

На правах рукописи

Сырцов Владимир Сергеевич

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫМ
ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В
РЕЖИМЕ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Гордиенко Вячеслав Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Акципетров Олег Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор Чекалин Сергей Васильевич

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится 24 мая 2007 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.0001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « » апреля 2007 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 501.001.31

кандидат физ.-мат. наук, доцент

Т.М. Ильинова.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Процессы, происходящие в прозрачных твердотельных средах при воздействии на них низкоэнергетического острогофокусированного фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью, превышающей порог плазмообразования вещества ($\sim 10^{13}$ Вт/см²), в настоящее время активно исследуются, как в плане фундаментальных исследований, так и в интересах новых технологий. Среди изучаемых физических процессов можно выделить: формирование микроплазмы и филаментация лазерного излучения в твердотельном веществе, наведение микромодификаций заданной формы для использования в фотонике и многое другое.

Работы по изучению процессов многофотонного поглощения и плазмообразования в широкозонных диэлектриках проводятся различными научными группами. Подавляющее число опубликованных работ связано, в той или иной степени, с изучением процесса формирования микромодификаций при острой фокусировке последовательности фемтосекундных лазерных импульсов. В качестве основных материалов выступают плавный кварц либо полимеры, то есть centrosymmetric материалы.

В то же время ряд вопросов в проблеме взаимодействия одиночного острогофокусированного высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с диэлектриками остаются открытыми. Незученным является вопрос, связанный с зависимостью процесса формирования плазмы от таких параметров лазерного излучения как длина волны, длительность и энергия. В качестве основного источника лазерного излучения, в подавляющем большинстве работ служит фемтосекундный титан-сапфировый лазер с длиной волны генерации порядка 0,8 мкм. Переход к использованию более длинноволнового излучения (это может быть фемтосекундный хром-форстеритовый лазер с длиной волны $\lambda \sim 1,24$ мкм) позволяет увеличить фотонность процесса поглощения, выйти на возможность создания

микромодификаций меньшего размера и, тем самым, реализовать условия, например, более плотной записи информации.

Слаборазработанными являются вопросы взаимодействия высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с диэлектриками, обладающими квадратичной нелинейностью. Неясным остается поведение нелинейно-оптических восприимчивостей при высоких значениях интенсивности лазерного излучения, в том числе и в режиме образования плазмы. Так, если обратиться к разложению поляризуемости среды P по степеням напряженности электрического поля E , то прослеживается сильная зависимость от E : $P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E \cdot E + \chi^{(3)}E \cdot E \cdot E + \dots$, где $\chi^{(n)}$ – тензор нелинейной восприимчивости среды n -го ранга. С ростом интенсивности лазерного излучения, с одной стороны, последующие члены в разложении поляризации могут оказаться сравнимыми с низшими, а с другой – образовавшаяся плазма может приводить к модификации самих значений компонент тензоров нелинейных восприимчивостей из-за возмущения электронной подсистемы. Таким образом, вопрос о возможной модификации нелинейных восприимчивостей является принципиальным с точки зрения изучения физики взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом. Использование фемтосекундного лазерного излучения в данном контексте является принципиальным, поскольку позволяет осуществлять процесс взаимодействия только с электронной подсистемой, так как времена передачи возбуждения на кристаллическую решетку существенно превышают длительность лазерного импульса. Отметим, что именно электронная подсистема ответственна за реализацию таких безынерционных нелинейно-оптических процессов как генерация гармоник лазерного излучения или фазовая самомодуляция (ФСМ) из-за нелинейности показателя преломления n_2 .

Простейшим процессом, характеризующим нелинейность поляризации вещества по внешнему полю, является генерация второй гармоники. При этом, высокая интенсивность может вызвать нелинейный набег фазы u

распространяющегося лазерного излучения из-за развития ФСМ. Известно, что такой нелинейный фазовый набег, связанный с проявлением кубической нелинейности среды $\chi^{(3)}$ ($n_2 \sim \chi^{(3)}$), оказывает существенное влияние на условия генерации второй гармоники и ограничивает ее эффективность. С ростом интенсивности ($I > 10^{13}$ Вт/см²), на процесс ГВГ может оказывать влияние образовавшаяся плазма. Это влияние, как уже сказано, может быть связано с модификацией значений линейных и нелинейных восприимчивостей, что естественно должно привести к изменению условий синхронизма и, соответственно, эффективности ГВГ. Режим острой фокусировки отличается малой длиной, на которой развивается процесс фазовой самомодуляции, как правило, предшествующий генерации суперконтинуума. Тем самым минимизируется возможное побочное влияние процесса генерации суперконтинуума на ГВГ. Вопрос об эффективности ГВГ в режиме каналообразования (режим филаментации при острой фокусировке фемтосекундного лазерного излучения) и роли длины канала в этом процессе также является открытым.

