

На правах рукописи

Лещенко Вячеслав Евгеньевич

**Когерентное сложение параметрически усиленных
мультитераваттных фемтосекундных импульсов в
двухканальной лазерной системе**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2014

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка и реализация принципов генерации экстремальных световых полей имеет большое значение для развития лазерной физики. Так достижение интенсивности, превышающей 10^{23} Вт/см², позволит исследовать различные эффекты и явления ультрарелятивистской оптики [1]. Среди наиболее интересных из них можно выделить лазерно-плазменное ускорение заряженных частиц, генерацию жёсткого когерентного рентгеновского и гамма излучений, генерацию высоких гармоник и предельно коротких импульсов (субаттосекундного диапазона). Дальнейшее повышение интенсивности до 10^{25} – 10^{29} Вт/см² откроет перспективы исследования ряда фундаментальных эффектов нелинейной квантовой электродинамики [2], связанных с нелинейной поляризацией вакуума и генерацией электрон–позитронных пар (а также потенциально других пар античастиц) в фотонных коллайдерах.

Ключевой вехой в развитии высокоинтенсивных лазерных систем стал предложенный в 1985 году метод усиления chirпованных импульсов (CPA – chirped pulse amplification) [3]. Совершенствование этого метода и создание широкополосных большеапертурных кристаллов (таких как титан-сапфир (Ti:Sa, Ti:Al₂O₃), дейтерированный дигидрофосфат калия (DKDP, KD₂PO₄), триборат лития (LBO, LiB₃O₅)), используемых в усилителях, позволило в 2008 году достичь пиковой интенсивности сфокусированного излучения на уровне 2×10^{22} Вт/см² [4], что до настоящего времени остаётся рекордом. При этом на данный момент нет проектов одноканальных лазерных систем, в рамках которых в обозримой перспективе планировалось бы достижение интенсивности, заметно превышающей 10^{23} Вт/см² [5, 6]. Связано это с тем, что за последние двадцать лет технологии выращивания кристаллов большой апертуры и создания используемых в компрессорах большеапертурных дифракционных решёток с высокой оптической стойкостью практически достигли технологического предела, что приводит к ограничению апертуры усиленного импульса на уровне ~ 10 – 40 см [7, 8]. Это, с учётом типичной оптической стойкости (определяемой в первую очередь дифракционными решётками) $\sim 0,2$ – $0,6$ Дж/см² [9, 10], ограничивает энергию усиленных сжатых импульсов на уровне нескольких десятков джоулей, что, с учётом минимальной достижимой длительности 5 – 25 фс [11, 12] и диаметра сфокусированного пучка ~ 1 мкм, приводит к обозначенному выше пределу максимальной достижимой пиковой интенсивности $\sim 10^{23}$ Вт/см².

Поэтому для её дальнейшего увеличения необходимо развивать альтернативные подходы к созданию высокоинтенсивных лазерных систем. Наиболее перспективным и естественным подходом выглядит переход к многоканальным системам с когерентным сложением усиленных импульсов. Так уже сейчас наиболее амбициозные проекты высокоинтенсивных лазерных комплексов, такие как ELI-Ultra-High-Field (Extreme Light Infrastructure) [13] и XCELS (Exawatt Center for Extreme Light Studies) [14], в рамках которых планируется достижение интенсивности $\sim 10^{25}$ Вт/см², базируются на использовании метода когерентного сложения фемтосекундных импульсов, усиленных в оптических параметрических усилителях chirпованных импульсов (OPCPA – optical

parametric chirped pulse amplifier). В связи с этим большую актуальность в настоящий момент приобретает развитие данного метода.

Использование в обозначенных выше проектах именно параметрических усилителей связано с рядом их преимуществ перед лазерными. Методы, основанные на лазерном усилении (в Ti:Sa кристаллах), позволяют генерировать импульсы энергией $\sim 10\text{--}100$ Дж и длительностью $25\text{--}40$ фс [7, 12]. Тогда как параметрические усилители позволяют потенциально генерировать импульсы существенно меньшей длительностью ~ 5 фс [11] при сопоставимой энергии, что в итоге обеспечивает достижение большей пиковой интенсивности.

Более того параметрические усилители являются более перспективными для создания высокоинтенсивных лазерных систем, основанных на когерентном сложении усиленных импульсов. Связано это с тем, что при лазерном усилении потенциально возникает немало проблем, вызванных фазовыми искажениями, возникающими из-за различных термооптических эффектов, которые приводят к ухудшению таких параметров, как фазовая и угловая стабильность. Эти параметры, как следует из представленного в работе анализа, являются критичными для реализации высокоэффективного когерентного сложения, а, следовательно, для достижения высоких интенсивностей. В оптимизированных параметрических усилителях (при достаточно низком поглощении накачки, холостой и сигнальной волн) подобные тепловые эффекты пренебрежимо малы, что делает их наиболее перспективным для реализации многоканальных систем с когерентным сложением.

Однако до данной работы в фемтосекундном режиме, имеющем принципиальное значение для достижения высоких интенсивностей, было реализовано только когерентное сложение импульсов, усиленных в волоконных усилителях [15, 16]. Поэтому экспериментальная реализация когерентного сложения параметрически усиленных фемтосекундных импульсов имеет большое значение, так как она позволит заложить фундамент и дать толчок для последующего развития высокоинтенсивных лазерных систем.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование условий необходимых для осуществления высокоэффективного когерентного сложения и экспериментальная реализация когерентного сложения двух последовательностей параметрически усиленных мультитераваттных фемтосекундных импульсов.

В соответствии с этой целью решались следующие задачи:

1. Анализ методов когерентного сложения, определение наиболее перспективных из них для создания лазерных систем высокой интенсивности. Анализ зависимости эффективности когерентного сложения от нестабильности различных параметров складываемых импульсов, определение наиболее критичных из них.
2. Стабилизация параметров усиленных импульсов, критичных для реализации когерентного сложения. В частности, разработка метода увеличения частотной полосы отработки системы активной стабилизации разности фаз усиленных импульсов.
3. Экспериментальная реализация когерентного сложения параметрически

усиленных мультитераваттных фемтосекундных импульсов. Экспериментальная демонстрация возможности достижения интенсивности релятивистского уровня в созданной двухканальной установке с когерентным сложением параметрически усиленных импульсов.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально реализовано когерентное сложение параметрически усиленных фемтосекундных импульсов.
2. Впервые проведены эксперименты по когерентному сложению импульсов энергией 100 мДж и длительностью 23 фс, что по обоим параметрам более чем на порядок превышает предыдущие достижения в фемтосекундном режиме.
3. Предложен метод увеличения частотной полосы отработки системы активной стабилизации разности фаз усиленных импульсов в низкочастотных лазерных системах. Работоспособность метода экспериментально продемонстрирована.
4. Впервые проведён комплексный анализ влияния всех наиболее существенных параметров складываемых импульсов на эффективность когерентного сложения.

Практическая ценность

1. Создана лазерная система с когерентным сложением параметрически усиленных фемтосекундных импульсов. В этой установке продемонстрирована достижимость интенсивности релятивистского уровня, что открывает перспективы исследования различных эффектов в данной области, в том числе ускорения заряженных частиц, генерации высоких гармоник и аттосекундных импульсов.
2. Разработан метод увеличения частотной полосы отработки системы активной стабилизации разности фаз в низкочастотных лазерных системах.
3. Разработан метод подавления вклада амплитудных шумов в регистрируемую разность фаз усиленных импульсов. Экспериментально продемонстрировано более чем трёхкратное подавление амплитудных шумов.
4. Вычислены зависимости эффективности когерентного сложения от нестабильности различных параметров суммируемых импульсов и числа каналов. Эти результаты позволяют определить перспективность осуществления когерентного сложения в других лазерных системах, после регистрации имеющихся в них нестабильностей параметров, критичных для реализации когерентного сложения. Также полученные результаты позволяют сформулировать требования к системам стабилизации этих параметров.
5. Разработана система стретчер–компрессор для высокоинтенсивных петаваттных лазерных систем с пикосекундной (~100 пс) длительностью импульсов накачки.

