

На правах рукописи

МИРОНОВ Сергей Юрьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ
ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

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

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики (г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н. Хазанов Е.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Власов С.Н.
доктор физико-математических наук Розанов Н.Н.

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова

Защита состоится « » апреля 2011 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики (603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан « » марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор



Ю.В. Чугунов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Применение технологии усиления чирпированных импульсов (CPA, Chirped Pulse Amplification) при создании лазерных комплексов петаваттного уровня мощности [1-4] открыло широкие возможности для экспериментального исследования взаимодействия сверхсильных световых полей с газовыми и твердотельными мишенями [5-8].

Для проведения подобных экспериментов необходимо знать параметры лазерного излучения. Особый интерес представляют задачи по измерению и управлению временными характеристиками сверхмощного лазерного поля, такими как длительность и временной контраст. Под контрастом понимают отношение интенсивности в главном пике к интенсивности на крыльях импульса. Фактически, знание длительности и распределения временного профиля интенсивности важно для определения уровня интенсивности и исключения возможности существенного изменения характеристик мишени предвестниками импульса.

На современном этапе временные параметры сверхмощных лазерных импульсов не могут быть измерены напрямую даже с использованием сверхбыстрых светодиодов и осциллографов. Основные причины связаны с природой лазерных импульсов. Дело в том, что длительность выходного излучения лазерных систем петаваттного уровня мощности составляет десятки, редко сотни, фемтосекунд, а временное разрешение регистрирующей аппаратуры не достигает пикосекундного уровня. Для измерения временного контраста разрешение по времени не столь существенно, но зато требуется огромный динамический диапазон. Например, для экспериментов по взаимодействию экстремального света с твердотельными мишенями критическое значение интенсивности предимпульса определяется порогом образования плазмы и составляет около 10^{10} Вт/см². На сегодняшний момент мировой рекорд измеренной пиковой интенсивности лазерного импульса составляет 10^{22} Вт/см² [9]. Следовательно, даже для регистрации профиля интенсивности таких импульсов на уровне близком к критическому значению динамический диапазон прибора должен превышать 10^{12} .

В связи с указанными выше причинами широкое развитие получили методики определения временных характеристик ультракоротких лазерных импульсов из косвенных измерений. Как правило, для определения длительности сверхкоротких импульсов измеряют автокорреляционную функцию (АКФ) второго порядка интенсивности [10, 11], а для измерения временного профиля интенсивности АКФ третьего порядка [10, 12-14]. АКФ второго порядка, в отличие от третьего, является симметричной и не позволяет отличать предимпульсы от постимпульсов. Важной особенностью лазерных систем петаваттного уровня мощности является их разовый режим работы, что не позволяет применять для измерений традиционные сканирующие корреляторы поля и интенсивности. Современные одноимпульсные измерители вре-

менных параметров основаны на широко известном принципе трансформации временного распределения интенсивности в пространственный профиль, который легко регистрируется с помощью ССD-камеры.

Временной профиль интенсивности сверхмощных лазерных импульсов имеет достаточно сложную структуру, которая непосредственно связана с методом генерации и усиления оптического излучения. В прикладных задачах часто возникает необходимость корректировки временного профиля. Процесс генерации второй гармоники (ГВГ) может быть использован как в приборах для измерения временных параметров, так и непосредственно для управления временными характеристиками фемтосекундных лазерных импульсов. В последнем случае длительность импульса на второй гармонике может быть существенно короче, а его контраст существенно больше, чем у импульса на первой гармонике.

Процесс ГВГ был открыт в 1961 году [15], однако и в настоящее время представляет интерес с теоретической и экспериментальной точки зрения. Дело в том, что преобразование сверхмощного ультракороткого лазерного излучения во вторую гармонику требует дополнительного учета влияния дисперсионных эффектов и эффектов, обусловленных кубической поляризацией. Вопрос о влиянии дисперсионных эффектов на процесс генерации второй гармоники достаточно хорошо изучен и рассмотрен в литературе [16, 17]. Эти эффекты существенно зависят как от свойств удвоителя частоты, так и от длительности и центральной длины волны импульса первой гармоники. Кубическая поляризация приводит к ряду эффектов, в основе которых лежит накопление нелинейной фазы, называемой интегралом распада или В-интегралом [17, 18]. Во-первых, нелинейная фаза приводит к срыву фазового синхронизма и снижению эффективности преобразования. Влияние эффекта может быть скомпенсировано за счет отклонения направления распространения сильных волн от угла фазового синхронизма. Во-вторых, нелинейная фаза способствует расширению спектра и модуляции спектральной фазы второй гармоники. Компенсация нелинейного чирпа позволяет дополнительно сократить длительность импульса. В-третьих, накопленная нелинейная фаза способствует развитию мелкомасштабной самофокусировки в нелинейном элементе удвоителя частоты как от внешних, так и от внутренних источников шума.

Цель настоящей работы заключается в разработке методов управления и измерения временных параметров выходного излучения сверхмощных фемтосекундных лазеров с помощью ГВГ. В частности,

1. Теоретическое исследование возможности использования ГВГ для увеличения временного контраста и сокращения длительности интенсивных лазерных импульсов.
2. Разработка теоретической модели развития неустойчивости плоских монохроматических волн в средах, обладающих одновременно квадратичной и кубической нелинейностями.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности самофильтрации пространственных шумов у интенсивных лазерных пучков.
4. Изучение влияния статистических характеристик неровностей поверхности и вариаций показателя преломления в объеме нелинейного элемента на генерацию и усиление пространственных шумов в процессе ГВГ интенсивного лазерного поля.
5. Создание моделей физических процессов, применяемых в приборах для измерения временного контраста стартовой части фемтосекундного лазерного комплекса [19]. Проведение экспериментов по измерению временного профиля интенсивности.

Новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены оптимальные параметры нелинейных кристаллов KDP для высокоэффективной ГВГ лазерного поля с центральными длинами волн 800 нм (лазеры на Ti:сапфире) и 910 нм (лазеры на параметрическом усилении в кристалле DKDP), в диапазоне длительностей $20 \div 70$ фс и интенсивностей $0.3 \div 5$ ТВт/см².
2. В экспериментах получена высокоэффективная (около 70%) ГВГ лазерного поля при средней интенсивности порядка 1 ТВт/см² (при пиковой до $3 \div 4$ ТВт/см²) и центральной длины волны 910 нм.
3. Разработана методика использования процесса ГВГ совместно с корректировкой спектральной фазы излучения для контролируемого сокращения длительности сверхмощных лазерных импульсов.
4. Предложен и экспериментально подтвержден принцип самофильтрации интенсивного лазерного излучения, позволяющий исключить пространственные гармонические возмущения лазерного пучка, обладающие максимальным коэффициентом усиления, путем увеличения расстояния между источником шума (последним зеркалом) и нелинейным оптическим элементом. Принцип начинает работать для лазерного излучения со средней интенсивностью около 1 ТВт/см² и выше.
5. Измерен временной контраст излучения стартовой части фемтосекундного петаваттного лазерного комплекса с использованием коррелятора третьего порядка интенсивности с динамическим диапазоном 10^8 .

Научное и практическое значение

1. Смоделирован процесс генерации второй гармоники в условиях существенного влияния дисперсионных эффектов и эффектов, обусловленных кубической поляризацией среды. Полученные результаты показывают перспективность использования ГВГ для управления параметрами сверхмощных лазерных импульсов.
2. Физическая модель развития линейной стадии мелкомасштабной самофокусировки в процессе генерации второй гармоники позволила пред-

ложить принцип самофльтрации пространственных шумов в лазерных пучках с интенсивностью около ТВт/см^2 . Принцип работает даже при В-интегралах порядка 10 и может найти широкое применение в целом ряде приложений.

3. Использование одноимпульсного коррелятора третьего порядка интенсивности дало возможность измерить временной контраст стартовой части фемтосекундного лазерного комплекса с динамическим диапазоном 10^8 .

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях Frontiers in Optics 2009: Laser Science XXV, Photonics Europe 2010, Laser Optics 2006, 2008, 2010, International Conference on High Power Laser Beams 2006, Frontiers of Nonlinear Physics 2007, Nonlinear Wave Phenomena 2008, Third Russian – French Laser Physics Workshop for Young Scientists 2008, First International Conference "Light at Extreme Intensities" LEI'09, International Committee on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL) Conference 2010, семинарах ИПФ РАН, результаты опубликованы в статьях, представлены в главе книги "Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission", а также в сборниках трудов конференций [А6-А23].

Результаты, изложенные в диссертации, отмечены поощрительными призами на конкурсах молодых ученых ИПФ РАН в 2008, 2009 годах, а также на XII и XIV Нижегородских сессиях молодых ученых.

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Общий объем работы составил 121 страницу, 65 рисунков, 65 ссылок.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обосновывается актуальность работы, выполнен обзор литературы по теме диссертации, сформулированы цели, кратко излагается содержание диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена исследованию вопросов генерации второй гармоники сверхмощного фемтосекундного излучения при сильном влиянии кубической поляризации среды и дисперсионных эффектов.

В параграфе 1.1 исследовано влияние эффектов группового разбегания и расплывания сверхкоротких импульсов на процесс удвоения частоты. На примере кристалла DKDP показана возможность управления дисперсионными свойствами с целью повышения эффективности преобразования в излучение второй гармоники.

Параграф 1.2 посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию влияния кубической поляризации среды на квазистатический режим генерации второй гармоники. В рамках модели плоских монохроматических волн процесс удвоения частоты описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dA_1}{dz} &= -i \cdot \beta \cdot A_2 \cdot A_1^* \cdot e^{-i\Delta k \cdot z} - i \cdot \gamma_{11} \cdot |A_1|^2 \cdot A_1 - i \cdot \gamma_{12} \cdot |A_2|^2 \cdot A_1, \\ \frac{dA_2}{dz} &= -i \cdot \beta \cdot A_1^2 \cdot e^{i\Delta k \cdot z} - i \cdot \gamma_{21} \cdot |A_1|^2 \cdot A_2 - i \cdot \gamma_{22} \cdot |A_2|^2 \cdot A_2,\end{aligned}$$

