



# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>6</b>
<b>Введение</b> .....	<b>8</b>
<b>Глава 1. Анализ фазовых искажений импульсной МЛУ с адаптивной оптической системой</b> .....	<b>12</b>
Введение.....	12
1.1. Краткие сведения об импульсных МЛУ и адаптивных системах для них.....	13
1.2. Источники искажений волнового фронта излучения в мощных твердотельных импульсных лазерах.....	21
1.3. Анализ распределения фазовых искажений вдоль силового канала и различных схем компенсации этих искажений.....	24
1.4. Анализ бюджета фазовых ошибок адаптивной оптической системы мощной импульсной лазерной установки.....	28
1.4.1. Структура бюджета фазовых ошибок.....	28
1.4.2. Волновой фронт излучения импульсных МЛУ.....	30
1.4.3. Коррекция искажений волнового фронта с помощью деформируемого зеркала и расходимость излучения импульсной МЛУ.....	36
1.4.4. «Турбулентность» в оптическом тракте ИМЛУ.....	44
1.4.4.1. Методическое обоснование измерений волнового фронта датчиком Шака — Гартмана с различным временным и пространственным разрешением.....	45
1.4.4.2. Методика оценки требований к компонентам АОС по измерениям волнового фронта с недостаточным разрешением.....	47
1.5. Критерии оптимизации системы управления ВФ и требования к ней.....	49
1.6. Проблема пространственной фильтрации фазовых искажений в ИМЛУ.....	55
Заключение.....	62
Литература к главе 1.....	64
<b>Глава 2. Системы управления волновым фронтом в импульсных МЛУ</b> .....	<b>68</b>
Введение.....	68
2.1. Общее описание системы управления волновым фронтом.....	69
2.2. Датчик волнового фронта.....	71
2.2.1. Описание технической реализации датчиков волнового фронта гартмановского типа.....	72
2.2.2. Пространственная фильтрация в задаче измерения волнового фронта [21].....	82
2.3. Компьютерная система управления волновым фронтом. Алгоритмы управления. Усилительная аппаратура.....	85
2.4. Эталон волнового фронта.....	88
2.5. «Т-1»-система.....	90

2.6. Дополнительные возможности системы управления волновым фронтом.....	92
2.7. Исследования и испытания систем управления волновым фронтом.....	93
Заключение.....	96
Литература к главе 2.....	97

<b>Глава 3. Деформируемое зеркало – критический элемент адаптивной системы импульсной МЛУ.....</b>	<b>100</b>
Введение.....	100
3.1. Определение облика деформируемого зеркала.....	101
3.1.1. Определение числа приводов и схемы их размещения на апертуре ДЗ.....	101
3.1.1.1. Аппроксимация аберраций.....	102
3.1.1.2. Расчет формы оптической поверхности.....	102
3.1.1.3. Анализ заданных экспериментальных волновых фронтов.....	103
3.1.1.4. Необходимое количество приводов и схема их размещения на апертуре.....	103
3.1.1.5. Адаптивное зеркало как фильтр пространственных частот.....	104
3.2. Примеры практической реализации деформируемых зеркал для различных ИМЛУ.....	106
3.3. Экспериментальная отработка деформируемых зеркал.....	113
3.3.1. Измерение характеристик деформируемых зеркал.....	114
3.3.2. Повышение точности позиционирования оптической поверхности АЗ.....	120
3.3.2.1. Уменьшение чувствительности привода и шага изменения напряжения.....	120
3.3.2.2. Уменьшение ошибки квантования сигнала (электронного «шума»).....	121
3.3.2.3. Неравномерность отклика поверхности на воздействие актюаторов на апертуре деформируемого зеркала – дополнительный источник ошибок.....	122
3.3.2.4. Использование двух деформируемых зеркал в схеме как способ повышения точности.....	124
3.3.2.5. Влияние других эффектов на точность отработки поверхности заданной формы.....	126
3.3.2.5.1. Эффект «печаты лунок» на оптической поверхности.....	126
3.3.2.5.2. Гистерезис и ползучесть пьезоактюаторов – источник ошибок формы поверхности.....	127
3.3.3. Стабильность формы оптической поверхности деформируемого зеркала.....	128
3.3.3.1. Температурная стабильность формы поверхности.....	128
3.3.3.2. Стабильность удержания формы поверхности в течение двух часов.....	130
3.3.3.3. Влияние количества вышедших из строя приводов на СКОп.....	132
3.3.3.4. Облучение оптической поверхности ДЗ светом ламп накачки.....	133

