение справа)			

В реальной установке модулятором добротности служит Ячейка Поккельса (ЯП), с запуском от пичка свободной генерации. ЯП представляет собой кристалл DKDP, кристалл дейтерированного дигидрофосфата калия, в котором приложенное постоянное электрическое поле меняет свойства кристалла и приводит к изменению поляризации волны, проходящей через него.

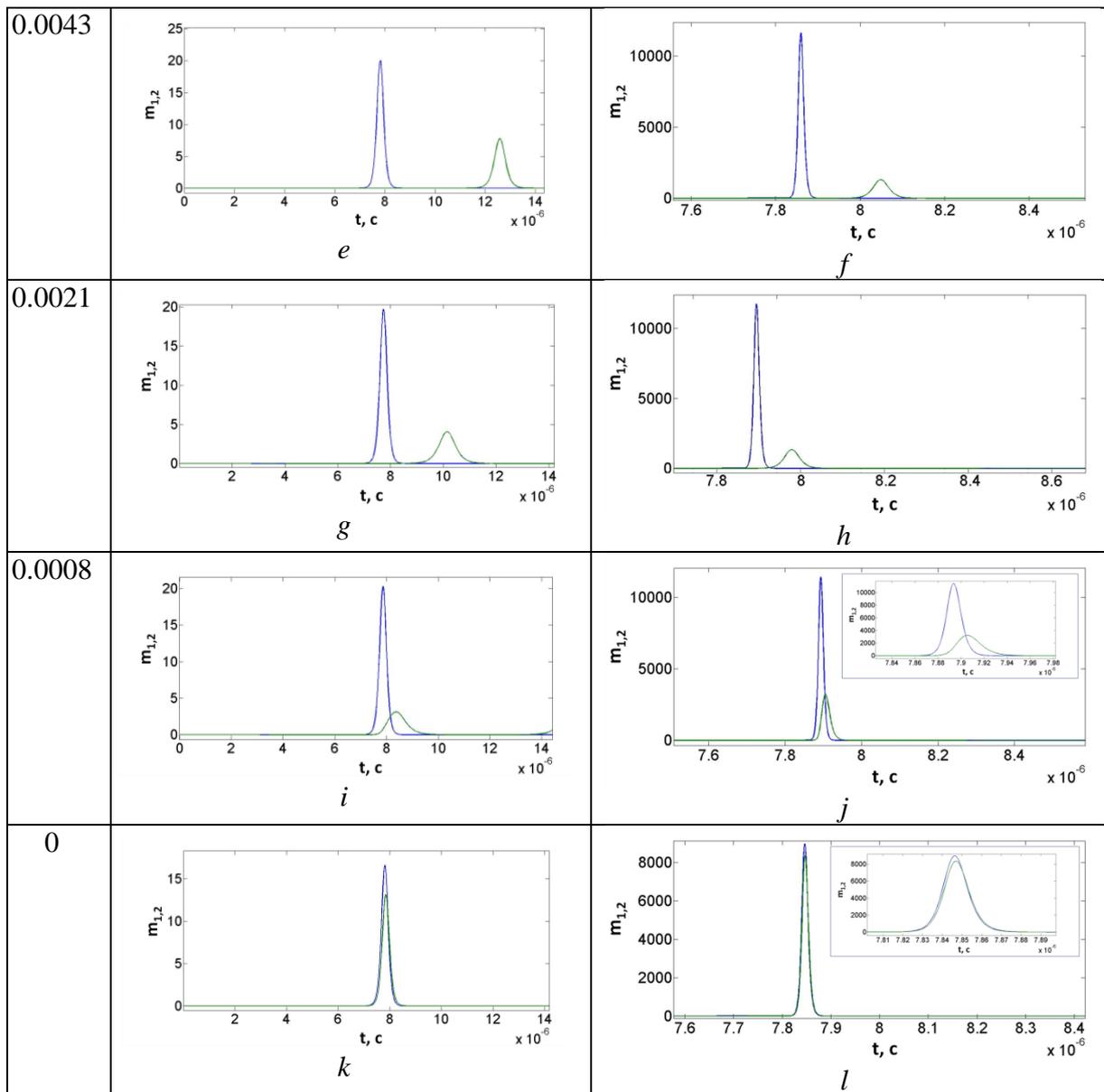
В системе уравнений потери продольных мод резонатора представлялись в виде  $\beta_i = \beta_{яп} + \Delta\beta_i$ , где  $\beta_{яп}$  – потери вносимые ЯП, а  $\Delta\beta_i$  является дополнительными потерями для  $i$ -ой моды относительно потерь для центральной относительно пика пропускания ЭФП. В ходе расчетов была получена формула для потерь вносимых ЯП:

