

## Безабберрационная широкополосная система «стретчер–компрессор» для фемтосекундного петаваттного лазерного комплекса с параметрическим усилением

В.Е. Лещенко, В.И. Трунов, Е.В. Пестряков, С.А. Фролов\*

*Институт лазерной физики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3*

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Разработана оптимальная схема системы «стретчер–компрессор» для использования в лазерных комплексах с параметрическим усилением чирпованных импульсов при пикосекундной накачке (~ 100 пс), позволяющая реализовывать генерацию импульсов петаваттного уровня мощности длительностью < 10 фс с высоким контрастом и низким уровнем абберраций. Показано, что единственной безабберрационной конфигурацией стретчера, основанной на сферических зеркалах, является схема, состоящая из отражательного телескопа со сферическими зеркалами по схеме Оффнера и двух дифракционных решеток, одна из которых расположена в центре зеркал телескопа. Согласно результатам моделирования компрессор, состоящий из четырех пропускающих дифракционных решеток с апертурой 112 × 125 мм, толщиной 3 мм и набора чирпованных зеркал с апертурой 100 мм, вносящих суммарную дисперсию примерно –4500 фс<sup>2</sup>, позволяет сжимать усиленные импульсы до спектрально ограниченной длительности < 10 фс и пиковой мощности ~ 1 ПВт при величине *B*-интеграла, не превышающей единицы. Планируется использование разработанной системы «стретчер–компрессор» в петаваттном фемтосекундном лазерном комплексе, развиваемом в ИЛФ СО РАН.

*Ключевые слова:* компрессор, стретчер, параметрическое усиление, фемтосекундные импульсы, ультра-релятивистская интенсивность; compressor, stretcher, optical parametric amplification, femtosecond pulses, ultra-relativistic intensity.

### Введение

В настоящее время в ведущих центрах лазерной физики значительные силы направлены на реализацию лазерных систем высокой интенсивности (до 10<sup>25</sup> Вт/см<sup>2</sup> и более), нацеленных на исследование эффектов ультрарелятивистской оптики и проверку фундаментальных явлений нелинейности вакуума, предсказываемых квантовой электродинамикой (поляризация вакуума, рождение электрон-позитронных пар и др.) [1], а также решение таких задач, как разработка лазерно-плазменных ускорителей заряженных частиц [2]. На создание систем подобного уровня нацелен ряд международных проектов, включая ELI в Европе и XCELS в России. Следует отметить: основная проблема при создании таких систем состоит в том, что интенсивность, достижимая в одноканальных системах, ограничена на уровне ~ 10<sup>23</sup>–10<sup>24</sup> Вт/см<sup>2</sup> [3, 4], поэтому практически все проекты планируют использование многоканальных схем с когерентным сложением усиленных импульсов. В Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН также ведутся работы по разработке базовых

принципов создания фемтосекундного петаваттного многоканального лазерного комплекса с параметрическим усилением и когерентным сложением усиленных излучений [5, 6].

При создании систем временного растяжения фемтосекундных импульсов и последующего их сжатия после каскадов усиления до петаваттного уровня мощности возникает ряд проблем, среди которых основными являются:

1. Точная компенсация спектрального фазового набега, вносимого стретчером, компрессором и другими элементами системы (нелинейные кристаллы, подложки делительных зеркал, окна вакуумных пространственных фильтров и т.п.) вплоть до 4-го порядка.

2. Обеспечение достаточно большой апертуры пучка в компрессоре и, соответственно, самого компрессора для гарантирования долговременного отсутствия оптических повреждений элементов компрессора при заданном уровне выходной мощности.

3. Система «стретчер–компрессор» должна обладать достаточно слабым нелинейным воздействием на пучок за счет эффекта Керра. При распространении излучения в системе «стретчер–компрессор» величина возникающего *B*-интеграла не должна превышать единицы.

Реализация первого пункта необходима для достижения длительности, близкой к спектрально ограниченной и соответственно максимально возможной

\* Вячеслав Евгеньевич Лещенко (leschenkoslava@gmail.com); Владимир Иванович Трунов (trunov@laser.nsc.ru); Ефим Викторович Пестряков (pefvic@laser.nsc.ru); Станислав Анатольевич Фролов (stanislav.a.frolov@gmail.com).

пиковой мощности при заданной энергии усиленного импульса. Второй пункт важен для обеспечения принципиальной возможности использования компрессора для сжатия импульсов до петаваттного уровня мощности. Третий пункт приобретает принципиальную важность для схем компрессора, использующих пропускающие элементы, так как при петаваттном уровне мощности, в зависимости от интенсивности, даже кварцевая пластинка миллиметровой толщины может вносить значительные амплитудно-фазовые искажения за счет нелинейных эффектов.

В большинстве реализованных и создаваемых мультитераваттных и петаваттных фемтосекундных систем отмеченные выше проблемы решаются с использованием компрессоров на основе отражательных голографических решеток достаточно большого размера (10–100 см). Такой подход к решению проблемы возможен благодаря тому, что в данных системах происходит усиление импульсов, chirпованных до  $\sim 1$  нс, при этом апертура компрессора, определяющая максимально достижимую мощность сжатых импульсов, ограничена в первую очередь размером используемых решеток. В таких системах, однако, невозможно реализовать частоту следования импульсов выше единиц Гц, ограниченную предельно допустимой тепловой нагрузкой на усиливающие лазерные элементы в выходных усилительных каскадах лазеров накачки.

В отличие от подобных систем развиваемый в ИЛФ СО РАН комплекс основан на параметрических каскадах усиления на основе кристаллов ВВО и LBO с накачкой импульсами пикосекундной длительности (90 пс), потенциально позволяющей повысить частоту следования импульсов до  $\sim 1$  кГц. Повышение частоты следования усиленных импульсов является определяющим фактором для осуществления активной стабилизации различных параметров усиленных импульсов, таких как относительный временной джиттер, угловая нестабильность, фаза несущей-оглабающей и др., необходимых для осуществления последующего когерентного сложения излучений усиленных каналов.