3.3.3.5. Анализ остаточной ошибки коррекции.....	135
3.3.4. Управление формой поверхности АЗ.....	135
3.3.4.1. Управление формой поверхности в составе экспериментального стенда.....	135
3.3.4.2. Управление формой поверхности в составе установки «Луч».....	137
3.4. Промежуточные результаты комплексной обработки широкоапертурных деформируемых зеркал.....	142
3.4.1. Увеличение эффективного динамического диапазона переме- щений поверхности и частотных характеристик системы.....	142
3.4.2. Снижение массы, габаритов и энергопотребления системы «АЗ-БУ».....	143
3.4.3. Сопоставление характеристик «АЗ-БУ» для АЗ200.1, АЗ200.2 и АЗ200.3.....	143
3.5. Некоторые технологические аспекты изготовления деформируемых зеркал.....	144
3.5.1. Формирование оптической поверхности адаптивных зеркал [47].....	144
3.5.2. Нанесение покрытий и контроль оптической поверхности.....	150
3.5.3. Сборка адаптивных зеркал.....	152
Заключение.....	154
Литература к главе 3.....	155
<b>Глава 4. Применение методов и средств адаптивной оптики для задач юстировки оптических трактов.....</b>	<b>159</b>
Введение.....	159
4.1. Общее описание существующих систем автоматизированной юстировки силового канала.....	160
4.2. Датчик волнового фронта как средство юстировки оптического тракта ИМЛУ.....	173
4.3. О возможностях адаптивной юстировки оптических систем.....	176
4.3.1. Идея метода апертурного зондирования в приложении к задачам юстировки.....	176
4.3.2. Экспериментальная проверка возможности автоматической юстировки.....	181
4.4. Автоматизированная юстировка ИМЛУ как продукт сочетания различных методов.....	184
Заключение.....	186
Литература к главе 4.....	187
<b>Заключение.....</b>	<b>190</b>
<b>Перечень принятых сокращений.....</b>	<b>194</b>
<b>Указатель важнейших обозначений.....</b>	<b>195</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>196</b>

*Даже хромой путник обгонит  
быстро скачущую лошадь, если  
он идет в верном направлении.  
ФРЭНСИС БЭКОН*

## Предисловие

Вопросам лазерного термоядерного синтеза посвящено огромное количество публикаций. Познакомиться с введением в проблему можно, например, по известной книге «Управляемый лазерный синтез» [1], тематическим сборникам статей [2, 3] и другим изданиям.

В получении термоядерной энергии существуют три проблемы: выработать нужное количество энергии для организации процесса ядерного синтеза, организовать эту энергию для осуществления этого процесса и организовать отвод полученной энергии. И если первую проблему по рукотворной выработке нужного количества энергии для целей термоядерного синтеза можно считать решенной, то вторая задача на сегодня решена лишь в природе (например, Солнце) и в виде термоядерного взрыва (то есть в неуправляемом виде). Одним из путей рукотворного получения сверхкритических давлений и температур для реализации реакции слияния является инерциальный термоядерный синтез с применением лазерной энергии. Уникальные свойства когерентного света теоретически позволяют реализовать управляемую термоядерную реакцию [4]. Для этих целей разрабатываются и созданы импульсные мощные лазерные установки, которые дают достаточное количество энергии для поджига мишени. Основная проблема в настоящее время заключается в равномерном подводе этой энергии к поверхности мишени, чтобы организовать равномерное ее сжатие, то есть в точном и прецизионном наведении лучей многих лазеров на мишень [5].

Создание отечественной лазерной установки мегаджоулевого уровня УФЛ-2М начинается существенно позже ее американского (установка NIF — National Ignition Facility) и французского (LMJ — Laser MegaJoule) аналогов. На вопрос «Есть ли отставание в отечественном развитии этого направления» нет однозначного ответа. Установки такого класса планируется использовать для получения систематических знаний о свойствах и поведении различных материалов при параметрах, реализующихся в термоядерных реакциях. Американские специалисты считают, что установка NIF должна дать такие знания на 50 лет вперед при 30-летнем времени ее жизни. Кроме того, на этих установках проверяются технические решения, позволяющие перебросить мостик к установке следующего поколения — прототипу термоядерного реактора. Уже сейчас видны технические решения установок NIF и LMJ, которые были чрезвычайно затратны при создании и которые трудно применить при реализации установок с частотой 10—15 выстрелов в секунду. Это, прежде всего, системы автоюстировки по световым маркерам и электромеханический привод французских деформируемых зеркал. И, наконец, за время

создания установок подобного класса (10—15 лет) наблюдается существенный прогресс в других, инфраструктурных областях техники. Начинаясь позже пользуется этими достижениями, например, в вычислительной технике, электронике, микрооптике и т. д.

