

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

Зуев Александр Сергеевич

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

“Измерение характеристик и управление параметрами
сверхмощных лазерных импульсов”

Аспирант:

Зуев Александр Сергеевич

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., зав. лаб. 370

Шайкин А.А.

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород — 2018

Актуальность темы диссертации

В последние годы большое внимание уделяется созданию сверхмощных лазерных систем. Огромная интенсивность и напряженности электрических и магнитных полей, достигаемые при фокусировке петаваттных лазерных импульсов, позволяют изучать процессы взаимодействия света с веществом в недоступных ранее режимах [1], в экстремальных условиях, близких к тем, что имеют место при ядерных взрывах и в недрах звезд. Импульсы со сверхвысокой мощностью находят свое применение для ускорения заряженных частиц [2-4]: электронов, протонов, ионов, в лазерном термоядерном синтезе [5], для создания новых источников рентгеновского излучения и во многих других приложениях. Создание и исследование лазеров сверхвысокой, в частности петаваттной, мощности является важной и актуальной задачей.

Для получения сверхмощных лазерных импульсов активно применяется метод усиления чирпированных (частотно-модулированных) импульсов [6] (chirped pulse amplification, CPA). При непосредственном усилении лазерных импульсов с большой пиковой мощностью происходит их самофокусировка, приводящая к искажению пучка и оптическому пробое материала усилителя [7]. Для успешной реализации принципа CPA используется согласованная по дисперсионным характеристикам система стретчер-компрессор, позволяющая растягивать и сжимать импульсы во времени. Лучшее фазовое согласование стретчера и компрессора минимизирует длительность импульсов и является достаточно очевидным способом увеличения пиковой мощности лазерных CPA систем.

Настоящая работа посвящена созданию нового стретчера для реконструируемого петаваттного лазерного комплекса PEARL (PEtawatt pARametric Laser) [8], созданного в ИПФ РАН. Эта лазерная система основана на параметрическом усилении чирпированных импульсов [9, 10] (optical parametric chirped pulse amplification - OPCPA) и построена по оригинальной схеме OPCPA с преобразованием частоты [11]. Принципиальное отличие этой схемы от традиционной OPCPA состоит в том, что в первый каскад усиления инжектируется стретчированное излучение хром-форстеритового фемтосекундного задающего генератора (ФЗГ), а в последующие каскады и компрессор направляется излучение с сопряженной длиной волны, рожденное за счет трехволнового взаимодействия в первом каскаде.

Реализованная модификация лазерного комплекса PEARL заключается в замене ФЗГ на хром-форстерите титан-сапфировым генератором и переходе к классической схеме OPCPA. Поскольку условия фазового согласования для этой схемы и схемы OPCPA с преобразованием частоты принципиально различаются, то возникла необходимость создания нового стретчера, согласованного с уже имеющимся компрессором. Более широкий спектр генерация лазера на Ti:sapphire позволяет получать более короткие лазерные импульсы. В новом стретчере и компрессоре растягиваются и сжимаются импульсы излучения с одинаковой центральной длиной волны, что в свою очередь позволяет лучше согласовать дисперсионные характеристики этих устройств.

Почти в каждом современном сверхмощном лазерном комплексе присутствуют дифракционные решетки. Они представляют из себя отражающие поверхности с нанесенными на них штрихами вдоль всей поверхности с большой частотой: от сотен до тысяч штрихов на 1 мм. Дисперсионные свойства дифракционных решеток позволяют растягивать импульсы в десятки тысяч раз во избежание пробоя кристаллов в процессе усиления. Сжатие импульса осуществляется в компрессоре, состоящего также из дифракционных решеток. Для успешного сжатия импульса необходимо совпадение плотностей штрихов решеток компрессора. Поэтому актуально измерение разности плотностей штрихов решеток [12]. Кроме этого дифракционные решетки благодаря своей периодичной структуре могут использоваться в качестве стандартов длины для устройств, измеряющих длины с нанометровым разрешением [13]. Интерес проявляется и к дифракционным решеткам с переменной плотностью штрихов благодаря их способности

минимизировать кому, сферические aberrации и дефокусировку излучения [14]. В связи с этим крайне важно уметь измерять абсолютную плотность штрихов дифракционных решеток как интегрально, так и локально.

