

Новая стратегия управления адаптивной оптикой для лазерных систем петаваттного класса*

Н.Варкентина, Г.Довилляр, Ж.Легран, Г.Богран, И.Стефанон, П.Тремани, К.Левек

Новое поколение фемтосекундных лазеров сверхвысокой интенсивности – петаваттного класса и выше – требует новых подходов для коррекции волнового фронта. Новые задачи для адаптивной оптики связаны с преодолением ограничений, вызванных увеличением размеров элементов и амплитуды aberrаций, созданием более быстрой оптики, увеличением рисков повреждения оптических компонентов, с ускорением и облегчением обслуживания. В работе представлена новая технология механически деформируемого зеркала с рабочей частотой до 10 Гц, характеризующаяся большой длиной хода, высокой температурной стабильностью, низким гистерезисом, отсутствием эффекта опорной поверхности, безопасным, простым и быстрым обслуживанием. Предлагается обеспечить полную коррекцию выходного фокального пятна в камере мишени путем сочетания стандартной адаптивной оптической системы, простой камеры в фокальной плоскости и процесса коррекции восстановления фазы. Надежность корректирующей системы тестируется по изменениям интенсивности и стабильности волнового фронта, затем проводится верификация устойчивости коррекции к внешним возмущениям и, наконец, осуществляется коррекция пятна тераваттной лазерной системы в режимах низкой и высокой мощности.

Ключевые слова: мощные лазеры, адаптивная оптика, формирование лазерного пучка, коррекция aberrаций волнового фронта.

1. Введение

Недавний прогресс в развитии лазерных установок ультравысокой интенсивности привлек внимание исследователей из разных областей к потенциальным возможностям новых применений лазеров в таких специфических областях, как физика вещества при высоких давлениях и температурах [1], астрофизика и космология [2], управляемый термоядерный синтез [3], лазерная генерация протонных пучков с энергией порядка МэВ (ГэВ) для лечения [4] и получения изображений [5, 6] и т. д. Генерация частиц высокой энергии (электронов, протонов, заряженных ионов, нейтронов) и широкий диапазон частот облучения (от мягкого рентгеновского до гамма-излучения) стала возможной за счет взаимодействия сильно сфокусированных лазерных пучков с твердотельными или газовыми мишенями. По этой причине было затрачено немало усилий на разработку лазеров высокой интенсивности (10^{18} – 10^{23} Вт/см²), работающих в петаваттном (ПВт) режиме.

Для достижения петаваттной мощности в лазерной системе требуется разработка новых технологий для компенсации потерь излучения. Важно корректировать aberrации волнового фронта, вносимые большим числом оптических элементов при многократном усилении и сжатии импульсов в лазере. Камера мишени также содержит оптические элементы, которые могут вызвать дальней-

шие искажения пучка и спровоцировать увеличение потерь интенсивности. В частности, в таких приложениях, как ускорение ионов, физика сжатого и разогретого вещества и управляемый термоядерный синтез качество фокусировки пучка имеет первостепенное значение, поскольку интенсивность лазерного пучка определяет энергию ускоряемых частиц [7–9] или порог инициирования реакции термоядерного синтеза.

Для достижения в эксперименте наивысшей возможной интенсивности необходимо тщательно контролировать как спектральную фазу (с целью получения наименьшей длительности импульса), так и пространственную фазу для обеспечения минимального пятна фокусировки в камере взаимодействия. Однако экспериментально получить свободное от aberrаций фокальное пятно чрезвычайно трудно без применения адаптивной оптики [10]. Для получения фокального пятна пучка дифракционно ограниченного качества требуется контролировать целый ряд факторов в оптической системе. Вот всего лишь некоторые из них. Важно контролировать и подавлять искажения волнового фронта, вносимые большим числом оптических элементов и механическими ограничениями для больших оптических элементов (статичность, отсутствие изменений во времени), тепловые эффекты в стекле усилителя (изменения за время порядка нескольких минут), aberrации в каскадах лазерного усиления и компрессии, а также при финальной фокусировке пучка в камере взаимодействия.

Эффективно корректировать пространственную фазу и управлять ею можно с помощью адаптивной оптики. Типичная система обычно включает датчик волнового фронта для измерения пространственной фазы и деформируемое зеркало для ее коррекции. Для лазерных каскадов высокой мощности при низких частотах следования импульсов (менее 0.1 Гц) стало обычным размещение

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

адаптивной оптики на выходе лазерной системы (непосредственно перед компрессором или сразу после него) [10–12].

В настоящей работе определена стратегия оптимизации пространственной фазы для лазерных пучков сверхвысокой интенсивности при высокой частоте следования импульсов (несколько Гц). Однако сначала обсудим последние достижения в области лазерных установок с высокой частотой следования импульсов и связанные с этим вопросы. В таких установках тепловые эффекты могут быть более сильными, хотя по-прежнему медленно меняющимися. Поскольку лазеры высокой интенсивности требуют более экстремальной фокусировки, то деформируемое зеркало (ДЗ) должно быть способно корректировать большие aberrации, работать с высокими средними и пиковыми лазерными мощностями в субсекундном временном масштабе на большом световом диаметре (550 мм и выше).