Защищаемые положения

1. Высокоэффективное когерентное сложение параметрически усиленных мультитераваттных фемтосекундных импульсов может быть экспериментально реализовано, в том числе при острой фокусировке. При сложении двух последовательностей импульсов энергией ~ 100 мДж, длительностью ~ 20 фс это даёт возможность достижения интенсивности релятивистского уровня более 2×10^{19} Вт/см².
2. При высокой эффективности когерентного сложения ($\sim 95\%$) в двухканальной лазерной системе её снижение не превысит нескольких процентов при переходе к большому числу каналов и сохранении нестабильностей суммируемых импульсов на том же уровне.
3. Предложенный метод увеличения частотной полосы отработки системы активной стабилизации разности фаз усиленных импульсов в низкочастотных лазерных системах позволяет расширить её более чем на два порядка (с 1 до 100 Гц) и, как следствие, повысить стабильность разности фаз до уровня ~ 85 мрад, что позволяет реализовать когерентное сложение с эффективностью более 90%.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих международных научных конференциях: «Фундаментальные Проблемы Оптики – 2012»; «Atomic and molecular pulsed lasers», AMPL (2011, 2013); Международная научная студенческая конференция «Студент и научно–технический прогресс», МНСК (2011, 2012); 2nd Chinese–Russian Workshop/ Youth Summer School on Laser Physics, Fundamental and Applied Photonics (2012); Conference on Laser Optics (2010, 2012, 2014); 21th International Laser Physics Workshop, LPHYS (2012); International Conference on Coherent and Nonlinear optics, ICONO (2010, 2013); International Symposium “Modern Problems of Laser Physics”, MPLP (2013); International Symposium “Laser–Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Energy, Industry and Medicine”, LDRP (2011).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах, из которых 6 [A1–A6] удовлетворяют требованиям ВАК. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и списка терминов и сокращений. Общий объём диссертации 108 страниц, включая 72 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 76 наименований, включая работы автора.

Личный вклад автора

Экспериментальная установка, на которой проводились эксперименты, была создана при непосредственном участии автора, при этом расчет и настройка стретчера и компрессоров выполнены автором лично. Все представленные в работе

экспериментальные данные получены при непосредственном участии автора. Автор предложил метод увеличения частотной полосы обработки системы активной стабилизации разности фаз усиленных импульсов в низкочастотных лазерных системах. Оптическая часть системы регистрации и стабилизации разности фаз усиленных импульсов разработана и создана автором лично, а электронная часть при его активном участии. Результаты оригинальных теоретических исследований, представленные во второй и четвёртой главах, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Кроме того, автор активно участвовал в подготовке публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен обзор наиболее значимых результатов по когерентному сложению, полученных как в импульсном, так и непрерывном режимах. В частности, представлены основные результаты по сложению усиленных фемтосекундных импульсов. Акцент на фемтосекундный режим связан с тем, что именно он представляет интерес для создания лазерных систем высокой интенсивности. Из проведённого обзора сделан вывод, что до результатов, полученных в рамках данной работы, было реализовано когерентное сложение только субпикосекундных импульсов, усиленных в волоконных усилителях, в то время как в данной работе [17, 18] экспериментально продемонстрирована возможность когерентного сложения параметрически усиленных фемтосекундных импульсов. Кроме того, в настоящий момент созданная в ИЛФ СО РАН система [18] является рекордной как по энергии, так и по длительности когерентно сложенных импульсов, то есть продемонстрировано когерентное сложение импульсов с максимальной энергией и минимальной длительностью.

Также в первой главе проведён сравнительный анализ существующих методов когерентного сложения, из которого установлено, что наиболее перспективным для создания лазерных систем высокой интенсивности является параллельный подход к когерентному сложению, в рамках которого все пучки складываются одновременно на одном фокусирующем элементе. На этот подход опирается всё последующее рассмотрение, и он был применён в развиваемой лазерной системе.

Во второй главе представлены результаты анализа требований к стабильности параметров складываемых импульсов для реализации высокоэффективного когерентного сложения. В частности, вычислена зависимость эффективности когерентного сложения от числа суммируемых каналов (N) и следующих параметров: разность фаз, идентичность оптических длин каналов, нестабильность фазы между несущей и огибающей, угловая нестабильность, относительный временной джиттер, точность компенсации дисперсии (чирпа), абберрации, угловой чирп и точность согласования поляризаций складываемых импульсов. При анализе поле импульса n -го канала в фокальной плоскости представлялось в следующем виде (все используемые приближения подробно

описаны в тексте диссертации)

$$\begin{aligned} \bar{E}(t, x, y, \delta T_n, \delta \varphi_n, \delta k_{2-n}, \delta x_n, \delta y_n, \Delta \theta_{n-x}, \Delta \theta_{n-y}, \delta \chi_n) = & A_0 \left(\cos(\delta \chi_n) \bar{e}_x + \sin(\delta \chi_n) \bar{e}_y \right) \times \\ \times \exp \left[-2 \ln(2) \frac{(t - \delta T_n)^2}{\tau^2} - i \omega_0 t + i \delta \varphi_n \right] & \frac{\exp \left[i 8 \ln^2(2) \frac{\delta k_{2-n} (t - \delta T_n)^2}{\tau_0^2 \tau^2} \right]}{\left(1 + \left(4 \ln(2) \frac{\delta k_{2-n}}{\tau_0^2} \right)^2 \right)^{1/4}} \times \\ \exp \left[-\frac{(x - \delta x_n)^2}{w^2 \left(1 + \left(\frac{\Delta \theta_{n-x} k_0 D_0}{4 \ln(2)} \right)^2 \right)} \right] & \exp \left[-\frac{(y - \delta y_n)^2}{w^2 \left(1 + \left(\frac{\Delta \theta_{n-y} k_0 D_0}{4 \ln(2)} \right)^2 \right)} \right] \\ \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta \theta_{n-x} k_0 D_0}{4 \ln(2)} \right)^2}} & \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta \theta_{n-y} k_0 D_0}{4 \ln(2)} \right)^2}} \end{aligned}$$

где x, y – пространственные координаты, $\delta \chi$ – угол, характеризующий неточность согласования направлений поляризации, \bar{e}_x и \bar{e}_y – взаимно ортогональные единичные векторы, δT – задержка между огибающими, определяемая отличием оптической длины n -го канала ($\delta L_n = c \delta T_n$) от средней величины (длины, усреднённой по всем каналам), A_0 – амплитуда поля, ω_0 – несущая частота, $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$, τ – длительность импульса по интенсивности по уровню $1/2$, τ_0 – спектрально-ограниченная длительность, $\delta \varphi_n$ – фаза, δk_{2-n} – нескомпенсированная дисперсия второго порядка, δx_n и δy_n – сдвиг пучка в фокальной плоскости, определяющий угловую нестабильность, $\Delta \theta$ – угловой разброс спектральных компонент по уровню $1/2$, вызванный угловым чирпом, D_0 – диаметр пучка на фокусирующем зеркале по полувысоте. Эффективность когерентного сложения (η) определялась как отношение пиковой интенсивности суммарного пучка при наличии некоторого возмущения (\bar{I}_Σ^{peak}) к максимально достижимой (при отсутствии возмущений) интенсивности (I_{\max}^{peak})

$$\eta = \bar{I}_\Sigma^{peak} / I_{\max}^{peak},$$

где $\bar{I}_\Sigma^{peak} = \int I_\Sigma^{peak} F [I_\Sigma^{peak}] dI_\Sigma^{peak}$, $I_\Sigma = \left| \sum_{n=1}^N E_n \right|^2$ – интенсивность в суммарном

импульсе, F – функция распределения.

