

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН,  
г. Нижний Новгород

*На правах рукописи*

МАРТЬЯНОВ Михаил Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
ЛАЗЕРОВ НАКАЧКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ  
ПЕТАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ**

01.04.21 – лазерная физика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2011

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук  
Е.А. Хазанов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
Г.Г. Кочемасов

кандидат физико-математических наук  
Н.Ф. Андреев

Ведущая организация:

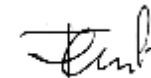
Институт общей физики РАН  
(ИОФ РАН) им. А.М. Прохорова

Защита состоится « 12 » декабря 2011 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «    » ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



Ю.В. Чугунов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

На сегодняшний день фосфатное и силикатное стекло, допированное ионами неодима (Nd:glass) как активная лазерная среда, не имеет конкурентов по объему и апертуре создаваемых активных элементов в сочетании с высоким оптическим качеством. Поэтому вполне естественно, что лазеры и усилители на Nd:glass являются неотъемлемой частью практически всех мощных лазерных систем по всему миру.

Мощные лазеры на стекле по их применению можно условно разделить на две группы. Первая группа – это лазеры наносекундной длительности с килоджоульной и мегаджоульной энергией в импульсе. Основное приложение этих лазеров – лазерный термоядерный синтез (ЛТС). Это крупные национальные проекты, такие как NIF [1, 2], VULCAN [3], ЛУЧ [4], HIPER [5], GEKKO XII [6], LMJ [7, 8], и др. В этих лазерных проектах осуществляется прямое лазерное усиление узкополосного импульса наносекундой длительности. Для обжигания термоядерных мишеней используется импульс на второй или третьей гармонике. При этом формально эти лазеры не являются сверхмощными, т.к. излучение в них поделено на каналы и мощность каждого канала в отдельности не превосходит 10 ТВт.

Вторую группу лазеров на стекле с неодимом условно можно назвать петаваттной, сюда входят:

а) CPA (chirped pulse amplification) системы, где усиление chirпированного импульса осуществляется непосредственно в Nd:glass с ламповой или диодной накачкой. В силу ограниченной спектральной полосы усиления в Nd:glass длительность усиленного импульса, как правило, не меньше 400 фс. Петаваттный уровень мощности достигается при килоджоульной энергии импульса (400 Дж после компрессии) [9, 10];

б) CPA на кристалле  $Ti:Al_2O_3$  (титан-сапфир), в этом случае вторая гармоника лазера на стекле с неодимом является накачкой активной среды  $Ti:сапфир$ . Никаких особых требований к излучению лазера накачки в данном случае не предъявляется, кроме того, что излучение килоджоульного уровня энергии в импульсе должно эффективно удваивать частоту в нелинейном кристалле большой апертуры, допускается длительность импульса несколько десятков наносекунд.

в) OPCPA (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification) системы, усиление широкополосных chirпированных импульсов в них осуществляется за счет параметрического взаимодействия в нелинейном кристалле слабой сигнальной волны (собственно сам chirпированный импульс) и интенсивной волны накачки. Волна накачки, как правило, это вторая гармоника лазера на стекле с неодимом.

В 2007 году в Институте прикладной физики РАН был создан лазерный комплекс PEARL (PEtawatt pARametric Laser) [11]. Усиление chirпированных

импульсов на последнем каскаде осуществляется в параметрическом усилителе света на кристалле DKDP большой апертуры ( $\varnothing$  130 мм), накачкой которого служит вторая гармоника (527 нм, 1 нс, 180 Дж) лазера накачки на фосфатном стекле с неодимом [12]. Данный лазер накачки представляет собой законченную часть системы PEARL, и с научной и технологической точки зрения может рассматриваться как вполне самостоятельная система, нуждающаяся в специфическом обслуживании, настройке и усовершенствовании. Настоящая диссертация состоит из результатов, полученных автором в период создания лазера накачки системы PEARL. Однако применимость результатов, конечно же, выходит за рамки использования их только в конкретной лазерной системе. В ходе выполнения работы был решен ряд задач, описанных ниже.

Типичной задачей для лазерных систем с большой энергией в импульсе, сравнимой с запасенной энергией в активной среде, является задача повышения КПД усилителя за счет, в частности, лучшего съема запасенной энергии со всей апертуры активных элементов. Теоретически оптимальным являлось бы использование П-образных пучков (flat-top, top-hat beam) или, при учете неравномерного распределения коэффициента усиления по радиусу активных элементов, им подобных. Однако практически такие пучки вряд ли могут быть использованы в реальных системах, т.к. из-за крутых краев они имеют широкий угловой спектр, который, с одной стороны, не может быть передан через транспортные фильтрующие телескопы, а с другой – является интенсивной затравкой для усиления шума при мелкомасштабной самофокусировке (ММСФ). Поэтому на практике возникает задача создания на входе в мощный усилитель пучка, который, с одной стороны, достаточно равномерно заполнял бы апертуру усилителя, а с другой – имел бы достаточно плавные края и ноль электромагнитного поля на определенном радиусе. В математическом смысле речь идет о создании супергауссовых или суперкосинус пучков.

В мощных лазерных усилителях наносекундной длительности на фосфатном стекле с неодимом фактором, ограничивающим выходную энергию (а следовательно, и мощность), является, как правило, либо пробой выходной поверхности, либо мелкомасштабная самофокусировка (ММСФ), проявляющаяся в экспоненциальном нарастании всплесков интенсивности (шума) в пучке при увеличении интеграла распада ( $B$ -интеграла) [13, 14]. Обычно полагают, что дальнейшее увеличение энергии импульса в данном каскаде нежелательно, если  $B$ -интеграл в данном элементе достиг единицы. При увеличении  $B$ -интеграла происходит резкий рост шумов и, как следствие, появление всплесков интенсивности в основном пучке, что приводит если не к филаментации, то к оптическому пробою. В данной работе предложен новый взгляд на мониторинг шумовых компонент, возникающих при ММСФ в случае, когда  $B$ -интеграл не превышает единицы и, следовательно, с точки зрения ММСФ система находится в безопасном режиме.