Во второй части работы мы опишем новое поколение наших механических ДЗ, в которых интегрированы указанные характеристики. Вновь разработанные приводы (актюаторы) обладают такими преимуществами, как более высокая механическая эффективность и лучшая температурная стабильность даже при частоте 10 Гц. Вариабельность диаметра пучка (от 16 до 500 мм и более) и угла падения (от 0° до 45°) позволяет достичь хороших результатов коррекции. Легкость и безопасность обслуживания обеспечивается использованием заменяемых механических приводов.

В третьей части работы особое внимание уделено коррекции aberrаций в конце последовательности каскадов путем реализации простой стратегии управления волновым фронтом. Прямой и автоматизированный метод использует стандартную камеру для регистрации изображения фокального пятна и алгоритмы восстановления фазы [13, 14] для прямого измерения и коррекции волнового фронта в фокальном пятне. Качество фокального пятна характеризуется фактором Штреля, получаемым как для импульсных пучков низкой энергии, так и для импульсов в режиме максимальной энергии. Процедура не требует дополнительного оборудования или ручных операций и успешно использовалась для оптимизации генерации протонов. Наконец, в четвертой части мы обсудим пути развития методов управления волновым фронтом и сделаем выводы относительно их применения в источниках света экстремальной интенсивности.

2. Результаты

2.1. Механически деформируемое зеркало для мощного лазера

Механически деформируемые зеркала, разработанные для мощных лазеров, имеют ряд преимуществ перед такими ДЗ, как зеркала на биморфных пьезоэлементах, микроэлектромеханические, магнитные и т.п. Это и возможность интегрировать высокую мощность, и доступность покрытий с высоким порогом лазерно-индуцированного повреждения для пучков большого диаметра, а также высокая временная стабильность даже без электропитания, полная невосприимчивость к электромагнитным возмущениям, большой динамический диапазон, низкий гистерезис. Более того, остаточные aberrации на ДЗ характеризуются малым или нулевым эффектом опорной поверх-

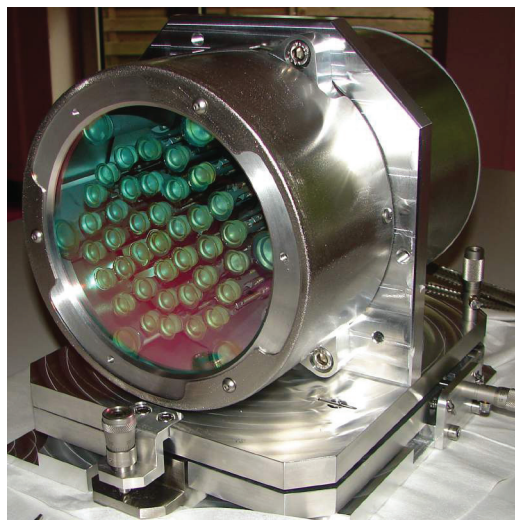


Рис.1. Вакуумсовместимое механически деформируемое зеркало ILAO Star с диэлектрическим покрытием, рассчитанное на высокую мощность.

ности благодаря конечным размерам приводов и расстояний между ними. Это можно видеть на поверхности мембраны при приближении к плоской форме зеркала. Фотография механически деформируемого зеркала приведена на рис.1. Действие такого ДЗ основано на применении механических приводов. Макроскопическое движение механических частей внутри привода создает силу, приложенную к задней поверхности зеркала, которая в свою очередь изменяет форму отражающей поверхности в нанометровом или микрометровом масштабе.

При использовании в мощных лазерах ДЗ обычно не управляется в моменты мощных выстрелов во избежание изменений формы, что могло бы привести к существенному изменению положения сфокусированного пятна или к появлению горячих точек, могущих повредить какие-либо части лазерной установки или дорогую оптику (например, дифракционные решетки). Поэтому стабильность коррекции волнового фронта является критической для качества коррекции фокального пятна. Технология механической деформации зеркал по своей природе предельно стабильна: электрическая энергия нужна только для движения макроскопических частей внутри актюаторов; после этого не нужно поддерживать электрическое напряжение или ток на актюаторе для обеспечения силы, приложенной к зеркалу. Форма зеркала остается постоянной все время, даже если питание выключено или контроллер отключен от сети. Рис.2 иллюстрирует стабильность зеркала во времени. Видно, что среднеквадратичное отклонение (СКО) волнового фронта составляет менее 10 нм в течение 13 ч без какого-либо контроля напряжения.

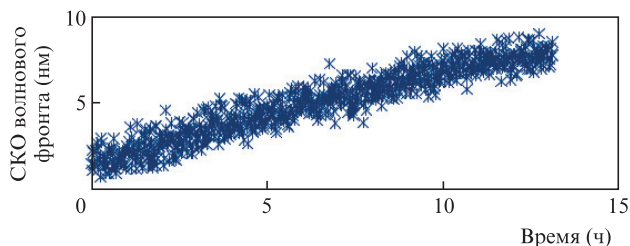


Рис.2. Временная стабильность деформируемого зеркала ILAO Star после выключения питания.

Качество коррекции поддерживается без непрерывного действия обратной связи, характерной для адаптивной оптики, и деформируемое зеркало становится почти пассивным компонентом (стабильным во времени). Благодаря этому зеркало также становится весьма нечувствительным к электростатическому разряду или внешнему возмущению, т. к. такие возмущения никогда не несут достаточной мощности, чтобы сдвинуть механические части актюаторов.