Настоящая книга посвящена рассмотрению использования методов и средств адаптивной оптики в системе управления волновым фронтом и автоматизированной юстировки импульсных мощных лазерных установок.

Автор будет благодарен специалистам, нашедшим время для ознакомления с книгой и приславшим свои замечания или уточнения.

- 
1. Бракнер К., Джорна С. Управляемый лазерный синтез. — М.: Атомиздат, 1977. — 144 с.
  2. Лазеры и термоядерная проблема. Сб. статей. — М.: Атомиздат, 1973. — 216 с.
  3. Проблемы лазерного термоядерного синтеза. Сб. статей. — М.: Атомиздат, 1976. — 296 с.
  4. Басов Н. Г., Крохин О. Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора. ЖЭТФ, т. 46, № 1, 1964, с. 171—175.
  5. Moses E. I. The National Ignition Facility and the Promise of Inertial Fusion Energy. LLNL-CONF-464130, 2010, 8p.

## Введение

В последние пятнадцать лет в мире постоянно расширяется фронт работ по созданию импульсных мощных лазерных установок (ИМЛУ) мегаджоулевого уровня, при фокусировке излучения которых достигаются фантастические плотности мощности и, как следствие, параметры, при которых протекают термоядерные реакции. Возможность изучения поведения вещества в этих условиях не только создает предпосылки для получения фундаментальных знаний об устройстве Вселенной, но и способствует созданию новых технологий. Так, успехи в создании ИМЛУ создают предпосылки для реализации управляемой реакции термоядерного синтеза. Проводимые в программах LIFE (США) и HiPER (Великобритания, международный проект) исследования показывают, что можно существенно развить полученные при создании установок NIF (США) и LMJ (Франция) достижения и перейти к коммерческому использованию подобных установок [1, 2, 4]. По заявлению директора установки NIF E. Мозеса уже в 2012 году ожидается «поджиг» термоядерной мишени [3] (эксперименты по усилению были запланированы ранее на 2010—2011 годы). Создание лазерных установок мегаджоулевого класса является своеобразным индикатором уровня научного и технологического развития страны.

Каждый класс лазерных установок имеет свою специфику, равно как и адаптивная оптика для этих систем, позволяющая существенно уменьшить расходимость излучения и улучшить его спектральные характеристики. Используемые во всех ИМЛУ адаптивные системы позволяют в десятки раз увеличить плотность мощности на мишени, поэтому можно утверждать, что технология управления параметрами излучения является ключевой технологией в подобных установках. Система управления волновым фронтом ИМЛУ отличается от традиционной адаптивной оптической системы более широкими функциями. Управление параметрами излучения включает в себя управление волновым фронтом, фильтрацию излучения, наведение и фокусировку его на мишени. В настоящей работе рассмотрение ограничивается лишь силовым каналом, имея в виду, что на входе и выходе из него должен быть отцентрированный пучок с плоским волновым фронтом.

Эффекты, связанные с фазовыми искажениями вследствие разогрева оптических элементов в импульсных лазерах (например фемтосекундных), становятся заметными с уровня энергии  $\sim 100$  мДж, а при энергии силового канала  $\sim 1$  кДж они являются определяющими даже для наносекундных систем. ИМЛУ являются настолько благодатным объектом для применения адаптивной оптики, что применение ее практически в любом виде дает эффект, часто очень сильный. Когда речь идет о небольших энергиях и сравнительно небольших фазовых искажениях, то систему коррекции, по-видимому, целесообразно устанавливать за силовым каналом. Если же энергия и, как следствие, фазовые искажения существенно возрастают, а вместе с ними неравномерности профиля интенсивности, то коррекцию фазы вкупе с пространственной фильтрацией фазовых искажений целесообразно осуществить в силовом канале — резонаторе — и пространственных фильтрах. В настоящей работе рассматриваются только внутррезонаторные системы.

