

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

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

**«КОМПРЕССИЯ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПОСЛЕ  
ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ В СРЕДАХ С КУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ»**

**Аспирант:** Кочетков Антон Андреевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:** Гинзбург Владислав  
Наумович, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник  
отдела 370

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**  
03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**  
01.04.21 лазерная физика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород – 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Одно из передовых направлений развития современной лазерной физики – создание лазеров петаваттного уровня пиковой мощности [1-3]. Интенсивность, достигаемая при фокусировке излучения петаваттного лазера, составляет более  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> [4]. Достижение такой мощности стало возможным благодаря предложенному Жераром Муру методом усиления чирпированных импульсов CPA (chirp pulse amplification) [5]. Метод CPA заключается в том, что входной фемтосекундный лазерный импульс растягивается в стретчере до длительности порядка единиц наносекунд, приобретая линейный чирп частоты. Чирпированный импульс усиливается (таким образом интенсивность в импульсе остается невысокой), а затем после всех каскадов усиления сжимается до нескольких десятков фемтосекунд за счет отражения от дифракционных решеток в компрессоре.

Сфокусированное излучение лазерных систем петаваттного уровня мощности находит широкое применение в экспериментах по исследованию взаимодействия сверхсильных световых полей с газовыми и твердотельными мишенями [6]. Особый интерес представляют задачи по ускорению электронов и протонов с целью получения моноэнергетичных пучков частиц [7, 8]. Возможность использования сверхмощного лазерного излучения для исследования нелинейных свойств вакуума и процесса рождения электрон-позитронных пар [9], а также генерации эксаваттных импульсов зептосекундной длительности рентгеновского диапазона [10] определяет интерес к задачам по дальнейшему увеличению мощности лазерных импульсов.

Мощность (и интенсивность) в современных лазерных установках выросла настолько, что ее ограничивает уже не тот факт, что лазерный импульс нельзя еще больше усилить, а то, что его нельзя компрессировать. Дифракционные решетки обладают конечным порогом пробоя, который и ограничивает интенсивность на выходе CPA-лазеров. Такие решетки позволят в ближайшее время создать лазеры с мощностью 10 ПВт и интенсивностью  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, в цепи стретчер-усилитель-компрессор самым слабым звеном теперь является компрессор. В качестве механизмов дальнейшего увеличения мощности и интенсивности лазеров рассматриваются, во-первых, увеличение размеров решеток или создание мозаичного (или черепичного) компрессора [11, 12]. Каждая решетка такого компрессора состоит из нескольких дифракционных решеток, что кратно увеличивает апертуру пучка. Это позволяет компрессировать импульс с большей энергией. Во-вторых, создание сфазированных параллельных CPA-каналов, каждый из которых заканчивается собственным компрессором [13-

16]. Эти два пути имеют ряд существенных недостатков: технические и технологические трудности, необходимость кратного увеличения энергии импульса, а также габаритов и цены лазера. От этих недостатков свободен третий подход, в котором мощность увеличивается не за счет роста энергии, а за счет уменьшения длительности импульса: импульс компрессируется после компрессора. Для этого спектр расширяется благодаря фазовой самомодуляции (ФСМ) при распространении в среде с керровской нелинейностью, а затем импульс сжимается дисперсионными зеркалами.

Идею использовать кубическую нелинейность для ФСМ в 1969 году предложил Роберт Фишер с соавторами [17]. В том же году [18] было продемонстрировано сжатие 20 пикосекундного импульса в несколько раз при ФСМ в кювете с  $CS_2$ . Позднее, уже в фс диапазоне, ФСМ была реализована в волокне [19], в заполненных газом полых волноводах [20] и в объеме с ограничением в поперечном направлении [21], однако удалось достичь компрессии импульсов с энергией порядка мДж, т.к. во всех этих экспериментах диаметр пучка был менее 1 мм. Ограничение масштабирования связано с пространственной неоднородностью пучка, которая неважна при волноводном распространении, но принципиальна при распространении в свободном пространстве. В настоящее время широко исследуется возможность применения этой методики для уменьшения длительности, и, соответственно, увеличение пиковой мощности выходного излучения сверхмощных лазеров, которые обладают квази-однородным распределением интенсивности.

Ключевым параметром в данных задачах является  $B$ -интеграл – нелинейная фаза, набираемая импульсом при распространении в среде. Существенная модификация спектра импульсов происходит при значениях  $B$ -интеграла составляющих единицы радиан. В этих условиях становятся актуальными вопросы развития и подавления процесса мелкомасштабной самофокусировки (ММСФ) в лазерных пучках [22, 23]. При больших значениях  $B$ -интеграла ( $B > 3$ ) ММСФ приводит к сильной модуляции интенсивности пучка и к разрушению оптических элементов, что многократно подтверждалось экспериментально. Кроме уменьшения значения  $B$ -интеграла подавление ММСФ возможно при уменьшении мелкомасштабных пространственных шумов лазерного пучка на входе в среду. Традиционный способ такой очистки пучка – это использование пространственных фильтров [24-26]. Пространственные фильтры представляют собой вакуумируемые телескопы Кеплера с диафрагмой в фокальной плоскости которая блокирует компоненты возмущений наиболее подверженные усилению. Однако применение пространственных фильтров для подавления ММСФ петаваттного излучения с интенсивностью в порядка  $TВт/см^2$  представляется весьма затруднительным, т.к. невозможно из-за ММСФ использовать линзовые телескопы. В работе [27] был предложен

оригинальный метод очистки пучка для подавления ММСФ петаваттного излучения: самофилтрация пучка при распространении в свободном пространстве. Самофилтрация интенсивного излучения была подтверждена в [27, 28] с помощью качественного эксперимента, в котором исследовалась степень разрушения стекла ММСФ.