Наличие двулучепреломления в нелинейно-оптических кристаллах позволяет использовать это явление для управления формой и направлением образующихся каналов за счет изменения поляризации падающего излучения и, соответственно, перераспределения энергии в формирующихся световых пучках. Литературные данные по этой проблеме отсутствуют.

Анизотропия кубической нелинейности $\chi^{(3)}$ может вызывать вращение плоскости поляризации в процессе нелинейного взаимодействия вида $\omega = \omega + \omega - \omega$, в результате которого появляется компонента излучения, имеющая ортогональную поляризацию. Практический интерес к такому процессу связан с тем, что интенсивность ортогонально поляризованной компоненты лазерного излучения пропорциональна кубу интенсивности падающего излучения. В результате излучение с ортогональной поляризацией должно иметь существенно лучший контраст, чем исходное фемтосекундное лазерное

излучение. Это важно, например, для задачи создания высокотемпературной приповерхностной плазмы с резкой границей. При переходе к значениям интенсивности более 10^{13} Вт/см², можно ожидать существенного влияния плазмы на процесс нелинейного вращения плоскости поляризации и генерации ортогонально поляризованного излучения.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являлись:

1. Создание экспериментальной установки для изучения нелинейных режимов взаимодействия острогофокусированного высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК (1,24 мкм) и видимого (0,62 мкм) диапазонов микроджоульного уровня энергии с прозрачными твердотельными материалами.
2. Изучение нелинейного пропускания и модификации спектра высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов при распространении в кристаллах KDP, LiNbO₃, BaF₂.
3. Исследование условий образования остаточных микромодификаций при взаимодействии низкоэнергетичного острогофокусированного фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов с прозрачными диэлектриками.
4. Экспериментальное изучение эффективности генерации второй гармоники в нелинейных кристаллах KDP и LiNbO₃ под действием острогофокусированного фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов в условиях плазмообразования.
5. Изучение особенностей нелинейного вращения плоскости поляризации фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона в кубическом кристалле BaF₂ в режиме плазмообразования.

Научная новизна

1. В работе измерено нелинейное пропускание низкоэнергетического фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах KDP и LiNbO₃ в режиме плазмообразования при $I > 10^{13}$ Вт/см² и обнаружена немонотонность этого процесса на длине волны 1,24 мкм в диапазоне энергий до 5 мкДж. Предложено объяснение такого немонотонного поведения изменением степени фотонности в процессе многофотонной ионизации.
2. Выполнены оценки, показавшие что максимальная интенсивность фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах KDP и LiNbO₃ в условиях проведенного эксперимента при фокусировке линзой с NA ~ 0,5 зависит от длины волны и составляет $\sim 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 0,62$ мкм (100 фс) и $\sim 4 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 1,24$ мкм (140 фс).
3. Экспериментально продемонстрирована возможность одновременного формирования двух остаточных микромодификаций в кристалле KDP за счет эффекта двулучепреломления. Показано, что формирование остаточных микромодификаций в кристалле KDP связано с процессом плазмообразования и начинается при мощности лазерного излучения, превышающей критическую мощность самофокусировки. Измерена зависимость длины области с остаточной микромодификацией от энергии падающего импульса на длинах волн 1,24 мкм и 0,62 мкм.
4. Исследован процесс ГВГ в кристалле KDP на длинах волн 1,24 мкм и 0,62 мкм в режиме плазмообразования. Установлено, что эффективность ГВГ резко уменьшается с развитием процесса плазмообразования при интенсивности лазерного излучения $\sim 10^{13}$ Вт/см².
5. Исследовано нелинейное изменение поляризации лазерного излучения микроджоульного уровня энергии на длине волны 0,62 мкм в кристалле BaF₂ в режиме острой фокусировки в условиях плазмообразования при интенсивностях $I > 10^{13}$ Вт/см² с эффективностью генерации ортогонально поляризованной компоненты до 2 %. Установлено, что образующаяся в

кристалле BaF_2 плазма не позволяет достичь максимума эффективности ($\sim 10\%$) из-за ограничения интенсивности лазерного излучения.

Научно-практическая значимость работы состоит в том, что полученные в работе результаты могут быть использованы, во-первых, для качественной интерпретации и анализа данных по взаимодействию остросфокусированного низкоэнергетического фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов с прозрачными твердотельными диэлектриками, во-вторых, при формировании микромодификаций в прозрачных твердотельных диэлектриках и, в-третьих, при планировании новых экспериментов по преобразованию частоты или поляризации интенсивного фемтосекундного лазерного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В зависимости пропускания остросфокусированного фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона ($\lambda=1,24$ мкм) кристаллами KDP и LiNbO_3 существует немонотонность.
2. Максимальная интенсивность остросфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в объеме кристаллов KDP и LiNbO_3 зависит от длины волны и, в условиях проведенных экспериментов, ограничена на уровне $\sim 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² ($\lambda = 0,62$ мкм) и $\sim 4 \cdot 10^{13}$ Вт/см² ($\lambda = 1,24$ мкм).
3. В кристалле LiNbO_3 в режиме острой фокусировки излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера наноджоульного уровня энергии возможно преобразование во вторую гармонику с эффективностью порядка 70 %. Спад эффективности ГВГ при росте энергии излучения связан с развитием процесса фазовой самомодуляции и плазмообразования.
4. Процесс нелинейного изменения состояния поляризации фемтосекундного лазерного излучения в кубическом кристалле BaF_2 носит аномальный характер при интенсивности фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона

более 2,5 ТВт/см².