где A_1 и A_2 – комплексные амплитуды напряженностей полей первой и второй гармоник; z – продольная координата распространения волн; $\Delta k = k_2 - 2 \cdot k_1$ – линейная фазовая расстройка волновых векторов; β , γ_{ij} ($i, j = 1, 2$) – коэффициенты нелинейной связи волн второго и третьего порядка [18]. Слагаемые с коэффициентами γ_{11} и γ_{22} ответственны за самовоздействие волн первой и второй гармоник, а слагаемые с γ_{12} и γ_{21} – за кросс-воздействие. Кубическая поляризация среды приводит к дополнительному накоплению нелинейной фазы у волн первой и второй гармоник, что приводит к срыву фазового синхронизма и снижению эффективности преобразования. В рамках рассматриваемой модели показано, что изменение направления распространения сильных волн от направления фазового синхронизма на угол $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \frac{-\Delta n}{n_1^3(n_1^{-2} - n_o^{-2})} \sqrt{\frac{n_1^{-2} - n_o^{-2}}{n_e^{-2} - n_1^{-2}}}$$

позволяет полностью скомпенсировать влияние этого эффекта. Здесь n_1 показатель преломления обыкновенной волны первой гармоники, n_o , n_e – главные значения показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн второй гармоники, $\Delta n = \frac{\lambda A_{10}^2 \cdot (2\gamma_{11} + 2\gamma_{12} - \gamma_{21} - \gamma_{22})}{8\pi}$. Отметим, что добавка

к углу синхронизма не зависит от квадратичной нелинейности и длины нелинейного элемента и прямо пропорциональна входной интенсивности.

Указанная возможность повышения эффективности преобразования получила экспериментальное подтверждение. На Рис. 1 представлены зависимости эффективности преобразования во ВГ от энергии входного излучения при различных положениях нелинейного элемента из KDP толщиной 0.6 мм. Внешний угол отстройки от положения оптимального распространения указан в мрад. Параметры излучения были следующие: диаметр пучка 4.3 мм, длительность импульса 65 фс, диапазон энергий 1–18 мДж, и центральная длина волны 910 нм. Среднее значение интенсивности для энергии 18 мДж соответствует 2 ТВт/см².

Согласно Рис. 1 положение нелинейного элемента $\Delta\theta = 0$ мрад является оптимальным для преобразования во ВГ излучения с малыми (2–4 мДж) и средними (10 мДж) энергиями. Однако при больших энергиях (около 18 мДж) оптимальное положение нелинейного элемента является $\Delta\theta = -3.1$ мрад. В этом положении происходит компенсация нелинейной фазы приобретенной волнами по мере распространения в нелинейном элементе. Очевидным становится различие в поведении эффективности преобразования при $\Delta\theta = -6.2$ мрад и $\Delta\theta = 6.2$ мрад. В первом случае отклонение нелинейного эле-

мента приводит к повышению эффективности преобразования (поскольку происходит компенсация нелинейной фазы), а в другом, к снижению т.к. волновая расстройка только увеличивается. Указанный эффект является первым экспериментальным подтверждением развитой теории ГВГ сверхсильным лазерным полем в средах с квадратичной и кубической нелинейностью.

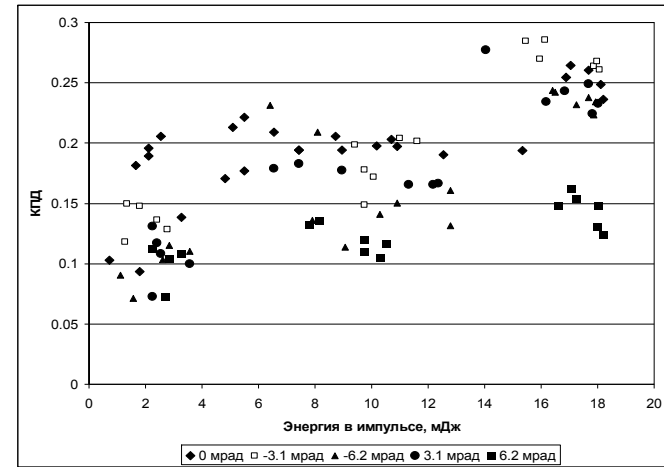


Рис. 1. Зависимость эффективности преобразования от энергии входного излучения при различных положениях нелинейного элемента. Указан внешний угол отстройки нелинейного элемента от положения, соответствующего фазовому синхронизму.

Относительно невысокий уровень эффективности преобразования в этой серии экспериментов связан с плохим качеством ближней зоны пучка первой гармоники.

Кристалл толщиной 1 мм использовался в экспериментальной серии, в которой средняя интенсивность изменялась в диапазоне $0.13 \div 0.98 \text{ ТВт/см}^2$, а пиковая $0.38 \div 2.9 \text{ ТВт/см}^2$. Зависимость эффективности преобразования от энергии и средней интенсивности входного излучения представлена на Рис. 2. Незначительное различие между теоретическими и экспериментальными данными может быть связано с рядом причин. Основные из них – это изменение ближней зоны пучка от импульса к импульсу при увеличении энергии, незначительные флуктуации длительности, а также возможное наличие не-сжатой в компрессоре остаточной фазы у излучения первой гармоники.

Для уменьшения влияния эффектов кубической поляризации среды при средней интенсивности порядка 1 ТВт/см^2 был использован нелинейный элемент из KDP толщиной 0.5 мм. Эффективность преобразования при различных отстройках от угла оптимального преобразования (не путать с углом синхронизма) представлена на Рис. 3. В экспериментальной серии средняя интенсивность изменялась в диапазоне $0.2 \div 1 \text{ ТВт/см}^2$, а пиковая

0.8÷3.8 ГВт/см². Теоретические зависимости получены при вычислении эффективности преобразования для реального распределения интенсивности пучка первой гармоники в ближней зоне, длительность импульса и положение центра спектра предполагались фиксированными: 70 фс и 910 нм соответственно.