$$\beta_{яп} = \frac{\ln T_{яп}}{\ln R_1 R_2}$$

В настоящей работе расчеты производились только для центральной относительно пика пропускания ЭФП и соседней мод резонатора, так как для последующих мод потери настолько велики, что вероятность их генерации ничтожно мала по сравнению с модами, близкими к максимуму пропускания ЭФП. Полученные результаты моделирования с использованием реальных значений всех измеренных параметров, а также интенсивности излучения и инверсии населенности в АЭ в начальный момент времени, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Интенсивность пичков свободной генерации соседних мод резонатора  $m_{1,2}$  в зависимости от времени ( $a, c, e, g, i, k$ ). Интенсивность гигантских импульсов на соседних частотах резонатора в зависимости от времени ( $b, d, f, h, j, l$ ). Пунктирная линия в  $a-b$  соответствует моменту переключения добротности.  $\Delta\beta$  – разница потерь для центральной относительно пика пропускания ЭФП и соседней продольных мод резонатора в условных единицах.

$\Delta\beta$	Пички свободной генерации	Гигантские импульсы
0.0274	<p style="text-align: center;"><math>a</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>b</math></p>
0.0107	<p style="text-align: center;"><math>c</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>d</math></p>



На рис. 2 продемонстрировано изменение инверсии населенности со временем, а именно изменение средней по слою инверсии населенности, нормированной на пороговое значение для первой моды  $N_{th_1}$ , взятое за начальное значение.

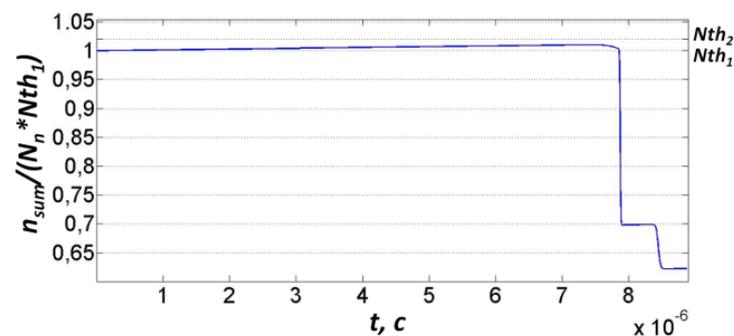


Рис 2. Среднее значение инверсии населенности, нормированное на пороговое значение для первой моды в зависимости от времени в ситуации, когда одна из продольных мод резонатора совпадает с максимумом пика коэффициента пропускания эталонов Фабри-Перо.

Для получения зависимости времени задержки генерации и интенсивности пост-импульса от смещения продольных мод резонатора относительно пика пропускания ЭФП был поставлен эксперимент, в котором одно из зеркал резонатора было наклеено на пьезо-элемент, который при подаче на него постоянного напряжения меняет свои размеры, тем самым изменяя длину резонатора. Для сравнения на рис. 3-4 совместно представлены результаты эксперимента и теории, и можно заметить их хорошее совпадение. Теоретическая кривая получена на основе сравнительно небольшого количества точек, обусловленного нехваткой имеющихся на тот момент компьютерных ресурсов для получения более точной и гладкой зависимости. Однако данной точности достаточно для оценки корректности полученных результатов и сравнения их с экспериментальными данными.