В книге сделана попытка обобщения накопленного опыта по технологии управления параметрами излучения в ИМЛУ и рассмотрения возможностей более широкого применения в них достижений адаптивной оптики. Обобщение строится на структурном анализе пространственного распределения фазовых искажений, и задача достижения высокого качества излучения ставится как задача пространственной фильтрации излучения. Именно поэтому первая и наиболее обширная глава посвящена анализу фазовых искажений и постановке проблемы управления параметрами излучения в ИМЛУ. Вторая глава освещает устройство системы управления волновым фронтом и ее элементов. Ключевым звеном в этой системе является деформируемое зеркало, детальному рассмотрению которого посвящена третья глава. Вопросам юстировки силового канала и его элементов посвящена четвертая глава, в которой также рассмотрена возможность более широкого применения средств и методов адаптивной оптики в задаче управления параметрами излучения. Но наибольшее внимание в работе уделено двум аспектам: абберационному анализу излучения импульсных МЛУ и созданию деформируемых зеркал для коррекции волнового фронта излучения. Детальное изучение излучения МЛУ позволяет сформулировать требования к элементам и к собственно системе управления волновым фронтом. Деформируемые зеркала должны быть высокоточными, стабильными и работать в уникальных условиях — при высоких потоках энергии в сильных электромагнитных полях.

Освещение основных технических решений при создании элементной базы адаптивной оптики для ИМЛУ сделано в историческом разрезе. Литературные источники отражают основные этапы разработки (в основном установки NIF, на лицевой стороне обложки приведен общий вид второго лазерного отсека установки NIF): 1) идеологические наброски основных концептуальных решений (соответствуют этапам технического предложения и эскизного проекта) были сделаны на основе предыдущего почти тридцатилетнего опыта и современных для начала 90-х годов прошлого столетия решений. Концептуальный проект установки NIF был выполнен в 1994 году [7]; 2) результаты расчетно-экспериментальной проверки основных технических решений отражены в литературе 1997—2000 годов; 3) результаты создания и испытаний опытного образца установки NIF (узел из восьми каналов) освещены в серии публикаций 2004—2006 годов. 4) Более поздние публикации относились к освещению текущего статуса создания и осмыслению перспектив развития. 5) После пуска установки в 2009 году в основном сообщается об очередных достижениях, но, вместе с тем, по результатам доводки установки в процессе эксплуатации в 2010—11 годах опубликован ряд работ, нашедших отражение в книге.

Следует обратить внимание на то, что во второй половине первого десятилетия в США стартовала программа LIFE (Laser Inertial Fusion Energy), направленная на создание лазерной термоядерной электростанции. В 2009—2011 годах опубликованы основные технические решения для прототипа лазерной установки такой электростанции [1, 3, 4]. Они основаны на достижениях, полученных в процессе создания установки NIF, и исследованиях, проведенных на лазерной установке «Меркурий» (Mercury), и используют достигнутый уровень материалов и технологий, ориентированы на современную произ-



водственную базу и оптимизированы по прогнозируемой стоимости электроэнергии. Лазерная установка LIFE power plant (см. рис. на задней обложке) содержит 384 силовых канала модульного типа, которые должны изготавливаться в заводских условиях и транспортироваться к месту сборки. Каналы собираются в узлы по восемь штук (аналогично NIF), которые располагаются веером на разных уровнях вокруг мишенной камеры. Отработанные на лазере «Меркурий» решения — диодная накачка активной среды и газовое (гелий) охлаждение слэбов, позволяют повысить электро-оптический КПД до 18%, сильно уменьшить общие габариты установки и довести ее скорострельность до 10—15 выстрелов в секунду. Скорострельность определяет новые требования к используемой в такой системе адаптивной оптике [5]. В качестве активной среды выбрано неодимовое стекло. Размер световой апертуры составляет  $270 \times 270$  мм. Энергия на третьей гармонике должна быть более 2 МДж в импульсе продолжительностью в несколько наносекунд. При коэффициенте энергетического усиления 64 такая установка становится конкурентноспособной по сравнению с традиционными источниками получения электроэнергии. Создание установки ориентировано на частный бизнес, и на сегодня в США уже насчитывается более 30 основных поставщиков, в числе которых такие фирмы, как Джeneral Атомик (General Atomic) и другие. Капитальные затраты создания пилотной электростанции оцениваются в четыре миллиарда американских долларов [10]. Планируемый срок создания демонстрационного прототипа — 2020 год, коммерческое использование предполагается начать с 2030 года. Установка NIF должна обеспечить научный базис для разработки термоядерных станций на первое время как минимум на 50 лет.