В лабораторных установках с контролируемой турбулентностью воздуха или в больших лазерных установках с вакуумными трубками для направления пучков стабильность волнового фронта после коррекции с помощью механически деформируемых зеркал может характеризоваться СКО менее 5 нм. Более того, механически деформируемое зеркало, свободное от эффекта опорной поверхности, позволяет избежать распространения пучка с горячими точками. Наилучшая активная плоская коррекция может достигать 5 нм на поверхности, как показано на рис.3,а. Используя новые патентованные актюаторы [15], можно достичь максимального разброса между максимумами и минимумами (peak to valley) в 100 мкм для аббераций низкого порядка (фокус и оба астигматизма), до 30 мкм для комы и трилистника и всего 9 мкм для сферической абберации третьего порядка. При коррекции больших деформаций, превышающих 21 мкм, качество коррекции волнового фронта (по оценке СКО) составляет ~17 нм (см. рис.3,б и в). Столь большой динамический диапазон смещений актюатора позволяет корректировать абберации, обусловленные сильными температурными эффектами и предельной фокусировкой. Кроме того, внедрение новых актюаторов в ДЗ позволяет увеличить скорость коррекции (до 10 Гц) [15].

Стандартная стратегия адаптивно-оптической коррекции состоит в ответвлении небольшой части пучка и измерении ее волнового фронта с помощью датчика волнового фронта. Однако такая стратегия гарантирует свободу лазерного пучка от аббераций только в месте нахождения датчика. Абберации, внесенные оптическими элементами в поле датчика волнового фронта, например фокусирующей оптикой, не измеряются и, следовательно, не корректируются обратной связью адаптивной оптики. Такие абберации могут вносить вклад в деградацию фокального пятна в конце оптического каскада. Для получения максимально возможной интенсивности на мишени требуется свободный от аббераций волновой фронт в камере взаимодействия. Однако это не означает, что мы имеем свободный от аббераций волновой фронт в месте нахождения датчика волнового фронта.

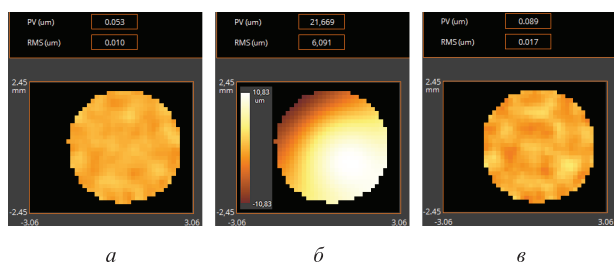


Рис.3. Измерение волнового фронта зеркала PIAO Star: а – активная плоская коррекция (СКО равно 10 нм); б – большая деформация (максимальный разброс более 21 мкм, включая сферическую абберацию с максимальным разбросом 1.96 мкм); в – исправленный волновой фронт хорошего качества с остаточной абберацией (СКО равно 17 нм).

2.2. Адаптивно-оптическое исполнение коррекции абберации

В общем случае, как показано на рис.4, в лазерных каскадных системах высокой мощности ДЗ ставится прямо после каскада компрессии импульса. После ДЗ устанавливается пропускающее зеркало, которое выделяет малую долю основного пучка для измерения волнового фронта датчиком. Этот оптический тракт может включать линзы, преобразующие пучок к размеру датчика волнового фронта, и осуществлять оптическое сопряжение между ДЗ и датчиком волнового фронта. Для исключения искажений волнового фронта ДЗ и датчик волнового фронта работают в режиме обратной связи, что позволяет получить почти совершенно плоский волновой фронт в этой части оптической установки. Такой вариант коррекции волнового фронта используется в многочисленных мощных лазерных установках, таких как QST (Национальный институт квантовых и радиологических наук и технологий, Япония), SEA Сакле (Комиссариат по атомной и альтернативной энергетике, Франция), ELI Beamlines (Чехия), синхротронные установки SLAC (Стэнфорд, США) и DESY (Дортмунд, Германия) и многие другие.

Кроме того, в основном тракте лазерного пучка имеется несколько оптических элементов (главным образом зеркал), служащих для направления и фокусировки пучка. Все эти оптические элементы могут вносить определенные абберации, чем и объясняется тот факт, что наилучший волновой фронт на датчике не обеспечивает наилучшего качества фокального пятна. Данные абберации называются дифференциальными, и, что важно, они являются статическими и не меняются со временем. Тем не менее, эти абберации в конце последовательности лазерных каскадов не регистрируются датчиком волнового фронта и не учитываются при коррекции с помощью ДЗ [12]. Пример измерения волнового фронта при стандартном положении датчика (в конце каскада сжатия импульса) на установке лаборатории CELIA (Бордо, Франция) показан на рис.4. Как видно из рисунка, остаточная ошибка волнового фронта составляет всего 34 нм. И хотя