Часто используется не само излучение стеклянного усилителя, а его вторая или третья гармоники. В этом случае накладывается дополнительное условие на качество излучения – минимальные искажения фазового фронта. Так, например, при диаметре пучка ~10 см на эффективность удвоения в кристалле DKDP длиной несколько сантиметров сказывается уже параболическое искажение фазового фронта, соответствующее линзе с фокусным расстоянием ~1 км. Отсюда естественным образом возникает требование на дифракционное качество выходного излучения. Это требование может быть удовлетворено при использовании оптических элементов высокого оптического качества, а также при минимизации оптических aberrаций, вносимых транспортными согласующими телескопами (они же обычно выполняют функцию и пространственных фильтров). В данной работе изложен подход к проектированию транспортных фильтрующих телескопов с простыми однокомпонентными линзами для лазера накачки системы PEARL.

Если вторая гармоника неодимового лазера используется для накачки параметрического усилителя, то необходима точная синхронизация по времени прихода в оптический параметрический усилитель (ОПУ) между импульсом накачки и импульсом сигнальной волны (не хуже примерно одной десятой от длительности сигнального импульса). Другими словами, сигнальное излучение «видит» как бы не весь пучок накачки, а только тот его временной срез, с которым оно синхронизовано. Как известно [15, 16], при проходе усилителей излучение лазера подвергается амплитудно-временным искажениям (АВИ), связанным с различной степенью насыщения усиления по поперечному сечению активного элемента (АЭ) и проявляющимися в смещении импульса вперед во времени в сопровождающей системе координат. Величина АВИ зависит как от локальной интенсивности пучка (т.е. от профиля пучка), так и от локального коэффициента усиления в активных элементах (т.е. от распределения коэффициента усиления по апертуре). В результате в реальной системе центр пучка «убегает» вперед относительно краев, что, в свою очередь, приводит к уменьшению эффективности преобразования излучения накачки в сигнальную и холостую волны, а также проявляется в эффективном уменьшении диаметра сигнального пучка. Описанное негативное влияние АВИ проявляется только при использовании излучения неодимового лазера в приложениях, требующих высокой точности синхронизации (например, накачка ОПУ), однако никак себя не проявляет, например, если излучение используется для накачки кристалла Ti:сапфир. Следует отметить, что появление АВИ тесно связано с профилем интенсивности пучка (фактором заполнения апертуры) и радиальным профилем распределения коэффициента усиления в стержнях. В представляемой работе практически важной задачей было получение простых аналитических соотношений между величиной эффекта АВИ и КПД усиления, которые можно было бы использовать для прогнозирования синхронизации между импульсом лазера накачки и сигнальным излучением в ОРСА, а также проверка этих соотношений в эксперименте.

## Цель работы

Целью данной работы является разработка методов управления пространственно-временными параметрами излучения лазера накачки параметрического усилителя и создание элементов мощной лазерной системы, позволяющих улучшить параметры выходного излучения (увеличить энергию, повысить равномерность заполнения апертуры, минимизировать фазовые искажения). В частности:

1. Создание системы ввода излучения, формирующей пучок высокого оптического качества с высоким коэффициентом заполнения апертуры на входе лазера накачки параметрического усилителя.

2. Оптимизация транспортных телескопов (пространственных фильтров) при учете таких противоречивых требований, как минимизация aberrаций, удовлетворительная передача изображения, уменьшение угла видения лазерной системы, фильтрация высокочастотных пространственных компонент пучка (шума), возникающих в результате развития ММСФ в активной среде.

3. Исследование амплитудно-временных искажений (АВИ), возникающих при распространении лазерного излучения в усиливающей среде с конечной запасенной энергией (учет насыщения усиления вдоль импульса). Получение соотношений, характеризующих АВИ, для прогнозирования точности синхронизации излучения накачки и сигнала в параметрических усилителях.

4. Исследование развития ММСФ в активных элементах в неразрушающем режиме (*B*-интеграл порядка единицы), разработка методов мониторинга уровня шума и ММСФ в мощных лазерах на неодимовом стекле.

## Научная новизна работы

1. Предложена, реализована и успешно используется система формирования поперечного профиля входного пучка для согласования работы импульсно-периодического Nd:YLF-лазера с многокаскадным усилителем на неодимовом фосфатном стекле.

2. В шестикаскадном усилителе на неодимовом стекле с коэффициентом усиления  $2.3 \cdot 10^6$ , суммарным значением *B*-интеграла 6.7 и коэффициентом заполнения апертуры на выходе 0.87 подавлены самовозбуждение и мелкомасштабная самофокусировка.

3. Теоретически показано и подтверждено экспериментально, что для импульсов колоколообразной формы при усилении в лазерном усилителе сдвиги во времени импульсов интенсивности и *B*-интеграла пропорциональны длительности входного импульса и КПД усилителя (т.е. энергосъему с усилителя, нормированному на запасенную энергию активной среды).