При использовании импульсов накачки длительностью 90 пс в разрабатываемой нами схеме петаваттного комплекса, как показано в [7], оптимальной является длительность усиливаемого импульса  $\sim 40$  пс. Переход к пикосекундной длительности растянутого импульса приводит к тому, что максимальная апертура компрессора ограничена в первую очередь не размером дифракционных отражательных решеток, а расстоянием между ними. В связи с этим ограничением стандартный способ сжатия усиленных импульсов отражательными дифракционными решетками при сжатии импульсов с 40 пс до 10 фс, как будет показано далее, не позволяет достичь пиковой мощности более 10 ТВт.

Переход к альтернативным схемам компрессора, содержащим пропускающие элементы, остро ставит вопрос ухудшения параметров сжатых импульсов из-за нелинейных эффектов, т.е. начинает существенно сказываться третья проблема из представленного выше перечня. На решение проблемы создания

системы растяжения фемтосекундных импульсов до длительности несколько десятков пикосекунд и их последующего сжатия после каскадов параметрического усиления до петаваттного уровня мощности направлены наши исследования.

В настоящей статье представлена разработанная для петаваттного фемтосекундного комплекса ИЛФ СО РАН система «стретчер–компрессор». Система рассчитана на растяжение-сжатие импульсов с 10 фс до 40 пс и обратно с центральной длиной волны 800 нм и пиковой мощностью усиленных сжатых импульсов 1 ПВт. Определены требования к качеству элементов системы и точности их настройки для достижения предельной пиковой интенсивности и высокого временного контраста. Достижение максимально возможной пиковой интенсивности имеет определяющее значение, так как основной целью создания комплекса является проведение экспериментов в области релятивистской и ультрарелятивистской оптики.

## 1. Компрессор

Как было представлено выше, основная проблема при создании системы «стретчер–компрессор» для комплексов, аналогичных разрабатываемому нами, состоит в выборе подходящего компрессора. В связи с этим в первую очередь определим оптимальную для разрабатываемого лазерного комплекса схему компрессора.

В настоящий момент набор возможных для использования в компрессоре (а также стретчере) дисперсионных элементов ограничен следующим перечнем: отражающие и пропускающие дифракционные решетки, призмы, гризмы, объемный компрессор (стеклянный блок) и chirпованные зеркала. Рассмотрим их основные преимущества и недостатки (табл. 1) при использовании для сжатия импульсов с 40 пс до 10 фс (для этого требуется внести дисперсию групповых задержек  $|k_2| \sim 145000$  фс<sup>2</sup>).

Призмы и chirпованные зеркала сразу исключаются ввиду невозможности обеспечить требуемую величину дисперсии, гризмы – ввиду низкой эффективности и внесения существенной ( $> 1$ ) величины  $B$ -интеграла материалом призм.

Объемный компрессор интересен с точки зрения возможности достижения высокой эффективности ( $> 90\%$ ), но возникает серьезная проблема роста влияния нелинейных эффектов. Оптимальной является конфигурация компрессора, первая часть которого состоит из стекла с большой величиной дисперсии групповых скоростей (но в то же время и значительной величиной нелинейного показателя преломления ( $n_2$ ), например SF57), а вторая – из стекла с низкой величиной  $n_2$ , но и небольшой дисперсией групповых скоростей (например, плавленый кварц). Такая конфигурация позволяет снизить нелинейный фазовый набег за счет использования на последней стадии материала с наибольшим  $n_2$  и в то же время сохранить относительную компактность за счет использования на начальной стадии материала с большой дисперсией групповых скоростей.

Возможные варианты компрессора на основе различных дисперсионных элементов

Компрессор	Практическая возможность внесения требуемой дисперсии	Эффективность компрессора	Величина вносимого $B$ -интеграла	Применимость для разработки системы
Пропускающие решетки в комбинации с чирпованными зеркалами	Да	Высокая (до 60–70%)	Варьируется снижением интенсивности в подложке решеток за счет дожатия чирпованными зеркалами (дает возможность реализации компрессора с $B < 1$ )	Да
Пропускающие решетки	—	Высокая (до 60–70%)	$> 1$	Нет
Отражающие решетки	—	$< 60\%$ , зависит от угла падения на первую решетку	0	—
Объемный компрессор	—	Очень высокая (до $> 90\%$ )	$\gg 1$ (при характерной апертуре $\sim 10$ см)	—
Гризы	—	Низкая ( $\sim 20\%$ , из-за использования решеток с низкой плотностью штрихов (300–600 штр./мм))	$> 1$	—
Призмы	Нет	Высокая	$> 1$	—
Чирпованные зеркала	—	Высокая	$\sim 0$	—

Проведенный нами анализ показал, что даже при использовании оптимизированной конфигурации компрессора для того, чтобы величина  $B$ -интеграла не превышала единицы при мощности 1 ПВт, апертура пучка должна быть не менее 135 см (при длине блока из SF57 60 см и блока из плавного кварца 28,5 см). Доступных стекол таких размеров с высоким оптическим качеством в настоящее время нет. Добавление чирпованных зеркал для снижения пиковой интенсивности в стекле позволяет снизить требуемую апертуру в 2 раза, но проблему не решает. Так, в спектральном диапазоне 700–900 нм максимальная величина дисперсии второго порядка коммерчески доступных зеркал составляет примерно  $-300 \text{ фс}^2$ , поэтому более  $10\,000 \text{ фс}^2$  внести чирпованными зеркалами практически невозможно. При этом использование чирпованных зеркал, вносящих  $10\,000 \text{ фс}^2$ , позволяет снизить требования на апертуру до 75 см. Но стекло даже такой апертуры высокого оптического качества не производится. Поэтому объемный компрессор для рассматриваемого типа лазерных систем в настоящее время не реализуем.