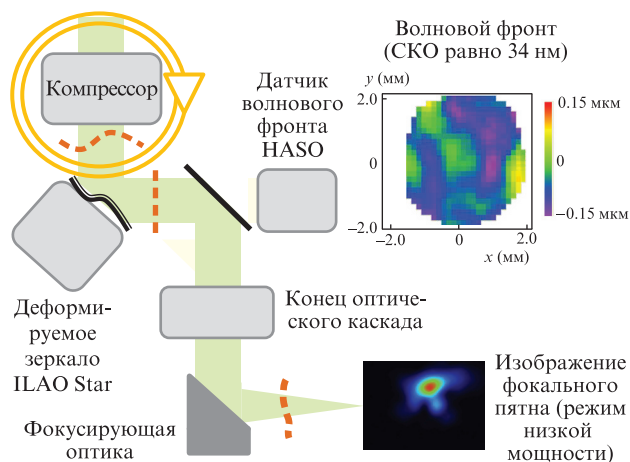


Рис.4. Схема типичного применения адаптивной оптики в лазерной системе высокой мощности. Изображение лазерного пучка в фокальной плоскости при низкой мощности лазера (справа внизу) и пример волнового фронта, измеренного датчиком волнового фронта HASO (справа сверху) в лаборатории CELIA (Бордо, Франция). Штриховыми линиями показана форма волнового фронта.

она весьма мала (при полной коррекции волнового фронта на уровне датчика), в этом эксперименте измеренный фактор Штреля сфокусированного лазерного пучка равен всего лишь 0.6.

В астрономии и аэронавтике для коррекции aberrаций конечного этапа разработано множество различных итерационных методов [16, 17]. Однако они не адаптированы для измерений одномодовых пучков и применяются для исправления aberrаций в пучках от широкополосных источников света. Более того, в ряде приложений мощных лазеров профиль интенсивности во время измерительной процедуры может быть известен заранее. В работах [18–20] показано, что с помощью генетических алгоритмов и алгоритмов поиска экстремумов можно корректировать работу мощных установок, соединяя биморфное зеркало и M^2 -измеритель. К сожалению, эти алгоритмы работают слишком медленно, а конечный результат поиска экстремумов сильно зависит от начальной деформации поверхности зеркала (стартовой точки). Часто по этим алгоритмам удается найти только локальный минимум, так что оптимальная форма деформируемого зеркала никогда не достигается. Более того, эти итерационные методы требуют по крайней мере несколько десятков итераций. Алгоритм «сходится» быстрее, если начальная точка ближе к искомому решению [18].

Представленный в настоящей работе метод Pharao (Phase Retrieval Adaptive Optics, что переводится как адаптивная оптика восстановления фазы (АОВФ)) является прямым и приспособлен для лазерных применений. Процедура состоит из двух шагов: 1) исправление aberrаций в режиме обратной связи; 2) оценка дифференциальных aberrаций с помощью алгоритма восстановления фазы [13, 14]. Основная идея метода состоит в том, чтобы собрать хотя бы одно изображение, отличающееся от сфокусированного определенным изменением фазы. Этот алгоритм различия фаз стремится гарантировать единственность решения на основе соотношения между аппаратной функцией (АФ) и фазой, подверженной aberrации, и таким образом определить дифференциальные aberrации. В нашем случае для осуществления второго шага коррекции используется ПЗС-камера в месте расположения фокального пятна. Чтобы получить достаточ-

ную информацию для расчета дифференциальных aberrаций, ПЗС-камера фиксирует три изображения фокального пятна с тремя различными фокусировками: одно изображение точно в фокусе, одно изображение с положительной расфокусировкой и одно – с отрицательной.

Затем используется следующий формализм с учетом гипотезы изопланатизма [21]:

$$i(\mathbf{r}) = \text{PSF}(\mathbf{r}) * O(\mathbf{r}) + n(\mathbf{r}),$$

где \mathbf{r} – двумерный вектор в плоскости изображения; $i(\mathbf{r})$ – изображение, являющееся сверткой аппаратной функции $\text{PSF}(\mathbf{r})$ в плоскости наблюдения и объекта $O(\mathbf{r})$; $n(\mathbf{r})$ – шум.

Аппаратная функция сфокусированного изображения имеет вид

$$\text{PSF}_f(\mathbf{r}) = |F^{-1}[P(\mathbf{u})\exp(i\varphi(\mathbf{u}))]|^2,$$

где F^{-1} – обратное преобразование Фурье; \mathbf{u} – двумерный вектор в плоскости зрачка; $P(\mathbf{u})$ – апертурная функция; $\varphi(\mathbf{u})$ – неизвестная фаза.

Математически фаза, содержащая aberrации, может быть разложена по полиномам Цернике $z_k(\mathbf{u})$:

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k z_k(\mathbf{u}),$$

где a_k – неизвестные коэффициенты aberrации.

Аппаратная функция при расфокусировке определяется как

$$\text{PSF}_d(\mathbf{r}) = |F^{-1}\{P(\mathbf{u})\exp[i(\varphi(\mathbf{u}) \pm \varphi_d(\mathbf{u}))] \}|^2,$$

где $\varphi_d(x, y)$ – известная фаза.

Минимизируем ошибку путем сравнения фурье-образа изображения $F(\text{PSF}_i)$ и фурье-образа его реконструкции с помощью полиномов Цернике $F(\text{PSF}_Z)$ так, чтобы $F(\text{PSF}_i) - F(\text{PSF}_Z) \rightarrow 0$ для всех трех изображений с использованием подхода максимального правдоподобия.