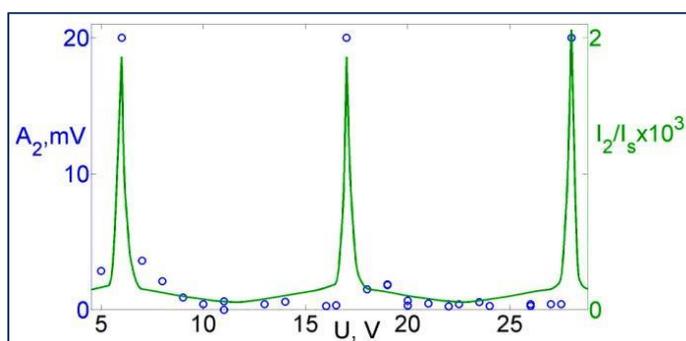


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности второго гигантского импульса (пост-импульса)  $A_2$  от напряжения на пьезоэлементе  $U$ ; сплошная кривая – модель, точки – эксперимент.

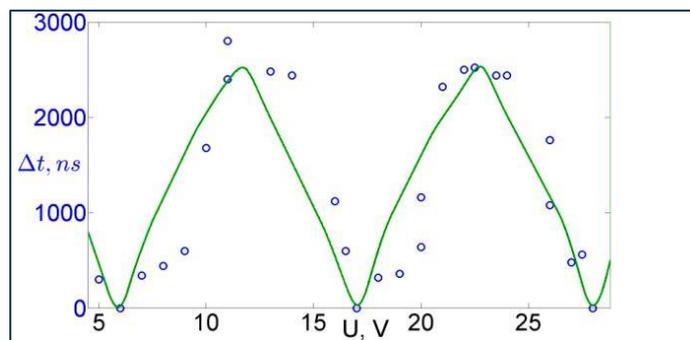


Рис. 4. Зависимость времени задержки  $\Delta t$  второго гигантского импульса (постимпульса) относительно основного от напряжения на пьезоэлементе  $U$ ; сплошная кривая – модель, точки – эксперимент.

Обнаруженный эффект генерации пост-импульса и дальнейшее его исследование позволяют реализовать новый способ получения стабильной одномодовой генерации в генераторе с модуляцией добротности, производя подстройку оптической длины резонатора заблаговременно до возникновения режима двухчастотной генерации, осуществив обратную

связь по возникновению генерации второго гигантского импульса с задержкой по времени после первого.

Во **второй главе** рассмотрены способы управления временной огибающей наносекундного импульса путем внесения предскажений, а также поставлен эксперимент по усилению chirпированного импульса наносекундной длительности в одном из усилителей на Nd:YLF лазера накачки комплекса PEARL.

Одним из способов формирования временной огибающей наносекундного импульса является независимое управление интенсивностью спектральных компонент chirпированного импульса.

Был поставлен эксперимент по усилению chirпированного наносекундного импульса с шириной спектра 1 нм в усилителе первого каскада усиления комплекса PEARL. В результате наблюдалось обужение временной формы импульса, как показано на рис. 5. Одной из причин являлся узкий спектр усиления Nd:YLF (0.3 нм) по сравнению со спектром входного излучения (1 нм).