Одной из пионерской работой по измерению плотности штрихов является работа Короткова 1996 года [13], где он предложил несколько дифракционно-интерферометрических методов с использованием нескольких источников излучения для измерения абсолютной плотности штрихов, точность методов составила $\frac{dN}{N} = 3 \cdot 10^{-3}$. В 1999 году Уооп предложил метод, требующий всего один источник излучения [15]. После решетки был установлено зеркало, измерялся угол поворота этого зеркала, необходимый для отражения назад падающего на него излучения. Зеркало поворачивалось для отражения назад лучей, отраженных от дифракционной решетки зеркально, и пучков, отраженных в первый порядок дифракции. Точность метода равнялась $\frac{dN}{N} = 3 \cdot 10^{-4}$. В более поздних работах предлагались методы по измерению плотности штрихов решеток с переменной плотности штрихов, например, с помощью последовательного измерения локальной плотности штрихов с помощью LTP (long trace profiler) [16, 17]. Позднее методы измерения плотности штрихов с использованием LTP совершенствовались, постепенно увеличивая их точность [18, 19]. Точность этих методов превзошла точности предыдущих и равнялась $\frac{dN}{N} = 7 \cdot 10^{-5}$ [20]. В ряде работ [21, 22] по измерению плотности штрихов с помощью гониометра исследовались и компенсировались негативные влияния неточности позиционирования оси вращения решетки на точность измерения. В работе [23] было показано, что оптимальным является измерение угла между положениями Литтрова первого порядка по разные стороны от зеркального отражения. Точность $\frac{dN}{N} = 3 \cdot 10^{-5}$. Измерение плотности штрихов до сих пор является актуальной задачей, предлагаются всё новые и новые методы измерения абсолютной плотности штрихов решеток [24, 24]. В недавней статье описано несколько новых методов измерения [25], основанных на использовании двух источников излучения и проанализировал другие ограничения точности измерения. Точность $\frac{dN}{N} = 2.7 \cdot 10^{-4}$. В другой работе [26] предложен метод двухмерного измерения плотности штрихов, метод реализован для выпуклой дифракционной решетки с переменной плотностью штрихов ($\frac{dN}{N} = 5 \cdot 10^{-5}$).

В то время как гониометры способны измерять большие углы за счет многократного измерения углов, точность измерения меньших углов автоколлиматорами значительно выше. Поэтому возникло предложение создания методов измерения абсолютной плотности штрихов дифракционной решетки, в которых понадобилось бы измерение углов, входящих в область видимости автоколлиматора. В данной работе предложены два новых метода измерения плотности штрихов с использованием автоколлиматора: при помощи двух источников излучения с близкими длинами волн и при помощи специальной оптической системы, позволяющей получать реперное направление под углом 45° к поверхности дифракционной решетки.

Цели и задачи диссертационной работы

Данная работа является частью большого исследования по созданию петаваттного лазерного комплекса. В рамках работы описана модификация стартовой части лазерного комплекса PEARL и создание системы диагностики излучения на выходе системы. Часть работы посвящена исследованию причин увеличения длительности лазерного импульса с целью минимизировать эффекты, уменьшающие пиковую мощность лазерного импульса. Были поставлены и решены следующие задачи:

1. Модификация стартовой части лазерного комплекса PEARL, которая заключается в переходе со схемы ОРСПА с преобразованием частоты на классическую схему ОРСПА.
2. Анализ различных схем стретчеров. Расчет остаточной фазы при распространении излучения через различные стретчеры и выбор оптимальной схемы.
3. Создание системы диагностики излучения на выходе компрессора.
4. Измерение остаточной спектральной фазы с помощью системы FRPG.
5. Реализация метода измерения относительной плотности штрихов дифракционных решеток.
6. Реализация новых методов измерения абсолютной плотности штрихов дифракционных решеток.

Методы исследования

Большая часть работы представляет из себя численные расчеты с использованием пакета прикладных программ MatLab. Расчет остаточной фазы в различных схемах стретчер-компрессор проводится с помощью лучевого метода.

Научная новизна работы

В работе представлено исследование различных схем стретчеров. Рассчитаны величины остаточной фазы, углового и пространственного чирпов при использовании в стретчерах разных отражающих поверхностей: сферических и параболических зеркал. Получено, что наиболее оптимальным является использование стретчера с триплетом Оффнера со сферическими зеркалами. В работе предложен и успешно использован метод расчета остаточной дисперсии фазы “стретчера с нулевой дисперсией”.

Усовершенствован метод измерения относительной плотности штрихов дифракционных решеток. Предложены два оригинальных метода измерения абсолютной плотности штрихов дифракционной решетки с использованием автоколлиматоров.