4. Впервые наблюдалась предсказанная в классических работах кольцевая структура пространственного спектра шума, усиленного в результате неустойчивости плоской волны в среде с кубической нелинейностью (мелкомас-

штабной самофокусировки). Предложена и реализована не имеющая аналогов методика неразрушающего контроля уровня оптического шума в лазерном пучке и развития мелкомасштабной самофокусировки при  $B$ -интеграле порядка единицы.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Оригинальная система формирования поперечного профиля входного пучка шестикаскадного усилителя на неодимовом фосфатном стекле, имея лучшие селективирующие свойства, позволяет увеличить угловую точность заведения пучка в усилитель, увеличить коэффициент заполнения апертуры на выходе усилителя с 0.63 до 0.87. В результате использования разработанной системы формирования профиля пучка получена энергия импульса 300 Дж при длительности 1 нс на выходе усилителя.

2. Четыре транспортных телескопа, обладающие минимальной (для однокомпонентных линз) сферической абберацией, при использовании диафрагм из молибдена с диаметром, соответствующим 30–40 дифракционных пределов, позволяют подавить самовозбуждение и мелкомасштабную самофокусировку в шестикаскадном усилителе на неодимовом стекле с коэффициентом усиления  $2.3 \cdot 10^6$  и суммарным значением  $B$ -интеграла 6.7 при коэффициенте заполнения апертуры на выходе усилителя 0.87.

3. Для импульсов колоколообразной формы при усилении в лазерном усилителе сдвиги во времени импульсов интенсивности и  $B$ -интеграла пропорциональны КПД усилителя (т.е. энергосъему с усилителя, нормированному на запасенную энергию активной среды), причем коэффициенты пропорциональности примерно равны 1/7, 1/5, 1/14, 1/10 от длительности импульса соответственно для максимума интенсивности, для центра масс (первого момента) интенсивности, для максимума  $B$ -интеграла, для центра масс  $B$ -интеграла. Эти зависимости справедливы при всех практически интересных значениях входной энергии и коэффициента усиления лазерного усилителя.

4. Пространственный спектр шума лазерного пучка, прошедшего через среду с кубической нелинейностью, имеет кольцевую структуру, что впервые наблюдалось в эксперименте. Эта кольцевая структура, связанная с фазовым набегом пространственных гармоник, распространяющихся под углом к оси пучка, дает возможность осуществлять неразрушающий контроль уровня оптического шума в пучке и развития мелкомасштабной самофокусировки на ранней стадии – при значении  $B$ -интеграла порядка единицы.

### Апробация результатов

Материалы диссертации опубликованы в реферируемых журналах [A1–A9]. Результаты докладывались на различных российских и международных конференциях (ICONO/LAT, International Symposium Topical Problem of

Nonlinear Wave Physics, Laser Optics, International Conference on High Power Laser Beams, CLEO, ASSP и др.) и опубликованы в трудах этих конференций [B1–B16].

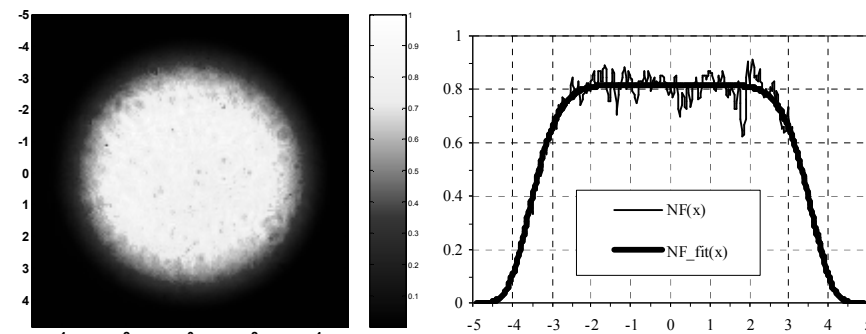
### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 85 страниц, 21 рисунок, 2 таблицы, список литературы содержит 70 ссылок.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** определены предмет исследований и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, а также приведены данные по апробации и публикациям включенных в диссертационную работу материалов.

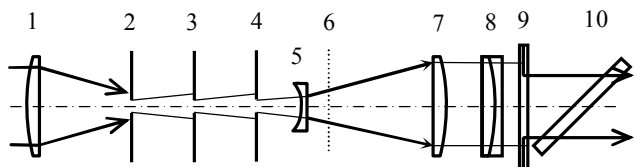
**В первой главе** рассмотрена предложенная и реализованная автором схема системы ввода излучения (СВИ) в мощный усилитель на стекле с неодимом комплекса PEARL. Основным достоинством данной системы является формирование на входе в усилитель гладкого пучка с фактором заполнения 0.6 (рис. 1).



**Рис. 1.** Ближняя зона пучка на выходе СВИ. Пространственный масштаб в миллиметрах,  $NF$  – экспериментальный срез пучка по центру,  $NF\_fit$  – аппроксимация

В параграфе 1.1 описан теоретический подход к формированию моды диафрагменной линии, обладающей в заданной плоскости необходимыми свойствами, а также приложение этого к формированию пучка с большим коэффициентом заполнения апертуры, рассмотрены принципы построения СВИ, схема которой представлена на рис. 2. Ключевым элементом СВИ является диафрагменная линия 2–4, которая за счет дифракции формирует пространственную моду излучения. Галилеев телескоп 5, 7 осуществляет перенос изображения с увеличением плоскости 6 на узел аподизации 8, 9, 10, состоя-

ший из мягкой диафрагмы 8, жесткой диафрагмы 9 и поляризатора 10. Мягкая диафрагма 8 представляет собой линзу из кристаллического кварца, находящуюся на оптическом контакте с линзой из плавленого кварца [17]. Основная идея работы состоит в правильном выборе плоскости 6, изображение с которой переносится на мягкую диафрагму 8. Распределение поля в плоскости 6 формируется за счет дифракции на диафрагменной линии, и на него можно воздействовать в широких пределах за счет подбора параметров линии, что и продемонстрировано в данной работе.