При проведении анализа предполагалось, что все возмущения статистически независимы и имеют нормальное распределение. В результате анализа установлено, что только требования на разницу фаз имеют заметную зависимость от числа каналов. Зависимость эта, как видно из данных, представленных на рис. 1(а), не очень существенная и довольно быстро (для $N \sim 10-20$) достигает величин, практически совпадающих с предельным (при $N \rightarrow \infty$) значением. В предположении сохранения стабильности параметров складываемых импульсов при переходе к

большому числу каналов, с использованием полученных зависимостей эффективности когерентного сложения от числа каналов установлено, что при эффективности сложения двух каналов η_2 , эффективность сложения большого числа каналов ($\eta_{N \gg 1}$) будет лежать в диапазоне от $\min(\eta_{N \gg 1}) \approx 2\eta_2 - 1$ (рис. 1(б)) до η_2 . Таким образом, при высокой эффективности когерентного сложения двух последовательностей импульсов её снижение при переходе к большому числу каналов не превысит нескольких процентов, при сохранении нестабильностей суммируемых импульсов на том же уровне. Например, если $\eta_2 = 0,95$, то $\eta_{N \gg 1}$ будет в диапазоне от 0,9 до 0,95. Поэтому экспериментальная демонстрация когерентного сложения 2-х каналов, подкреплённая проведённым анализом, будет являться подтверждением практической реализуемости многоканальных высокоинтенсивных лазерных систем, основанных на методе когерентного сложения.

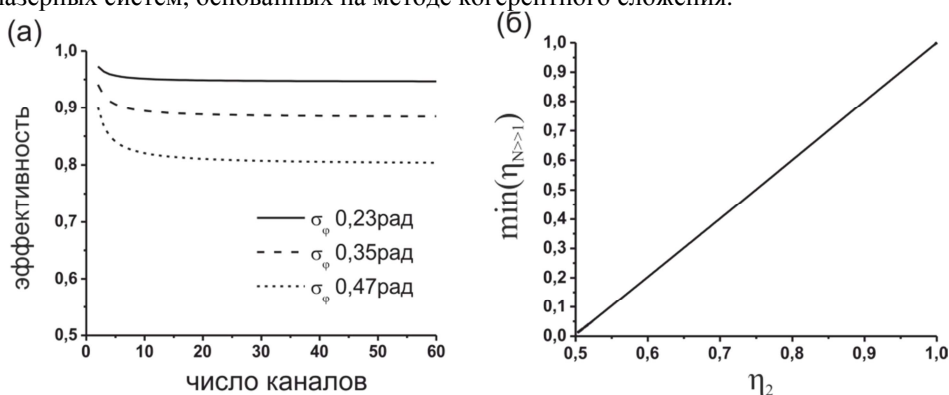


Рис. 1. (а) Зависимость эффективности когерентного сложения от числа каналов для различных величин среднеквадратичной нестабильности разности фаз складываемых импульсов (σ_φ) (центральная длина волны 800 нм, длительность импульсов 10 фс). (б) Вычисленная, в предположении сохранения стабильности параметров складываемых импульсов при увеличении числа каналов, связь минимальной величины эффективности когерентного сложения большого числа каналов с эффективностью сложения двух каналов.

В таблице 1 представлены вычисленные требования к стабильности различных параметров усиленных импульсов для реализации высокоэффективного когерентного сложения.

Таблица 1. Требования к стабильности различных параметров усиленных импульсов для реализации когерентного сложения с эффективностью 95% в многоканальной лазерной системе ($N \gg 1$) (для импульсов длительностью 10 фс, с центральной длиной волны 800 нм, диаметром пучка по полувысоте 10 мм).

параметр	Требуемая стабильность (точность)
Разница фаз	220 мрад (при отсутствии нестабильности фазы между несущей и огибающей соответствует джиттеру 100 ас) (320 мрад при сложении двух каналов)
Идентичность оптических длин каналов	0,4 мкм
Разница фаз между несущей и огибающей	3,2 рад
Угловая нестабильность	5–10 мкрад в зависимости от пространственного профиля
Точность компенсации дисперсии (чирпа)	12,5 фс ² , 100 фс ³ , 1000 фс ⁴ для дисперсии второго, третьего и четвёртого порядков соответственно
Аберрации	~0.2 рад
Угловой чирп	8,5 мкрад / 100 нм
Точность согласования поляризаций	13° (требуемая точность идентичности направлений линейной поляризации)

Важно отметить, что, насколько нам известно, ранее подобного анализа, учитывающего как большинство специфических параметров импульсного излучения (длительность, временной и угловой чирп), так и зависимость от числа каналов, проведено не было. Так в работе [19] был выполнен анализ зависимости эффективности когерентного сложения от нестабильности большинства параметров для случая сложения непрерывных излучений и в приближении большого числа каналов ($N \rightarrow \infty$). Кроме того, был рассмотрен случай сложения импульсных излучений с учётом зависимости от числа каналов, но только для одного–двух параметров [20, 21]. Стоит отметить, что в диссертации также приведены выражения для эффективности когерентного сложения в пределе большого числа каналов.

В третьей главе представлена созданная в ИЛФ СО РАН двухканальная лазерная система (рис. 2(а)) и её основные характеристики. В первом канале была достигнута энергия 155 мДж до сжатия и 75 мДж после компрессора, во втором канале энергия составила 220 и 110 мДж до и после компрессора соответственно. Экспериментально зарегистрированная нестабильность энергии усиленных импульсов после компрессоров составила 4% и 2% в первом и втором каналах соответственно. Спектры на различных стадиях усиления и сжатия представлены на рис. 2. В обоих каналах спектры после компрессора соответствуют спектрально–ограниченной длительности 23 фс. Усиленное излучение в обоих каналах имеет диаметр (по уровню e^{-2}) 14 мм и расходимость (полная ширина на полувысоте) 80 мкрад в первом канале и 90 мкрад во втором.

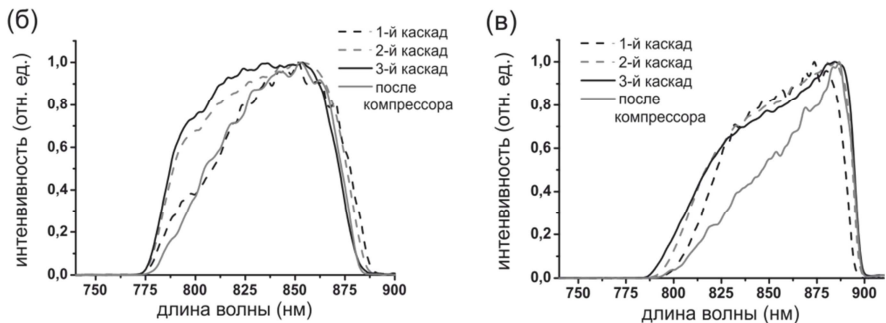
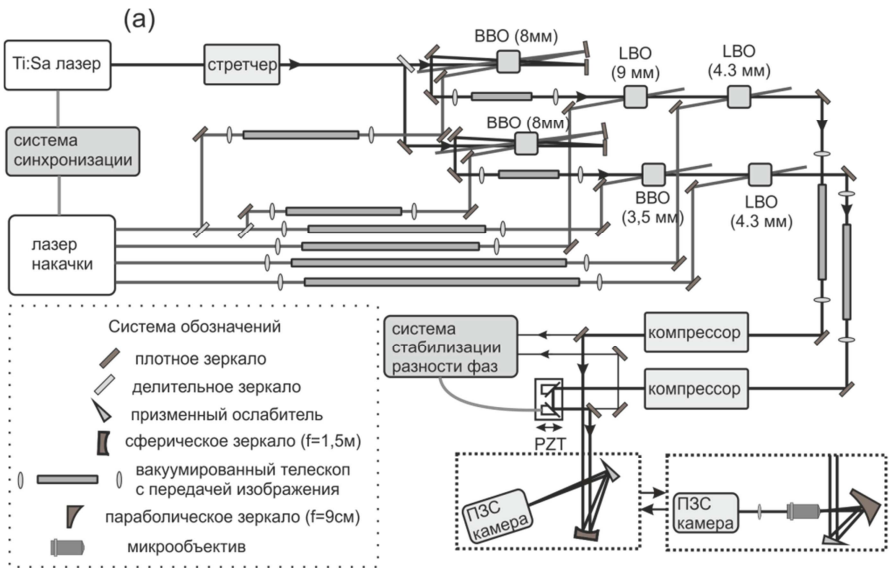