Одной из важнейших характеристик сверхмощных лазерных импульсов является их временной контраст, поскольку он определяет возможность их использования в экспериментах по взаимодействию экстремального света с газовыми и твердотельными мишенями. Лазерные импульсы с низким временным контрастом могут еще до прихода основного импульса привести к модификации и даже разрушению мишени [29]. В настоящее время для повышения временного контраста применяют плазменные зеркала [30-32], а также процессы генерации волны второй гармоники [33] и ортогональной поляризации (XPW Cross polarized wave) [34, 35] в кристаллах с анизотропией тензора кубической нелинейности (например,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$ ). Плазменные зеркала и генерация второй гармоники могут быть использованы непосредственно для выходного излучения петаваттного уровня мощности, а метод генерации волны ортогональной поляризации, как правило, применяют в стартовой части петаваттных лазерных систем.

ММСФ в изотропных (кубических) кристаллах впервые была исследована лишь в 2016 году [36]. Кубический кристалл представляет собой среду с изотропными линейными свойствами, но с анизотропией нелинейности – в тензоре  $\chi^{(3)}$  по сравнению со стеклом появляются дополнительные компоненты. Это приводит к появлению двух важных параметров – ориентация кристалла и угол наклона поляризации излучения. В [36] теоретически исследовано развитие ММСФ в кубическом кристалле с ориентациями [111], [001] и [101]. Показано, что развитие неустойчивости в кристаллах с ориентацией [111] происходит при меньших интенсивностях, чем в кристаллах с ориентациями [001] и [101]. В последних двух ориентациях инкремент неустойчивости существенно зависит от поляризации излучения, и, следовательно, ММСФ может быть значительно подавлена выбором оптимальной поляризации.

Лазерная (оптическая) керамика изготавливается из самых различных кубических кристаллов, и обладает рядом преимуществ по сравнению с монокристаллами: большая апертура, однородность и высокая концентрация допирующих ионов, возможность управления физико-химическими и спектроскопическими характеристиками, низкая стоимость. Керамика широко используется не только в качестве активной среды лазеров (при допировании ионами Nd, Yb, Ho, Tm, Pr и т.д.), но и в пассивных модуляторах добротности [37], оптических окнах [38], изоляторах Фарадея [39], ВКР-лазерах [40].

Керамика представляет собой совокупность плотно упакованных гранул со случайной ориентацией кристаллографических осей. Для исследования нелинейных свойств керамики требуется исследовать  $\chi^{(3)}$ -эффекты в кубических кристаллах с произвольной ориентацией, обсуждение которых в литературе практически отсутствует.

### **Цель работы**

Цель настоящей работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании метода повышения мощности лазерных импульсов за счет уширения их спектра при фазовой самомодуляции и компрессии на дисперсионных зеркалах. Основными задачами являются:

1. Исследование модификации спектра при ФСМ и возможности последующей компрессии применительно к реальным параметрам импульсов лазерных систем.
2. Проведение экспериментов по укорочению лазерного импульса с использованием ФСМ на ПВт уровне мощности.
3. Исследование мелкомасштабной самофокусировки мощного фемтосекундного излучения и методов ее подавления.
4. Исследование  $\chi^{(3)}$ -эффектов в кристаллах с кубической симметрией.

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

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

1. Обнаружен эффект качественного влияния кубической спектральной фазы лазерного импульса на его самомодуляцию в нелинейной среде при любых значениях интеграла распада  $B$ . В частности, в спектре самомодулированного импульса появляются узкие пики, а уширение спектра существенно меньше, чем у Фурье-ограниченного импульса. Теоретически показано, что независимо от кубической спектральной фазы исходного импульса, использование дисперсионных зеркал, вносящих только квадратичную фазу, позволяет увеличить мощность выходного импульса примерно в  $(1+B/2)$  раз.

2. Проведено экспериментальное исследование нелинейных и дисперсионных свойств полиэтилентерефталата – перспективного материала для фазовой самомодуляции сверхмощных лазерных импульсов. Показано что кубическая нелинейность полиэтилентерефталата приблизительно вдвое превышает нелинейность в кварце, а параметр дисперсии групповой скорости на длине волны 910 нм порядка 120 фс<sup>2</sup>/мм, что примерно в 3 раза выше чем у кварца.

3. Экспериментально продемонстрирована посткомпрессия лазерных импульсов петаваттного уровня мощности за счет фазовой самомодуляции и последующей компенсации дисперсии при отражении от дисперсионных зеркал. В модельном эксперименте с частью петаваттного пучка продемонстрирована компрессия с 57 фс до 22 фс. В экспериментах с полным пучком диаметра 18 см достигнута компрессия с 63 фс до 21 фс импульса с энергией 12 Дж.

4. Экспериментально подтверждена возможность подавления мелкомасштабной самофокусировки с помощью самофилтрации фемтосекундного лазерного пучка при распространении в свободном пространстве. Измерения коэффициента усиления пространственного шума (инкремента самофокусировочной неустойчивости) двумя независимыми методами продемонстрировали количественную согласованность с теорией и высокую эффективность подавления мелкомасштабной самофокусировки.

5. Исследовано влияние ориентации кристаллов с кубической симметрией на генерацию ортогональной поляризации, на фазовую самомодуляцию и на самофокусировку лазерного излучения. Определены ориентации кристалла, в которых указанные эффекты максимальны и минимальны. Экспериментально продемонстрирована предсказанная ранее существенная зависимость развития мелкомасштабной самофокусировки от угла между вектором поляризации излучения и кристаллографической осью кристалла  $\text{BaF}_2$  с ориентацией [001].

6. Экспериментально подтвержден новый метод восстановления амплитуды и фазы фемтосекундных импульсов основанный на измерении спектра после ФСМ.

### **Достоверность научных результатов**

Все полученные в диссертации результаты достоверны и обоснованы. Экспериментальные результаты получены по апробированным методам и подтверждаются теоретическими расчетами, базирующимися на хорошо известных из литературы моделях. Экспериментальные данные, полученные независимыми методами, хорошо согласуются друг с другом и показывают высокую повторяемость. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях.

### **Апробация результатов**

Материалы диссертации опубликованы в трех статьях в реферируемых журналах [1-8], докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в тезисах этих конференций [1-7].