**Рис. 2.** Схема СВИ. 1 – входная фокусирующая линза; 2, 3, 4 – диафрагменная линия; 5, 7 – галлиев телескоп; 6 – плоскость переноса изображения; 8, 9, 10 – узел аподизации (8 – мягкая косинус-диафрагма, 9 – жесткая диафрагма, 10 – поляризатор)

В параграфе 1.2 описана реализация системы ввода излучения в лазер накачки системы PEARL, приведены результаты расчетов с указанием всех конкретных параметров и экспериментальная реализация распределения поля (см. рис. 1) на входе в первый усилительный каскад Nd:glass диаметром 10 мм.

В параграфе 1.3 приведены ключевые результаты первой главы, а также результат использования предложенной СВИ в конкретной лазерной системе (усилителе PEARL). Использование предложенной в данной работе СВИ позволило увеличить коэффициент заполнения апертуры усилителя с 0.45 до 0.6, что, в свою очередь, повысило коэффициент заполнения апертуры на выходе с 0.63 до 0.87 и позволило получать импульсы с энергией 300 Дж и длительностью 1 нс [12].

**Во второй главе** рассмотрены принципы построения транспортных согласующих телескопов (пространственных фильтров), показано, что остаточная сферическая aberrация телескопов существенно не влияет на качество выходного излучения и на преобразование во вторую гармонику. Рассмотрен вопрос оптимизации размера фильтрующих диафрагм с точки зрения качества переноса изображения с одной стороны и уменьшения угла видения системы и фильтрации ММСФ с другой.

В параграфе 2.1 описана оптическая схема лазера накачки системы PEARL, приведены основные параметры лазера накачки.

В параграфе 2.2 рассмотрена проблема сферической aberrации реальной однокомпонентной линзы в приложении к построению транспортного фильтрующего телескопа, исследована возможность сокращения длины телескопа без существенного ухудшения фазы пучка. Получен критерий (1), ограничи-

вающий фокусное расстояние входной линзы телескопа и, следовательно, его полную длину

$$f > \left( \frac{2UR^4}{\beta\lambda} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние входной линзы телескопа,  $U$  – сумма Зейделя для данной линзы,  $R$  – радиус пучка,  $\beta$  – безразмерный параметр, определяющий радиус темного кольца в дальней зоне пространственно ограниченного пучка (для П-образного пучка  $\beta = 1.22$ ),  $\lambda$  – длина волны.

В параграфе 2.3 рассмотрен вопрос фильтрации излучения лазера накачки в транспортных телескопах. Фильтрация необходима для уменьшения угла видения системы (для снижения уровня спонтанных шумов усилителя), а также для фильтрации пространственных гармоник шума, возникающих при ММСФ.

**В третьей главе** исследованы (теоретически и экспериментально) АВИ излучения в условиях насыщения усиления, получены удобные расчетные зависимости для временного сдвига максимума интенсивности колоколообразного импульса, максимума, связанного с импульсом  $B$ -интеграла, первого момента (центр масс) импульса сложной формы. При усилении импульсного лазерного излучения в режиме насыщения всегда наблюдается сдвиг импульса во времени. Показано, что временные сдвиги максимума интенсивности и  $B$ -интеграла пропорциональны нормированному на запасенную энергию энергосъему с усилителя, причем коэффициент пропорциональности примерно равен 1/7 и 1/14 от длительности импульса соответственно. Получены простые аналитические формулы для максимальных значений выходной интенсивности и  $B$ -интеграла. Результаты экспериментально подтверждены при усилении в кристалле Nd:YLF.

В параграфе 3.1 аналитически проанализирован сдвиг максимума колоколообразного импульса в условиях усиления с насыщением. Получена простая формула, связывающая сдвиг максимума импульса с КПД усилителя:

$$\frac{2\sqrt{\pi}\Delta t_I}{\tau \ln G_0} = -\eta, \quad (2)$$

где  $\Delta t_I$  – сдвиг максимума интенсивности импульса,  $G_0$  – коэффициент усиления по слабому сигналу,  $\eta$  – КПД усилителя (отношение снятой энергии к запасенной). Знак « $\rightarrow$ » означает, что максимум интенсивности появляется раньше (сдвигается вперед) в системе отсчета, связанной с импульсом.

В параграфе 3.2 аналитически проанализирован сдвиг максимума  $B$ -интеграла колоколообразного импульса в условиях усиления с насыщением. Получена простая формула, связывающая сдвиг максимума  $B$ -интеграла импульса с КПД усилителя. Оказалось, что сдвиг максимума  $B$ -интеграла для колоколообразного импульса ровно в 2 раза меньше, чем сдвиг максимума интенсивности, рассчитанный по формуле (2).

В параграфе 3.3 аналитически проанализирован сдвиг центра масс (первого момента) импульса произвольной формы в условиях усиления с насыщением. Получена простая формула, связывающая данный временной сдвиг с КПД усилителя:

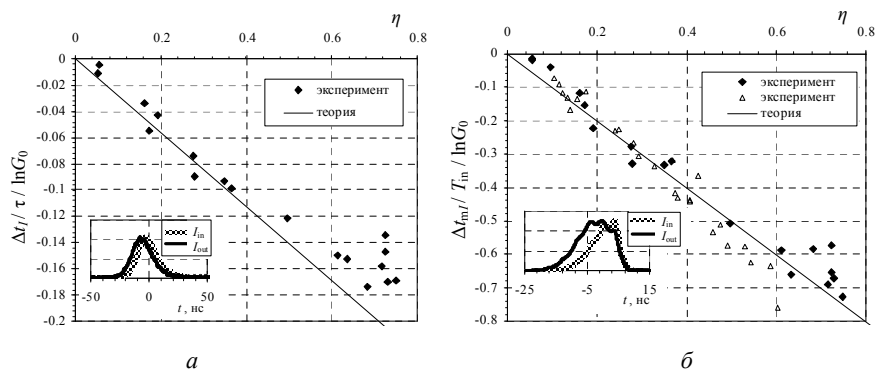
$$\frac{\Delta t_{ml}}{T_{in} \ln G_0} = -\eta, \quad (3)$$