Рис. 2. (а) Схема экспериментальной установки. Спектры усиленных импульсов на различных стадиях усиления и сжатия в первом (б) и втором (в) каналах.

В четвёртой главе рассматривается проблема создания системы растяжения 10 фемтосекундных импульсов до ~ 40 пикосекунд и их последующего сжатия после каскадов параметрического усиления до мультитераваттного и петаваттного уровня пиковой мощности. Пикосекундная длительность (~ 40 пс) усиливаемого импульса определяется пикосекундной длительностью накачки (в нашем случае ~ 90 пс). Необходимость использования пикосекундной накачки связана с тем, что она, в отличие от накачки наносекундной длительности, позволяет усиливать импульсы длительностью менее 10 фс [22]. Однако переход к растяжению усиливаемого импульса до пикосекундной, а не наносекундной длительности приводит к тому, что стандартный способ сжатия усиленных импульсов отражательными дифракционными решётками ограничивает максимальную достижимую пиковую мощность на уровне ~ 10 ТВт. Связано это с тем, что максимальная апертура компрессора в данном случае ограничена не размером дифракционных

отражательных решёток, а расстоянием между ними. Ограничения на апертуру на уровне нескольких сантиметров, на ряду с типичной стойкостью дифракционных решёток $\sim 0,2$ Дж/см², приводят к обозначенной выше предельной величине пиковой мощности.

В связи с необходимостью поиска альтернативных схем компрессора, был проведён анализ применимости к решению обозначенной проблемы всего спектра дисперсионных элементов. В результате установлено, что для сжатия импульсов до мультитераваттного и петаваттного уровня мощности с пикосекундного до фемтосекундного уровня длительности оптимальным и фактически единственным вариантом является компрессор на основе пропускающих решёток и чирпованных зеркал. В диссертации представлена разработанная схема компрессора для сжатия усиленных импульсов с 40 пс до 10 фс для последующего развития системы с увеличением пиковой мощности усиленных импульсов до петаваттного уровня. Он состоит из четырёх пропускающих дифракционных решеток размером 112x125 мм, плотностью штрихов 1280 штр/мм и следующих за ними 15 чирпованных зеркал диаметром ~ 100 мм. Следует отметить, что в предложенной схеме компрессора максимальная мощность и энергия сжатого импульса ограничены апертурой компрессора, определяемой апертурой пропускающих решёток и чирпованных зеркал. Поэтому если с развитием технологий произойдёт увеличение доступной апертуры пропускающих решёток и чирпованных зеркал в 3–4 раза, то разработанная схема позволит сжимать импульсы до пиковой мощности ~ 10 ПВт.

В четвёртой главе также представлен разработанный оптимальный стретчер для компенсации дисперсии компрессора и остальных элементов системы (кристаллов, окон вакуумных фильтров и т.п.). Оптимальным является решёточный стретчер с телескопом между решётками для изменения знака вносимой дисперсии. Проведён анализ различных вариантов отражательных телескопов для стретчера с точки зрения вносимых аберраций и углового чирпа, а также отклонений временного чирпа от идеализованного случая стретчера с безабберационным телескопом. Установлено, что стретчер, состоящий из двух дифракционных решёток и оффнеровского телескопа, с первой решёткой расположенной в общем центре кривизны сферических зеркал, является практически безабберационным (при качественной настройке снижение пиковой интенсивности сфокусированного сжатого импульса, обусловленное стретчером, не превысит 1%). Представлена разработанная и рассчитанная схема стретчера с телескопом, состоящим из вогнутого сферического зеркала апертурой 180x50 мм и радиусом кривизны 400 мм и выпуклого сферического зеркала апертурой 90x15 мм и радиусом кривизны 200 мм. Для разработанной схемы стретчер–компрессор вычислены требования на точность позиционирования оптических элементов. В частности, установлено, что в разработанной схеме телескопа для стретчера нет необходимости использования моторизованных элементов позиционирования.

В связи с тем, что на данном этапе энергия усиленных импульсов перед компрессором составляет ~ 200 мДж, острой потребности использования пропускающих решёток нет, так как компрессор, основанный на отражающих дифракционных решётках, позволяет сжимать импульсы с такой энергией. В связи с этим, а также труднодоступностью и дороговизной высококачественных пропускающих решёток, на данном этапе была создана система стретчер–

компрессор, основанная на отражающих голографических дифракционных решётках.

В четвёртой главе представлены экспериментальные результаты сжатия и достигнутые параметры усиленных сжатых импульсов: спектр, длительность и контраст. Длительность составила $23 \pm 1,5$ фс и $24 \pm 1,3$ фс в первом и втором каналах соответственно, при спектрально-ограниченной длительности 23 фс. Зарегистрированные автокорреляционные функции представлены на рис. 3. Измеренный контраст представлен на рис. 4. На переднем фронте он составил 10^{-6} на временах $\sim 0,5$ пс и не хуже 10^{-8} на временах 20 пс в первом канале и 40 пс во втором канале. Зарегистрированный контраст согласуется с теоретически ожидаемым [23] и находится приблизительно на том же уровне, что и в других ОРСРА системах с сопоставимыми параметрами, например LWS-20 [24].

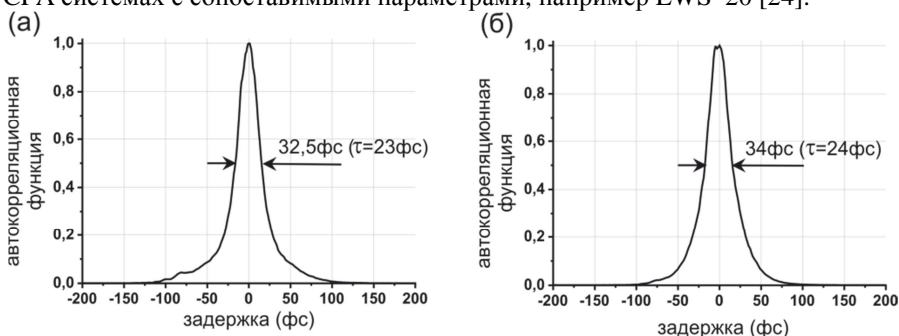


Рис. 3. Автокорреляционная функция усиленных сжатых импульсов в первом (а) и втором (б) каналах.