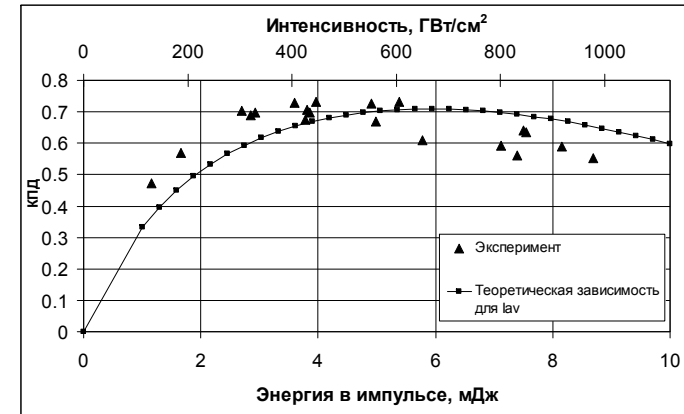


Рис. 2. Зависимость эффективности преобразования от энергии и средней интенсивности входного излучения. Теоретическая зависимость получена для пучка с плоским амплитудным фронтом и интенсивностью равной средней интенсивности лазерного пучка в эксперименте.

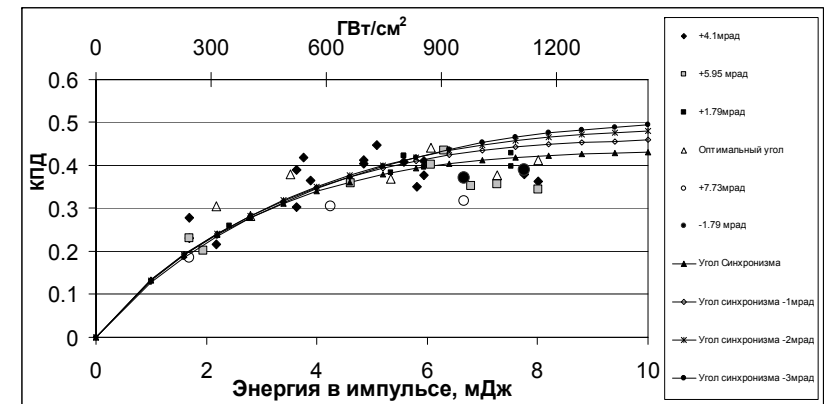


Рис. 3. Теоретические (соединенные линиями) и экспериментальные зависимости эффективности преобразования в излучение второй гармоники в нелинейном элементе из KDP толщиной 0.5 мм.

В результате выполнения экспериментов по генерации второй гармоники интенсивным лазерным полем достигнуто 70% преобразование в нелинейном

элементе из кристалла KDP толщиной 1 мм при средней по сечению пучка интенсивности 0.6 ТВт/см^2 (1.8 ТВт/см^2 пиковая), а в нелинейном элементе толщиной 0.5 мм получено преобразование около 50% при средней интенсивности 1.0 ТВт/см^2 (3.8 ТВт/см^2 пиковой). Экспериментально показана возможность повышения эффективности преобразования в излучение второй гармоники за счет отклонения от угла фазового синхронизма.

В параграфе 1.3 обсуждается возможность генерации второй гармоники интенсивного излучения с длительностью 20 фс. Показано существенное отличие дисперсионных характеристик кристалла KDP для излучений с центральными длинами волн 910 нм и 800 нм. Рассмотрена возможность использования процесса генерации второй гармоники не только для повышения временного контраста импульсов, но и для дополнительного сокращения длительности сверхмощного излучения за счет корректировки квадратичной спектральной фазы. Показано, что излучение длительностью 20 фс с центральной длиной волны 910 нм (800 нм) и интенсивностью 5 ТВт/см^2 после преобразования во вторую гармонику в нелинейном элементе толщиной 0.4 мм (0.25 мм) может быть скомпрессировано до длительности 8 фс (12 фс).

Вторая глава настоящей работы посвящена исследованию явления мелкомасштабной самофокусировки (ММСФ) интенсивного излучения в средах с квадратичной и кубической нелинейностью, а также разработке методики ее подавления. Физическая модель развития ММСФ в анизотропной среде при наличии квадратичной поляризуемости является обобщением классической задачи о неустойчивости плоской монохроматической волны в среде с кубической нелинейностью [20, 21].

В параграфе 2.1 получены линеаризованные уравнения для амплитуд гармонических возмущений волн первой и второй гармоники. Установлена и объяснена анизотропная структура коэффициентов усиления мелкомасштабных возмущений. Разработан метод вычисления допустимого уровня шума в пучке первой гармоники. Решение задачи необходимо для исключения возможности пробоя в процессе удвоения частоты интенсивным лазерным полем. Критический уровень шума по мощности в пучке первой гармоники для удвоения частоты излучения с интенсивностью 4.5 ТВт/см^2 в нелинейном элементе KDP толщиной 0.5 мм уровень шума не должен превышать 0.04 %.

В параграфе 2.2 рассмотрен принцип самофильтрации пространственных шумов в лазерных пучках с интенсивностью несколько ТВт/см^2 . Основная идея принципа заключается в использовании свободного пространства между источником шума (как правило, это дифракционная решетка или зеркало после компрессора) и нелинейным элементом для исключения подверженных наибольшему усилению гармонических возмущений пучка из области сильного поля. Принципиальная схема представлена на Рис. 4.