где  $\Delta t_{ml}$  – сдвиг первого момента (центра масс) импульса произвольной формы,  $G_0$  и  $\eta$  – коэффициент усиления по слабому сигналу и КПД усилителя соответственно,  $T_{in}$  – характерная длительность импульса, определяемая по формуле

$$T_{in} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} w_{in}(t) \frac{E_s}{E_{in}} \left( 1 - w_{in}(t) \frac{E_s}{E_{in}} \right) dt,$$

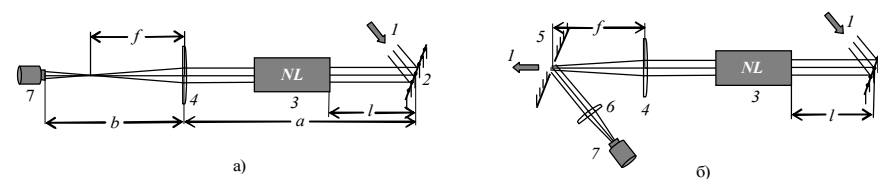
где  $w_{in}(t) = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^t I_{in}(\xi) d\xi$ ,  $E_s$  и  $E_{in}$  – плотность энергии насыщения лазерной среды и плотность энергии входного импульса соответственно.

В параграфе 3.4 приведены экспериментальные результаты по измерению сдвига максимума колоколообразного импульса и центра масс (первого момента) импульса сложной формы при их усилении в Nd:YLF в условиях насыщения (рис. 3, а, б), показано хорошее согласие с теорией.



**Рис. 3.** а) Экспериментальная зависимость сдвига максимума интенсивности  $\Delta t_l$ , нормированного на  $\tau \ln G_0$ , от КПД  $\eta$  для колоколообразного импульса, показанного на вставке (ромбы). Линия соответствует значениям, полученным по приближенной формуле (2). б) Сдвиг центра масс импульса интенсивности  $\Delta t_{ml}$  нормированный на  $T_{in} \ln G_0$  в зависимости от КПД  $\eta$  для колоколообразного импульса, показанного на вставке к рисунку 3, а (ромбы) и асимметричного импульса, показанного на вставке к этому рисунку (треугольники). Линия соответствует значениям, полученным по приближенной формуле (3)

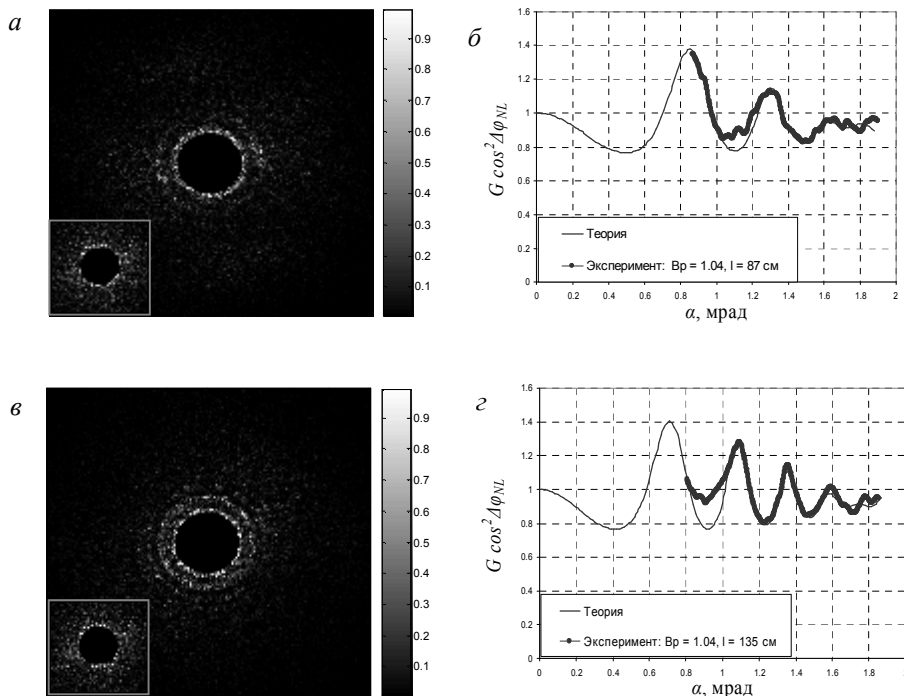
В четвертой главе предложено и впервые реализовано два способа экспериментального исследования нелинейного взаимодействия основного пучка и шумовой компоненты лазерного излучения высокой мощности в условиях мелкомасштабной самофокусировки в неразрушающем режиме (при  $B \sim 1$ ), см. рис. 4. При значении интеграла распада  $B \sim 1$  экспериментально обнаружена предсказанная теоретически кольцевая структура пространственного спектра поля и спектра интенсивности лазерного пучка 20 Дж / 20 ГВт, прошедшего через стеклянный образец. Указанные способы пока не нашли практического применения, однако при дополнительной проработке легко могут быть применены в реальной лазерной системе для контроля оптического тракта на предмет появления оптических шумов и связанной с ними ММСФ.