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 73 страниц, 30 рисунков, 4 таблицы, 68 ссылок на литературу.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

**Первая глава** посвящена исследованию уширения спектра при фазовой самомодуляции мощных фемтосекундных лазерных импульсов и метода укорочения лазерного импульса, основанного на последующей фазовой коррекции модулированных импульсов.

В параграфе 1.1 описаны основные аспекты процесса ФСМ применительно к фемтосекундным лазерным импульсам. Проведены численные расчеты процесса ФСМ импульсов с остаточной квадратичной фазой. В частности, показано, что уширение спектра при положительном остаточном chirпе входного импульса значительно больше, чем при отрицательном.

В параграфе 1.2 обнаружен эффект качественного влияния кубической спектральной фазы лазерного импульса на его самомодуляцию в нелинейной среде при любых значениях интеграла распада  $B$ . В частности, в спектре самомодулированного импульса появляются узкие пики, а уширение спектра существенно меньше, чем у Фурье-ограниченного импульса.

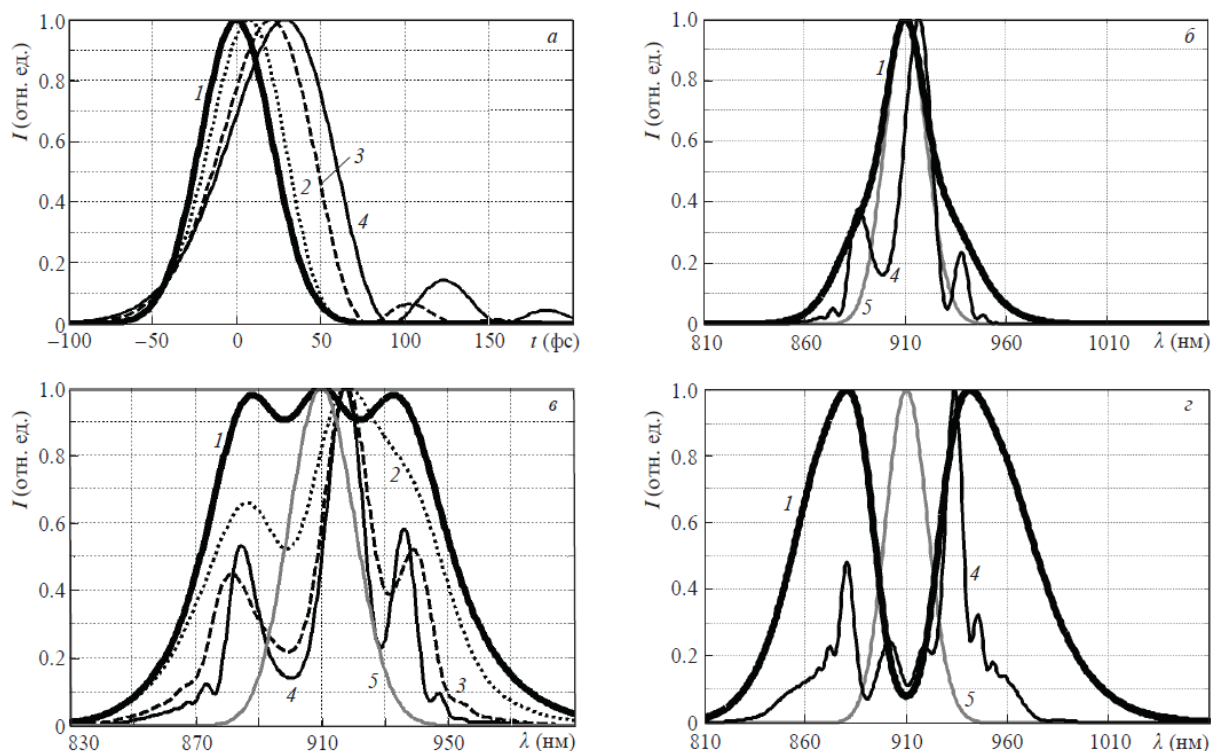


Рисунок 1. Огибающие входного импульса (а) и спектры импульсов при  $V = 2$  (б), 3 (в) и 5 (г), для  $\beta = 0$  (1), 15000 (2), 60000 (3) и 110000 фс<sup>3</sup> (4), а также спектр входного импульса (5).

Теоретически показано, что независимо от кубической спектральной фазы исходного импульса, использование дисперсионных зеркал, вносящих только квадратичную фазу, позволяет увеличить мощность выходного импульса. При чем коэффициент  $K$  увеличения мощности при оптимальной коррекции хорошо аппроксимируется простой линейной зависимостью:

$$K = 1 + V/2.$$

В параграфе 1.3 получены экспериментальные данные, необходимые для апробации нового метода восстановления амплитуды и фазы фемтосекундного лазерного импульса. Для этого в одном выстреле стартовой части лазерного комплекса PEARL были диагностированы автокорреляционная функция излучения и одновременно три огибающих спектра сигнала (входного, набравшего  $V$  и  $2V$  интеграл распада). Так же для проверки корректности работы метода были произведены контролируемые перестройки компрессора для внесения известной квадратичной спектральной фазы разных знаков. Полученные экспериментальные данные позволили доказать применимость данного метода восстановления.

В параграфе 1.4 приведено экспериментальное исследование нелинейных и дисперсионных свойств полиэтилентерефталата – перспективного материала для фазовой самомодуляции сверхмощных лазерных импульсов. Качественным анализом модуляции



спектра показано что кубическая нелинейность полиэтилентерефталата приблизительно вдвое превышает нелинейность в кварце, а прямые наблюдения временного расплывания фемтосекундного импульса позволили измерить параметр дисперсии групповой скорости на длине волны 910 нм (порядка  $120 \text{ фс}^2/\text{мм}$ ), что примерно в 3 раза выше чем у стекла К8.

В параграфе 1.5 экспериментально продемонстрирована посткомпрессия лазерных импульсов петаваттного уровня мощности за счет фазовой самомодуляции и последующей компенсации дисперсии при отражении от дисперсионных зеркал.

В модельном эксперименте с частью петаваттного пучка продемонстрирована компрессия с 57 фс до 22 фс.