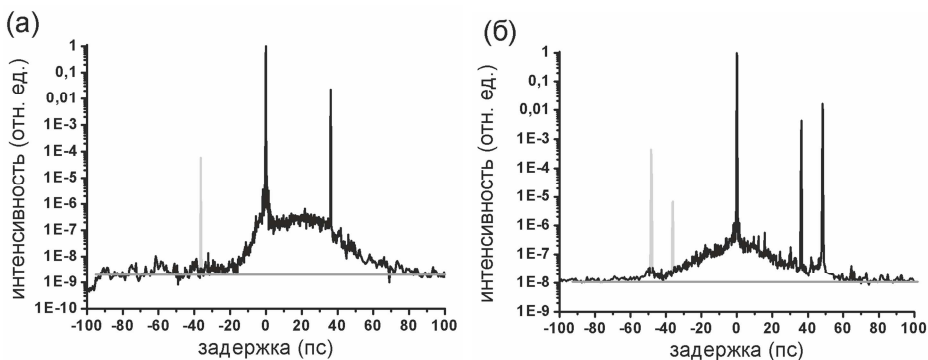


Рис. 4. Контраст усиленных сжатых импульсов в первом (а) и втором (б) каналах (серая линия – уровень шумов системы регистрации, светло серые пики – «артефакты» корреляционной функции третьего порядка, связанные с соответствующими постимпульсами, возникающими из-за двукратного отражения от граней кристаллов второго и третьего каскадов).

В пятой главе представлены результаты стабилизации джиттера, угловой стабилизации и когерентного сложения. Для определения параметров, требующих активной стабилизации, проведено сравнение имеющихся в установке

нестабильностей параметров усиленных импульсов с требуемыми для эффективного когерентного сложения величинами. Установлено, что наиболее критичным параметром является разница фаз усиленных импульсов. Без стабилизации нестабильность разницы фаз превышает 800 мрад, что существенно хуже требуемых 220–320 мрад, тогда как все остальные параметры укладываются в требования для реализации высокоэффективного когерентного сложения. Также продемонстрировано, что в созданной установке нет острой необходимости применения системы активной угловой стабилизации, потому что измеренная угловая нестабильность 6 и 4 мкрад в первом и втором каналах соответственно позволяет достичь эффективности когерентного сложения ~99%. Тем не менее, при последующем наращивании энергии импульсов и, соответственно, увеличении диаметра пучков угловая стабилизация может потребоваться. Связано это с тем, что, согласно проведённому анализу, требуемая для эффективного когерентного сложения величина угловой нестабильности обратно пропорциональна диаметру складываемых пучков. То есть при увеличении диаметра пучков в два раза, для сохранения эффективности когерентного сложения на том же уровне, угловую нестабильность необходимо уменьшать также в два раза. Поэтому был разработан и создан прототип системы активной угловой стабилизации, который, как показали эксперименты, позволяет снизить угловую нестабильность до 1,8 мкрад. Этот результат, согласно проведённому анализу, потенциально обеспечивает эффективное сложение пучков апертурой до ~90 мм, что позволяет работать с импульсами вплоть до петаваттного уровня пиковой мощности.

Принципиальной особенностью высокоинтенсивных лазерных систем является низкая частота следования усиленных импульсов (в настоящее время не более ~10 Гц), ограниченная частотой следования импульсов лазеров накачки. Это приводит к тому, что система активной стабилизации, основанная на регистрации усиленных импульсов (частотой 10 Гц), будет иметь частотную ширину полосы отработки теоретически не более 5 Гц (частота Найквиста), а практически не более 1–2 Гц [17]. Однако на основе полученных экспериментальных данных (были проведены эксперименты по регистрации флуктуаций разности фаз неусиленных импульсов в типичном режиме работы системы) установлено, что для достижения стабильности разности фаз ~200 мрад частотная ширина полосы отработки системы стабилизации должна составлять ~100 Гц, что не может быть реализовано при стабилизации только по усиленному излучению частотой 10 Гц. Этот факт мог поставить под сомнение перспективы создания многоканальных высокоинтенсивных систем, основанных на когерентном сложении. Однако для решения этой проблемы был разработан метод, позволяющий расширить частотную ширину полосы отработки системы активной стабилизации различных параметров усиленных импульсов, работоспособность которого продемонстрирована при стабилизации разности фаз усиленных импульсов – наиболее критичном для когерентного сложения параметре.

Предложенный метод основан на использовании неусиленной высокочастотной части излучения задающего лазера. Основная идея заключается в том, что это излучение, распространяясь по тому же оптическому пути, что и основные усиливаемые импульсы, будет приобретать те же возмущения, вызываемые вибрациями оптических элементов, воздушными потоками,

изменениями температуры и т.п. В связи с этим, регистрация разности фаз неусиленных импульсов позволяет получать в широком частотном диапазоне информацию о вкладе в разность фаз усиленных импульсов всех возмущений, кроме возмущений, связанных с нелинейными эффектами. Соответственно, дополнительную информацию о возмущениях, определяемых нелинейными эффектами, необходимо получать, регистрируя разность фаз усиленных импульсов. Стоит отметить, что в большинстве случаев вклад нелинейных эффектов будет достаточно мал. Это связано с тем, что при разработке и создании высокоинтенсивных систем следят за тем, чтобы величина нелинейного фазового набег (В-интеграла) не превышала 1 рад, что при характерной в нашем случае нестабильности энергии усиленных импульсов 2–4% приведёт к вкладу нелинейных эффектов в фазовую нестабильность на уровне 20–40 мрад, позволяющем без проблем осуществлять высокоэффективное когерентное сложение.

На основе предложенного метода была разработана и создана система стабилизации разности фаз усиленных импульсов (рис. 5). С использованием этой системы экспериментально продемонстрирована работоспособность предложенного метода расширения частотной полосы стабилизации. На рис. 6 представлены экспериментальные данные, полученные в различных режимах работы системы стабилизации. Из этих данных установлено, что если с использованием низкочастотного контура, основанного на регистрации разности фаз усиленных импульсов, была достигнута ширина полосы стабилизации ~1 Гц, то при использовании высокочастотного контура, регистрирующего неусиленное высокочастотное излучение, полосу удалось расширить до ~100 Гц, то есть на два порядка. При этом нестабильность разности фаз усиленных импульсов снизилась с 372 ± 42 мрад в первом случае, до 85 ± 42 мрад во втором (погрешность определяется собственными шумами системы регистрации).

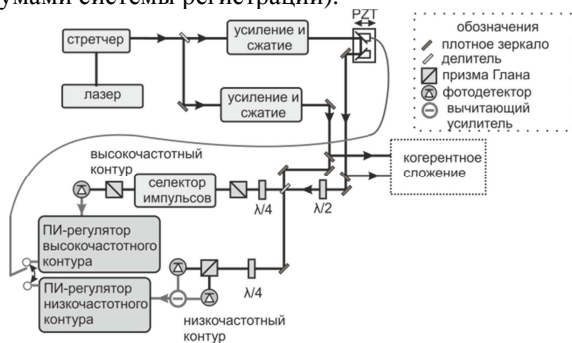


Рис. 5. Схема измерения и стабилизации разности фаз с двумя контурами.

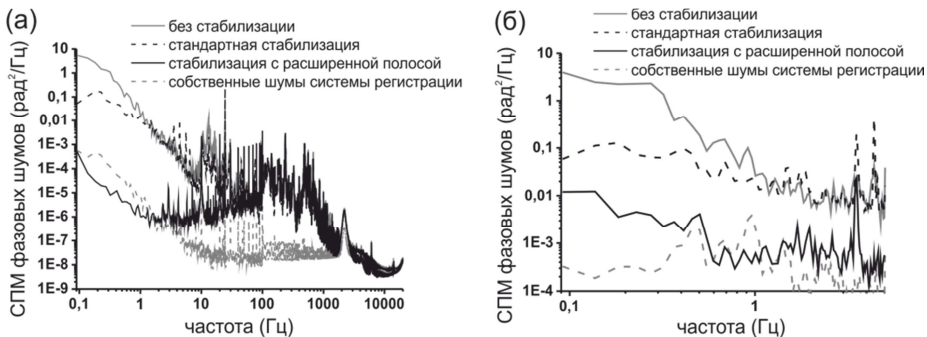


Рис. 6. Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов при наличии и отсутствии стабилизации в высокочастотном (а) и низкочастотном (б) контурах.