**Рис. 4.** Схема установки для экспериментального наблюдения ММСФ с помощью анализа распределения интенсивности шумовой компоненты в ближней (а) и дальней (б) зоне: 1 – излучение от 20 Дж / 20 ГВт лазера; 2 – источник шума; 3 – нелинейная среда длины  $L = 63$  см и оптическими параметрами  $n_0 = 1.534$  и  $\gamma = 3.2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 / \text{ГВт}$ ; 4 – линза с фокусным расстоянием  $f = 73$  см; 5 – отражающий экран с отверстием диаметром 0.65 мм; 6 – объектив ПЗС-камеры; 7 – ПЗС-камера

В параграфе 4.1 приведен обзор основных известных результатов теории ММСФ для линейно поляризованного поля. В частности, указано, что пространственный спектр шума должен приобретать кольцевую структуру при распространении в кубичной среде.

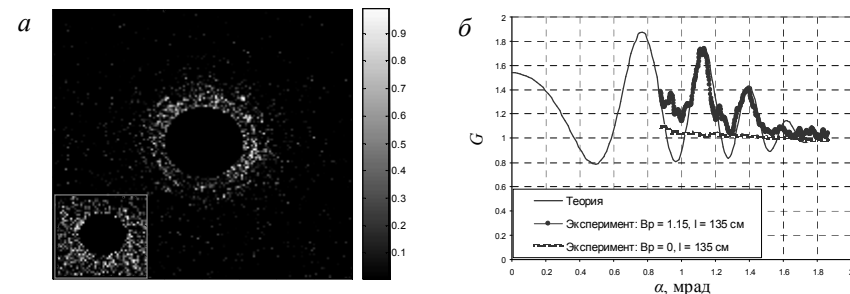
В параграфе 4.2 представлены экспериментальные результаты по наблюдению кольцевой структуры пространственного спектра шума при построении изображения источника шума 2 (см. рис. 4, а) через кубично нелинейную среду 3. Далее изображение обрабатывалось по предложенной оригинальной процедуре: фурье-преобразование снимка интенсивности пучка, полученного с CCD камеры 7, с последующим удалением центрального яркого пятна, отвечающего в спектре за основной пучок (рис. 5). Схема эксперимента представлена на рис. 4, а; в условиях эксперимента  $B$ -интеграл не превышал единицы, но это не помешало отчетливо наблюдать предсказанную ранее теоретически кольцевую структуру спектра интенсивности (см. рис. 5).



**Рис. 5.** Двумерный (*а, в*) и одномерный (*б, г*) спектры распределения интенсивности шумовой компоненты в ближней зоне при  $B = 1.05$ , при расстоянии между источником шума и нелинейной средой  $l = 87$  см (*а, б*) и  $l = 135$  см (*в, г*). На вставке показан спектр распределения интенсивности шумовой компоненты в ближней зоне при  $B = 0$

В параграфе 4.3 представлены экспериментальные результаты прямого наблюдения кольцевой структуры пространственного спектра шума, возникающей при ММСФ. Схема эксперимента приведена на рис. 4, б, в условиях эксперимента  $B$ -интеграл не превышал единицы. В данном варианте спектральные компоненты поля, отвечающие основному пучку, отсекались зеркалом с небольшим отверстием 5, а шумовые компоненты пучка этим же зеркалом отражались, и с помощью линзы 6 в CCD камере 7 строилось изображение дальней зоны пучка.

Полученные результаты представлены на рис. 6 и находятся в хорошем согласии с теорией.



**Рис. 6.** Двумерное (*а*) и одномерное (*б*) распределения интенсивности компоненты возмущения в дальней зоне при  $B = 1.15$ , при расстоянии от источника шума до нелинейной среды  $l = 135$  см. На вставке показано распределение интенсивности шумовой компоненты при  $B = 0$

В **Заключении** приводится перечень основных результатов, полученных в диссертации.

### Литература

1. Hogan W.J., Jeffrey L., Paisner A. National ignition facility design focuses on optics // Laser Focus World, v.32, №11, p.107, 1996.
2. Miller G.H., Moses E.I., Wuest C.R. The National Ignition Facility: enabling fusion ignition for the 21st century // Nuclear Fusion, v.44, p.S228-S238, 2004.
3. Edwards C.B., Aldis J.C., Allot R., Brummitt P.A., Collier J., Clark R.J., Danson C.N., Day R., Dominey M., Eltham B.C., Frackiewicz A.J., Govans J.A., Gray B.J., Hancock S., Hatton P.E., Hawkes S., Heathcote C.R., Hernandez-Gomez C., Holligan P., Hooker C., Hutchinson M.H., Jackson A.R., Kidd A., Knott T., Lester W.J., Loose J.M., MacPhee A.J., Monk J., Miljus Z.A., Neely D., Neville D.R., Norreys P., Notley M., O'Dell J., Pepler D.A., Pitts M.R., Reason C.J., Robinson D., Rodgers K.J., Rodkiss D.A., Rose D., Rose S.J., Ross I.N., Ryder A.J., Selley M.R., Strange T., Warner G.P., Wellstood R., Wiggins G.N., Winstone T.B., Wright P.N., Wyatt R.W., Wyborn B.E., Ziener C. Vulcan petawatt interaction facility // Proc. SPIE, v.4948, p.444-451, 2003 (25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, ed. Cavailler C., Haddleton G.P., Hugenschmidt M.).
4. Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Ильяев Р.И., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Курунов Р.Ф., Муругов В.М., Сухарев С.А. Канал мощной установки "Луч" для ЛТС с энергией импульса 3.3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая Электроника, v.35, №4, p.299-301, 2005.
5. <http://www.hiper-laser.org/>, "HiPER" Project
6. Kitagawa Y., Sentoku Y., Akamatsu S., Mori M., Tohyama Y., Kodama R., Tanaka K.A., Fujita H., Yoshida H., Matsuo S., Jitsuno T., Kawasaki T.,