Апробация работы

По результатам диссертационной работы опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК России, 2 статьи в трудах конференций и 7 тезисов докладов.

Основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе, докладывались на следующих международных конференциях: 10th International Conference NOLPC (Alushta, Ukraine, 2004), ICONO/LAT (Санкт-Петербург, Россия, 2005), CLEO (Germany, Munich, 2005), Демидовских чтениях (Москва, Россия, 2006), 10-ой Всероссийской научной школе-семинаре «Волны – 2006» (Звенигород, Россия, 2006), Laser Physics Workshop (Lausanne, Switzerland, 2006), ILLA-2006 (Smolyan, Bulgaria, 2006).

Результаты докладывались также на научных семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, и семинаре отдела взаимодействия когерентного излучения с веществом ИОФ РАН им. А.М. Прохорова.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. В конце приведен список цитируемой литературы, содержащий 118 наименований. Полный объем диссертационной работы составляет 149 страниц, включая 68 рисунков и 4 таблицы.

Личный вклад

Приведенные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его непосредственном участии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано краткое обоснование темы диссертационной работы, сформулированы цели работы, а также основные защищаемые положения. Показана актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы, ее научная и практическая значимость.

В **Первой главе** проводится рассмотрение имеющихся в литературе результатов по взаимодействию острогофокусированного низкоэнергетического фемтосекундного лазерного излучения с прозрачными диэлектриками, дается мотивация выбранной темы исследований. Проведен анализ физических процессов, происходящих при таком взаимодействии, включающих самофокусировку лазерного излучения и ионизацию. Так, вследствие баланса процессов самофокусировки за счет керровской нелинейности показателя преломления и дефокусировки из-за появления свободных электронов в результате полевой ионизации, может возникать плазменный канал (филамент) с длиной существенно больше длины перетяжки фемтосекундного лазерного излучения, причем его диаметр составляет несколько микрометров.

При высокой интенсивности лазерного излучения ($I > 10^{13}$ Вт/см²), в результате многофотонной ионизации, в диэлектрике могут образоваться свободные электроны с плотностью близкой к критической, что приведет к оптическому пробое вещества с образованием остаточной микромодификации.

Принципиальное различие между пробоем и филаментацией состоит в том, что при пробое плотность электронов намного больше, чем в филаменте и область остаточной микромодификации от пробоя имеет меньший продольный размер, чем у сформированного канала. Поэтому, в зависимости от условий фокусировки, могут наблюдаться разные режимы взаимодействия: пробоем вещества в области фокуса (в режиме предельно острой фокусировки, $NA \sim 1$), филаментация без формирования остаточной микромодификации, образование микромодификации показателя преломления в области канала. Изменение показателя преломления может иметь как обратимый, так и необратимый

характер, а режим нелинейного взаимодействия лазерного излучения и формирование микромодификации существенным образом зависит от остроты фокусировки.

Процесс деструкции материала мишени в результате плазмообразования, может происходить по различным механизмам. К основным следует отнести: тепловое воздействие поглощенного в области фокуса излучения на материал мишени и возникновение ударных волн в объеме материала при поглощении лазерного излучения в предельно малом фокальном объеме. В случае материалов с низкой температурой плавления или термо-химического разложения, что, например, характерно для кристалла KDP, преобладает механизм теплового разрушения. В случае же кристаллов с высокой температурой плавления (например, для ниобата лития) образующиеся микромодификации не носят характер разрушения, а демонстрируют “слабую” модификацию показателя преломления, что затрудняет их наблюдение простыми экспериментальными методами. Для “слабой” модификации материала мишени возможно обратимое фоторефрактивное изменение показателя преломления. Исходное состояние может быть восстановлено различными способами – нагревом, отжигом или с использованием облучения на другой длине волны.

Далее в Главе I обсуждаются различные практические применения взаимодействия высокоинтенсивного остросфокусированного лазерного излучения с прозрачными диэлектриками.

В четвертом разделе Главы I рассматриваются особенности генерации второй гармоники фемтосекундного лазерного излучения в режиме жесткой фокусировки и образования плазмы в объеме нелинейного кристалла. В случае нелинейно-оптических взаимодействий, преимуществом жесткой фокусировки, помимо достижения высокой интенсивности ($I > 10^{13}$ Вт/см²), является, за счет малой длины взаимодействия, возможность исследовать процесс генерации без влияния суперконтинуума. В таком режиме взаимодействия будет отсутствовать

поверхностный пробой, порог которого, как правило, ниже по сравнению с объемным. Обсуждается, что определяющим для процесса ГВГ является необходимость соблюдения помимо фазового, еще и группового согласования участвующих во взаимодействии волн. Отмечается отсутствие работ, в которых изучалась бы генерация второй гармоники в условиях образования плазмы. Очевидно, что влияние плазмы на условия ГВГ, в частности на фазовое и групповое согласование, является принципиальным при изучении процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом.