Подготовлен и проведен эксперимент по укорочению лазерного импульса на выходе петаваттного лазерного комплекса PEARL с параметрами излучения: диаметр 18 см энергия 12 Дж. Схема установки приведена на Рисунок 2. Достигнута компрессия с 63фс до 21фс импульса с энергией 12Дж.

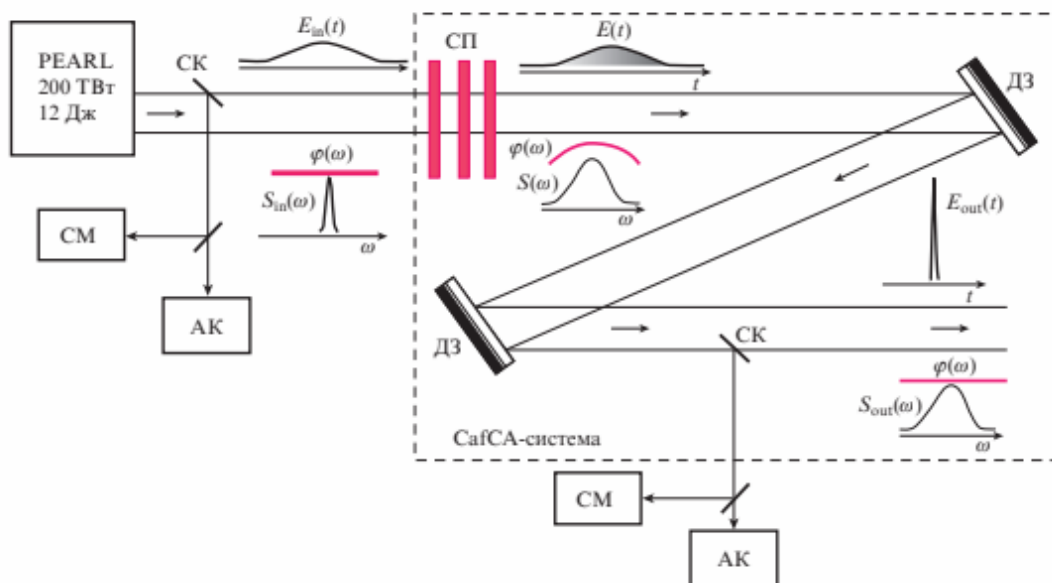


Рисунок 2. Схема эксперимента.

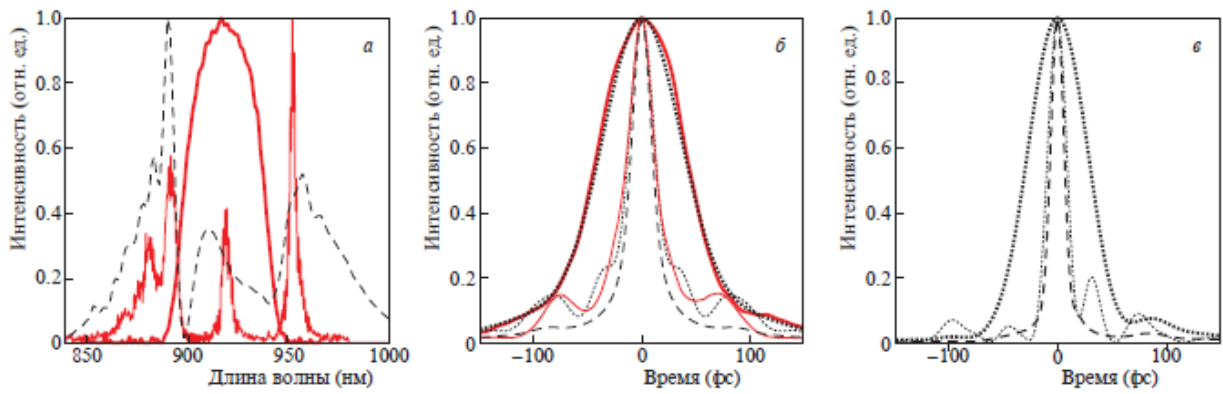
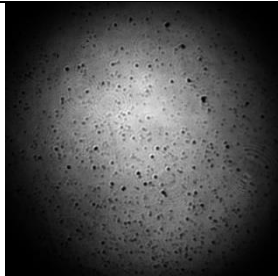
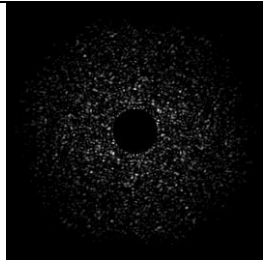


Рисунок 3. А) Красным представлены входной и выходной спектры, черной прерывистой линией – спектр смоделированного сигнала, б) красными линиями представлены измеренные АКФ входного и выходного импульса, черными пунктиром и прерывистой линией – АКФ модельного фурье-ограниченного и с подобранной фазой сигналов. в: огибающие фурье ограниченного и с подобранной фазой импульсов.

**Вторая глава** посвящена развитию и апробации методов подавления мелкомасштабной самофокусировки.

В параграфе 2.1 проведен разбор существующей на данный момент теории развития ММСФ, коэффициент усиления шума зависит не только от угла  $\alpha$  между волновыми векторами сильной и шумовой волн, но и от разности фаз  $\varphi$  между этими волнами на входе в нелинейную среду. Эта разность фаз  $\varphi$ , в свою очередь, зависит от угла  $a$  в соответствии с очевидной формулой  $\varphi = \pi\alpha 2L/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны. Здесь мы полагаем, что матовая пластинка является идеальной амплитудной маской и, соответственно, в плоскости источника шума эта разность фаз равна нулю для всех  $a$ . Следовательно, зависимость  $G$  от  $\varphi$  приводит к модуляции функции  $G(\alpha)$ , т.е. к появлению колец в дальней зоне усиленного шума. При увеличении  $L$  частота осцилляций функции  $G(\alpha)$  увеличивается и кольца в дальней зоне шума становятся неразличимы

В параграфе 2.2 проведено экспериментальное исследование развития процесса ММСФ.