- Sakabe S., Nishimura H., Izawa Y., Mima K., Yamanaka T. Progress of fast ignitor studies and Petawatt laser construction at Osaka University // *Physics of plasmas*, v.9, №5, p.2202-2207, 2002.
7. <http://www-lmj.cea.fr/index.htm>, "LMJ" Project.
  8. Pennington D.M., Perry M.D., Stuart B.C., Boyd R.D., Britten J.A., Brown C.G., Herman S.M., Miller J.L., Nguyen H.T., Shore B.W., Tietbohl G.L., Yanovsky V. Petawatt laser system // *Proc. SPIE*, v.3047, p.490-500, 1997 (Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion: Second Annual International Conference ed. Andre M.L.).
  9. Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C., Tietbohl G., Britten J.A., Brown C., Herman S., Golick B., Kartz M., Miller J., Powell H.T., Vergino M., Yvanovsky V. Petawatt lasers pulses // *Optics Letters*, v.24, №3, p.160-162, 1999.
  10. Gaul E., Martinez M., Ditmire T., Barber P., Blakeney J., Douglas S., Hammond D., Henderson W., Ringuette M. A hybrid, OPCPA-Nd:glass petawatt laser // *Proc. of Advanced Solid-State Photonics*. Nara, Japan, January, 27-30, 2008, p.MC3.
  11. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals // *Laser Physics Letters*, v.4, №6, p.421-427, 2007.
  12. Poteomkin A.K., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. Compact 300 J/ 300 GW frequency doubled neodymium glass laser. Part II: Description of Laser setup. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v.45, №7, p.854-862, 2009.
  13. Беспалов В.И., Таланов В.И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейной жидкости // *Письма в ЖЭТФ*, v.3, p.471, 1966.
  14. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн. // Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1997.
  15. Таланов В.И. Распространение коротких электромагнитных импульсов в активной среде // *Известия ВУЗов. Радиофизика*, v.7, №3, p.491-495, 1964.
  16. Franz L.M., Nodvik J.S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier // *Journal of Applied Physics*, v.34, №8, p.2346-2349, 1963.
  17. Крыжановский В.И., Седов Б.М., Серебряков В.А., Цветков А.Д., Яшин В.Е. Формирование пространственной структуры излучения в твердотельных лазерных системах аподизирующими и жесткими апертурами // *Квантовая Электроника*, v.10, №2, p.354-359, 1983.

#### Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Потемкин А.К., Катин Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартыанов М.А., Матвеев А.З., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Компактный лазер на фосфатном стекле с неодимом с энергией 100 Дж и мощностью 100 ГВт для накачки параметрического усилителя чирпированных импульсов // *Квантовая Электроника*, v.35, №4, p.302-310, 2005.
- A2. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers // *Applied Optics*, v.46, №20, p.4423-4430, 2007.
- A3. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals // *Laser Physics Letters*, v.4, №6, p. 421-427, 2007.
- A4. Мартыанов М.А., Потемкин А.К., Шайкин А.А., Хазанов Е.А. Формирование профиля пучка на входе в лазерный усилитель с большой энергией // *Квантовая Электроника*, v.38, №4, p.354-358, 2008.
- A5. Мартыанов М.А., Лучинин Г.А., Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Линейная зависимость временного сдвига усиленного импульса от энергопотребления лазерного усилителя // *Квантовая Электроника*, v.38, №2, p.103-108, 2008.
- A6. Кочеткова М.С., Мартыанов М.А., Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Экспериментальное наблюдение мелкомасштабной самофокусировки пучка в неразрушающем режиме // *Квантовая Электроника*, v.39, №10, p.923-927, 2009.
- A7. Poteomkin A.K., Martyanov M.A., Kochetkova M.S., Khazanov E.A. Compact 300 J/ 300 GW frequency doubled neodymium glass laser. Part I: Limiting power by self-focusing. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v.45, №4, p.336-344, 2009.
- A8. Poteomkin A.K., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. Compact 300 J/ 300 GW frequency doubled neodymium glass laser. Part II: Description of Laser setup. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v.45, №7, p.854-862, 2009.
- A9. Kochetkova M.S., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Khazanov E.A. Propagation of laser radiation in a medium with thermally induced birefringence and cubic nonlinearity // *Optics Express*, v.18, №12, p.12839-12851, 2010.
- B1. Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. Beam input system for Nd:glass amplifier // *Proc. of International Conference on Lasers, Applications, and Technologies* 11-15, May, 2005, p.Lf112.