Научная значимость результатов

С использованием созданной системы диагностики излучения после компрессора лазерного комплекса рассчитана максимальная возможная мощность лазерного импульса, которую способен обеспечить лазерный комплекс PEARL без пробоя дифракционных решеток компрессора. Она составила 500 ТВт.

Проведено исследование влияния различных эффектов на характеристики лазерного излучения при его фокусировке, что позволит в дальнейшем минимизировать их негативный эффект.

Для контроля остаточной фазы на выходе комплекса создана система измерения спектральной фазы методом FROG. При использовании акустооптического модулятора импульсов появится возможность минимизации остаточной фазы.

Достоверность полученных результатов

Все измерения характеристик лазерного излучения хорошо согласуются друг с другом. После распространения импульса через всю трассу лазерного комплекса наблюдается увеличение его длительности, что хорошо согласуется с результатами измерения спектра, ширина по полувысоте которого действительно уменьшается при

увеличении пройденной излучением трассы. Это связано главным образом со спектральной неоднородностью коэффициента отражения диэлектрических зеркал. Увеличение длительности импульса, связанное с клиппированием спектра лазерного импульса, также хорошо наблюдается при сжатии импульса непосредственно после растяжения в стретчере. Остаточная спектральная фаза, измеренная системой FROG, хорошо объясняет увеличенную длительность импульса по сравнению с длительностью спектрально-ограниченного импульса, рассчитанного по измеренному спектру.

Публикация и апробация результатов

Результаты исследований были опубликованы в 1 статье в рецензируемом журнале, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов[27]. На момент написания диссертации пишется ещё одна статья про предложенный метод измерения абсолютной плотности штрихов. Результаты работы обсуждались на внутренних семинарах ИПФ РАН, кроме того они представлены в ряде конференций и опубликованы в трудах этих конференций[28-38].

Личный вклад автора

При выполнении диссертационной работы автором было написано множество программ для анализа схем стретчеров, непосредственно им была выбрана схема стретчера с триплетом Оффнера со сферическими зеркалами, реализуемая впоследствии. Система диагностика лазерного излучения на выходе компрессора была полностью создана автором диссертационной работы. Силами автора работы был проведен анализ влияния спектральной фазы и других негативных эффектов на всевозможные характеристики лазерного излучения при его фокусировке. Методы измерения абсолютной плотности штрихов, описанные в третьей главе, были предложены автором работы.

Благодарности

Автор выражает свою благодарность кандидату физико-математических наук и научному руководителю Шайкину А.А., кандидату физико-математических наук Яковлеву И.В., доктору физико-математических наук Хазанову Е.А., кандидату физико-математических наук Гинзбургу В.Н. за совместную работу и ценные советы в процессе написания настоящей работы

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 87 страницы.

Краткое содержание работы

Первая глава настоящей работы посвящена модернизации стартовой части лазерного комплекса PEARL, как предварительным теоретическим исследованиям, так и последующей экспериментальной реализации.

В разделе 1.1 описан метод создания петаваттных лазерных комплексов с помощью chirпированных лазерных импульсов (CPA). Описаны условия фазового согласования,

необходимые для успешного сжатия лазерных импульсов после их усиления. После подробно описана схема лазерного комплекса PEARL, описаны используемые в нем стретчер и компрессор для успешного выполнения условий фазового согласования в схеме ОРСПА с преобразованием частоты. Часть раздела посвящена лучевому методу расчета дисперсионных характеристик, приобретаемых импульсом при распространении через стретчер и компрессор.

В разделе 1.2 приведены характеристики нового фемтосекундного генератора на Ti:sapphire. По измеренной длительности и спектру был сделан вывод о том, что лазерный импульс не спектрально-ограниченный. В связи с этим были проведены эксперименты по сжатию лазерного импульса до минимальной длительности с помощью chirпирующих зеркал, минимальная длительность импульса равнялась 30 фс.

Раздел 1.3 посвящен анализу различных схем стретчеров с различными сферическими поверхностями. По результатам анализа благодаря малой остаточной дисперсии четвертого порядка был выбран стретчер с триплетом Оффнера со сферическими зеркалами.