а	$B=0$  ( $L$ любое)	 <p style="text-align: center;">5 мм</p>	 <p style="text-align: center;">-16 мрад      16 мрад</p>	$G \cos^2 \psi_n = 1$
---	---------------------------	---	--	-----------------------

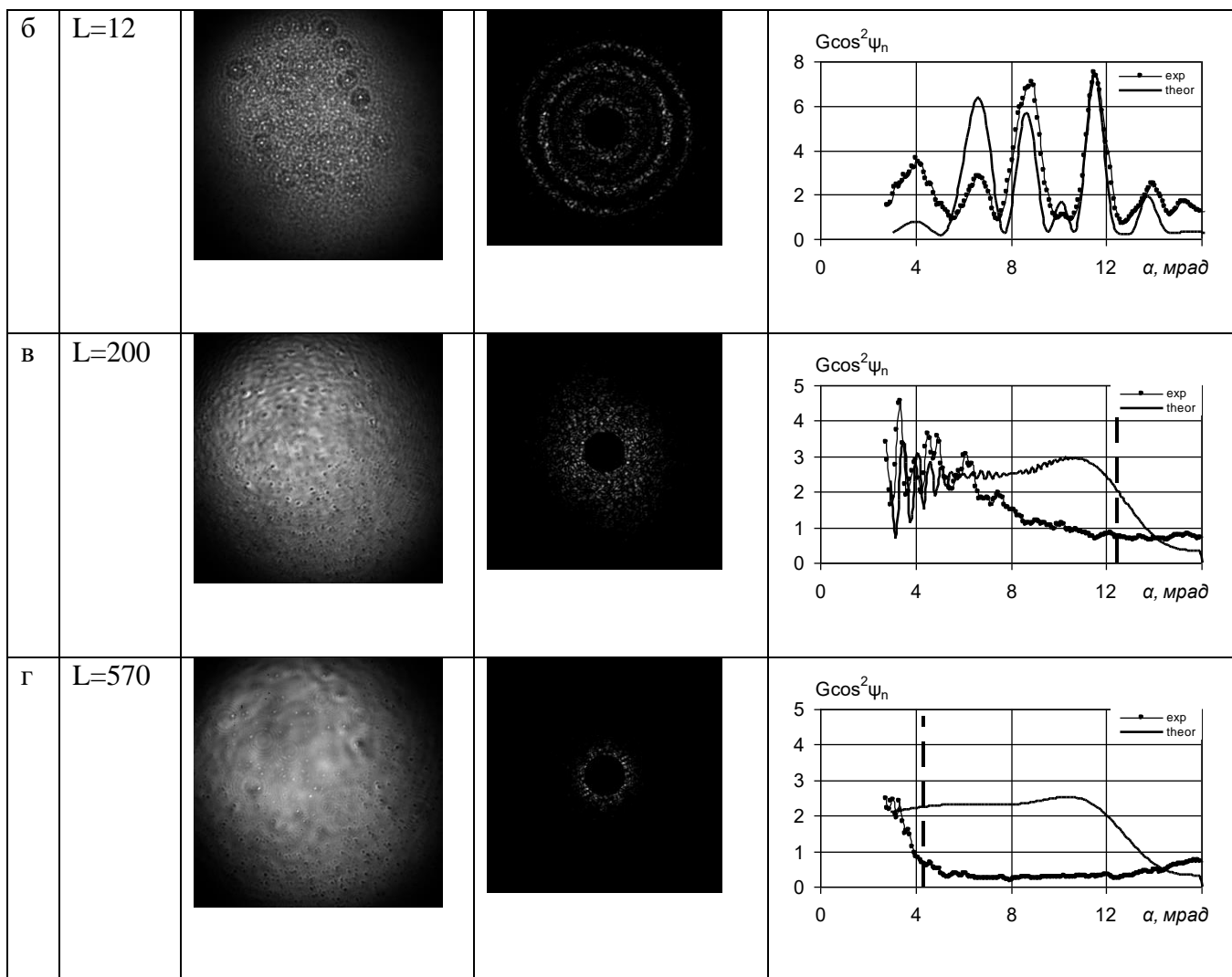


Рисунок 4 Слева направо расстояние до нелинейного элемента, ближняя зона излучения с шумовой компонентой, сосчитанная дальняя зона такого излучения, угловой спектр выходного шума.

Измерения усиления шумов проводились прямым и непрямым методом. Суть прямого метода заключается в том, что основная компонента излучения отсекалась просверленной дыркой в зеркале, а дальняя зона переносилась на камеру, таким образом, в выстреле наблюдался угловой спектр усиленных шумов. Сравнивая данное распределение с не усиленным шумом (при  $B=0$ ), были сделаны выводы о коэффициенте усиления  $G$ . В непрямом методе измерения поперечная структура излучения переносилась со входа в нелинейную среду на камеру, таким образом наблюдалось развитие шумовых компонент, далее численно применялось преобразование Фурье и рассматривались картины полученного углового спектра. На Рисунок 4 для наглядности приведены результаты непрямого метода измерения Рисунок 5. Интегральный, т.е. усредненный по пространственному спектру, коэффициент усиления шума в зависимости от угла  $\varphi$ . Точки – эксперимент, линии – теория при  $B=0.75$  (тонкая),  $B=0.9$  (толстая) и  $B=1$  (пунктир).. В первом ряду представлены ближняя зона излучения и расчётный спектр шума. В последующих рядах показаны ближние зоны сигнала, спектры шума и спектры усиления по мере удаления нелинейной среды от шумового образца. Видно, что с увеличением

длины картина сигнала улучшается, так же обратим внимание на спектр усиления, который практически обращается в ноль после угла, соответствующего углу видения. Рисунок 1 Оба метода показали качественное и количественное согласие с построенной теорией ММСФ. Также в обоих методах наблюдалась самофилтрация мощного лазерного излучения, распространяющегося в свободном пространстве при условии  $L > L_{SC}$ , где  $L$  – это расстояние между шумовым элементом и входом в нелинейную среду, а  $L_{SC}$  – это характерное расстояние, на котором наиболее опасные шумовые компоненты покидают апертуру пучка. Таким образом была экспериментально подтверждена высокая эффективность подавления мелкомасштабной самофокусировки