По той же причине (требования на апертуру для снижения до требуемой величины  $B$ -интеграла) невозможно создать компрессор для разрабатываемой нами лазерной системы на основе пропускающих дифракционных решеток без использования чирпованных зеркал.

Отражающие решетки, на первый взгляд, являются приемлемым вариантом: достаточно высокая эффективность, отсутствие нелинейных эффектов, повсеместное использование в компрессорах. Однако

при использовании в компрессоре отражающих решеток возникает проблема, связанная с тем, что при достаточно небольшом коэффициенте временного растяжения импульсов (с 10 фс до 40 пс) расстояние между решетками составляет всего несколько сантиметров (3–6 см в зависимости от угла падения на первую решетку при плотности штрихов 1200 штр./мм), что существенно ограничивает апертуру компрессора (рис. 1, а).

Следует отметить, что ограничения носят сугубо геометрический характер. Ограничения на апертуру создают ограничения на максимальную энергию сжимаемого импульса (рис. 1, б). Так, максимально достижимая энергия сжатого импульса с гипергауссовым профилем вида

$$I(r) = \exp(-2r^4/W^4) \quad (1)$$

с учетом эффективности дифракции при использовании решеток с плотностью штрихов 1200 штр./мм, стойкостью  $0,2 \text{ Дж/см}^2$  и при сжатии с 40 пс до 10 фс составляет 110 мДж (при энергии импульса на входе в компрессор 350 мДж и угле падения на первую решетку  $45^\circ$ ), что соответствует пиковой мощности 11 ТВт.

В принципе расстояние между решетками, а следовательно, и апертуру, и энергию сжатого импульса при том же коэффициенте растяжения можно увеличить за счет использования решеток с меньшей плотностью штрихов. Однако использование решеток с плотностью штрихов менее 1200 штр./мм нецелесообразно, так как это приводит к существенному падению эффективности дифракции [8].

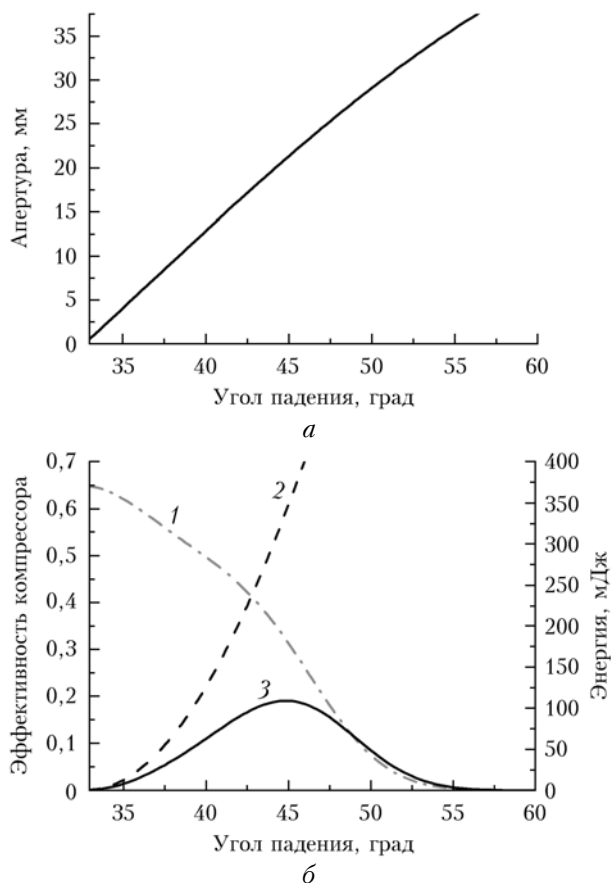


Рис. 1. Максимальная апертура сжимаемого импульса (решетки 1200 штр./мм, растяжение с 10 фс до 40 пс, центральная длина волны 800 нм) (а) и эффективность компрессора (1) (экспериментальные данные для голографической решетки 1200 штр./мм с золотым покрытием производства ХолоГрэйт для импульсов с центральной длиной волны 800 нм) и энергия на входе (2) и выходе (3) компрессора для пучка с гипергауссовым профилем (1) и пиковой плотностью энергии 0,2 Дж/см<sup>2</sup> (б)

Таким образом, компрессор с отражательными решетками для разрабатываемой системы не подходит.

В итоге остается единственный вариант компрессора на основе дифракционных пропускающих решеток в комбинации с chirпованными зеркалами. Рассмотрим решетки из плавленого кварца толщиной 3 мм, плотностью штрихов 1280 (решетки с такими параметрами производятся, например, фирмой JENOPTIK Optical Systems GmbH [9]). Использование для временного дожатия импульса после пропускающих дифракционных решеток chirпованных зеркал (вносящих отрицательную дисперсию групповых скоростей) позволяет существенно снизить интенсивность в подложке последней решетки компрессора и, следовательно, величину вносимого компрессором  $B$ -интеграла. Снижение интенсивности в подложке последней решетки за счет добавления chirпованных зеркал позволяет при сохранении величины  $B$ -интеграла существенно уменьшить апертуру сжимаемого пучка, а значит, и требуемую апертуру решеток. На рис. 2 представлена рассчитанная зависимость требуемого диаметра пучка (энергией 10 Дж, спектрально ограниченной длительностью 10 фс) и соот-

ветствующей апертуры решеток для обеспечения того, чтобы потери энергии на апертуре решеток не превышали 1% и величина  $B$ -интеграла не превышала единицы, от величины суммарной дисперсии групповых скоростей, вносимой chirпованными зеркалами. Расчет проводился для гипергауссова профиля пучка (1).