Оптимизация параметров стретчера с триплетом Оффнера приведена в разделе 1.4. Тщательным образом были фокусное расстояние зеркал стретчера, прицельный параметр при попадании излучения в стретчер. Были рассмотрены различные способы разведения входных и выходных пучков в стретчере, для каждого случая рассчитаны остаточная фаза, угловые chirпы на выходе системы. Подробно описаны, как с помощью сдвига и поворота решетки стретчера можно ликвидировать остаточную дисперсию второго и третьего порядков.

Стретчер с триплетом Оффнера со сферическими зеркалами был собран. В разделе 1.5 описана система настройки стретчера. При этом на выходе стретчера контролировался спектр импульса и отсутствие углового chirпа.

После растяжения излучения в стретчере была проведена процедура сжатия лазерного импульса в однорешеточном компрессоре, минимальная длительность излучения составила 36 фс. Этому и анализу причин увеличенной длительности импульса посвящен последний раздел первой главы.

Вторая глава настоящей работы посвящена вопросам измерению характеристик мощных фемтосекундных импульсов.

В разделе 2.1 описано создание системы диагностики лазерного излучения после компрессора. По измеренному поперечному распределению пучка рассчитана максимальная допустимая мощность лазерного импульса с учетом стойкости дифракционной решетки. Приведен результат измерения поперечного распределения пучка после фокусировки. Также численно рассчитано влияние астигматизма, углового и пространственного chirпов на длительность лазерного импульса при его фокусировке. В режиме “гребенки” и в “разовом” режиме работы лазерного комплекса измерены длительности лазерного импульса.

В разделе 2.2 представлены результаты численного расчета влияния остаточной дисперсии фазы разных порядков на характеристики лазерного импульса: длительность, контраст на временах 1 пс и интенсивности пика лазерного импульса. Подробно исследована проблема клиппирования спектра лазерного импульса при распространении излучения через стретчер и компрессор.

Раздел 2.3 посвящен непосредственному измерению спектральной фазы с помощью метода FROG. Подробно описан и исследованы возможности алгоритма восстановления временного профиля, спектральной фазы и спектра импульса по спектрограмме FROG.

В третьей главе описана важность использования в компрессоре дифракционные решетки с одинаковой плотностью штрихов.

В разделе 3.1 описано ухудшение характеристик лазерных импульсов в случае использования для их сжатия компрессор с дифракционными решетками, различающимися плотностями штрихов. Показано, что хоть четырехрешеточный

компрессор обладает достаточным количеством степеней свободы для компенсации углового чирпа, дисперсии второго и третьего порядков, некоторые эффекты компенсировать невозможно, что скажется на длительности лазерного импульса при его фокусировке. В связи с этим в разделе 3.2 описан метод измерения относительной плотности штрихов двух решеток и проведена его модернизация с целью увеличения точности измерения в десять раз.

Разделы 3.3 и 3.4 посвящены новым методам измерения абсолютной плотности штрихов дифракционной решетки с помощью автоколлиматоров. Предложенный метод, описанный в разделе 3.3, экспериментально реализован. Для другого метода подготовлена теоретическая база.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы

Результаты работы

В процессе написания диссертационной работы проведена модификация стартовой части лазерного комплекса PEARL, которая заключается в переходе со схемы ОРСПА с преобразованием частоты на классическую схему ОРСПА с помощью замены фемтосекундного генератора на Cr:forsterite генератором на Ti:sapphire и конструировании стретчера с триплетом Оффнера, согласованного с имеющимся компрессором. Для модификации был проведен анализ различных схем стретчеров, и реализована наиболее оптимальная схема с точки зрения характеристик лазерного импульса после его сжатия в компрессоре. Для расчета остаточной фазы в различных схемах стретчер-компрессор предложен метод расчёта "стретчера с нулевой дисперсией". В результате модификации стартовой части лазерного комплекса увеличена надежность и стабильность системы, за счет широкого спектра генерации фемтосекундного лазера на Ti:sapphire появилась возможность генерации более коротких импульсов, измеренная длительность импульсов на выходе компрессора равнялся 42.2 фс.

С использованием созданной системы диагностики излучения после компрессора лазерного комплекса рассчитана максимальная возможная мощность лазерного импульса, способную обеспечить комплекс PEARL без пробоя дифракционных решеток компрессора. Она составила 500 ТВт. Исследовано влияние остаточной спектральной фазы лазерного импульса на его временной профиль, длительность импульса и на вид автокорреляционных функций. Исследованы причины увеличения длительности лазерного импульса при его фокусировке, связанные с остаточной фазой, пространственным чирпом, угловым чирпом, астигматизмом, деградацией ширины спектра импульса при его распространении через лазерную систему и при использовании компрессора с дифракционными решетками, различающимися плотностью штрихов. Проанализированы различные методы измерения спектральной фазы лазерного импульса, с помощью наиболее оптимальной схемы по результатам анализа проведено измерение спектральной фазы. Реализован метод измерения спектральной фазы SHG FROG.