Три положения с разной расфокусировкой получают с помощью ДЗ. Затем по алгоритму восстановления фазы рассчитывается единственный набор дифференциальных aberrаций и получается волновой фронт, воспро-

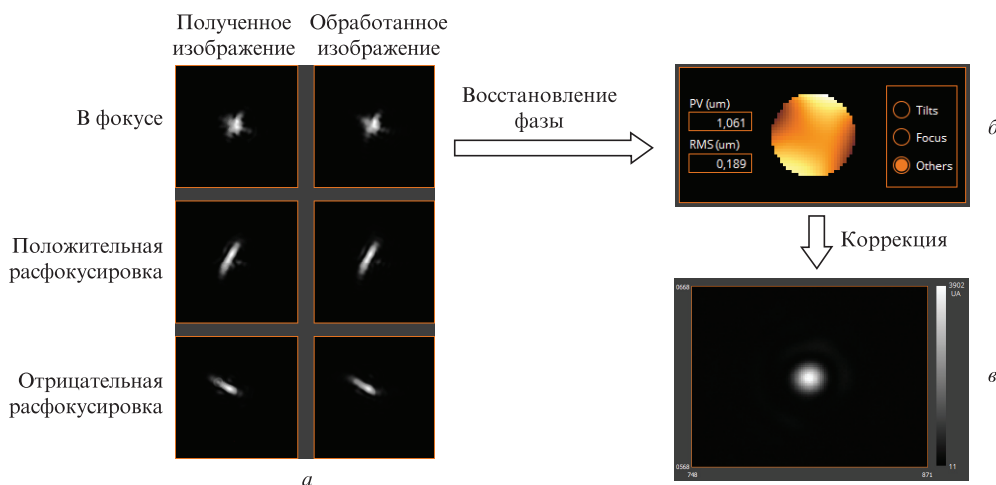


Рис.5. Измерение аппаратной функции (АФ) с помощью ПЗС-камеры (три положения пучка: в фокусе, с положительной и отрицательной расфокусировкой) (слева) и восстановление изображения из имитируемого волнового фронта с помощью алгоритма восстановления фазы (справа) (а); восстановление наилучшего волнового фронта для компенсации aberrаций на выходе системы (б); пятно почти дифракционного качества в фокальной плоскости после подачи волнового фронта на деформируемое зеркало (в). Для компенсации aberrаций на выходе системы с помощью деформируемого зеркала добавлялась деформация с максимальным разбросом 1.061 мкм.

изводящий эти три изображения (рис.5,*a*). Как видно из рисунка, после применения данного алгоритма полученное изображение и изображение, реконструированное из набора измеренных aberrаций, виртуально идентичны (слева показаны измеренные изображения, справа – восстановленные).

Результатом АОВФ-оптимизации является волновой фронт, обуславливающий деградацию аппаратной функции. Противоположная этому волновому фронту деформация сообщается ДЗ (рис.5,*b*) для исправления указанных дифференциальных aberrаций. В результате получается фокальное пятно, качество которого близко к дифракционному (рис.5,*в*).

Надежность алгоритма АОВФ тестировалась на длине волны 780 нм в настольном эксперименте (рис.6). Установка состояла из диодного лазера (Imagine Optic, Франция), деформируемого зеркала ПЛАО Star (Imagine Optic, Франция), коллимирующих и фокусирующих линз (Thorlabs, Германия) и микрообъектива (Nikon, Япония). С помощью светоделителя формировались два оптических тракта. Первый из них использовался для диагностики установки с помощью датчика волнового фронта HASO4 First (Imagine Optic, Франция), а второй – для имитации окончательной фокусировки пучка. С помощью фазовой пластинки создавались aberrации на выходе последнего каскада (не обнаруживаемые датчиком волнового фронта), а для получения изображения использовалась камера acA 1600-20gm (Basler, Германия). Изменения интенсивности лазерного пучка и соответствующего волнового фронта измерялись для каждой итерации обратной связи АОВФ.

При исправлении aberrаций в длинных последовательностях лазерных каскадов установка была несколько иной. Камера, регистрирующая фокальное пятно, располагалась после микрообъектива и ослабляющих фильтров. Может показаться, что при такой схеме расположения алгоритм восстановления фазы не будет правильно работать. Но даже если есть какие-либо aberrации, вносимые ослабляющими фильтрами и микрообъективом, мы полагаем, что их влияние на нашу установку минимально. Во-первых, качество фокусирующего объектива намного выше, чем оптическое качество фокусирующей оптики в конце лазерной цепочки (по порядку величины $\lambda/100$). Во-вторых, для ослабления сигнала используются поглощающие фильтры высокого качества, которые вносят очень малые aberrации (если вообще таковые имеют-

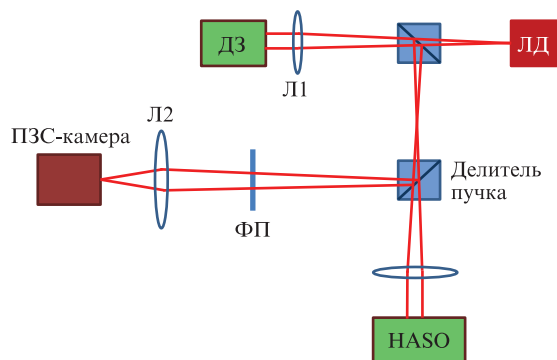


Рис.6. Настольный эксперимент по измерению выходных aberrаций: ЛД – лазерный диод; ДЗ – деформируемое зеркало; HASO – датчик волнового фронта; Л1, Л2 – линзы коллиматора; Л2 – микрообъектив, представляющий фокусирующую оптику на выходе; ФП – фазовая пластинка.