В последнем разделе главы, рассматривается специфика процесса несинхронной генерации ортогонально поляризованного излучения в кубических кристаллах за счет анизотропии кубической нелинейности $\chi^{(3)}$. Известно, что использование лазерного излучения с интенсивностью $\sim 10^{12}$ Вт/см², позволяет получить с достаточно высокой эффективностью ($\sim 10\%$) ортогонально поляризованное излучение без искажения его качества, что необходимо для основного применения такого процесса – “очистки” лазерного излучения, улучшения его энергетического контраста. До сих пор не рассмотрен в литературе вопрос о поведении эффективности вращения плоскости поляризации и кубической нелинейности в условиях плазмообразования.

Во **Второй главе** диссертации представлены результаты по нелинейному пропусканию прозрачными твердотельными диэлектриками (KDP, LiNbO₃ и SiO₂) остросфокусированного фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов, .

Для проведения экспериментов была собрана экспериментальная установка, в которой использовалось основное излучение ($\lambda_1 = 1,24$ мкм, $\tau \approx 140$ фс) хром-форстеритового лазера и его вторая гармоника ($\lambda_1 = 0,62$ мкм, $\tau \approx 100$ фс). Энергия лазерного излучения устанавливалась в пределах не более 20 мкДж. Лазерное излучение фокусировалось короткофокусной линзой с числовой апертурой 0,45 в исследуемый образец. С помощью фотоприемников на основе фотодиодов ФД-24, контролировалась энергия падающего и

прошедшего излучения, волоконным спектрометром SL40-2-3648 измерялся спектр, а переносом изображения канала с помощью 8ми кратного объектива на ПЗС камеру записывались изображения микромодификаций с разрешением не хуже 2 мкм.

В главе обсуждаются результаты, относящиеся к процессу формирования микромодификаций в области плазменного канала в кристалле KDP. Получена зависимость размеров таких модификаций от энергии и длины волны, продемонстрировано формирование двух микромодификаций в одном лазерном выстреле за счет эффекта двулучепреломления. Обнаружена немонотонная зависимость пропускания кристаллов KDP и LiNbO₃ от энергии падающего импульса с длиной волны 1,24 мкм (Рис. 1). Немонотонность объясняется изменением (“скачками”) фотонности ионизации при росте интенсивности лазерного излучения.

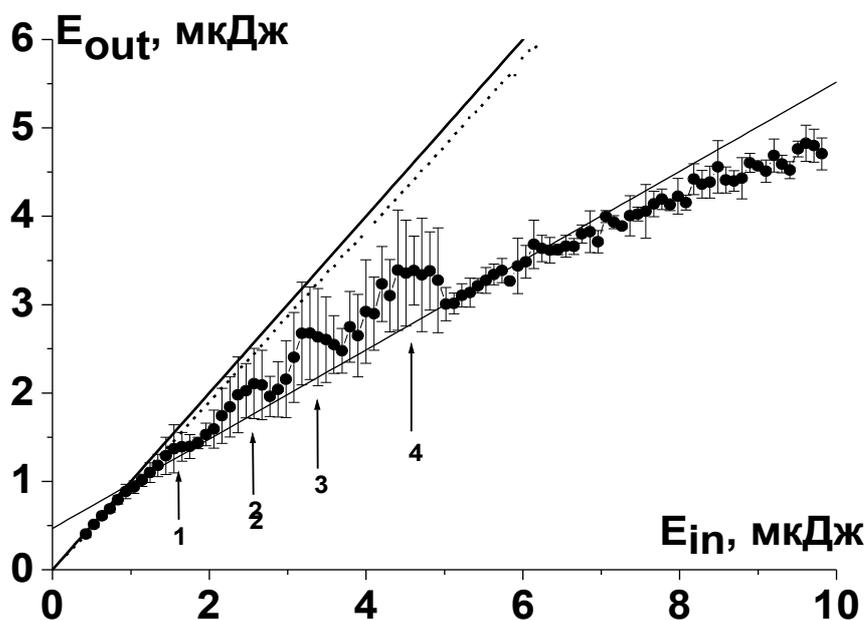


Рис. 1. Зависимость прошедшей энергии E_{out} от падающей E_{in} для кристалла KDP толщиной 2 мм при острой фокусировке ($NA \sim 0,5$) лазерного излучения с длиной волны 1,24 мкм. • – экспериментальные значения, толстая сплошная линия соответствует отсутствию режима поглощения, пунктирная линия – поправка с учетом потерь на ГВГ, тонкая сплошная линия – характеризует отклонение от монотонной зависимости, числа 1-4 соответствуют скачкам фотонности

Приведена простая модель, в основе которой лежит теория полевой ионизации

ции Келдыша и модель Друде для описания нагрева электронов. Модель позволила качественно описать экспериментальные результаты по нелинейному пропусканию лазерного излучения. Получены оценки изменения показателя преломления исследуемых широкозонных диэлектриков.