Проанализировано влияние на характеристики излучения использования в компрессоре решёток с различающимися плотностями штрихов. Проведена модернизация метода измерения относительной плотности штрихов, позволяющая измерять относительную плотность штрихов в 10 раз точнее, $\frac{dN_{\text{отн}}}{N} = 1.7 \cdot 10^{-8}$. Предложен и реализован метод измерения абсолютной плотности штрихов дифракционной решетки, заключающийся в измерении автоколлиматором угла отражения излучения от дифракционной решетки после нормального падения с использованием специальной оптической системы, способной устанавливать поверхности зеркал под углом 45° . С точностью $\frac{dN}{N} = 3.4 \cdot 10^{-6}$ измерена абсолютная плотность штрихов дифракционной

решетки. Рассчитана точность предложенного метода измерения абсолютной плотности штрихов дифракционной решетки, заключающегося в измерении автоколлиматором угла между направлениями отраженных после нормального падения на дифракционную решетку лазерных пучков, генерируемых источниками с близкими длинами волн. Она составила $\frac{dN}{N} = 2.4 * 10^{-5}$.

Литература

1. G. Mourou, T. Tajima, S.V. Bulanov, "Relativistic optics", Rev.Mod.Phys., V.78. P.309 (2006).
2. В. Беляев и др., «Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями», УФН, Т.178, С.823 (2008).
3. А. Коржиманов, А. Гоносков, и др., "Горизонты петаваттных лазерных комплексов", УФН, Т.181, С.9 (2011).
4. C. Joshi, V. Malka, "Focus on Laser- and Beam-Driven Plasma Accelerators", New J. Phys., V.12, 045003 (2010).
5. C. Labaune, "Incoherent Light on the Road to Ignition", Nature Physics, V.3, P.680 (2007).
6. D. Strickland, G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses", Optics Comm., V.56, P.219 (1985).
7. G. Mourou, C. Barry, M. Perry, "Ultrahigh-Intensity Lasers: Physics of the Extreme on a Tabletop", Physics Today, V.51, P.22 (1998).
8. V. Lozhkarev, G. Freidman et al., "Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals", Laser Phys. Lett., V4, P.421 (2007).
9. A. Dubietis, G. Jonušauskas, et al., "Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal", Opt. Commun., V.88, P. 437 (1992).
10. A. Dubietis, R. Butkus, et al., "Trends in chirped pulse optical parametric amplification", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, V.12, P.163 (2006).
11. G. Freidman, N. Andreev, et al., "Parametric amplification of chirped laser pulses at 911 nm and 1250 nm wavelengths", Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., V.4630, P.135 (2002).
12. И. Яковлев "Особенности настройки компрессора чирпированных импульсов" Квант. электрон. V. 42, P. 996 (2012)
13. V. Korotkov, S. Pulkin, A. Vitushkin, L. Vitushkin "Laser interferometric diffractometry for measurements of diffraction grating spacing" Appl. Opt. Vol. 35, N.24, P.4782 (1996)
14. M. Ito, T. Harada, T. Kita "Soft x-ray monochromator with a varied-space plane grating for synchrotron radiation: design and evaluation" Appl Opt V.28, N.1, P.146 (1989).
15. T. Yoon, C. Eom, M. Chung, H. Kong "Diffractometric methods for absolute measurement of diffraction-grating spacings" Opt. Lett. V.24, N.2 P.107 (1999).
16. S. Irick, W. McKinney "Measurement of diffraction gratings with a long trace profiler with application for synchrotron beamline gratings" AIP Conference Proceedings V.417, P.118 (1997)
17. P. Takacs, S. Qian, J.Colbert "Design of a long trace surface profiler" SPIE V.749, P.59 (1987)
18. B. Liu, Q. Wang, X. Xu, S. Fu "Measurements of groove density for concave gratings with the long trace profiler" Rev. Sci. Instrum. V.77, P.046106 (2006).
19. D. Cocco, R. Sergo1, G. Sosteroa, M. Zangrando "High precision measurements of the groove density of diffraction gratings" Proc. SPIE V.4146, P.143 (2000).