- B2. Martyanov M.A., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. Beam profiling in 100 J 1 ns Nd:glass laser // Proc. of International Symposium Topical Problem of Nonlinear Wave Physics St.Petersburg - N.Novgorod, 2-9 August, 2005, p.82-83.
- B3. Poteomkin A.K., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Matveev A.Z., Palashov O.V., Shaykin A.A. A 100 J 1 ns Nd:glass laser for optical parametric chirped pulse amplifiers pumping // Proc. of Advanced Solid-State Photonics Vienna, Austria, 6-9 February, 2005, p.TuB42.
- B4. Khazanov E.A., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. Linear dependence between energy efficiency of quantum amplifier and temporal shift of laser pulses // Proc. of XII Conference on Laser Optics. St. Petersburg, 2006, p.ThR1-p49.
- B5. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Shaykin A.A., Zelenogorsky V.V. Transport telescopes and spatial filters for 100J 1ns multistage Nd:glass amplifier // Proc. of XII Conference on Laser Optics. St. Petersburg, 2006,
- B6. Martyanov M.A., Khazanov E.A., Kochetkova M.S., Poteomkin A.K. The experimental investigation of small-scale self-focusing of the high-power laser beam in nondestructive conditions // Proc. SPIE, p.48, 2008 (Physics of Extreme Light (NWP-2), ed.
- B7. Shaykin A., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Kirsanov A., Lozhkarev V., Luchinin G., Mal'shakov A., Martyanov M., Mironov S., Palashov O., Poteomkin A., Sergeev A., Soloviev A., Starodubtsev M., Yakovlev I., Zelenogorsky V. Electron acceleration at Petawatt parametric Laser (PEARL) // Proc. of International Conference of Ultra Intense Lasers (ICUIL 2010). Watkins Glen, New York, USA, 2010,
- B8. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Shaykin A.A., Zelenogorsky V.V. Transport telescopes for 300 J 1 ns multi-cascade Nd:glass amplifier // Proc. of International Conference on High Power Laser Beams. Nizhny Novgorod - Yaroslavl - Nizhny Novgorod, 3-8 July, 2006, p.87.
- B9. Shaykin A.A., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Poteomkin A.K. Tabletop 300 J 1 ns Nd:glass laser // Proc. of International Conference on High Power Laser Beams. Nizhny Novgorod - Yaroslavl - Nizhny Novgorod, 3-8 July, 2006, p.98.
- B10. Kirsanov A.V., Khazanov E.A., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. Pinhole alignment of the spatial filters for 300J 1ns multistage Nd:glass amplifier // Proc. of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/ International Conference on Lasers, Applications, and Technologies. Minsk, Belarus, May 28 - June 1, 2007, p.L05-12.
- B11. Poteomkin A.K., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Shaykin A.A. Tabletop 300J 1ns Nd:glass laser for pumping of a chirped pulse optical parametric amplifier // Proc. of Advanced Solid-State Photonics. Vancouver, British Columbia, Canada, 28-31 January 2007, 2007, p.WD5.
- B12. Poteomkin A.K., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Shaykin A.A. Compact neodymium phosphate glass laser emitting 300J/300GW pulses for pumping of a chirped pulse optical parametric amplifier // Proc. SPIE, v.6610, p.661005-1-661005-11, 2007 (Laser Optics 2006: Solid State Lasers and Nonlinear Frequency Conversion, ed. Ustyugov V.I.).
- B13. Shaykin A.A., Mal'shakov A.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Poteomkin A.K. Tabletop 300J 1ns Nd:glass laser with 3 diffraction-limited beam divergence // Proc. of CLEO/Europe - IQEC 2007. Munich ICM, Germany, 17-22 June 2007, 2007, p.CA6-3-TUE.
- B14. Kochetkova M.S., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Khazanov E.A. Depolarization compensation in the nonlinear medium with induced birefringence and amplification // Proc. of Russian-French-German Laser Symposium-2009. Nizhny Novgorod, Russia, 2009, p.155-156.
- B15. Kochetkova M.S., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Khazanov E.A. Theoretical investigation of negative influence of the cubic nonlinearity and induced birefringence on developing and using contemporary PW lasers systems // Proc. SPIE, v.7721, p.772123-1-772123-11, 2010 (Solid State Lasers and Amplifiers IV, and High-Power Lasers).
- B16. Kochetkova M.S., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Khazanov E.A. Influence of the cubic nonlinearity and induced birefringence on contemporary PW lasers systems // Proc. of Laser Optics - 2010. St. Petersburg, 2010, p. FrR4-41.

## Содержание диссертации

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Система ввода излучения в усилители большой мощности</b>	<b>20</b>
1.1. Принципы формирования профиля пучка	
1.2. Реализация системы ввода излучения в лазере накачки PEARL	
1.3. Выводы	
<b>Глава 2. Пространственные фильтры в мощных лазерных системах</b>	<b>32</b>
2.1. Оптическая схема лазера накачки PEARL	
2.2. Сферические аберрации в реальных линзовых системах и возможность их минимизации	
2.3. Пространственная фильтрация в лазере накачки PEARL	
2.4. Выводы	
<b>Глава 3. Амплитудно-временные искажения (АВИ) в среде, подчиняющейся балансным уравнениям</b>	<b>44</b>
3.1. Теория АВИ: сдвиг максимума колоколообразного импульса	
3.2. Теория АВИ: сдвиг максимума $B$ -интеграла колоколообразного импульса	
3.3. Теория АВИ: сдвиг первого момента импульса произвольной формы	
3.4. Экспериментальное исследование АВИ при усилении в стержнях Nd:YLF в режиме насыщения	
3.5. Выводы	
<b>Глава 4. Способы прямого наблюдения мелкомасштабной самофокусировки (ММСФ) и контроль уровня шума при ММСФ</b>	<b>61</b>
4.1. Теория ММСФ	
4.2. Экспериментальное наблюдение усиленного пространственного спектра при ММСФ по спектру интенсивности поля при переносе изображения источника шума	
4.3. Прямое экспериментальное наблюдение усиленного пространственного спектра при ММСФ	
4.4. Выводы	
<b>Заключение</b>	<b>74</b>
<b>Литература</b>	<b>76</b>

Электронный адрес автора: mam1@appl.sci-  
nnov.ru

МАРТЬЯНОВ Михаил Алексеевич

### ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРОВ НАКАЧКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПЕТАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 2.11.2011.  
Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Заказ № 98(2011)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46