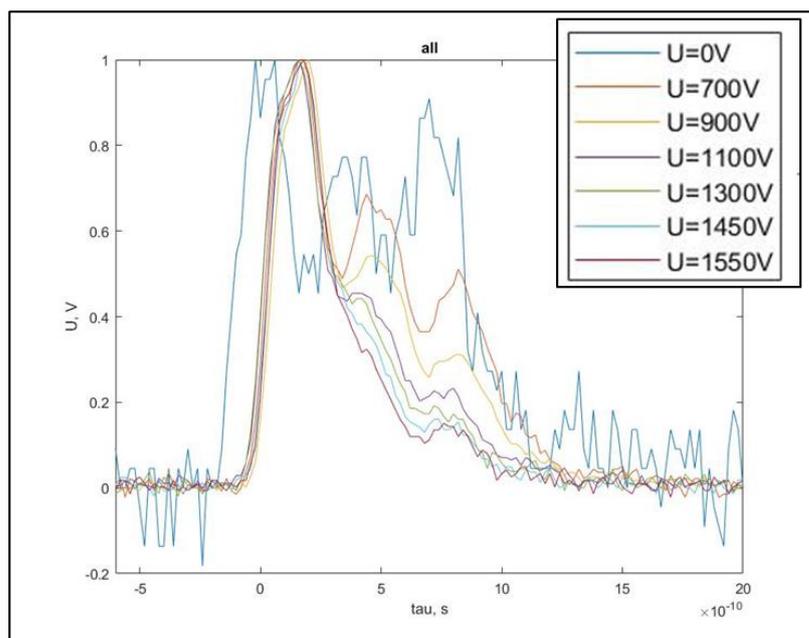


Рис. 5. Временная форма импульсов на выходе из усилителя при различных значениях напряжения на газоразрядных лампах.

Эффект обужения спектра при усилении до 0.3 нм говорит о том, что для внесения необходимых предскажений потребуется управление спектром ширины 0.3 нм. Независимое управление различными спектральными компонентами является задачей нетривиальной, но возможной. Формирование подобных искажений может быть реализовано с помощью стретчера для разнесения спектральных составляющих импульса в пространстве и пространственного модулятора света (SLM), аналогично использованию SLM в работах [18-19],

для управления интенсивностью излучения в зависимости от частоты. Примерная схема, реализовывающая описанную логику, изображена на рис. 6.

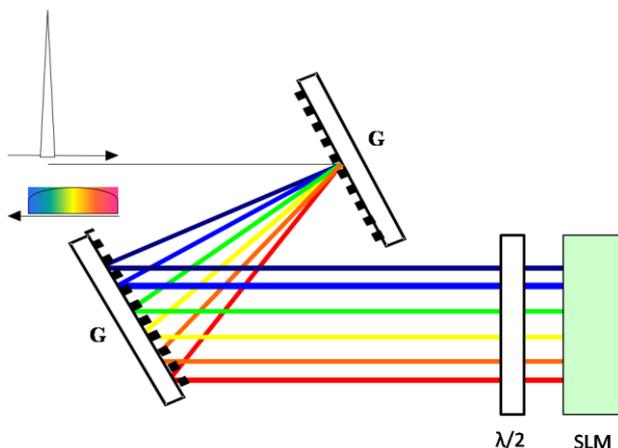


Рис. 6. Схема по управлению временной огибающей путем изменения интенсивности спектральных компонент импульса.

В дальнейшем при успешной реализации описанного способа управления временной огибающей станет возможным решение проблемы, связанной с искажением временного профиля импульса на выходе лазера накачки, и удастся добиться заданной временной формы импульса.

**Третья глава** посвящена созданию компактной линии задержки с оптической длиной более 100 м и исследованию влияния параметров системы на качество пучка.

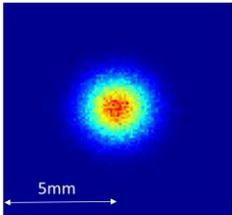
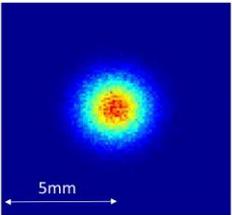
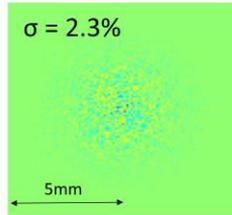
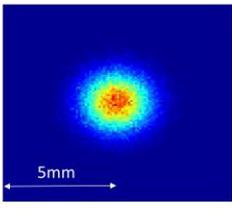
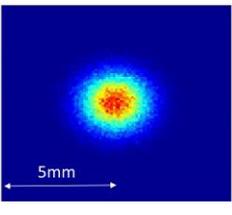
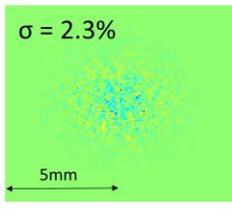
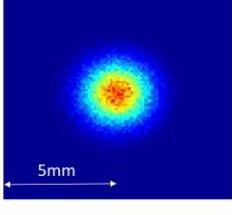
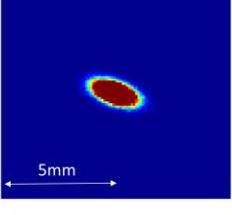
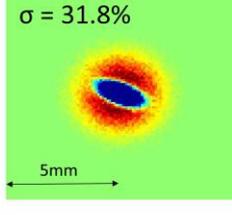
К линии задержки комплекса PEARL предъявляется ряд требований. Необходимо скомпенсировать достаточно большую разницу оптических длин  $\approx 100$  метров, которая определяется разницей оптических путей двух импульсов накачки последовательно расположенных оптических параметрических усилителей (ОПУ), с учетом соответствующей разницы оптических длин для сигнального импульса данных ОПУ. Также, при построении данной линии задержки для реального лазерного пучка диаметром около 6 мм, чтобы избежать больших дифракционных искажений, необходимо осуществить перенос изображения с одного предусилителя на другой. Предусилители расположены до и после линии задержки. Для обеспечения стабильности линия задержки должна быть собрана на одном столе.