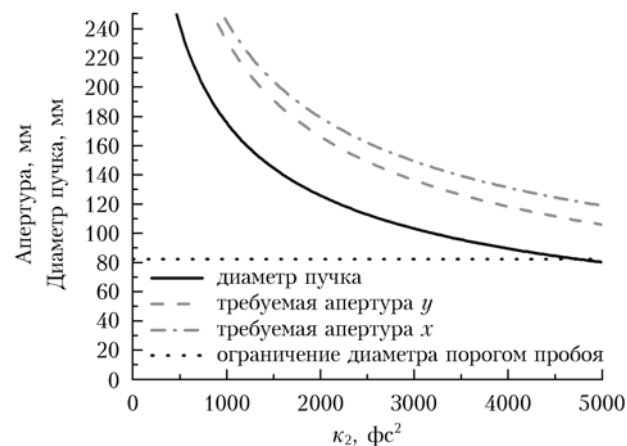


Рис. 2. Зависимость требований к апертуре по вертикали ( $y$ ) и горизонтали ( $x$ ) пропускающих решеток толщиной 3 мм от дисперсии, вносимой chirпованными зеркалами, для обеспечения величины  $B$ -интеграла  $< 1$  при сжатии импульсов с гипергауссовым пространственным профилем вида (1) до пиковой мощности 1 ПВт

Из данных, представленных на рис. 2, следует, что для сжатия импульса до мощности 1 ПВт потребуются компрессор на основе четырех пропускающих дифракционных решеток размером  $112 \times 125$  мм (при диаметре пучка по интенсивности уровня  $e^{-2}$  85 мм, пиковой плотности энергии 0,29 Дж/см<sup>2</sup>) и chirпованные зеркала, вносящие примерно  $-4500$  фс<sup>2</sup>. Решетки с подобными параметрами производятся, например, той же фирмой JENOPTIK [9]. Они предлагают решетки с максимальной апертурой  $125 \times 125$  мм, толщиной 3 мм, стойкостью 0,3 Дж/см<sup>2</sup> (в фемтосекундном режиме с просветляющими покрытиями). На сегодняшний день максимальная величина дисперсии второго порядка, которую можно внести в спектральном диапазоне 700–900 нм с помощью chirпованных зеркал, составляет примерно  $-300$  фс<sup>2</sup> и, следовательно, для набора  $-4500$  фс<sup>2</sup> необходимо  $\sim 15$  отражений. При этом требуемая апертура chirпованных зеркал при угле падения  $\sim 10^\circ$  (типичная величина для chirпованных зеркал) равна  $\sim 98$  мм. Подобные зеркала потенциально являются коммерчески доступными, например фирма UltraFast Innovations GmbH производит chirпованные зеркала, вносящие  $\sim -300$  фс<sup>2</sup>, диаметром до 100 мм, стойкостью 0,3 Дж/см<sup>2</sup> [10].

Таким образом, проведенный анализ показывает, что для сжатия импульсов до петаваттного уровня мощности с пикосекундного до фемтосекундного уровня длительности оптимальным и фактически единственным вариантом является компрессор на основе пропускающих решеток и chirпованных зеркал, причем обе позиции являются потенциально коммерчески доступными.

## 2. Стретчер

После определения конфигурации и параметров компрессора следующим шагом является выбор подходящего стретчера, позволяющего компенсировать дисперсионные коэффициенты вплоть до четвертого порядка. Стретчером с максимально близкой дисперсией с обратным знаком является решеточный стретчер с телескопом между решетками с коэффициентом передачи минус единица.

Проведенный нами анализ показал, что при использовании рассмотренного в разд. 1 компрессора для оптимальной компенсации его дисперсии, а также дисперсии среды (нелинейные кристаллы, подложки делительных зеркал, окна вакуумных пространственных фильтров, подложки пропускающих решеток и т.п.) требуется стретчер, состоящий из двух пропускающих дифракционных решеток 1280 штр./мм при угле падения на первую решетку  $30^\circ$ , расстоянии между решетками (по нормали) 30 мм, с телескопом между решетками с коэффициентом передачи минус единица. При этом удастся компенсировать спектральную дисперсию вплоть до 3-го порядка. Некомпенсированная дисперсия 4-го порядка составляет  $23650 \text{ фс}^4$  и в нашей схеме будет скомпенсирована за счет использования акустооптического перестраиваемого дисперсионного фильтра (АОПДФ), расположенного после стретчера перед каскадами усиления.

Так как целью создания петаваттного лазерного комплекса является достижение предельно высокой пиковой интенсивности, телескоп в стретчере должен быть безабберационным, т.е. вносить минимальные искажения, снижающие пиковую интенсивность при последующей фокусировке усиленного сжатого импульса. В частности, была поставлена цель — разработать стретчер, aberrации которого снижают пиковую интенсивность на величину, не превышающую 10%. Как известно, классическая схема стретчера с одним сферическим зеркалом не является безабберационной [11]. При использовании сферических зеркал безабберационной является схема телескопа, предложенная Оффнером [12, 13], но только в случае, когда объект расположен в общем центре сферических зеркал. В настоящее время широко используется схема с оффнеровским телескопом и одной дифракционной решеткой [14], сдвинутой от центра зеркал, но такая схема, как будет показано далее, безабберационной не является. Также будет показано, что для создания истинно безабберационного стретчера необходимо использовать схему с оффнеровским телескопом и двумя решетками, первая из которых расположена в общем центре зеркал телескопа.

Для расчета влияния на пиковую интенсивность искажений, вносимых различными схемами телескопа для стретчера, нами был разработан программный код, основанный на методе трассировки лучей («ray tracing») [11, 15, 16]. Вычислялись вносимые пространственные aberrации, угловой chirp и временной chirp (дополнительная групповая задержка) и их влияние на пиковую интенсивность. С использованием этого кода было проведено сравнение основных схем стретчеров с телескопами на основе

сферических зеркал при схожих условиях: радиусах зеркал и вертикальном сдвиге пучка. На рис. 3 представлены aberrации (рис. 3, а, б) и угловая дисперсия (рис. 3, в), вносимые основными типами телескопов на основе сферических зеркал, используемых в стретчерах. Отметим, что согласно нашим расчетам aberrации, вносимые стретчером с оффнеровским телескопом и двумя решетками, идентичны aberrациям, вносимым стретчером с оффнеровским телескопом той же геометрии и одной решеткой при том же коэффициенте растяжения. Также отметим, что угловой chirp отсутствует в стретчерах с двумя дифракционными решетками, одна из которых расположена в центре сферического зеркала (сферических зеркал для случая оффнеровского телескопа).