20. D. Cocco, G. Sostero, M. Zangrandoa "Technique for measuring the groove density of diffraction gratings using the long trace profiler" *Rev. Sci. Instrum.* V.74, N.7, P.3544 (2003).
21. Z. Hu, Q. Chen, X. Yu, Z. Liu, Q. Wang "Groove density measurements for the VLS grating by diffraction method" *AIP Conference Proceedings* V.705, P.823 (2004).
22. J. Lim, S. Rah "Technique for measuring the groove density of a diffraction grating with elimination of the eccentricity effect" *Rev. Sci. Instrum.* V.75, P.780 (2004).
23. Z. Hu, Z. Liu, Q. Wang "Determination of groove spacings for concave diffraction gratings" *Rev. Sci. Instrum.* V.75, P.4419 (2004).
24. B. Sheng, G. Chen, Y. Huang, L. Luo "Note: Measuring grating periods by diffraction method with a fore-end light path comprising fused fiber couplers and fiber port collimators" *Rev. Sci. Instrum.* V.88, P.106102 (2017)
25. Q. Wang, Z. Liu, H. Chen, Y. Wang, X. Jiang, S. Fu "The method for measuring the groove density of variable-line-space gratings with elimination of the eccentricity effect" *Rev. Sci. Instrum.* V.86, P.023109 (2015)
26. L. Du, X. Du, Q. Wang, "Two-dimensional groove density measurement for gratings by diffraction method" *AIP Conf. Proc.* V.1741, P.040039 (2016)
27. А. Зуев, В. Гинзбург, А. Кочетков, А. Шайкин, И. Яковлев "Стретчер Оффнера для лазерного комплекса PEARL" *Квантовая электроника*, Т.47, Н.8, С.705 (2017).
28. A. Zuev, I. Yakovlev. "Offner triplet telescope stretcher for PEARL system". *Proceedings of international symposium: "Topical problems of nonlinear wave physics"*, NWP-2014, Nizhny Novgorod, IAP RAS, P.141 (2014).
29. А. Зуев, И. Яковлев, "Новый стретчер для лазерного комплекса PEARL". *Труды XVIII научной конференции по радиофизике, секция "Квантовая радиофизика и оптика"*, ННГУ, С.29 (2014).
30. А. Зуев, И. Яковлев "Требования к плотности штрихов дифракционных решеток компрессоров чирпированных импульсов". *XX Нижегородская сессия молодых ученых, секция "Физика"*, С.19 (2015).
31. А. Зуев, И. Яковлев, "Анализ влияния разности плотностей штрихов дифракционных решеток на характеристики скомпрессированного излучения". *Труды XIX научной конференции по радиофизике, секция "Квантовая радиофизика и оптика"*, ННГУ, С.41 (2015).
32. А. Зуев, И. Яковлев, А. Степанов, А. Шайкин, "Генерация сверхмощных лазерных импульсов с центральной длиной волны 1.25 мкм". *XVII научная школа "Нелинейные волны-2016"*, С.62. (2016)
33. А. Кочетков, В. Гинзбург, А. Зуев, "Компрессия сверхмощных фемтосекундных лазерных импульсов после SPM в пластике (полиэтилентерафталате)". *XVII научная школа "Нелинейные волны-2016"*, март 2016, стр. 82.
34. А. Зуев, А. Кочетков, А. Шайкин, И. Яковлев, "Апгрейд стартовой части лазерного комплекса PEARL". *XXI Нижегородская сессия молодых ученых, секция "Физика"*, май 2016, стр. 19.
35. К. Сидоров, А. Зуев, И. Яковлев, "Измерения плотности штрихов дифракционных решеток", *труды XXI научной конференции по радиофизике, ННГУ*, 2017.
36. А. Зуев, К. Сидоров, И. Яковлев, "Измерение относительной и абсолютной плотностей штрихов дифракционных решеток с помощью автоколлиматора" *материалы докладов XXII Нижегородской сессии молодых ученых, г. Нижний Новгород*, 2017.
37. A. Zuev, A. Kochetkov, A. Shaykin, I. Yakovlev, "Upgrade of the front-end of the PetaWatt laser complex PEARL" *proceedings of international symposium NWP-2017*.
38. А. Зуев, А. Шайкин, И. Яковлев, "Компрессор субпетаваттных лазерных импульсов в комплексе PEARL", *сборник трудов XVII научной школы "Нелинейные волны-2018"*, Нижний Новгород, 2018, стр. 54-56.