Принцип был объяснен теоретически и проверен экспериментально при средних по пучку значениях V -интеграла около 10. В эксперименте, лазерное излучение со средней интенсивностью около ТВт/см^2 отражалось от источни-

ка шума (диэлектрического зеркала) и направлялось в стеклянную пластину толщиной 4 мм. Расстояние между источником шума и пластиной изменялось, и измерялся коэффициент поглощения стекла в области, где проходил лазерный пучок. Квадрат отношения угла, при котором происходит наибольшее усиление шума (вычисленный для средней интенсивности) к внутреннему углу видения нелинейного элемента был принят как параметр фильтрации пучка (среда изотропная). На Рис. 5 представлен график зависимости коэффициента поглощения R ($R=1-T_r/T_{пр}$, где T_r , $T_{пр}$ – коэффициенты пропускания облученного и необлученного образца) от параметра фильтрации. Как видно из рисунка, при угле видения меньшем угла максимального инкремента, процесс ММСФ идет с гораздо худшей эффективностью. На этом же графике приведены точки для образца К-8, шероховатость поверхности которого в 20 раз больше. Для этого образца ММСФ значительно сильнее из-за шумов, вызванных рассеянием на поверхности.

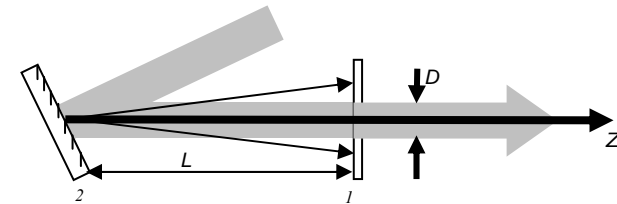


Рис. 4. Принципиальная схема самофильтрации излучения. I – нелинейный элемент (стеклянная пластина, кристалл для ГВГ и пр.), 2 – последнее зеркало (источник шума), L – длина, на которой происходит самофильтрация.

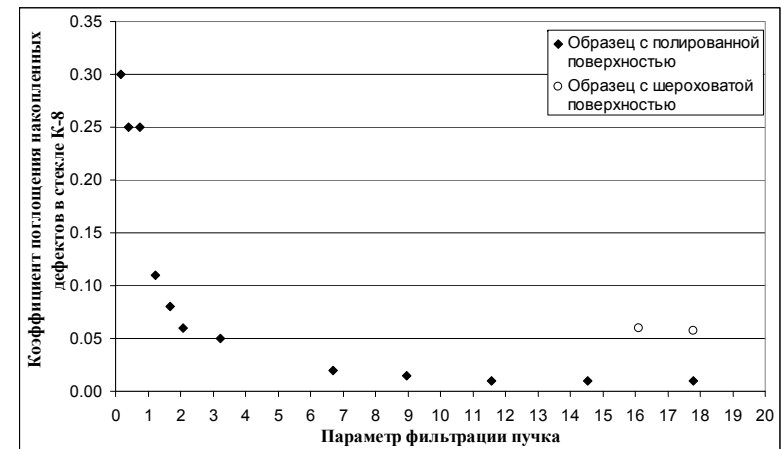


Рис. 5 Зависимость коэффициента поглощения от параметра «самофильтрации» пучка.

Параграф 2.3 посвящен вопросам влияния статистических характеристик поверхности и неоднородной составляющей показателя преломления нелинейного элемента на генерацию и последующее усиление пространственных шумов в процессе удвоения частоты лазерным излучением с интенсивностью несколько $\text{ТВт}/\text{см}^2$ [22-24]. Получены линеаризованные уравнения, описывающие процесс. Найдено выражение для мощности пространственного шума на выходе кристалла в зависимости от шероховатости поверхности и неоднородности показателя преломления. Экспериментально исследовано влияние шероховатости поверхности на генерацию шума в изотропной среде. Моделирование (подтвержденное экспериментом) показало, что для оптического качества нелинейных элементов, рассмотренные эффекты, являются несущественными в процессе высокоэффективной ГВГ в нелинейном элементе толщиной 0.5 мм.

Третья глава настоящей работы посвящена разработке приборов, применяемых для измерения временных параметров интенсивных лазерных импульсов.

В параграфе 3.1 представлена оптическая схема и принцип работы одноимпульсного коррелятора третьего порядка интенсивности.

В схеме реализована неколлинеарная генерация третьей гармоники при взаимодействии тестируемого излучения и его второй гармоники в нелинейном элементе из кристалла ВВО толщиной 90 мкм. Детально рассмотрена методика трансформации временного профиля интенсивности излучения в пространственное распределение сигнала суммарной частоты. Доказано, что измеряемое пространственное распределение третьей гармоники представляет собой корреляционную функцию третьего порядка интенсивности. Показано несущественное различие между корреляционной функцией третьего порядка и временным распределением интенсивности.