Табл.1. Проверка повторяемости АОВФ на длине волны 780 нм.

Номер эксперимента	Вариация интенсивности I_n/I_{ref}	СКО волнового фронта (мкм)	Отклонения от опорного волнового фронта (нм)
1	1.01	192	7
2	0.99	198	9
3	1.01	188	9
4	1.00	192	7
5	0.99	188	8
6	1.01	193	8
7	1.01	196	5
8	0.99	195	5
9	0.99	197	4
10	1.00	194	7

ся), причем фильтры установлены близко к фокальному пятну (плоскости изображения) для минимизации их влияния на волновой фронт. В-третьих, измерения проводятся при низкой лазерной мощности. Когда используется режим высокой мощности, aberrации вносятся в основном лазером, а не оптикой. И, наконец, aberrации, вносимые отдельными компонентами, можно измерить с помощью метрологических инструментов заранее, до их установки в оптическую систему, таким образом селективно уменьшая их влияние.

Результаты проверки повторяемости измерений с обратной связью собраны в табл.1. Оценивалась также разность между опорным и измеренным волновыми фронтами. Между итерациями среднеквадратичная величина этой разности никогда не превышала 9 нм. Более того, изменение фактора Штреля было менее 0.01.

Устойчивость метода коррекции проверялась при работе в широкой спектральной полосе. Калибровка проводилась на одной длине волны (850 нм), для измерения дифференциальных aberrаций применялся алгоритм АОВФ. Затем описанный выше процесс коррекции применялся для исправления aberrаций на выходе лазерной системы с помощью деформируемого зеркала, и процесс повторялся три раза на трех различных длинах волн (655, 780 и 1060 нм). Результаты показаны на рис.7. Видно различие между АФ до и после исправления aberrаций для каждой длины волны. Стоит отметить, что после исправления дифференциальной aberrации вокруг АФ можно обнаружить структуру Эйри. Таким образом, достигнуто полное исправление фокального пятна

В заключение отметим, что полная коррекция дифференциальных aberrаций была измерена как при низкой, так и при высокой (100 ТВт) мощности лазера УНИ 100 в СЕА Сакле. Лазер УНИ 100 генерирует импульсы длительностью 25 фс на длине волны 800 нм с частотой следования 10 Гц. На рис.8 приведены результаты трех различных измерений в фокальной плоскости с применением этого лазера.

Таким же путем, как описано выше, ДЗ может исправлять aberrации до датчика волнового фронта. Пусть имеются некие искажения волнового фронта за счет финальной фокусирующей оптики (фактор Штреля равен 0.45), которые портят изображение фокального пятна (рис.8,*a*). Тогда применяется АОВФ-процедура (рис.8,*б*) и определяется корректирующий волновой фронт. Как только дифференциальные aberrации измерены и процесс коррекции запущен, эти aberrации должны быть исправле-