Кроме того, была разработана и создана система регистрации разности фаз усиленных импульсов (низкочастотный контур на рис. 5) с пониженной чувствительностью к амплитудным шумам, вызванными нестабильностью энергии усиленных импульсов. Потребность в этой системе связана с тем, что использование стандартной схемы регистрации, аналогичной высокочастотному контуру на рис. 5, привело бы к преобразованию амплитудных шумов в фазовые, так как в данном случае невозможно отличить изменение величины регистрируемого сигнала из-за изменения разности фаз и из-за изменения энергии импульсов. Подробно принцип регистрации разности фаз усиленных импульсов описан в диссертации, а качественно он заключается в том, что в разработанной оптической схеме формируются два сигнала, в которые амплитудные шумы дают синфазный вклад, а фазовые противофазный, что после регистрации и вычитания этих сигналов позволяет подавить амплитудные шумы. Экспериментально установлено, что созданная система обеспечивает более чем трёхкратное подавление вклада амплитудных шумов в регистрируемый сигнал, по сравнению со стандартной схемой измерения разности фаз.

Когерентное сложение усиленных импульсов осуществлялось в фокальной плоскости сферического зеркала с радиусом кривизны 3 метра. Довольно большой радиус кривизны был выбран для того, чтобы пучки в фокальной плоскости были достаточно большими для их регистрации стандартной ПЗС-камерой. Полученные типичные профили отдельных пучков и суммарного импульса представлены на рис. 7.

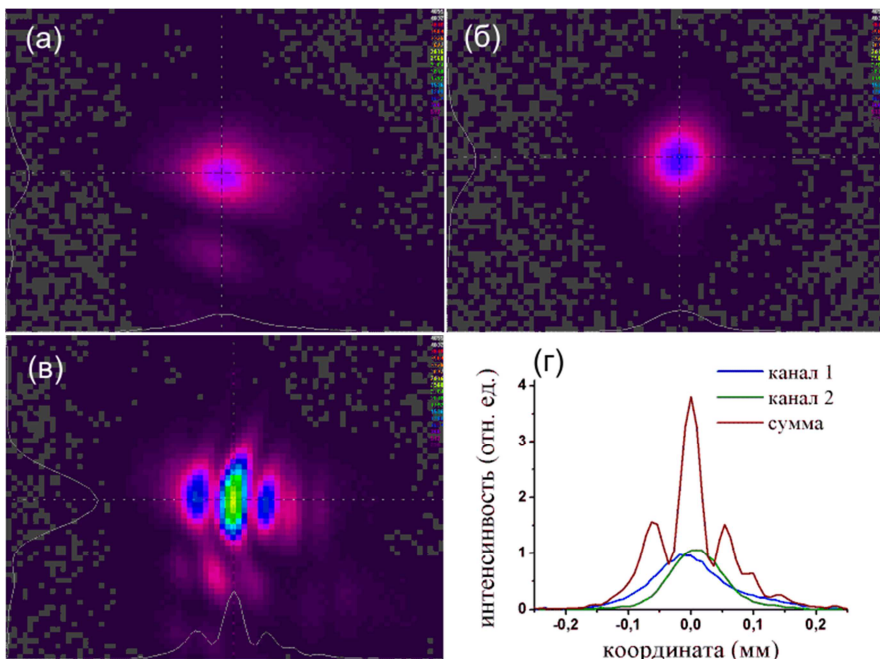


Рис. 7. Когерентное сложение мультитераваттных усиленных сжатых импульсов: профили в первом канале (а), втором канале (б), суммарного пучка (в) и горизонтальная проекция данных (г).

Эффективность когерентного сложения, вычисленная из полученных данных, составляет $95 \pm 5\%$ (погрешность связана с нестабильностью энергии усиленных импульсов). Также экспериментально продемонстрировано, что созданная система стабилизации позволит сохранять достигнутый уровень эффективности когерентного сложения на продолжительных временных интервалах, что важно для последующего применения созданной установки. В частности, установлено, что если без стабилизации при усреднении по 100 импульсам наблюдается падение эффективности сложения до минимальных (при сложении двух каналов) $\sim 50\%$, то при включенной системе стабилизации эффективность сохраняется на максимально достигнутом уровне $\sim 95\%$ (рис. 8).

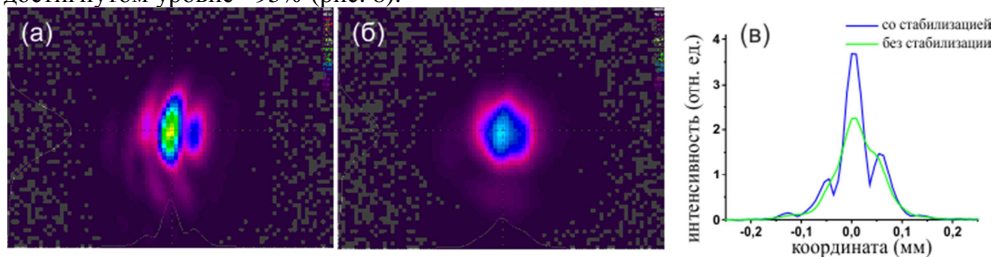


Рис. 8. Результаты когерентного сложения при усреднении по 100 импульсам со стабилизацией (а) и без (б), горизонтальная проекция данных (в).

Для определения перспектив проведения исследований в области физики высоких полей, а также демонстрации сохранения достигнутой эффективности когерентного сложения при переходе от длиннофокусного фокусирующего зеркала к короткофокусному, были проведены эксперименты по острой фокусировке усиленных сжатых импульсов. Фокусировка осуществлялась 45° параболическим зеркалом (Edmund Optics Inc.) диаметром 76 мм с фокусным расстоянием 90 мм. При использовании такого короткофокусного зеркала, фокальное пятно будет иметь размер менее 10 мкм, что сопоставимо с размером пикселя ПЗС-камеры и, соответственно, не позволяет определить такие параметры излучения в фокальной плоскости, как диаметр и пиковую интенсивность. Для решения данной проблемы была использована схема, осуществляющая передачу изображения из фокуса параболического зеркала на ПЗС-камеру с 40-кратным увеличением. Для минимизации искажений, связанных с хроматическими аберрациями и аберрациями короткофокусной оптики, в этой схеме использован скорректированный на бесконечность ахроматический микрообъектив (40X Nikon Plan Fluorite Imaging Objective, 0.75 NA). Зарегистрированные увеличенные профили отдельных пучков и суммарного пучка в фокальной плоскости параболического зеркала представлены на рис. 9. Вычислено, что в первом канале с учётом энергии 75 мДж, длительности 23 фс и профиля рис. 9(а), достигнута пиковая интенсивность релятивистского уровня $0,47 \times 10^{19}$ Вт/см². Во втором канале с учётом достигнутой энергии 110 мДж, длительности 24 фс и профиля рис. 9(б) пиковая интенсивность составляет $0,7 \times 10^{19}$ Вт/см². В суммарном пучке пиковая интенсивность $2,2 \times 10^{19}$ Вт/см², и эффективность когерентного сложения составляет те же $95 \pm 5\%$. При этом погрешность в определении пиковых интенсивностей составляет $\sim 3\%$ и определяется шумами камеры (1%), её конечным разрешением ($\sim 1\%$), то есть размером пикселя (9x9 мкм), и точностью настройки на фокус ($\sim 1\%$), то есть точностью позиционирования микрообъектива. Кроме того от импульса к импульсу данная величина будет флуктуировать, из-за нестабильности энергии импульсов, в пределах 4% в первом канале, 2% во втором и $\sim 5\%$ в сумме. Стоит отметить, что интенсивность может быть увеличена примерно в два раза после компенсации аберраций, преимущественно астигматизма и ещё примерно на порядок при увеличении числовой апертуры фокусирующей системы.