**В третьей главе** проведен анализ развития  $\chi^{(3)}$ -эффектов в кубических кристаллах.

В параграфе 3.1 приведены результаты экспериментального исследования влияния ориентации линейно-изотропного кубического кристалла  $BaF_2$  на развитие в нем ММСФ, что подтвердило выдвинутую в [36] гипотезу. Для измерения развития шумов в кристалле проводился эксперимент по прямому методу измерения аналогично описанному в параграфе 2.2 с тем отличием, что кристалл был помещен в оптический стол, позволяющий вращать образец на  $360^\circ$  относительно оси прохождения излучения. Результирующий интегральный коэффициент усиления представлен на Рисунок 4. Данная зависимость количественно подтверждает теоретические оценки, также продемонстрирована важность правильной ориентации кристаллов для уменьшения в них ММСФ (параллельно кристаллографической оси), ведь разница в коэффициенте усиления даже при малых значениях  $B$ -интеграла в эксперименте достигла трех раз.

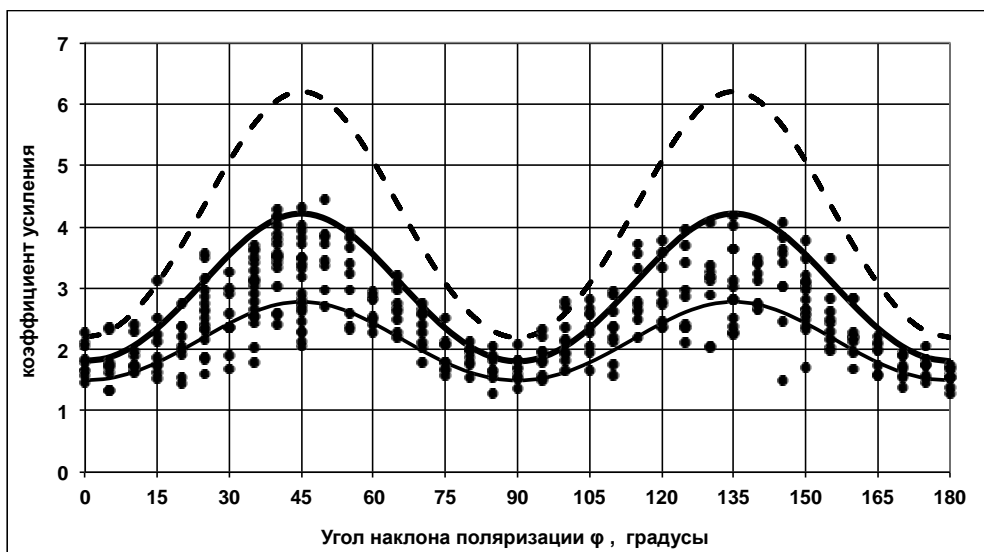


Рисунок 5. Интегральный, т.е. усредненный по пространственному спектру, коэффициент усиления шума в зависимости от угла  $\varphi$ . Точки – эксперимент, линии – теория при  $B=0.75$  (тонкая),  $B=0.9$  (толстая) и  $B=1$  (пунктир).

В параграфе 3.2 описаны уникальные свойства лазерной керамики и  $\chi^{(3)}$ -эффектов в ней. Керамика представляет собой совокупность плотно упакованных гранул с характерными размерами  $l_g$  от единиц микрон до 100 микрон. Толщина границ между гранулами меньше 1 нм. Ориентация кристаллографических осей в каждой грануле случайна. Значит для исследования свойств керамики требуется изучить свойства отдельного кубического кристалла с произвольной ориентацией. Было исследовано влияние ориентации кристаллов с кубической симметрией на генерацию ортогональной поляризации, на фазовую самомодуляцию и на самофокусировку лазерного излучения. Определены ориентации кристалла, в которых указанные эффекты максимальны и минимальны.

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

### Список используемой литературы

1. 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 // Book Petawatt laser system / EditorProc. SPIE, 1997. – С. 490-500.
2. 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. – 2010. – Т. 49. – С. 1676-1681.
3. Yu T. J., Lee S. K., Sung J. H., Yoon J. W., Jeong T. M., Lee J. Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser // Optics Express. – 2012. – Т. 20, № 10. – С. 10807-10815.
4. 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 (1022 W/cm<sup>2</sup>) // Applied Physics B. – 2005. – Т. 80. – С. 823–832.
5. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Optics Communications. – 1985. – Т. 56. – С. 219.
6. Chvykov V., Yanovsky V. // CLEO/IQEC – Baltimore: Proceeding, 2009. –.
7. Chen S. N., Vranic M., Gangolf T., Boella E., Antici P., Bailly-Grandvaux M., Loiseau P., Pepin H., Revet G., Santos J. J., Schroer A. M., Starodubtsev M., Willi O., Silva L. O., d'Humieres E., Fuchs J. Collimated protons accelerated from an overdense gas jet irradiated by a 1  $\mu$ m wavelength high-intensity short-pulse laser // Scientific Reports – 2017. – Т. 7. – С. 13505