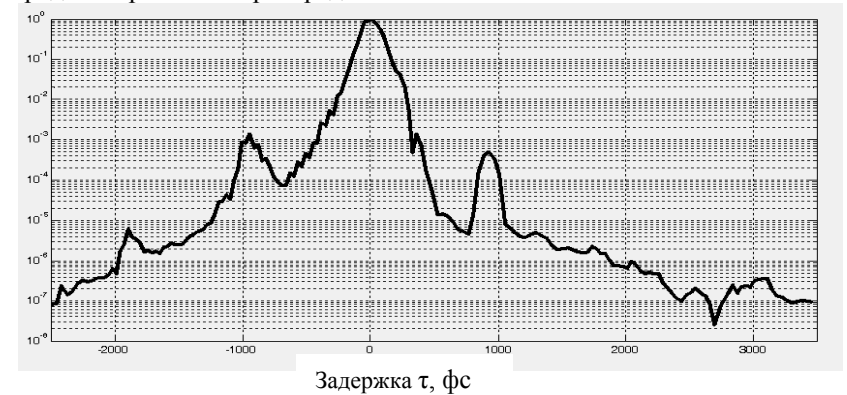


Рис. 6. Временной профиль интенсивности стартовой части лазерного комплекса: график ближнего контраста.

На Рис. 6 представлены результаты измерений временного контраста стартовой части петаваттного фемтосекундного лазерного комплекса. Ближний контраст импульса (± 1 пс) составил 10^4 , что связано с нескомпенсированной остаточной дисперсией высших порядков в импульсе. Дополнительные пики при задержке $\tau = \pm 900$ фс на временной панораме обусловлены переотражениями в нелинейном элементе из ВВО. Дальний контраст (при 20 пс) не хуже 10^8 относительно главного максимума. Временной профиль не обладает явно выраженным фоном. Следовательно, шум усиленной люминесценции параметрических усилителей лазерного комплекса не превышает уровня 10^{-8} .

Параграф 3.2 посвящен измерителю временного профиля интенсивности, в основе работы которого лежит процесс параметрического усиления. Представлен сравнительный анализ нелинейных элементов из кристаллов KDP и ВВО, применяемых для реализации неколлинеарного взаимодействия тестируемого излучения и его второй гармоники в процессе параметрического усиления. Показано, что взаимодействие $oe-e$ – типа в нелинейном элементе ВВО является наиболее оптимальным с точки зрения спектральной полосы для излучения с центральной длиной волны 910 нм. В параграфе представлены результаты измерений временного профиля интенсивности, полученные с помощью прототипа измерителя контраста на основе параметрического усиления.

В **Заключении** сформулированы результаты, полученные в настоящей работе.

Основные результаты диссертации

1. Аналитически показано, что при генерации второй гармоники интенсивной монохроматической волны влияние кубической поляризации среды может быть скомпенсировано полностью за счет отклонения распространения излучения от угла точного фазового синхронизма в сторону ближе к оптической оси. Величина этой угловой отстройки линейно зависит от интенсивности излучения первой гармоники и не зависит от толщины нелинейного элемента и его квадратичной поляризуемости. Экспериментально продемонстрировано, что для различного уровня интенсивности импульсов первой гармоники оптимальное преобразование происходит при разных положениях кристалла.

2. Получена высокоэффективная (70%) генерация второй гармоники в кристалле KDP толщиной 1 мм при значении В-интеграла 4.2 и пиковой интенсивности 1.8 ТВт/см^2 , т.е. продемонстрирована возможность преобразования во вторую гармонику выходного излучения петаваттных лазеров.

3. Показано существенное преимущество петаваттных лазеров на основе параметрического усиления в кристалле DKDP (центральная длина волны $\lambda=910$ нм) по отношению к лазерам на Ti:сапфире ($\lambda=800$ нм) с точки зрения

высокоэффективного преобразования излучения во вторую гармонику в кристалле KDP. Это преимущество обусловлено дисперсионными свойствами кристалла KDP.

4. Предложен способ укорочения петаваттных фемтосекундных импульсов за счет преобразования во вторую гармонику и последующей линейной фазовой модуляции с помощью дисперсионных многослойных диэлектрических зеркал. Теоретически показано, что излучение длительностью 20 фс с центральной длиной волны 910 нм (800 нм) и интенсивностью 5 ТВт/см² после преобразования во вторую гармонику в кристалле KDP толщиной 0.4 мм (0.25 мм) может быть скомпрессировано до длительности 8 фс (12 фс).

5. Для лазерного излучения с интенсивностью порядка ТВт/см² и более предложен, теоретически обоснован и экспериментально проверен (при В-интеграле равном 10) способ подавления мелкомасштабной самофокусировки за счет самофилтрации пространственных шумов при распространении пучка в свободном пространстве.

6. Разработана линеаризованная модель мелкомасштабной самофокусировки с учетом пространственных шумов, возникающих в пучке из-за шероховатости поверхности и неоднородностей показателя преломления нелинейного элемента. На основе модели показано и экспериментально проверено, что при стандартном оптическом качестве нелинейного элемента влияние этих шумов на мелкомасштабную самофокусировку вплоть до значений В-интеграла 10 не существенно.

7. С помощью одноимпульсного кросс-коррелятора измерен временной контраст стартовой (тераваттной) части фемтосекундного лазерного комплекса "PEARL" с динамическим диапазоном 10⁸. Уровень ближнего контраста (при временной задержке 1 пс) составляет 10⁴, а дальнего (при задержке > 20 пс) не хуже 10⁸ относительно главного максимума, т.е. шум усиленной спонтанной люминесценции параметрических усилителей стартовой части не превышает уровня 10⁻⁸.

Литература

1. Aoyama M., Yamakawa K., Akahane Y., Ma J., Inoue N., Ueda H., Kiriyama H. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser // Optics Letters, v. 28, №17, p.1594-1596, 2003.