Данные по нелинейному пропусканию позволили оценить для обоих кристаллов, KDP и LiNbO₃, максимальное значение интенсивности в канале для лазерного излучения с длиной волны 1,24 мкм. Это значение не превышает величины $4,5 \cdot 10^{13}$ Вт/см².

Из модели Келдыша следует, что для излучения с длиной волны 0,62 мкм в кристалле KDP интенсивность лазерного излучения не может достичь величины, необходимой для реализации режима хотя бы с одним скачком фотонности, так как первый скачок должен был бы произойти только при интенсивности $\sim 3 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Из выполненных расчетов следует, что интенсивность излучения в кристалле KDP на длине волны 0,62 мкм не превышает $2 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Приведенные эксперименты подтверждают отсутствие эффекта немонотонности нелинейного пропускания в KDP на длине волны 0,62 мкм.

Определены величины энергий, при которых в условиях нашего эксперимента возникает режим нелинейного поглощения в кристаллах KDP, LiNbO₃ и плавленом кварце. Уровни мощности соответствуют критической мощности самофокусировки лазерного излучения. Сделан вывод о решающей роли самофокусировки на развитие процесса образования остаточных микромодификаций.

В режиме нелинейного распространения лазерного излучения на длине волны 1,24 мкм получено, что до 50 % энергии импульса с энергией 10 мкДж может поглощаться в кристалле KDP, а энергия, при которой начиналось нелинейное поглощение, составила $1 \pm 0,2$ мкДж. Для кристалла LiNbO₃ такая энергия составила $1,5 \pm 0,5$ мкДж, поглощение достигало ~ 10 % при энергии падающего импульса 10 мкДж.

На длине волны 0,62 мкм была измерена кривая пропускания кристалла KDP. Возникновение нелинейного поглощения соответствует энергии $0,25 \pm 0,05$ мкДж. Поглощение лазерного излучения достигало 70% при энергии падающего импульса 5 мкДж. Были проведены измерения уширения спектра лазерного излучения, вызванного процессом фазовой самомодуляции. Связь между уширением спектра и интенсивностью лазерного излучения позволила оценить, что интенсивность в области фокуса ограничена на уровне $\sim 10^{13}$ Вт/см².

Из проведенных экспериментов следует, что режим плазмообразования в кристалле KDP сопровождался образованием остаточных микромодификаций в области с высоким поглощением лазерного излучения. Схема переноса изображения позволила установить, что длины остаточных микромодификаций в кристалле KDP не превышали 70 мкм ($E_{in} \sim 10$ мкДж $\lambda = 1,24$ мкм) и были короче микромодификаций созданных при использовании лазерного излучения с длиной волны 0,62 мкм – до 100 мкм ($E_{in} \sim 6$ мкДж). Энергия, при которой в условиях данного эксперимента наблюдалось образование остаточных микромодификаций в KDP, близка к энергии, при которой начинается нелинейное поглощение и развивается самофокусировка (для KDP и длины волны 0,62 мкм, $E_{пр} = P_{кр} \tau \sim 0,2$ мкДж, где $P_{кр} \sim 2$ МВт – критическая мощность самофокусировки, $\tau \approx 100$ фс - длительности импульса).

В кристалле LiNbO₃ образование остаточной микромодификации не наблюдалось вплоть до энергии падающего импульса $E_{in} \sim 20$ мкДж. Это связывается с существенно большей стойкостью его кристаллической структуры к термическому и ударному повреждению, и находит подтверждение в литературе.

В Третьей главе рассматриваются особенности ГВГ в режиме острой фокусировки, когда на процесс генерации влияет образующаяся в фокальной области плазма, приводящая к модификации линейного показателя преломления. В качестве объектов исследования брались нелинейно-оптические

кристаллы KDP и LiNbO₃. Использовалось фемтосекундное лазерное излучение с двумя длинами волн ($\lambda_1 = 0,62$ мкм и $\lambda_2 = 1,24$ мкм). Установлены общие закономерности: зависимость эффективности ГВГ имеет первоначальный квадратичный рост, четко выраженный максимум и спад с выходом на некоторый постоянный уровень эффективности преобразования.

Показано, что насыщение эффективности ГВГ и последующий ее спад, для нелинейно-оптических кристаллов KDP и LiNbO₃ связаны с нарастающим влиянием плазмы на изменение дисперсии показателя преломления. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению условий фазового и группового синхронизма, уменьшению спектральной и угловой ширин синхронизма.