Написание настоящей книги стимулировано двумя событиями: 1) принятием решения о создании в России ИМЛУ мегаджоулевого уровня УФЛ-2М [6] и 2) серией сообщений о проектных решениях лазерной термоядерной электростанции LIFE Power Plant (США) [1]. При создании больших установок возникает два аспекта: 1) так как создание идет длительное время, необходимо обучать людей; 2) так как проектирование занимает ограниченное время, чрезвычайно актуальным становится обмен информацией на всех этапах, особенно вначале. По мнению автора, необходимо обобщить накопленный опыт, зафиксировать уровень на начало реализации подобного мегапроекта. Написание подобной книги преследует и определенные учебные цели. Создание установки NIF заняло около пятнадцати лет, и в этом процессе было задействовано около трех тысяч человек на постоянной основе и постоянно привлекались более семи тысяч человек, так что одновременно в процессе создания участвовало более 10 тысяч человек. Поставки в интересах NIF осуществлялись с более чем 3000 предприятий из 47 штатов США [1]. Такие масштабы требуют соответствующей подготовки кадров. Кроме того, автор надеется, что книга будет полезна и для специалистов в смежных областях.

Структура книги сознательно выбрана открытой, каждая глава является самостоятельной и может быть дополнена и исправлена без существенной переработки остального текста, исходя из двух соображений. Во-первых, для того, чтобы читатель мог выборочно ознакомиться с тем, что его интересует. Во-вторых, для того, чтобы была возможность расширять эти главы по мере накопления опыта создания и эксплуатации адаптивных оптических



систем в ИМЛУ, то есть такой стиль объясняется существенной динамикой развития данной области. Материал носит в основном описательный и аналитический характер. Математический аппарат в книге используется лишь там, где нужно проиллюстрировать обоснованность или эффективность тех или иных технических решений. Обилие приводимых цифр позволит лучше почувствовать рассматриваемую проблему, книга сознательно перегружена различными оценками.

Накопленный опыт разбросан по различным публикациям, в основном англоязычным, зачастую труднодоступным для российского читателя. Так как описываемая технология имеет передовой, инновационный и прорывной характер, то многие вопросы умышленно остаются за кадром и без полной картины непонятно, почему отданы предпочтения тем или иным решениям. Автор надеется, что настоящая книга послужит не только введением в предмет, но и своеобразным началом координат, точкой отсчета, позволяющими проследить за динамичными изменениями в этой области.

Несмотря на популярный стиль изложения, желательно, чтобы читатель имел общее представление об импульсных твердотельных лазерах и основах адаптивной оптики. Эти сведения можно почерпнуть, например, в книгах [8, 9].

Изложенные материалы неоднократно обсуждались на совещаниях различного уровня, начиная с семинара лаборатории адаптивной оптики в ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» и заканчивая различными международными конференциями («Оптика лазеров», Харитоновские чтения, «Оптика атмосферы и океана»). Автор благодарен сотрудникам ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» и Института лазерно-физических исследований ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» за помощь, оказанную при подготовке материалов для данной книги.

- 
1. <https://life.llnl.gov>.
  2. [www.hiper-laser.org](http://www.hiper-laser.org).
  3. Moses E. I. The National Ignition Facility and the Promise of Inertial Fusion Energy. LLNL-CONF-464130, 2010. — 8 p.
  4. Stolz C. J. The National Ignition Facility: The Path to a Carbon-Free Energy Future. LLNL-PROG-474593, 2011. — 17 p.
  5. Andreev N. E., Buchenkov V. Y., Charuktchev A. V. et al., Prospects of International Cooperation in Ultra-High Intensity Lasers for Civil Application within the Frame of the ISTC Activities. Sarov, RFNC-VNIIEF, 2010 — 76 p.
  6. ЯОК ждет стабильное будущее. Страна РОСАТОМ, № 06 (51), февраль 2012, с. 1, 7.
  7. Paisner J. A., Cambell E. M., Hogan W. J. The National Ignition Facility Project. UCRL-JC-117397 Rev 1, 1994. — 15 p.
  8. Мак А. А. и др. Лазеры на неодимовом стекле. — М.: Наука, 1990. — 287 с.
  9. Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005. — 416 с.
  10. Hand E. Laser fusion nears crucial milestone. Nature, 483, March 2012, p. 133—134.