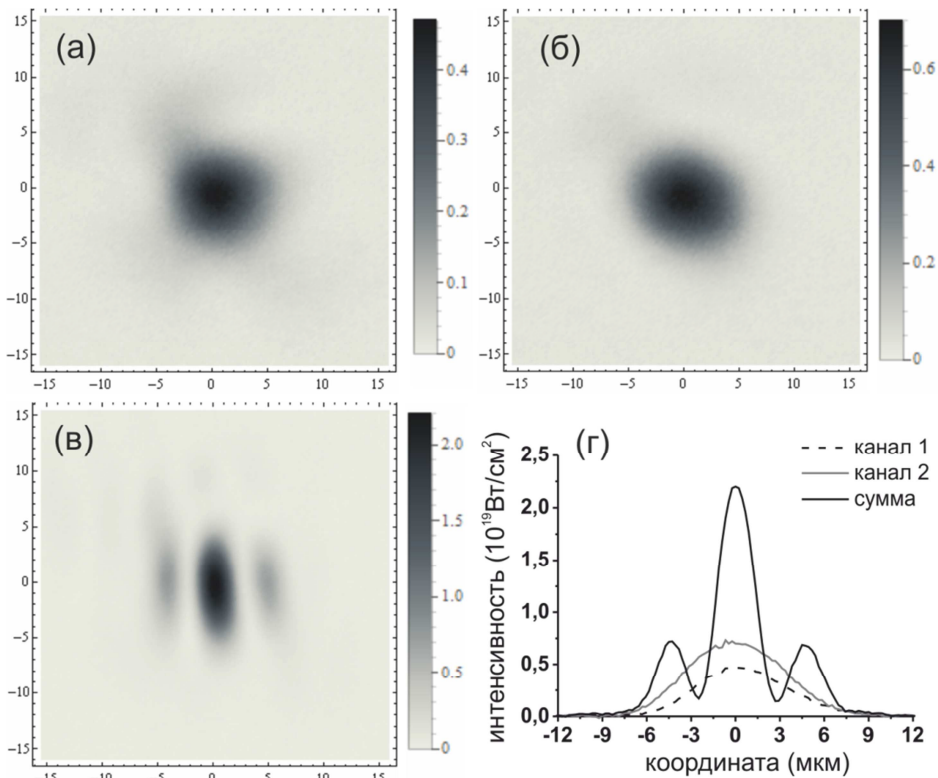


Рис. 9. Профиль в фокальной плоскости при острой фокусировке для первого (а) и второго (б) каналов, суммарного пучка (в) и горизонтальная проекция данных (г). (координаты в микронах; FWHM диаметр $6,9 \pm 0,3$ мкм и $7,2 \pm 0,3$ мкм в первом и втором каналах соответственно; горизонтальный FWHM размер суммарного пучка уменьшился до $2,7 \pm 0,3$ мкм)

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Впервые экспериментально реализовано когерентное сложение параметрически усиленных фемтосекундных импульсов. Проведены эксперименты по когерентному сложению импульсов энергией 100 мДж, длительностью 23 фс, что на данный момент по обоим параметрам является рекордным результатом.
2. Проанализированы методы когерентного сложения, установлено, что наиболее перспективным из них для создания лазерных систем высокой интенсивности является параллельный подход к когерентному сложению.
3. Проведён анализ зависимости эффективности когерентного сложения от нестабильности различных параметров складываемых импульсов. Установлено, что наиболее критичным параметром, требующим

- первоочередной стабилизации, является разность фаз усиленных импульсов.
4. Разработан метод увеличения частотной полосы обработки системы активной стабилизации разности фаз в низкочастотных лазерных системах. Экспериментально продемонстрировано его преимущество по сравнению со стандартным подходом.
 5. Разработана система регистрации разности фаз усиленных импульсов с пониженной чувствительностью к амплитудным шумам. Экспериментально продемонстрировано более чем трёхкратное подавление вклада амплитудных шумов.
 6. Разработана система стретчер–компрессор для высокоинтенсивных петаваттных лазерных систем с пикосекундной (~100 пс) длительностью импульсов накачки.
 7. В созданной установке экспериментально продемонстрирована возможность достижения интенсивности релятивистского уровня $\sim 2 \times 10^{19}$ Вт/см² при использовании параболического зеркала с фокусным расстоянием 90 мм.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Mourou G. A., Tajima T. and Bulanov S. V. Optics in the relativistic regime // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78, № 2. P. 309–371.
2. Di Piazza A., Muller C., Hatsagortsyan K. Z., and Keitel C. H. Extremely high–intensity laser interactions with fundamental quantum systems // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 84, № 3. P. 1177–1228.
3. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // *Optics Communications.* 1985. V. 56, № 3. P. 219–221.
4. Yanovsky V., Chvykov V., Kalinchenko G., Rousseau P., Planchon T., Matsuoka T., Maksimchuk A., Nees J., Cheriaux G., Mourou G. and Krushelnick K. Ultra–high intensity 300TW laser at 0.1 Hz repetition rate // *Optics Express.* 2008. V. 16, № 3. P. 2109–2114.
5. Giambruno F., Radier C., Rey G. and Chériaux G. Design of a 10 PW (150 J/15 fs) peak power laser system with Ti:sapphire medium through spectral control // *Applied Optics.* 2011. V. 50, № 17. P. 2617–2621.
6. Lyachev A., Chekhlov O., Collier J., Clarke R. J., Galimberti M., Hernandez–Gomez C., Matousek P., Musgrave I. O., Neely D., Norreys P. A., Ross I., Tang Y., Winstone T. B., Wyborn B. E. The 10PW OPCPA Vulcan Laser Upgrade // *Advances in Optical Materials*, February 16–18, 2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (CD), paper HThE2.
7. Коржиманов А. В., Гonosков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // *УФН.* 2011. Т. 181, № 1. С. 9–32.
8. Shaohua Ji, Fuquan Li, Fang Wang, Xinguang Xu, Zhengping Wang, and Xun Sun. Homogeneity of rapid grown DKDP crystal // *Opt. Mater. Express.* 2014. V. 4, № 5. P. 997–1002.
9. Gratings for scientific applications, HORIBA. URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/for-scientific-applications/>