Предположение об уменьшении квадратичной восприимчивости $\chi^{(2)}$ на ~20 % в кристалле KDP, позволило более точно описать экспериментальные данные по генерации второй гармоники в условиях плазмообразования для длины волны падающего излучения 0,62 мкм.

Полученные результаты по насыщению эффективности преобразования во вторую гармонику в кристалле KDP для энергий $E_{in} > 1$ мкДж, служат дополнительным экспериментальным подтверждением вывода об ограничении интенсивности в области фокуса на уровне $I_{max} \sim 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 0,62$ мкм и $I_{max} \sim 4 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 1,24$ мкм.

Далее обсуждается схема, позволяющая выявить преобладающую деструктивную роль плазмы на уменьшение эффективности ГВГ. В рамках предложенной схемы можно минимизировать отрицательное влияние процесса фазовой самомодуляции. Для этого необходимо либо ограничить длину нелинейно-оптического взаимодействия на уровне не более 200 мкм (используя тонкий кристалл, типичное значение $n_2 \sim 3 \cdot 10^{-16}$ Вт/см²), либо осуществлять процесс ГВГ в несинхронном режиме в кристаллах, обладающих высокой квадратичной нелинейностью.

Были проведены сравнительные эксперименты по ГВГ на длине волны 0,62 мкм в “толстом” ($h \gg L_{пер}$) и “тонком” ($h \sim L_{пер}$) кристаллах KDP, где h –

толщина кристалла и $L_{\text{пер}}$ – длина перетяжки. Показано, что в области больших энергий лазерного импульса, в фокальной плоскости, где концентрация плазмы максимальна, ГВГ пропадает. Имеющийся же “хвост” в зависимости эффективности от энергии падающего импульса связан с генерацией второй гармоники в периферийных областях, вне фокуса. Объясняется это тем, что в результате изменения показателей преломления катастрофически, до единиц микрометров, уменьшается когерентная длина взаимодействия, что и приводит к уменьшению эффективности ГВГ при росте энергии импульса накачки выше 1 мкДж.

Процесс ГВГ фемтосекундного лазерного излучения с $\lambda = 1,24$ мкм в несинхронном режиме преобразования, когда влияние фазовой самомодуляции отсутствует, был изучен в кристалле LiNbO_3 , вырезанном в направлении высокой квадратичной нелинейности ($d_{\text{eff}} \sim 10$ пм/В). Зависимость эффективности ГВГ от энергии падающего лазерного излучения в несинхронном режиме в целом соответствует той, которая наблюдалось в режиме синхронной генерации. Она целиком определяется ухудшением условий фазового согласования между двумя участвующими в процессе ГВГ волнами основного излучения и второй гармоники. Из проведенных расчетов следует, что когерентная длина для LiNbO_3 уменьшается от начального значения ~ 5 мкм, до ~ 2 мкм при $I \sim 6 \cdot 10^{12}$ Вт/см². Эта тенденция сохраняется с ростом интенсивности лазерного излучения.

Результаты приведенных экспериментов показывают, что ГВГ может быть использована в качестве чувствительной диагностики развития процесса плазмообразования в средах с квадратичной нелинейностью.

В синхронном режиме в кристалле ниобата лития достигнуто рекордное преобразование во вторую гармонику ~ 70 % для наноджоульных лазерных импульсов ($E_{\text{in}} \sim 10$ нДж). Спад эффективности ГВГ при росте энергии излучения связан с развитием процесса фазовой самомодуляции и плазмообразования.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению процесса нелинейного изменения поляризации высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны излучения 0,62 мкм при распространении в кристалле ВаF₂ вдоль оси Oz в двух режимах: мягкой фокусировки (до образования плазмы в объеме материала) и острой фокусировки, приводящей к образованию микроплазмы. Используемый кристалл ВаF₂, толщиной 3 мм имеет кубическую симметрию, а процесс изменения поляризации в нем происходит на анизотропии кубической нелинейности в несинхронном процессе взаимодействия. Создана схема эксперимента, которая позволяла наблюдать увеличение эллиптичности поляризации лазерного излучения и поворот плоскости поляризации. Поляризация падающего и прошедшего излучения контролировалась с помощью двух призм Глана.

В режиме мягкой фокусировки, эффективность генерации ортогонально поляризованной компоненты излучения достигала 10 % при интенсивности лазерного излучения $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² (соответствует энергии импульса 6 мкДж). При этом, для интенсивности лазерного излучения ниже $2,5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² (энергия импульса до 3 мкДж) эффективность генерации пропорциональна квадрату энергии падающего импульса. Это соответствует известным моделям для процесса четырехволнового нелинейно-оптического преобразования на кубической нелинейности. Далее, до интенсивности $\sim 6 \cdot 10^{12}$ Вт/см² (энергия импульса 6 мкДж), при которой достигается максимум преобразования, эффективность растет быстрее чем по квадрату - пропорционально примерно кубу энергии падающего излучения, что свидетельствует об аномальном характере развития процесса. На дальнейшее поведение эффективности преобразования отрицательно влияет начало фазовой самомодуляции и генерация суперконтинуума.