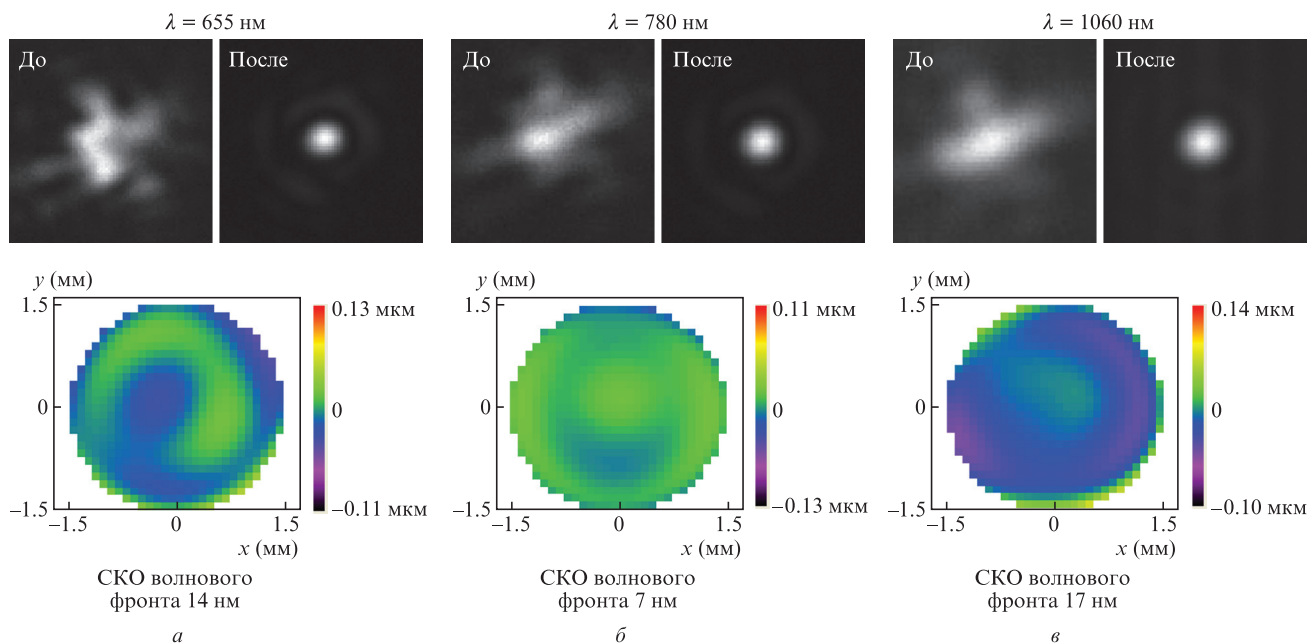


Рис.7. Проверка зависимости АОВФ от длины волны при $\lambda = 655$ (а), 780 (б) и 1060 нм (в). В каждом случае показан лучший сфокусированный пучок до и после (верхние изображения) АОВФ-коррекции с восстановлением фазы. Внизу – изображения остаточного волнового фронта относительно опорного при $\lambda = 850$ нм.

ны. Когда этот волновой фронт используется при работе установки в режиме низкой мощности, фактор Штреля возрастает до 0.93. Теперь датчик волнового фронта не может обнаружить совершенно плоский волновой фронт, но измеряет тот, который обеспечивает совершенство пятна фокусировки. В режиме низкой мощности получающиеся aberrации характеризуются СКО, равным 169 нм. Такой волновой фронт должен быть сохранен в качестве

опорного для каждой итерации обратной связи. При переходе к режиму высокой мощности ПЗС-камера становится ненужной, так как опорный волновой фронт сохранен. Результирующий фактор Штреля в режиме высокой мощности составляет 0.87 при среднеквадратичной ошибке 158 нм волнового фронта, измеренного датчиком. Процесс обратной связи будет продолжать измерение и коррекцию aberrаций лазерного пучка, зависящих

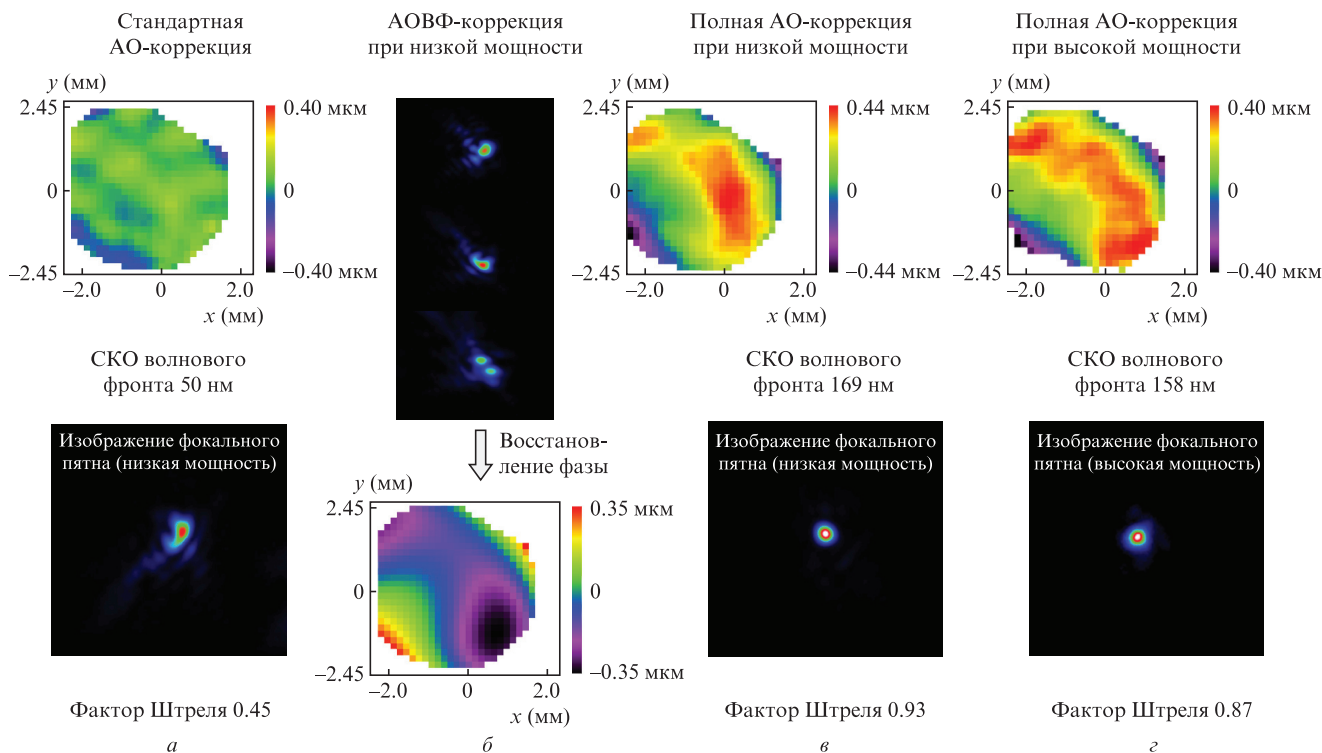


Рис.8. Полная коррекция волнового фронта лазера высокой мощности UHI 100 в СЕА Сакле (100 ТВт, 25 фс, 10 Гц). Верхние изображения а, в, г и нижнее изображение б – измерения волнового фронта. Нижние изображения а, в, г фокального пятна на ПЗС-камере и верхние изображения б восстановлены из серии измеренных aberrаций с помощью алгоритма АОВФ. Масштабный отрезок равен 100 мкм.