В табл. 2 представлены рассчитанные отклонения коэффициентов дисперсии второго ( $k_2$ ), третьего ( $k_3$ ) и четвертого ( $k_4$ ) порядков для тех же стретчеров от коэффициентов при использовании безабберационного телескопа.

Совокупное влияние анализируемых выше факторов на пиковую интенсивность, получаемую при фокусировке усиленного и сжатого импульса, для рассмотренных типов стретчеров представлено в табл. 3.

Из представленных в табл. 3 данных следует, что телескоп с одним сферическим зеркалом нашим требованиям не удовлетворяет, так как вносит большие aberrации и большой временной chirp, снижающие пиковую интенсивность более чем на порядок. Стретчер с оффнеровским телескопом и одной решеткой с точки зрения вносимых aberrаций гораздо лучше телескопа с одним сферическим зеркалом. Кроме того, он был бы проще в настройке по сравнению с телескопом с двумя решетками, так как «первая» и «вторая» решетки оказываются автоматически идеально идентичными и параллельными в связи с тем, что по факту это одна и та же решетка. Но все же этот стретчер вносит заметный угловой chirp и дополнительную групповую задержку, приводящие к снижению пиковой интенсивности на 22,7%, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стретчеру для разрабатываемого петаваттного комплекса.

Для такого стретчера была проанализирована зависимость достижимой пиковой интенсивности от величины сдвига решетки от центра зеркал (рис. 3, з, кривая 1) и соответственно от коэффициента растяжения, так как чем больше сдвиг от центра, тем больше эффективное расстояние между решетками. Из представленной зависимости следует, что данную схему целесообразно применять (для достижения пиковой интенсивности ~95% от максимально возможной) при сдвиге решетки от центра зеркал ( $dD$ ) не более 10 мм.  $dD$  связано с эффективным расстоянием между решетками ( $L_{eff}$ ) соотношением

$$L_{eff} = 2dD \cdot \cos(\theta_{in}),$$

где  $\theta_{in}$  — угол падения на первую решетку. Для сравнения на рис. 3, з (кривая 2) представлена аналогичная зависимость при использовании телескопа с цилиндрическими зеркалами с теми же радиусами