В экспериментах с использованием острогофокусированного низкоэнергетического фемтосекундного лазерного излучения, результаты которых представлены на Рис.2, была достигнута эффективность генерации

ортогонально поляризованной компоненты излучения 2 % и установлено деструктивное влияние плазмы на этот процесс. Развитие процесса плазмообразования не позволяет получить максимальную эффективность генерации ортогональной компоненты из-за ограничения интенсивности. Режим плазмообразования контролировался по измерению нелинейного пропускания кристалла ВаF₂. Плазмообразование приводит к ограничению интенсивности излучения в перетяжке линзы на уровне $\sim 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Пунктиром на Рис.2 приведена теоретическая кривая эффективности генерации, без учета ограничения интенсивности, сплошная линия – с учетом ограничения интенсивности величиной $1,8 \cdot 10^{13}$ Вт/см², оценки выполнены по методике, приведенной в Главе II.

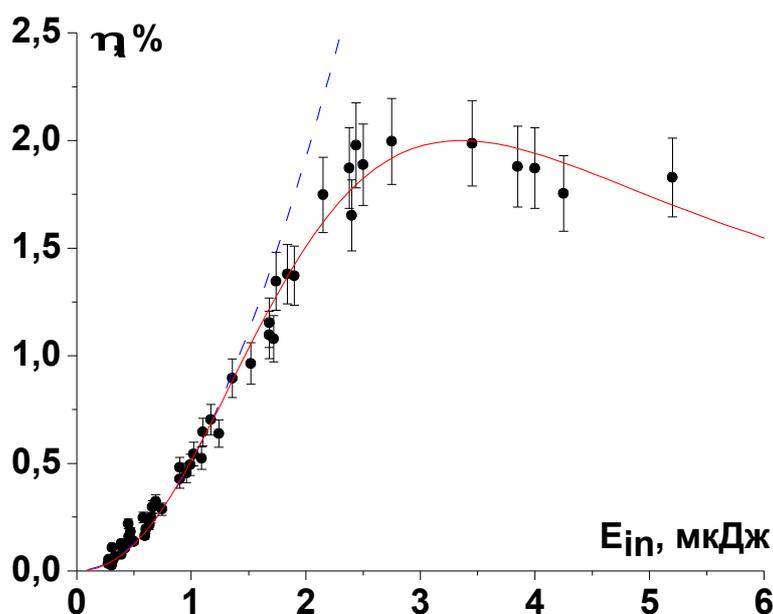


Рис.2. Зависимость эффективности генерации ортогонально поляризованной компоненты излучения с длиной волны 0,62 мкм в кристалле ВаF₂ от энергии падающего импульса при настройке на оптимальный угол: точки – экспериментальные данные, пунктир - теоретическая кривая без учета влияния плазмы, сплошная линия - теоретическая кривая с учетом влияния плазмы

Оценены такие параметры тензора кубической нелинейности кристалла ВаF₂ как анизотропия $\sigma = -0,8 \pm 0,1$ и компонента $\chi^{(3)}_{xxxx} = (1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-23}$ м²/В².

В **Заключении** перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

- 1) Создан экспериментальный стенд для изучения нелинейных режимов взаимодействия остросфокусированного высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения видимого (0,6 мкм) и ближнего ИК (1,24 мкм) диапазонов микрожоульного уровня энергии с прозрачными твердотельными материалами.
- 2) Впервые измерено нелинейное пропускание фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах KDP и LiNbO₃ в режиме плазмообразования при $I > 10^{13}$ Вт/см² и обнаружена немонотонность этого процесса на длине волны 1,24 мкм в диапазоне энергий до 5 мкДж. Предложено объяснение такого немонотонного поведения изменением степени фотонности в процессе многофотонной ионизации.
- 3) Максимальная интенсивность фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах KDP, LiNbO₃ и BaF₂ зависит от длины волны и, в условиях проведенных экспериментов, ограничивается на уровне $\sim 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 0,62$ мкм (100 фс) и $\sim 4 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для $\lambda = 1,24$ мкм (140 фс).
- 4) Продемонстрирована возможность одновременного формирования двух остаточных микромодификаций за счет эффекта двулучепреломления в кристалле KDP при облучении высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным излучением.
- 5) Установлено, что формирование остаточных микромодификаций в кристалле KDP начинается в результате процесса плазмообразования, при мощности, превышающей критическую мощность самофокусировки. Измерена зависимость длины области с остаточной микромодификацией от энергии падающего импульса основного излучения ($\lambda = 1,24$ мкм) и второй гармоники ($\lambda = 0,62$ мкм).
- 6) Исследован процесс ГВГ на длинах волн 1,24 мкм (в кристаллах KDP и LiNbO₃) и 0,62 мкм (в кристалле KDP) при переходе в режим плазмообразования. Установлено, что эффективность ГВГ резко уменьшается с развитием процесса плазмообразования при интенсивности лазерного

излучения $\sim 10^{13}$ Вт/см².