При диаметре пучка 6 мм, диаметре зеркал 50 мм и длине телескопа от 1.5 м величина аббераций ничтожно мала, и величина среднеквадратичного отклонения интенсивности порядка 2.3%. Однако при попытке реализовать 64 прохода для пучка диаметром 6 мм путем увеличения диаметра зеркал, увеличивается и расстояние от оптической оси, на котором распространяется пучок, что в свою очередь может привести к возникновению астигматизма. В

результате наблюдается значительное увеличение aberrаций, что влияет на качество пучка. Величина среднеквадратичного отклонения около 32%.

Была создана модель, позволяющая наглядно изобразить геометрию распространения пучка в линии задержки, состоящей из двух блоков зеркал, по 4 зеркала с независимым управлением в каждом. Были рассчитана зависимость величины aberrаций пучка на выходе из системы от различных параметров системы зеркал и пучка, некоторые зависимости представлены в таблице 3.

Таблица 3. Распределение интенсивности входного и выходного пучка в ближней зоне, а также их разница при различном количестве проходов  $N$ , значении длины телескопа  $L$  и диаметре блока зеркал  $D$ .

Параметры системы	Входной пучок	Выходной пучок	Разница входного и выходного пучка
$L = 3$ м $N = 32$ прохода $D = 50$ мм			
$L = 1,5$ м $N = 32$ прохода $D = 50$ мм			
$L = 1,5$ м $N = 64$ прохода $D = 100$ мм			

Параметры макета линии задержки, реализованной на данный момент в комплексе PEARL, по результатам расчетов являются удовлетворительными с точки зрения стабильности качества пучка.

В ходе моделирования было замечено, что есть более выгодное положение зеркал, упрощающее процесс юстировки и уменьшающее влияния aberrаций на качество пучка.