10. Bagchi S., Zhang J., Banerjee S., Ramanathan V., Smith N. C., Brown K., and Umstadter D. Measurement of Damage Threshold for Metallic Gratings under Intense Laser Pulse Irradiation // *Optical Fabrication and Testing*, October 21-24, 2008, Rochester, New York United States, OSA Technical Digest (CD), paper OFB3.
11. Major Zs., Klingebiel S., Skrobol C., Ahmad I., Wandt C., Trushin S. A., Krausz F. and Karsch S. Status of the Petawatt Field Synthesizer—pump-seed synchronization measurements // *AIP Conference Proceedings*. 2010. V. 1228. P. 117–122.
12. Guillaume M., Lureau F., Laux S., Casagrande O., Radier C., Chalus O., Caradec F., Boudjema L., Simon-Boisson C. A., Dabu R., Jipa F., Neagu L., Dancus I., Sporea D., Fenic C., and Grigoriu C. First sub-25fs PetaWatt laser system // *CLEO: Science and Innovations*, June 9–14, 2013, San Jose, California United States, OSA Postdeadline Paper Digest (online), paper CTh5C.5.
13. ELI home page. URL: <http://www.eli-beams.eu>
14. XCELS home page. URL: <http://www.xcels.iapras.ru>
15. Klenke A, Breiẗkopf S, Kienel M, Gottschall T, Eidam T, Hädrich S, Rothhardt J, Limpert J and Tünnermann A. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, № 13. P. 2283–2285.
16. Zaouter Y, Daniault L, Hanna M, Papadopoulos D N, Morin F, Hönninger C, Druon F, Mottay E and Georges P. Passive coherent combination of two ultrafast rod type fiber chirped pulse amplifiers // *Optics Letters*. 2012. V. 37, № 9. P. 1460–1462.
17. Bagayev S. N., Leshchenko V. E., Trunov V. I., Pestryakov E. V., and Frolov S. A. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals // *Optics Letters*. 2014. V. 39, № 6. P. 1517–1520.
18. Leshchenko V. E., Trunov V. I., Frolov S. A., Pestryakov E. V., Vasiliev V. A., Kvashnin N. L. and Bagayev S. N. Coherent combining of multimillijoule parametric-amplified femtosecond pulses // *Laser Phys. Lett.* 2014. V. 11, № 9. 095301.
19. Goodno G. D., Shih C., and Rothenberg J. E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers // *Opt. Express*. 2010. V. 18, № 24. P. 25403–25414.
20. Klenke A., Seise Y., Limpert J., and Tünnermann A. Basic considerations on coherent combining of ultra-short laser pulses // *Opt. Express*. 2011. V. 19, № 25. P. 25379–25387.
21. Siiman L. A., Chang W., Zhou T., and Galvanauskas A. Coherent femtosecond pulse combining of multiple parallel chirped pulse fiber amplifiers // *Opt. Express*. V. 20, № 16. P. 18097–18116.
22. 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 // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7994. P. 799425.
23. Багаев С. Н., Трунов В. И., Пестряков Е. В., Лещенко В. Е., Фролов С. А., Васильев В. А. Оптимизация каскадов широкополосного параметрического усиления фемтосекундной лазерной системы с когерентным сложением полей // *Квантовая Электроника*. 2014. Т. 44, № 5. С. 415–425.
24. Herrmann D., Veisz L., Tautz R., Tavella F., Schmid K., Pervak V., and Krausz F. Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical

parametric chirped-pulse amplification // Opt. Lett. 2009. V. 34, № 16. P. 2459–2461.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Bagayev S. N., Leshchenko V. E., Trunov V. I., Pstryakov E. V., and Frolov S. A. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals // Optics Letters. 2014. V. 39, № 6. P. 1517–1520.
- A2. Leshchenko V. E., Trunov V. I., Frolov S. A., Pstryakov E. V., Vasiliev V. A., Kvashnin N. L. and Bagayev S. N. Coherent combining of multimillijoule parametric-amplified femtosecond pulses // Laser Phys. Lett. 2014. V. 11, № 9. 095301.
- A3. Bagayev S. N., Trunov V. I., Pstryakov E. V., Frolov S. A., Leshchenko V. E., Kokh A. E. and Vasiliev V. A. Super-intense femtosecond multichannel laser system with coherent beam combining // Laser Physics. 2014. V. 24, № 7. 074016.
- A4. Лещенко В. Е., Трунов В. И., Пестряков Е. В., Фролов С. А. Безаберационная широкополосная система стретчер-компрессор для фемтосекундного петаваттного лазерного комплекса с параметрическим усилением // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 332–340.
- A5. Багаев С. Н., Трунов В. И., Пестряков Е. В., Лещенко В. Е., Фролов С. А., Васильев В. А. Высокоинтенсивные фемтосекундные лазерные системы на основе когерентного сложения оптических полей // Оптика и Спектроскопия. 2013. Т. 115, № 3. С. 356–366.
- A6. Trunov V. I., Bagayev S. N., Pstryakov E. V., Frolov S. A., Leschenko V. E., Kirpichnikov A. V., Kokh A. E., Petrov V. V., Vasiliev V. A. Ultrarelativistic laser systems based on coherent beam combining // AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1465. P. 18–22.
- A7. Лещенко В.Е. Когерентное сложение параметрически усиленных фемтосекундных импульсов // Материалы 50-й юбилейной международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (МНСК), 13–19 апреля, 2012, Новосибирск, Россия, Сб. тез., С. 12.
- A8. Bagaev S. N., Trunov V. I., Frolov S. A., Pstryakov E. V., Leschenko V. E., Kokh A. E., Vasiliev V. A. Coherent combining of parametrically amplified femtosecond pulses // 15-th international conference “Laser optics 2012”, 25–29 June, 2012, St.Petersburg, Russia, Summaries (CD), 0481_Trunov.
- A9. Leschenko V. E., Trunov V. I., Frolov S. A., Pstryakov E. V., Vasiliev V. A. Coherent addition of parametrically amplified femtosecond pulses // 2nd Chinese-Russian Workshop/ Youth Summer School on Laser Physics, Fundamental and Applied Photonics, 3–8 august, 2012, Tianjin, China, Abstracts and resumes, P. 6.
- A10. Багаев С. Н., Трунов В. И., Пестряков Е. В., Лещенко В. Е., Кох А. Е., Фролов С. А., Васильев В.А. Высокоинтенсивные фемтосекундные лазерные системы на основе когерентного сложения // VII международная конференция «Фундаментальные Проблемы Оптики – 2012», 15–19 октября, 2012, Санкт-Петербург, Россия, Сборник трудов, С. 427.
- A11. Leshchenko V. E., Trunov V. I., Pstryakov E. V., Frolov S. A. Aberration-free broadband stretcher-compressor for femtosecond petawatt level laser system based on parametrical amplification // XI International conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers (AMPL-2013), 16–20 September, 2013, Tomsk, Russia, Conference abstracts, P. 72.

- A12. Bagayev S. N., Trunov V. I., Pestryakov E.V., Frolov S. A., Leschenko V. E., Kokh A. E., Vasiliev V. A. Ultra-intense laser systems based on coherent beam combining // International Conference on Coherent and Nonlinear optics (ICONO 2013), 18–22 June, 2013, Moscow, Russia, Technical Digest (CD), ICONO–05, P. 38.
- A13. Bagayev S. N., Trunov V. I., Pestryakov E. V., Frolov S. A., Kokh A. E., Leschenko V. E., Vasiliev V. A. Superintense femtosecond multichannel laser system with coherent beam combining // The 6–th International Symposium “Modern Problems of Laser Physics” (MPLP 2013), 25–31 August, 2013, Novosibirsk, Russia, Technical Digest, P. 64.
- A14. Bagayev S. N., Trunov V. I., Pestryakov E. V., Frolov S. A., Leschenko V. E., Kirpichnikov A. V., Kokh A. E., Petrov V. V., Vasiliev V. A. Ultrarelativistic laser systems based on coherent beam combining // The 3rd International Symposium “Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Energy, Industry and Medicine” (LDRP–2011), 30 May – 2 June, 2011, Kizugawa-city, Kyoto, Japan, Book of Abstracts LDRP–11, P. 13.
- A15. Trunov V. I., Pestryakov E. V., Frolov S. A., Leschenko V. E., Kirpichnikov A.V., Kokh A. E., Petrov V. V., Vasiliev V. A., Bagayev S. N. Generation of ultra-intense laser fields in multichannel system phase-locked by optical clock // The 10–th International Conference “Atomic and molecular pulsed lasers” (AMPL-2011), 12–16 September, 2011, Tomsk, Russia, Abstracts, D-6, P. 64.