7) В кристалле LiNbO₃ в режиме острой фокусировки излучения наноджоульного уровня энергии с длиной волны 1,24 мкм получено преобразование во вторую гармонику с эффективностью порядка 70 %.

8) Построена простая модель, позволяющая описать процесс нелинейного поглощения высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения в широкозонном диэлектрике. Проведено сопоставление экспериментальных результатов для кристалла KDP с расчетными и получено качественное соответствие.

9) Показано, что нелинейное изменение состояния поляризации фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона ($\lambda = 0,62$ мкм) в кубическом кристалле BaF₂ носит аномальный характер при интенсивности более 2,5 ТВт/см².

10) В экспериментах по нелинейному вращению поляризации достигнута максимальная эффективность генерации ортогональной компоненты излучения 10 %. В режиме плазмообразования при острой фокусировке фемтосекундного лазерного излучения, эффективность оказалась ограничена величиной 2 % из-за сильного деструктивного влияния плазмы на этот процесс.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Syrtsov V. S., Gordienko V. M., Makarov I. A., Mikheev P. M., Shashkov A. A., Volkov R. V. Photorefraction in a KDP crystal induced by femtosecond laser radiation under plasma formation conditions // Technical Digest of 10th International Conference NOLPC'2004, October 3-8, 2004, Alushta, Ukraine, p.85.
2. Mikheev P. M., Gordienko V. M., Makarov I. A., Shashkov A. A., Syrtsov V. S. Femtosecond laser radiation conversions in non-linear crystal under plasma formation conditions // ICONO/LAT-2005, St. Petersburg. Conference Program, p. 52.
3. Gordienko V. M., Makarov I. A., Mikheev P. M., Shashkov A. A., Syrtsov V. S., Volkov R. V. Photorefraction in a KDP crystal induced by femtosecond laser radiation under plasma formation conditions // Proc. SPIE, 2005, v. 6023,

pp.167-172.

4. Гордиенко В.М., Макаров И.А., Михеев П.М., Сырцов В.С., Шашков А.А. Формирование микромодификаций в кристалле KDP при острой фокусировке фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона // Квантовая электроника, 2005, т.35, N 7, с.627-632.

5. Mikheev P.M., Gordienko V.M., Makarov I.A., Shashkov A.A., Syrtsov V.S. Plasma channels characteristics dependence on tightly focused femtosecond laser radiation parameters // CLEO-2005, Germany, Munich, 12-17 June, 2005. Advance Programme, p. 59.

6. Гордиенко В. М., Михеев П. М., Сырцов В.С. Немонотонность поглощения остро сфокусированного фемтосекундного излучения хром-форстеритового лазера в диэлектрике из-за увеличения степени фотонности процесса ионизации // Письма в ЖЭТФ, 2005, т.82, N 4, с.247-250.

7. Гордиенко В. М., Михеев П. М., Сырцов В. С. Генерация второй гармоники излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера в нелинейных кристаллах при жесткой фокусировке, приводящей к режиму плазмообразования // Тезисы докладов научного форума «Демидовские чтения», Москва, 25-28 февраля, 2006, с.116.

8. Syrtsov V. S., Gordienko V. M., Mikheev P. M., I. A. Makarov, A. A. Shashkov, R. V. Volkov Plasma channel formation and micromodification in KDP crystal by tightly focused Cr:forsterite femtosecond laser radiation // Proc. SPIE, 2006, v.6161, pp.40-46.

9. Гордиенко В.М., Михеев П.М., Сырцов В.С. Нелинейное вращение поляризации интенсивного фемтосекундного лазерного излучения в BaF₂ // Тезисы докладов 10-й Всероссийской научной школы-семинара «Волны – 2006», Звенигород, с.65.

10. Mikheev P.M., Gordienko V.M., Syrtsov V.S. Nonlinear rotation of polarization of femtosecond laser radiation with intensity up to 10¹³ W/cm² in BaF₂ crystal // Book of abstracts LPHYS'06, Lausanne, Switzerland, July 24-28, 2006, p. 242.

11. Gordienko V.M., Mikheev P.M., Syrtsov V.S. Femtosecond laser induced filamentation and damage in dielectrics in tightly focused regime // Technical Digest of ILLA-2006, Smolyan, Bulgaria, 2006, p.195.

12. Гордиенко В.М., Дьяков В.А., Михеев П.М., Сырцов В.С. Высокоэффективная генерация второй гармоники излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера с наноджоульным уровнем энергии в кристалле ниобата лития // Квантовая электроника, 2006, т.36, N 11, с.1072-1073.

13. Гордиенко В. М. , Михеев П. М. , Сырцов В. С. Нелинейное вращение поляризации интенсивного фемтосекундного лазерного излучения в BaF₂ // Известия РАН. Серия физическая, 2007, т.71, N 1, с.127-130.