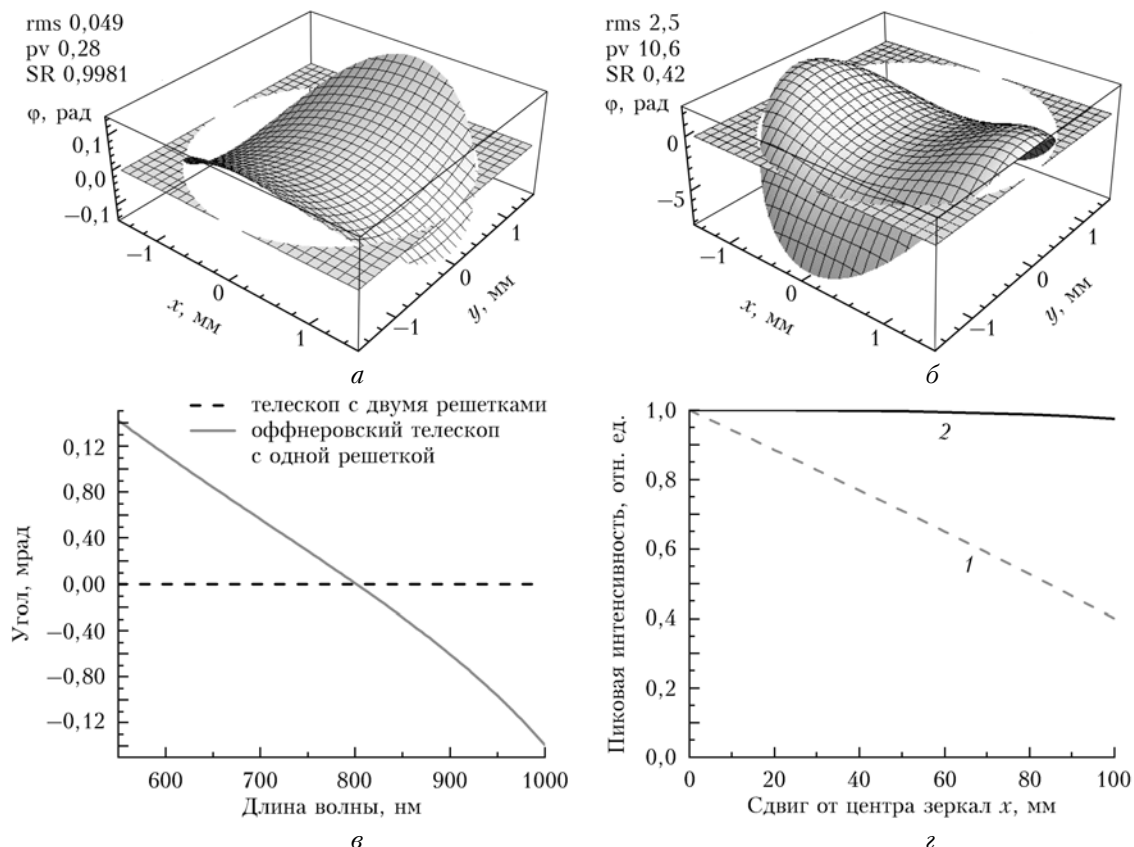


Рис. 3. Аберрации, вносимые стретчером с оффнеровским телескопом и двумя решетками, радиусы зеркал 400 и 200 мм, расстояние между зеркалами 200 мм, сдвиг перпендикулярно оси зеркал 18 мм (а) (rms – среднеквадратичное отклонение (root mean square), pv – максимальный разброс (peak to valley), SR – параметр Штреля (Strehl ratio)); аберрации, вносимые стретчером с телескопом с одним сферическим зеркалом и двумя решетками, радиус зеркала 400 мм, сдвиг перпендикулярно оси (для обеспечения возможности пространственного разделения проходов) 9 мм (б); угловая дисперсия, вносимая телескопами (в); зависимость пиковой интенсивности от сдвига решетки от центра зеркал для оффнеровского стретчера со сферическими зеркалами радиусами 400 и 200 мм и одной решеткой (сдвиг перпендикулярно оси зеркал 18 мм) (1) и с цилиндрическими зеркалами радиусами 400 и 200 мм и одной решеткой (наклон в вертикальной плоскости  $1,2^\circ$ ) (2) (z)

Таблица 2

**Отклонения коэффициентов дисперсии для рассматриваемых стретчеров от коэффициентов при использовании безабберационного телескопа**

Характеристика	Стретчер с оффнеровским телескопом и двумя решетками	Стретчер с оффнеровским телескопом и одной решеткой	Стретчер с телескопом, состоящим из одного сферического зеркала, и двумя решетками
$\kappa_2, \text{фс}^2$	0,01	-13	323
$\kappa_3, \text{фс}^3$	-0,026	27,5	-696
$\kappa_4, \text{фс}^4$	0,12	-155	3201
Снижение пиковой интенсивности, %	0	7,6	88

Таблица 3

**Влияние различных факторов на пиковую интенсивность (снижение, %)**

Фактор	Стретчер с оффнеровским телескопом и двумя решетками	Стретчер с оффнеровским телескопом и одной решеткой	Стретчер с телескопом, состоящим из одного сферического зеркала, и двумя решетками
Аберрации	0,2	0,2	58
Угловой чирп	0	13,4	0
Временной чирп	0	7,6	88
Суммарный вклад	0,2	20,2	95

**Безабберационная широкополосная система «стретчер–компрессор»...**

кривизны. Из сопоставления представленных зависимостей следует вывод, что для создания безабберационного стретчера с одной решеткой необходимо использовать оффнеровский телескоп с цилиндрическими зеркалами. Следует, правда, отметить, что доступность качественных цилиндрических зеркал большого размера существенно ниже по сравнению со сферическими зеркалами аналогичного радиуса и апертуры.

Таким образом, из представленных выше данных следует, что стретчер с оффнеровским телескопом и двумя решетками является безабберационным с точки зрения пространственно- и спектрально-фазовых искажений, а также углового чирпа. Поэтому данный вариант для нас является наиболее предпочтительным и именно его планируется реализовать в разрабатываемом комплексе.

### 3. Требования к оптическим элементам системы «стретчер–компрессор» и к точности настройки

Основные параметры элементов стретчера и компрессора определены в разд. 1 и 2. Далее проанализируем требования к оптическому качеству элементов системы «стретчер–компрессор», определяющему вносимые фазовые искажения, и точности их позиционирования для достижения максимальной интенсивности.

Рассчитанный контраст 10-фс импульса, после прохождения системы «стретчер–компрессор», представлен на рис. 4, а и определяется спектральной полосой пропускания системы 700–900 нм, ограниченной размерами решеток компрессора и рабочим диапазоном высокодисперсионных чирпованных зеркал. Из рис. 4, а следует, что на временах, превышающих несколько пикосекунд, контраст не хуже  $10^6$ , а на временах более 10 пс – не хуже  $10^8$ . Необходимо отметить, что основным фактором, ограничивающим спектральный диапазон, являются чирпованные зеркала. Связано это с тем, что доступные в настоящее время высокодисперсионные ( $|k_2| > 200 \text{ фс}^2$ ) зеркала имеют рабочий спектральный диапазон не более 200 нм.

Однако чтобы достичь контраста, определяемого спектральной полосой пропускания системы «стретчер–компрессор», необходимо обеспечить высокое оптическое качество ее элементов, а именно достаточно низкую величину вносимых ими искажений волнового фронта, дающих вклад в спектральные фазовые искажения. Согласно [17, 18], а также нашим расчетам (рис. 4, б) для достижения контраста не хуже  $10^5$  среднеквадратичные фазовые неоднородности элементов стретчера и компрессора не должны превышать 0,16 рад (соответствует  $\lambda/40$ ). Следует отметить, что это относится в основном к абберациям высокого порядка, так как вклад в спектральные фазовые искажения от аббераций низкого порядка, вносимые зеркалами телескопа стретчера, можно компенсировать с использованием АОПДФ.