8. Soloviev A. A., Khazanov E. A. 1 GeV/cm electron acceleration by a petawatt OPCPA laser // Book 1 GeV/cm electron acceleration by a petawatt OPCPA laser / EditorProc. of SPIE, 2010. – C. 77511G.
9. Narozhny N. B., Bulanov S. S., Mur V. D., Popov V. S.  $e^+e^-$ -pair production by a focused laser pulse in vacuum // Physics Letters A. – 2004. – Т. 330, № 1. – С. 1-6.
10. Mourou G., Mironov S., Khazanov E., Sergeev A. Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics // European Physical Journal-Special Topics. – 2014. – Т. 223 №6 –С. 1181–1188.
11. Cotel A., Castaing M., Pichon P., Le Blanc C. Phased-array grating compression for high-energy chirped pulse amplification lasers // Optics Express. – 2007. – Т. 15, № 5. – С. 2742-2752
12. Cotel A., Gombaud C., Pichon P., Liard A., Marchetti L., Vassilakis J. P., Feilleux R., Michaud F., Boronski M., Sellam A., Devrieze C., Bernard Y. Meter-size 575x1015mm Gold-coated Gratings for 10PW-class lasers // Book Meter-size 575x1015mm Gold-coated Gratings for 10PW-class lasers / Editor. – Lindau, Germany, 2018. – С. 69.
13. Frolov S. A., Trunov V. I., Bagayev S. N. Coherent combining of pulses amplified in wideband parametric amplifiers under multiple-beam pumping // Quantum Electronics. – 2018. – Т. 48, № 4. – С. 335–339.
14. Fan T. Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. . – 2005. – Т. 11. – С. 567-577.
15. Shaykin A., Kostyukov I., Sergeev A., Khazanov E. Prospects of PEARL 10 and XCELS Laser Facilities // The Review of Laser Engineering. – 2014. – Т. 42, № 2. – С. 141-144.
16. Фролов С. А., Трунов В. И., Багаев С. Н. Когерентное сложение импульсов, усиленных в широкополосных параметрических усилителях с многопучковой накачкой // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 4. – С. 335–339.
17. Fisher R. A., Kelley P. L., Gustajson T. K. Subpicosecond pulse generation using the optical Kerr effect // Applied Physics Letters –1969. – Т. 14, № 4. – С. 140-143.
18. Laubereau A. External frequency modulation and compression of picosecond pulses // Physical Letters. – 1969. – Т. 29A, № 9. – С. 539-540.
19. Shank C. V., Fork R. L., Yen R., Stolen R. H., Tomlinson W. J. Compression of femtosecond optical pulses // Applied Physics Letters. – 1982. – Т. 40. – С. 761-763.
20. Nisoli M., Silvestri S. D., Svelto O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique // Applied Physics Letters –1996. – Т. 68, № 20. – С. 2793-2795.
21. Rolland C., Corkum P. B. Compression of high-power optical pulses // Journal of the Optical Society of America B. – 1988. – Т. 5, № 3. – С. 641-647.

22. Беспалов В. И., Таланов В. И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейной жидкости // Письма в ЖЭТФ. – 1966. – Т. 3, № 12. – С. 471-476.
23. Розанов Н. Н., Смирнов В. А. Мелкомасштабная самофокусировка лазерного излучения в усилительных системах // Квантовая Электроника. – 1980. – Т. 7, № 2. – С. 410-418.
24. Кузьмина Н. В., Розанов Н. Н., Смирнов В. А. О пространственной фильтрации аподизированных лазерных пучков // Оптика и спектроскопия. – 1981. – Т. 51, № 3. – С. 509-514.
25. Гаранин С. Г., Епатко И. В., Львов Л. В., Серов Р. В., Сухарев С. А. Подавление самофокусировки в системе из двух нелинейных сред и пространственного фильтра // Квантовая Электроника. – 2007. – Т. 37, № 12. – С. 1159-1165.
26. 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. – 2007. – Т. 46, № 20. – С. 4423-4430.
27. Mironov S. Y., Lozhkarev V. V., Ginzburg V. N., Yakovlev I. V., Luchinin G., Shaykin A. A., Khazanov E. A., Babin A. A., Novikov E., Fadeev S., Sergeev A. M., Mourou G. A. Second-harmonic generation of super powerful femtosecond pulses under strong influence of cubic nonlinearity // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics – 2010. – Т. 18, № 1. – С. 7-13.
28. Mironov S., Lozhkarev V., Luchinin G., Shaykin A., Khazanov E. Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femtosecond radiation // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2013. – Т. 113, № 1. – С. 147-151.
29. Ivanov K. A., Tsymbalov I. N., Shulyapov S. A., Krestovskikh D. A., Brantov A. V., Bychenkov V. Y., Volkov R. V., Savel'Ev A. B. Prepulse controlled electron acceleration from solids by a femtosecond laser pulse in the slightly relativistic regime // Physics of Plasmas. – 2017. – Т. 24, № 6.
30. Inoue S., Maeda K., Tokita S., Mori K., Teramoto K., Hashida M., Sakabe S. Single plasma mirror providing 104 contrast enhancement and 70% reflectivity for intense femtosecond lasers // Applied Optics. – 2016. – Т. 55, № 21. – С. 5647-5651.
31. Lévy A., Ceccotti T., D'Oliveira P., Réau F., Perdrix M., Quéré F., Monot P., Bougeard M., Lagadec H., Martin P., Geindre J.-P., Audebert P. Double plasma mirror for ultrahigh temporal contrast ultraintense laser pulses // Optics Letters. – 2007. – Т. 32, № 3. – С. 310-312.
32. Arikawa Y., Kojima S., Morace A., Sakata S., Gawa T., Taguchi Y., Abe Y., Zhang Z., Vaisseau X., Lee S. H., Matsuo K., Tosaki S., Hata M., Kawabata K., Kawakami Y., Ishida M., Tsuji K., Matsuo S., Morio N., Kawasaki T., Tokita S., Nakata Y., Jitsuno T., Miyanaga N., Kawanaka J., Nagatomo H., Yogo A., Nakai M., Nishimura H., Shiraga H., Fujioka S., Group F., Group L., Azechi H., Sunahara A., Johzaki T., Ozaki T., Sakagami H., Sagisaka A., Ogura K., Pirozhkov A. S.,

Nishikino M., Kondo K., Inoue S., Teramoto K., Hashida M., Sakabe S. Ultrahigh-contrast kilojoule-class petawatt LFEX laser using a plasmamirror // *Applied Optics*. – 2016. – Т. 55, № 25. – С. 6850-6857.

33. Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., Khazanov E. High-efficiency second-harmonic generation of superintense ultrashort laser pulses // *Applied Optics*. – 2009. – Т. 48, № 11. – С. 2051-2057.

34. Jullien A. 10–10 temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation // *Optics Letters*. – 2005. – Т. 30. – С. 8.