2. Bank S. W., Rousseau P., Planchon T. A., Chvykov V., Kalintchenko G., Maksimchuk A., G.A. M., Yanovsky a.V. Generation and characterization of the highest laser intensities (10²² W/cm²) // Optics Letters, v. 29, p. 2837-2839, 2004.

3. Kitagawa Y., Fujita H., Kodama R., Yoshida H., Matsuo S., Jitsuno T., Kawasaki T., Kitamura H., Kanabe T., Sakabe S., Shigemori K., Miyanaga N., Izawa Y. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor // IEEE Journal of Quantum Electronics, v.40, №3, p.281-293, 2004.

4. Gaul E., Martinez M., Blakeney J., Jochmann A., Ringuette M., Hammond D., Borger T., Escamilla R., Douglas S., Henderson W., Dyer G., Erlandson A.,

Cross R., Caird J., Ebberts C.A., Ditmire T. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier // APPLIED OPTICS, v.49, №9, p.1676-1681, 2010.

5. Tajima T., Dawson J.M. Laser electron accelerator // Physical Review Letters, v.43, p.267-270, 1979.

6. Faure J., et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams. // Nature, v.431, p. 541-544, 2004 .

7. Mangles S.P.D.e.a. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions // Nature, v.431, p.535-538 2004.

8. Geddes C., al. G.R.e. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding // Nature, v.431, p.538-541, 2004.

9. Bahk S.W., Rousseau P., Planchon T.A., Chvykov V., Kalintchenko G., Maksimchuk A., Mourou G.A., Yanovsky V. Characterization of focal field formed by a large numerical aperture paraboloidal mirror and generation of ultra-high intensity (10^{22} W/cm²). // Applied Physics B, v.80, p.823-832, 2005.

10. Divall E.J., Ross I.N. High dynamic range contrast measurements by use of an optical parametric amplifier correlator // Optics Letters, v.29, №19, p.2273-2275, 2004.

11. Braun A., Rudd J.V., Cheng H., Mourou G., Kopf D., Jung I.D., Weingarten K.J., Keller U. Characterization of short-pulse oscillators by means of a high-dynamic-range autocorrelation measurement // Optics Letters, v.20, №18, p.1889-1891, 1995.

12. Tavella F., Schmid K., Ishii N., Veisz L., F. K. High-dynamic range pulse-contrast measurements of a broadband optical parametric chirped-pulse amplifier // Appl. Phys. B v.81, p.753-756, 2005.

13. Osvay K., Ross I., Lister J., Hooker C. High dynamic range measurement of temporal shape and contrast of ultrashort UV pulses // Appl. Phys. B, v.69, p.19-23, 1999.

14. Белинский А.В., Силантьева И.А., Телегин Л.С., Чиркин А.С. Об измерении корреляционной функции интенсивности третьего порядка световых импульсов // Письма в ЖТФ, v.10, № 20, С.1258-1262, 1984.

15. Franken P.A., Hill A.E., Peters C.W., Weinreigh G.W. Generation of Optical Harmonics // Physical Review Letters, v.7, 1961.

16. Сухоруков А.П. Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. // М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

17. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. // М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

18. Разумихина Т.Б., Телегин Л.С., Холодных А.И., Чиркин А.С. Трехчастотные взаимодействия интенсивных световых волн в средах с квадратичной и кубичной нелинейностями // Квантовая Электроника, v.11, №10, С.2026-2035, 1984.

19. 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.

20. Беспалов В.И., Таланов В.И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейной жидкости // *Письма в ЖЭТФ*, v.3, p.471, 1966.

21. Розанов Н.Н., Смирнов В.А. Мелкомасштабная самофокусировка лазерного излучения в усилительных системах // *Квантовая Электроника*, v.7, №2, С.410-418, 1980.

22. Беспалов В.И., Литвак А.Г., Таланов В.И. Самовоздействие электромагнитных волн в кубичных изотропных средах // *Тр. 2-го Всесоюз. симп. по нелинейной оптике*, С. 428 - 464, 1968.

23. Беннет Д., Маттсон Л. Шероховатость поверхности и рассеяние. / Перевод с англ. Вашингтон: Оптическое общество Америки, 1993.

24. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1997.

Основные публикации автора по теме диссертации:

A1. Гинзбург В. Н., Диденко Н. В., Конященко А. В., Ложкарев В. В., Лучинин Г. А., Луценко А.П., Миронов С. Ю., Хазанов Е. А., Яковлев И. В. Коррелятор третьего порядка для измерений временного профиля интенсивности излучения петаваттного лазерного комплекса // *Квантовая электроника* 38(11), 1027-1032, 2008.

A2. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., and Khazanov E. A. High-efficiency second-harmonic generation of superintense ultrashort laser pulses // *Applied Optics* 48(11), 2051-2057 (2009).

A3. Гинзбург В. Н., Ложкарев В. В., Миронов С. Ю., Потемкин А. К., Хазанов Е. А. Влияние мелкомасштабной самофокусировки на генерацию второй гармоники сверхсильным лазерным полем // *Квантовая электроника* 40(6), 503–508, 2010.

A4. Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., Yakovlev I., Luchinin G., Shaykin A., Khazanov E., Babin A., Novikov E., Fadeev S., Sergeev A., and Mourou G. Second harmonic generation of super powerful femtosecond pulses at strong influence of cubic nonlinearity // *Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, Published 21 October, 2010.