от времени, тогда как статические дифференциальные aberrации будут исправлены заранее с достижением наилучшего фокального пятна. Более того, частота обратной связи тогда будет такой же, как и в стандартной схеме обратной связи. Итак, фактор Штреля в режиме высокой мощности получается сравнимым с таковым при низкой мощности. Это доказывает эффективность данного метода в измерении и исправлении aberrаций систем фокусировки мощного излучения в реальном времени. Данный метод коррекции и управления может быть успешно применен к лазерному ускорению частиц высокой энергии (электронных и протонных пучков) и физике сжатого и нагретого вещества.

3. Обсуждение и выводы

Калибровка дифференциальных aberrаций оптической системы – долгий и деликатный процесс [16]. Вот почему большинство адаптивно-оптических решений предлагают только измерение и исправление волнового фронта до фокусировки пучка, не учитывая таким образом дифференциальных aberrаций. В этом случае фактор Штреля вряд ли превысит 0.60 в месте расположения фокального пятна. Иногда фокусное расстояние финального фокального пятна отличается в разных экспериментальных ситуациях. Следовательно, нужно настраивать положение зрачка и адаптировать тестовую установку на выходе используемой системы. Более того, измерения волнового фронта в фокальной плоскости лазера не обеспечивают возможности коррекции в режиме высокой мощности. Применение простой камеры, отображающей фокальное пятно, в сочетании с алгоритмом восстановления фазы позволяет получить значения фактора Штреля до 0.93 в фокальной плоскости и, следовательно, фокальное пятно почти дифракционного качества (см. рис.8). В настоящее время рост частоты следования импульсов от одного выстрела в минуту до нескольких Гц становится все более обычным для мощных лазеров. Стратегия АОВФ-управления и коррекции открывает новые пути в исследовании

мощных лазеров как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения, вплоть до лазеров, работающих с частотами следования в несколько герц. Высокие требования к качеству пучка могут быть выполнены для пучков предельно высокой интенсивности, сфокусированных в пятно микронных размеров.

Авторы с благодарностью отмечают вклад д-ра Т.Секотти (CEA Сакле, Франция).

1. Higginson D.P., McNaney J.M., Swift D.C., Bartal T., Hey D.S., Kodama R., Le Pape S., Mackinnon A., Mariscal D., Nakamura H., Nakani N., Tanaka K.A., Beg F.N. *Phys. Plasmas*, **17**, 100701 (2010).
2. Chen P., Mourou G. arXiv:1512.04064 (2015).
3. Eliezer S., Hora H., Korn G., Nissim N., Martinez Val J.M. *Phys. Plasmas*, **23**, 050704 (2016).
4. Bulanov S.V., Khoroshkov V.S. *Plasma Phys. Rep.*, **28**, 453 (2002).
5. Fritzier S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3039 (2003).
6. Mackinnon A.J. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 045001 (2006).
7. Macchi A., Borghesi M., Passoni M. *Rev. Modern Phys.*, **85** (2), 751 (2013).
8. Fuchs J. et al. *Nat. Phys.*, **2**, 48 (2006).
9. Robson L. et al. *Nat. Phys.*, **3**, 58 (2007).
10. Kudryashov A., Samarkin V., Alexandrov A., Rukosuev A., Zavalova V., in *Adaptive Optics for Industry and Medicine (Springer Proc. in Physics)*, **102**, 237 (2005); doi: 10.1007/3-540-28867-8_25.
11. Cheriaux G., Chambaret J.P., Planchon T.A. *Proc. CLEO/QEC/PhAST (OSA, 2004, paper JTuG6)*.
12. Canova F., Canova L., Chambaret J., Levecq X., Lavergne E., Dovillaire G., Planchon T. *Proc. CLEO/QEC/PhAST (OSA, 2007, paper JThD125)*.
13. Fienup J.R. *Appl. Opt.*, **21** (15), 2759 (1982).
14. Golzavez R.A. *Opt. Eng.*, **21** (5), 829 (1982).
15. Patent pending WO2016156158.
16. Sauvage J.-F., Fusco T., Rousset G., Petit C. *J. Opt. Soc. Am. A*, **24** (8), 2334 (2007); doi: 10.1364/JOSAA.24.002334.
17. Tokovinin A., Heathcote S. *PASP*, **118** (846), 1165 (2006).
18. Sheldakova J.V., Samarkin V.V., Kudryashov A.V. *Proc. SPIE*, **6101**, 61010B (2006).
19. Sheldakova J.V., Cherezova T.Y., Kudryashov A.V. *Proc. SPIE*, **5975**, 59750S (2006).
20. Sheldakova J., Rukosuev A., Alexandrov A., Kudryashov A. *Proc. SPIE*, **4969**, 115 (2003).
21. Di Jorio M. *J. Opt. Soc. Am.*, **39**, 305 (1949).