# ГЛАВА I

## АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЛУ С АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

### Введение

Создание масштабных объектов новой техники целесообразно начинать с обобщения накопленного в данном направлении опыта. В настоящей работе сделана такая попытка в отношении адаптивных систем для импульсных мощных лазерных установок (ИМЛУ) мегаджоулевого уровня. Действительно, в настоящее время уже созданы и эксплуатируются как прототипы, так и собственно ИМЛУ. В их составе используется адаптивная оптика, позволяющая существенно уменьшить расходимость излучения и улучшить его спектральные характеристики. Накоплен значительный опыт проектирования и эксплуатации таких адаптивных систем.

Вместе с тем эту проблему нельзя считать решенной до конца. Если проблемы наведения и фокусировки энергии можно считать решенными, то проблема обеспечения равномерной засветки поверхности мишени еще далека до своего завершения. Наверняка и в решении этой проблемы адаптивная оптика займет свое достойное место.

В современной литературе по адаптивной оптике есть лишь небольшие замечания по поводу систем коррекции волнового фронта импульсных МЛУ. Для этого есть несколько причин. Во-первых, для традиционной адаптивной оптики, которая ушла далеко вперед по пространственному разрешению и быстродействию (существуют системы, содержащие сотни и тысячи приводов и работающие с килогерцовым быстродействием), квазистатические системы импульсных МЛУ казались архаикой, не представляющей проблем. Во-вторых, это впечатление усилилось, когда в системах начали использовать дешевые биморфные зеркала, так как эффект от использования таких систем был мгновенным и довольно ощутимым, а затраты ничтожны.

По мере повышения мощности импульсных МЛУ возросли размер световой апертуры и масштаб фазовых aberrаций. Но особое значение приобрел переход к многопроходности и многоканальности систем. Во-первых, должно быть

повышено быстродействие систем управления волновым фронтом. Во-вторых, особое внимание должно уделяться точности и стабильности этой системы. При переходе к МЛУ импульсно-периодического действия, а именно такие установки необходимы для реализации коммерческого термоядерного синтеза (см., например, проект HiPER [28]) с частотой следования импульсов 10—15 импульсов в секунду, системы коррекции волнового фронта должны обладать довольно высоким быстродействием и работать в условиях периодического отключения с частотой следования импульсов. Кажущаяся простота на первом этапе реализации в перспективе может превратиться в серьезную проблему. В связи с устойчивой тенденцией к переходу к зеркалам с дискретным приводом (установки LIL, LMJ, «Луч») биморфные зеркала рассматриваются здесь лишь в историческом аспекте. Подробнее об этом можно узнать из работ [29, 30].

Адаптивная оптика в ИМЛУ применяется в двух взаимно связанных системах: системе наведения и системе управления волновым фронтом. Эти системы служат главной цели ИМЛУ — концентрации энергии на мишени.

В настоящей главе приводится детальный анализ фазовых искажений волнового фронта лазерного излучения ИМЛУ. Подход к их компенсации базируется на пространственной фильтрации излучения.

## 1.1. Краткие сведения об импульсных МЛУ и адаптивных системах для них

Во всем мире созданы и создаются лазерные установки нового поколения с мегаджоульным уровнем энергии: NIF (США), LMJ (Франция), HiPER (Великобритания), Shenguang IV (Китай), УФЛ-2М (Россия) и др. Для отработки основных технических решений, используемых при создании полномасштабных установок NIF, LMJ и УФЛ-2М, были построены прототипы — установки Beamlet, LIL и «Луч» соответственно [1—6, 51]. Некоторые характеристики этих установок приведены в табл. 1.1. Следует обратить особое внимание на разрабатываемый прототип термоядерной электростанции LIFE (Laser Inertial Fusion Energy) Power Plant (США) [45].

В настоящей работе сделана попытка обобщения накопленного мирового опыта и анализа на примере адаптивной оптики, созданной для установки «Луч», рассматриваются проблемы применения адаптивных систем в импульсных мощных лазерных установках (ИМЛУ). Сразу же подчеркнем разницу с традиционными адаптивными системами, которая заключается в том, что система управления волновым фронтом выполняет более широкие функции и в режиме замкнутого контура работает лишь частично (более подробно об этом будет сказано ниже).