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

## Список используемой литературы

1. *D. Strickland and G. Mourou.* Compression of amplified chirped optical pulses // *Opt. Commun.*[en], Vol. 56, iss. 3, P. 219 – 221 (1985).
2. *Dubietis, G. Jonušauskas, and A. Piskarskas,* Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal // *Opt. Commun.* 88, 437–440 (1992).
3. *Потемкин А.К. и др.,* Компактный лазер на фосфатном стекле с неодимом с энергией 100 Дж и мощностью 100 ГВт для накачки параметрического усилителя чирпированных импульсов // *Квантовая электроника*, 35, 302-310 (2005).
4. *V.V. Lozhkarev, G.I. Freidman, V.N. Ginzburg, E.V. Katin, E.A. Khazanov, A.V. Kirsanov, G.A. Luchinin, A.N. Mal'shakov, M.A. Martyanov, O.V. Palashov, A.K. Poteomkin, A.M. Sergeev, A.A. Shaykin, I.V. Yakovlev,* Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals // *Laser Physics Letters* 4, 421–427 (2007).
5. *Kitagawa et al.,* Prepulse-free petawatt laser for a fast ignite // *IEEE J. Quantum Electron.*, Т.40, № 3, С. 281–293.3 (2004).
6. *C. N. Danson et al.* Vulcan Petawatt—an ultra-high-intensity interaction facility // *Nucl. Fusion*, Т. 44, С. S239–S246.5 (2004).
7. *M. Aoyama et al.* 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser // *Optics Letters*, Т. 28, № 17, С. 1594–1596 (2003).
8. *Ian N. Ross et al,* Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification // *JOSA B*, Vol. 19, Issue 12, pp. 2945–2956 (2002).
9. *J. Hein et al.,* *Appl. Phys. B* 79, 419 (2004)
10. *C. P. J. Barty et al.,* Motivations and challenges for high energy petawatt lasers at the National Ignition Facility // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Francisco, California, June 1-6, (2004).
11. *L.J. Waxer et al.,* High-Energy Petawatt Capability for the Omega Laser // *Optics and Photonics News*, Vol. 16, Issue 7, pp. 30-36 (2005).
12. *Erhard W. Gaul et al.* // *Design of the Texas Petawatt Laser* Quantum Electronics and Laser Science Conference Baltimore, May 22, 2005.
13. *N. Blanchot et al.* // *Proc. Topical Problems of Nonlinear Wave Physics - 2005*, St. Petersburg – N. Novgorod, (SPIE), p.59750C-1 (2005).
14. *E.V. Katin, V.V. Lozhkarev, O.V. Palashov and E.A. Khazanov,* Synchronisation of a femtosecond laser and a Q-switched laser to within 50 ps // *Quantum Electronics* 33, 836, 2003.
15. *О. Звелто* // *Принципы лазеров*, изд.4, 2008.
16. *Ханин Я.И.* // *Основы физики лазеров - Изд. Наука*, 1999.

17. Волков Е.А. // Численные методы – М.: Наука, с.133-134, 1987.

18. A. M. Weiner, Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // Review of Scientific Instruments, 71, 1929 (2000).

19. Jiangfeng Zhu, Takashi Tanigawa, Tao Chen, Shaobo Fang, Keisaku Yamane, Taro Sekikawa and Mikio Yamashita, Ultrabroadband spectral amplitude modulation using a liquid crystal spatial light modulator with ultraviolet-to-near-infrared bandwidth // Applied Optics, 49, 350-357 (2010).

#### **Основные публикации автора по теме диссертации**

A1. А. П. Коробейникова, И. А. Шайкин, А. А. Шайкин, И. В. Корюкин, Е. А. Хазанов, Генерация двух гигантских импульсов в лазерах с активной модуляцией добротности // Квантовая электроника, т.48, №4, сс. 351–357 (2018).

A2. А.П. Коробейникова, К.Ф. Бурдонов, А.А. Шайкин, Е.А. Хазанов, Новый способ получения одномодовой генерации в лазерах с модуляцией добротности // XVII научная школа Нелинейные волны – 2016, Нижний Новгород, 27 февраля – 4 марта 2016, с. 78 (2016).

A3. А.П. Коробейникова, А.А. Шайкин, И.В. Корюкин, and Е.А. Хазанов, Mathematical model of an additional laser pulse generating process in a Q-switched generator // International Symposium Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2017), Moscow – St.-Peterburg, Russia, 22 – 28 July 2017, p.76 (2017).

A4. А.П. Коробейникова, И.А. Шайкин, И.В. Корюкин, Е.А. Хазанов, Моделирование процесса генерации импульсов в многомодовом генераторе с модуляцией добротности с учетом бегучести при реальных параметрах резонатора // XVIII научная школа Нелинейные волны – 2018, Нижний Новгород, 26 февраля – 4 марта 2018, с.76–78 (2018).

A5. Anastasia Korobeynikova, IlyaShaikin, AndreyShaykin, Synchronization system of the pump pulses for different cascades of parametrical amplification in the petawatt laser PEARL: modeling, calculation and creation // The 8th conference of the international committee on ultrahigh intensity lasers (ICUIL 2018), Lindau, Germany, September 10 – 14, p.144 (2018).