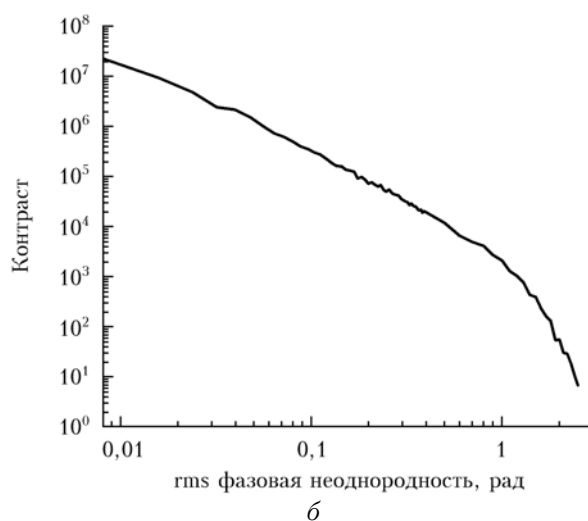
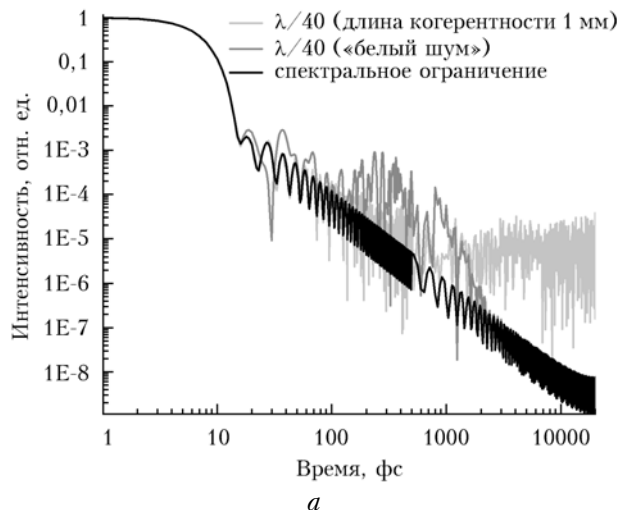


Рис. 4. Временной контраст 10-фс гауссового импульса после прохождения системы «стретчер–компрессор», область спектрального пропускания 700–900 нм, профиль симметричный, т.е. для  $t < 0$ , зависимость та же (а) и зависимость контраста 10-фс импульса от rms фазовых искажений зеркал для случая, когда фазовые искажения моделируются белым шумом (б)

Типичное спектральное разрешение АОПДФ в области 800 нм составляет 0,3 нм [19]. Спектральное разрешение 0,3 нм позволяет компенсировать спектральные фазовые возмущения, вносимые за счет пространственных искажений волнового фронта зеркалами стретчера характерным размером более 180 мкм = (размер пучка в плоскости дифракции) / (спектральный диапазон) · (спектральное разрешение) на сферическом зеркале стретчера радиусом 400 мм и 90 мкм на зеркале радиусом 200 мм. Неоднородности с меньшим характерным размером компенсировать с помощью АОПДФ не удастся, и они потенциально могут ухудшать контраст сжатых импульсов. В связи со столь малым пространственным размером некомпенсируемых неоднородностей в данном случае корректней говорить не о фазовых искажениях, а о качестве обработки поверхности («surface roughness») сферических зеркал, которое должно быть не хуже  $\lambda/40 = 20 \text{ нм}$ .

Отметим также, что, согласно проведенному анализу влияния фазовых неоднородностей на контраст, характерное время  $T$ , на котором сказывается неоднородность с характерным размером  $a$  (длина когерентности случайного распределения, мм), приблизительно определяется выражением  $T$  [пс]  $\approx 1/a$  [мм].

Еще одним источником спектральных фазовых искажений являются пропускающие дифракционные решетки. В связи с тем что увеличение размера (для рассматриваемых стретчера и компрессора и импульса длительностью 10 фс) второй решетки составляет 6,5 мм, в спектральную фазу будут давать вклад только неоднородности решеток размером менее 6,5 мм. Именно их среднеквадратичная величина не должна превышать  $\lambda/40$ .

Неоднородности большего размера будут давать вклад в пространственную фазу и влиять на фокусировку пучка, но с учетом того, что типичное пространственное разрешение большеапертурных деформируемых зеркал составляет 5–7 мм [20], эти возмущения при современном уровне развития технологий деформируемых зеркал можно компенсировать.

Рассчитанные требования на точность настройки (позиционирования) решеток для решеточных стретчера и компрессора для нашего случая представлены в табл. 4. Следует отметить, что они не зависят от типа используемого в стретчере телескопа.

Т а б л и ц а 4

**Требования к точности позиционирования решеток для обеспечения снижения пиковой интенсивности на величину не более 5%**

Параметр	Требуемая точность (для импульса длительностью 10 фс)
Расстояние между решетками	2,5 мкм
Параллельность в плоскости дифракции	1,3"
Параллельность в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции	8,6' для стретчера и 4,6" для компрессора
Параллельность штрихов	21"
Идентичность периода	0,23%

Т а б л и ц а 5

**Требования к точности настройки положения зеркал оффнеровского телескопа для обеспечения снижения пиковой интенсивности на величину не более 5%**

Параметр	Требуемая точность, мм
Расстояние между зеркалами	1
Сдвиг перпендикулярно оси зеркал в плоскости дифракции	4
Сдвиг перпендикулярно оси зеркал в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции	1 $R_1/R_2 = 2 \pm 0,0075$ , если $R_1 = 400$ мм, то $R_2$
Кратность радиусов зеркал	должно быть $(200 \pm 1,5)$ мм

Требования к точности настройки положения зеркал оффнеровского телескопа и точности поддержания кратности их радиусов для стретчера с двумя дифракционными решетками были вычислены с использованием разработанного программного кода и представлены в табл. 5, из которой следует, что разработанная схема телескопа для стретчера является довольно не критичной в настройке и не требует моторизованных элементов позиционирования.

## Заключение

Разработана оптимальная схема системы «стретчер–компрессор» для использования в системах с параметрическим усилением чирпованных импульсов при пикосекундной ( $\sim 90$  пс) накачке, позволяющая получать сжатые импульсы петаваттного уровня мощности с высоким контрастом и низким уровнем аберраций, а следовательно, высокой пиковой интенсивностью.

Установлено, что оптимальной и практически безальтернативной схемой компрессора в рассматриваемом случае является комбинированный компрессор, состоящий из пропускающих дифракционных решеток и чирпованных зеркал. Показано, что компрессор, состоящий из четырех пропускающих дифракционных решеток с апертурой  $112 \times 125$  мм, толщиной 3 мм и 15 чирпованных зеркал с апертурой 100 мм, вносящих чирп  $\sim -4500$  фс<sup>2</sup>, позволяет сжимать усиленные импульсы до спектрально ограниченной длительности  $< 10$  фс и пиковой мощности  $\sim 1$  ПВт при величине  $B$ -интеграла, не превышающей единицы.