На рис. 1.1 приведена оптическая схема установки «Луч» [7]. Излучение из системы формирования опорного излучения (СФОИ) предназначена для: 1) формирования спектральных, угловых, пространственных и временных характеристик пучка; 2) деления пучка на 4 и 3) запитки входным сигналом силовых усилительных каскадов) попадает в усилители 1 и 2 (усиление энергии лазерного импульса от ~0,2 Дж на входе до ~3,7 кДж на выходе), отража-

Таблица 1.1. Сведения о различных импульсных мощных лазерных установках

№	Установка, страна	Технические характеристики	1-ый выстрел
1	National Ignition Facility (NIF), США, 2012 — User Facility	1,053 мкм, 4,2 МДж, 1,8 МДж + (3 $\omega$ ), 20 нс, 192 канала, 372 × 372 мм, центральная схема зажигания 9,6 кДж с канала на 3 $\omega$	2009 — 1,2 МДж <sup>1</sup> 2012 — Q = 1
1a	Beamlet laser, США	4 (1) канала, 300 × 300 мм	1994
2	LIFE Power Plant, США	1,053 мкм, 2 МДж на 3 $\omega$ , 3 нс, 10—15 выстрелов в секунду, 384 канала, 270 × 270 мм, коэффициент усиления — 64, ЭОКПД — 18 %	2020
3	Laser MegaJoule (LMJ), Франция	1,053 мкм, 2 МДж + (3 $\omega$ ), 3 нс, 240 (174) каналов, 360 × 370 мм, центральная, 600 выстрелов в год	2012 (2014) год
3a	Laser Integration Line (LIL), Франция	0,35 мкм, 1—9,5 кДж с канала, 0,3—25 нс, 4 канала	2004 год
4	Fast Ignition Realization Experiment (FIREX-II), Япония	Сжатие — 0,35 мкм, 50 кДж, 3 нс; Зажигание — 50 кДж, 10 пс, быстрая схема зажигания	2017 год
4a	FIREX-I: 1) Лазер для сжатия ГЕККО XII; 2) Лазер для зажигания LFEX	4 канала, быстрая, 1,053 мкм, 10 кДж, (2 $\omega$ ), 2 нс, 325 × 325 мм 1,053 мкм, 10 кДж, (2 $\omega$ ), 1—10 пс, 325 × 325 мм	2008 год
5	SG-III, Китай	0,35 мкм, 150 кДж, (3 $\omega$ ), 3 нс, 64 канала, центральная и быстрая схемы зажигания	2010 год
5a	SG-II, Китай	1,053 мкм, 6 кДж или 3 кДж (3 $\omega$ ), 1 нс, 8 каналов, ф200 мм	
5б	SG-IIU, Китай	18 кДж (3 $\omega$ ), 3 нс	2007 год
5в	(SG-III prototype), Китай	8 каналов, 3 нс, 15 кДж (2 $\omega$ )	2005 год
6	(SG-IV), Китай	1 МДж, центральная или быстрая	2020 год
7	High Power laser Energy Research facility (HiPER), ЕС (Англия)	Сжатие — 1,053 мкм, 200 кДж, 10 нс, 60 каналов, 360 × 370 мм; зажигание — 100 кДж, 10 пс, 2 $\omega$ , быстрая, 1, 5—15 выстрелов в с	2020 год
8	УФЛ-2М, Россия	1,053 мкм, 2,8 МДж, (2 $\omega$ ), 3 нс, 192 канала, 400 × 400 мм, центральная схема зажигания, 1 выстрел в смену, 2-я гармоника	2020 год
8a	«Луч», Россия	1,053 мкм, 3,3 кДж/канал, 4 нс, 4 канала, 200 × 200 мм, 2 выстрела в смену	2004 год

<sup>1</sup> 15 марта 2012 года в мишенной камере установки NIF зарегистрирована энергия 1,875 МДж на длине волны третьей гармоники, полученная из 192 каналов. К следующему выстрелу лазер был готов через 36 часов после рекордного.

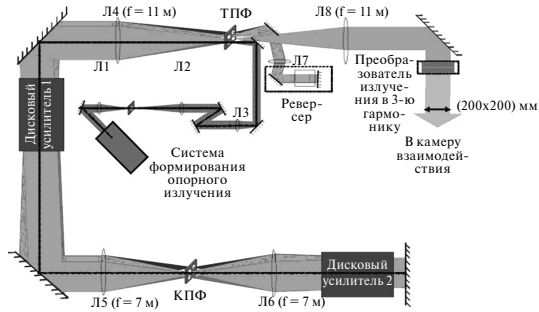


Рис. 1.1. Оптическая схема лазерной установки «Луч»

ется от торцевого зеркала, проходит обратно через транспортный пространственный фильтр с реверсером (ТПФ предназначен для ввода излучения в 4-проходную усилительную систему и вывода излучения после четвертого прохода), отражается от зеркала реверсера, совершает 3-й и 4-й проходы через усилительные каскады и выводится через ТПФ.