35. High Temporal Contrast Front End with a multipass Ti:Sa amplifier and a CaF<sub>2</sub>-based XPW temporal filter. / Kalashnikov M., Osvay K., Roman V., Schönagel H., Sandner W., 2011.

36. Кузьмина М. С., Хазанов Е. А. Пространственная неустойчивость линейно поляризованной плоской волны в кубическом кристалле // *Известия ВУЗов. "Радиофизика"*. – 2016. – Т. 59, № 7. – С. 596-604.

37. Feng Y., Lu J., Takaichi K., Ueda K.-i., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A. A. Passively Q-switched ceramic Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG lasers // *Applied Optics*. – 2004. – Т. 43, № 14. – С. 2944-2947.

38. Kim W., Villalobos G., Baker C., Frantz J., Shaw B., Bayya S., Bowman S., Sadowski B., Hunt M., Rock B., Aggarwal I., Sanghera J. Overview of transparent optical ceramics for high-energy lasers at NRL // *Applied Optics*. – 2015. – Т. 54, № 31. – С. F210-F221.

39. Хазанов Е. А. Термооптика магнитоактивной среды: изоляторы Фарадея для лазеров с высокой средней мощностью // *УФН*. – 2016. – Т. 186, № 9. – С. 975-1000.

40. Kaminskii A. A., Bagaev S. N., Eichler H. J., Rhee H., Ueda K., Takaichi K., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T. Observation of high-order stokes and anti-stokes  $\chi(3)$ -generation in highly transparent laser-host Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics // *Laser Physics Letters* –2006. – Т. 3, № 6. – С. 310-313.

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

Основные результаты работы опубликованы в статьях в реферируемых журналах:

1. S Yu Mironov, V N Ginzburg, A A Kochetkov, E I Gacheva, D E Silin, Yu A Mamaev, A A Shaykin, E A Khazanov and G A Mourou "Use of polyethylene terephthalate for temporal recompression of intense femtosecond laser pulses" // *Laser Physics Letters* Volume 12 Number 2
2. V. N. Ginzburg, A. A. Kochetkov, I. V. Yakovlev, S. Yu. Mironov, A. A. Shaykin, E. A. Khazanov. "Influence of the cubic spectral phase of high-power laser pulses on their self-phase modulation" // *Quantum electron*. 46, 106 (2016).



3. Anashkina E.A.,Ginzburg V.N.,Kochetkov A.A.,Yakovlev I.V.,Kim A.V. and Khazanov E.A. «Single-shot laser pulse reconstruction based on self-phase modulated spectra measurements»// Scientific Reports 6, Article number: 33749 (2016)
4. В. Н. Гинзбург, А. А. Кочетков, М. С. Кузьмина, К. Ф. Бурдонов, А. А. Шайкин, Е. А. Хазанов “Влияние поляризации лазерного излучения на мелкомасштабную самофокусировку в изотропных кристаллах”// Квантовая электроника, 47, 3 (2017)
5. Khazanov, E. A.; Maslennikov, O. V.; Ginzburg, V. N.; Kochetkov, A. A.; Nekorkin, V. I.,Third-order-nonlinear effects in single crystals with arbitrary orientation and in ceramics, OPTICS EXPRESS, V 25, N 23, 27968-27980 (2017)
6. С. Ю. Миронов, В. Н. Гинзбург, И. В. Яковлев, А. А. Кочетков, А. А. Шайкин, Е. А. Хазанов, Ж. Муру, “Использование самомодуляции фазы для временного сжатия интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов”, Квантовая электроника, 47:7 (2017), 614–619 [Quantum Electron., 47:7 (2017), 614–619]
7. . А. С. Зуев, В. Н. Гинзбург, А. А. Кочетков, А. А. Шайкин, И. В. Яковлев, “Стретчер Оффнера для лазерного комплекса PEARL”, Квантовая электроника, 47:8 (2017), 705–710 [Quantum Electron., 47:8 (2017), 705–710]
8. В. Н. Гинзбург, А. А. Кочетков, А. К. Потемкин, Е. А. Хазанов, “Подавление мелкомасштабной самофокусировки сверхмощных лазерных пучков благодаря их самофилтрации при распространении в свободном пространстве”, Квантовая электроника, 48:4 (2018), 325–331 [Quantum Electron., 48:4 (2018), 325–331]

В трудах конференций:

1. V. Ginzburg, A. Kochetkov, E. Khazanov, and S. Mironov «Optimization of temporal parameters of petawatt femtosecond pulses by XPW and SPM techniques.» // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2014, pp. 108

Доложены на конференциях

1. A. Kochetkov, V. Ginzburg «Optimization of temporal parameters of petawatt femtosecond pulses by XPW and SPM techniques.» // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2014, pp. 112

2. Кочетков А.А., Гинзбург В.Н., Зуев А.С. “Компрессия сверхмощных фемтосекундных лазерных импульсов после SPM в пластике (полиэтилентерафталате)” // XVII научная школа “Нелинейные волны-2016”, март 2016, стр. 82.
3. V.N. Ginzburg, A.A. Kochetkov, and E.A. Khazanov “Study of self-filtering and small-scale self-focusing suppression of high-intensity laser beams” //NWP-2017
4. A.A. Kochetkov, V.N. Ginzburg, M.S. Kuzmina, A.A. Shaykin, and E.A. Khazanov “Experimental research of small-scale self-focusing in isotropic crystals” // NWP 2017
5. Anton Kochetkov, Vlad Ginzburg, Maryana Kuz'mina and Efim Khazanov “The Impact of Laser Beam Polarization on Small-Scale Self-Focusing in Isotropic Crystals” // NWP2017
6. Anton Kochetkov, Vlad Ginzburg, Maryana Kuz'mina, Efim Khazanov “The Impact of Laser Beam Polarization on Small-Scale Self-Focusing in Isotropic Crystals” // Fio LS 2017
7. A.A. Kochetkov, V.N. Ginzburg, E.A. Khazanov "Self-filtering and small-scale self-focusing suppression of high-intensity laser beams" // ICUIL 2018 conference