Проведен анализ различных вариантов телескопов для решеточного стретчера. Показано, что единственной безаберрационной конфигурацией, основанной на сферических зеркалах, является схема, состоящая из отражательного телескопа со сферическими зеркалами по схеме Оффнера и двух дифракционных решеток, одна из которых расположена в центре зеркал телескопа.

Для разработанной схемы определены требования к качеству оптических элементов и точности их позиционирования. Согласно результатам моделирования выбранная схема телескопа для стретчера является слабокритичной в настройке и не требует моторизованных элементов.

1. Mourou G.A., Tajima T., Bulanov S.V. Optics in the relativistic regime // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78, N 2. P. 309–371.
2. Leemans W.P., Nagler B., Gonsalves A.J., Toth Cs., Nakamura K., Geddes C.G.R., Esarey E., Schroeder C.B., Hooker S.M. GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator // Nature Physics. 2006. V. 2, N 10. P. 696–699.
3. Giambroño F., Radier C., Rey G., Cheriaux G. Design of a 10 PW (150 J/15 fs) peak power laser system with Ti:sapphire medium through spectral control // Appl. Opt. 2011. V. 50, N 17. P. 2617.
4. Lyachev A., Chekhlov O., Collier J., Clarke R.J., Galimberti M., Hernandez-Gomez C., Matousek P., Musgrave I.,



- Neely D., Norreys P., Ross I., Tang Y., Winstone T., Wyborn B.* The 10 PW OPCPA Vulcan Laser Upgrade // Advances in Optical Materials. 16–18 February 2011. Istanbul, Turkey. OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper HThE2.
5. *Багаев С.Н., Пестряков Е.В., Трунов В.И.* Эксаваттные лазерные системы – новый этап в развитии лазерной физики // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 845–853.
  6. *Фролов С.А., Трунов В.И., Пестряков Е.В., Кирпичников А.В., Петров В.В.* Оптимизация каскадов параметрического усиления петаваттной малопериодной лазерной системы на основе кристаллов ВВО и LBO // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 278–284.
  7. *Pestryakov E.V., Petrov V.V., Trunov V.I., Frolov S.A., Kirpichnikov A.V., Bagayev S.N., Kokh A.E.* Design of high gain OPCPA for multiterawatt and petawatt class systems on large aperture LBO crystals // Proc. SPIE. 2011. V. 7994. P. 799425.
  8. URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/>
  9. URL: [http://www.jenoptik.com/cms/products.nsf/0/2BBE3A68652D3ACFC125771C00459FCA/\\$File/pcg\\_en.pdf](http://www.jenoptik.com/cms/products.nsf/0/2BBE3A68652D3ACFC125771C00459FCA/$File/pcg_en.pdf)
  10. URL: <http://www.ultrafast-innovations.com>
  11. *Zhang Z., Yagi T., Arisawa T.* Ray-tracing model for stretcher dispersion calculation // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 15. P. 3393–3399.
  12. *Suzuki A.* Complete analysis of a two-mirror unit magnification system. Part 1 // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 24. P. 3943–3949.
  13. *Suzuki A.* Complete analysis of a two-mirror unit magnification system. Part 2 // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 24. P. 3950–3956.
  14. *Cheriaux G., Rousseau P., Salin F., Chambaret J.P., Walker B., Dimauro L.F.* Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification // Opt. Lett. 1996. V. 21, N 6. P. 414–416.
  15. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1975. 720 с.
  16. *Luke D.R., Burke J.V., Lyon R.G.* Optical wavefront reconstruction: theory and numerical methods // SIAM Rev. 2002. V. 44, N 2. P. 169–224.
  17. *Antonetti A., Blasco F., Chambaret J.P., Cheriaux G., Darpentigny G., Le Blanc C., Rousseau P., Ranc S., Rey G., Salin F.* A laser system producing  $5 \cdot 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> at 10 Hz // Appl. Phys. B. 1997. V. 65, N 2. P. 197–204.
  18. *Hong K.-H., Hou B., Nees J.A., Power E., Mourou G.A.* Generation and measurement of  $> 10^8$  intensity contrast ratio in a relativistic kHz chirped-pulse amplified laser // Appl. Phys. B. 2005. V. 81, N 4. P. 447–457.
  19. URL: [www.fastlite.com/file/spec-ubr-650-1100-rev2012-2.pdf](http://www.fastlite.com/file/spec-ubr-650-1100-rev2012-2.pdf)
  20. URL: <http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/AOAXinetics/IntelligentOptics/Products/Pages/SurfaceNormalMirrors.aspx>

*V.E. Leshchenko, V.I. Trunov, E.V. Pestryakov, S.A. Frolov.* **Aberration-free broadband stretcher–compressor system for femtosecond petawatt level laser system based on parametric amplification.**

The optimal stretcher-compressor scheme is designed for the use in facilities with chirped pulse optical parametric amplification under picosecond ( $\sim 100$  ps) pumping. It enables one to achieve petawatt peak power in less than 10 fs pulses with high contrast and low aberrations. The stretcher design is based on an Öffner telescope with spherical mirrors and two diffraction gratings, one being placed in the center of spherical mirrors. It is shown to be the only possible aberration-free stretcher design with spherical mirrors. Performed analysis shows that the compressor consisting of four transmission diffraction gratings with  $112 \times 125$  mm aperture, 3 mm thickness and chirped mirrors adding  $-4500$  fs<sup>2</sup> dispersion with 100 mm aperture allows amplified pulse compression with up to 1 PW peak power and less than 10 fs pulse duration, with total  $B$ -integral being less than 1. The designed stretcher–compressor system is planned to be implemented in the high power femtosecond laser facility developed at ILP SB RAS.