A5. S. Y. Mironov, V. V. Lozhkarev, V. N. Ginzburg, I. V. Yakovlev, G. A. Luchinin, E. A. Khazanov, A. M. Sergeev, and G. Mourou, "Second Harmonic Generation under Strong Influence of Dispersion and Cubic Nonlinearity Effects," in *Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission*, p. 189-204, InTech, Rijeka, Croatia, 2010.

A6. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., Yakovlev I. V., Luchinin G. A., Khazanov E. A., Sergeev A. M., and Mourou G. Temporal intensity contrast ratio enhancement of petawatt level laser pulses based on second harmonic generation // *Proc. SPIE Vol. 7721, 77211R*, May. 18, 2010.

A7. Khazanov E., Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., and Mourou G., Shortening Petawatt-Level Laser Pulses Based on Self-Phase Modulation // International Committee on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL) Conference, 2010.

A8. Mironov S. Y., Khazanov E. A., and Lozhkarev V. V. High-efficiency second harmonic generation of laser pulses with petawatt level peak power // Physics of Extreme Light (NWP-2), Nizhny Novgorod, Russia, p. 52, 2008.

A9. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., Khazanov E. A., and Mourou G. Small-scale self-focusing suppression at intense laser beams in mediums with quadratic and cubic nonlinearity // High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS), 2011.

A10. Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., Yakovlev I., Luchinin G., Khazanov E., Sergeev A., and Mourou G. Second harmonic generation at large B-integral for ELI-class laser pulses // presented at the First International Conference "Light at Extreme Intensities" LEI'09, Brasov, Romania, October 16-21, 2009.

A11. Lozhkarev V. V., Didenko N. V., Ginzburg V. N., Konyashchenko A. V., Luchinin G. A., Lutsenko A., Mironov S. Y., and Yakovlev I. V. Single-shot third-order autocorrelator for high contrast measurement // International Conference on High Power Laser Beams, Nizhny Novgorod - Yaroslavl - Nizhny Novgorod, 3-8 July, 2006.

A12. Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., Luchinin G. A., Mironov S. Y., Yakovlev I. V., Lutsenko A., Didenko N. V., and Konyashchenko A. V. Measurement of eight orders of magnitude intensity contrast ratio in 1TW OPCPA laser // XII Conference on Laser Optics, St. Petersburg, 2006.

A13. Mironov S. Y., Ginzburg V. N., Lozhkarev V. V., Luchinin G. A., Lutsenko A., and Yakovlev I. V. High-dynamic-range measurement of intensity contrast of 1PW femtosecond laser pulse // Frontiers of Nonlinear Physics, Nizhny Novgorod – Saratov - Nizhny Novgorod, p.108, 2007.

A14. Миронов С. Ю., Ложкарев В. В., Гинзбург, В. Н. Оптимизация измерителя контраста фемтосекундных лазерных импульсов на основе параметрического усиления // 12-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 2007.

A15. Миронов С. Ю., Ложкарев В. В., Луценко А. П., и Гинзбург В. Н. Коррелятор третьего порядка для измерений временного профиля интенсивности излучения петаваттного лазерного комплекса // XIV научная школа "Нелинейные волны - 2008", С.113, Нижний Новгород, 2008.

A16. Миронов С. Ю., Ложкарев В. В., Гинзбург В. Н. Измерители временного профиля интенсивности с большим динамическим диапазоном // XIII Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), 20-25 апреля 2008, Нижний Новгород, С. 118, 2008.

A17. Mironov S. Y., Ginzburg V. N., Khazanov E. A., and Lozhkarev V. V. High-efficiency second harmonic generation of super-powerful femtosecond laser pulses in media with quadratic and cubic nonlinearity // Third Russian-French La-

ser Physics Workshop for Young Scientists, St. Petersburg, Russia, September, 22-27, p.19-20, 2008.

A18. Mironov S. Y., Ginzburg V. N., and Lozhkarev V. V. Optical parametric amplifier correlator for high-dynamic range measurement of intensity contrast ratio // Laser Optics 2008, St. Petersburg, Russia, June 23-28, 2008.

A19. Миронов С.Ю., Ложкарев В.В., Гинзбург В.Н., Хазанов Е.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники сверхсильными ультракороткими лазерными импульсами // XIV Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, С. 44, 2009.

A20. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., and Khazanov E. A. Highly Efficient Second Harmonic Generation of Super Strong Femtosecond Laser Pulses // in Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV, (San Jose, USA, 2009).

A21. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., Poteomkin A. K., and Khazanov E. A. Suppression of small-scale self-focusing of super intense laser beams // XIII Conference on Laser Optics, 2010 St. Petersburg, 2010.

A22. Миронов С. Ю., Гинзбург В. Н., Ложкарев В. В., Лучинин Г. А., Сергеев А. М., Хазанов Е. А., Шайкин А. А., Яковлев И. В. Генерация второй гармоники сверхмощного фемтосекундного излучения при сильном влиянии кубичной нелинейности // XV научная школа “Нелинейные волны -2010”, “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики” – конференция молодых ученых, 2010.

A23. Миронов С. Ю., Ложкарев В. В., Гинзбург В. Н. Расчет параметров нелинейных элементов в приборах для диагностики длительности и контраста фемтосекундных лазерных импульсов // ННГУ “ВШОПФ 2006”, 2006.

МИРОНОВ Сергей Юрьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

А в т о р е ф е р а т

Ответственный за выпуск
С.Ю. Миронов

Подписано к печати 21.03.2011 г.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 26(2011).

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