Деформируемое зеркало может быть размещено в различных местах схемы: на входе и выходе, посередине за 2-м усилителем, на месте зеркала реверсера. Также могут быть использованы различные комбинации из двух зеркал.

В качестве примеров на рис. 1.2а—в приведены архитектуры четырехпроходных силовых каналов различных установок (NIF, LMJ, УФЛ-2М, Beamlet, LIL и др.). Как видно, они очень похожи друг на друга, хотя и имеют отличия. В силовом канале установки NIF (рис. 1.2а, 3) излучение четыре раза прохо-

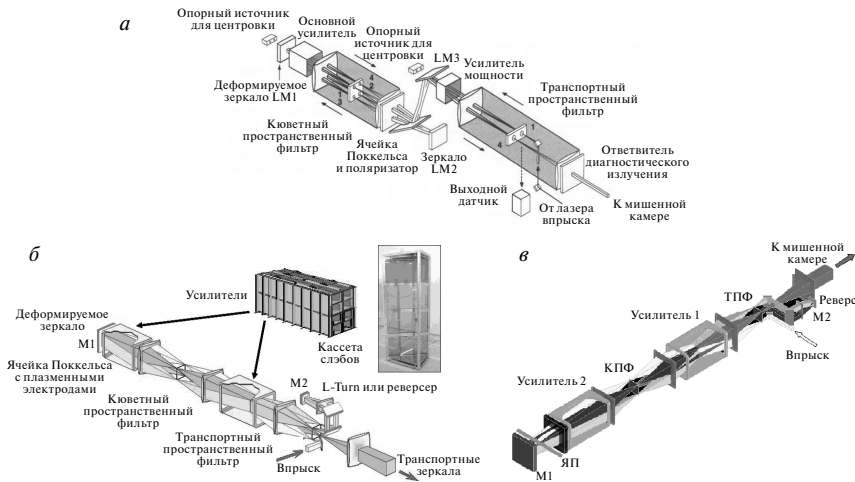
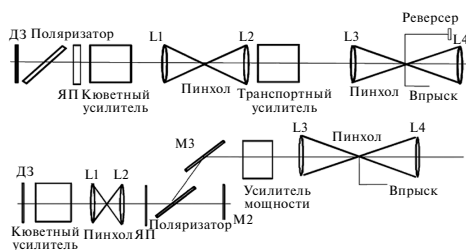


Рис. 1.2. Четырехпроходная архитектура силовых каналов мощных импульсных лазерных установок: а) NIF; опорные источники для центровки расположены за деформируемым зеркалом (LM1) и зеркалом LM3; б) LIL, LMJ, HiPER; в) УФЛ-2М



**Рис. 1.3.** Различные реализации оптической схемы четырехпроходного усилителя: верхняя реализована на LIL/LMJ (четыре прохода через оба усилителя), нижняя — на NIF (два прохода через усилитель мощности и четыре прохода через основной усилитель)

дит через основной усилитель и лишь дважды — через дополнительный усилитель [14]. Приведенная на схеме ячейка Поккельса и поляризатор служат своеобразным затвором, блокируя одно из зеркал резонатора и открывая его на момент выстрела. Транспортный пространственный фильтр имеет всего два отверстия, через одно из которых опорное излучение входит в систему, а через второе выходит мощное излучение. Длина кюветного пространственного фильтра установки NIF составляет 23,5 м (соответственно заднее фокусное расстояние линз равно 11,75 м), а транспортного пространственного фильтра — 30 м (15 м — заднее фокусное расстояние линз). Поверхность линз пространственных фильтров имеет сложную форму для фокусировки излучения квадратного профиля [47]. Силовые каналы установок LIL и LMJ (рис. 1.2б, 3) имеют два усилителя, и излучение четыре раза проходит через них, и транспортный пространственный фильтр имеет уже четыре отверстия. Интуитивно понятно, что система наведения в этом случае должна быть более точной, чем в схеме установки NIF. Аналогичная архитектура принята и для силового канала установки HiPER [31]. На рис. 1.2в приведена объемная иллюстрация силового канала установки УФЛ-2М, откуда видно, что она схожа с архитектурой установки LMJ.

На рис. 1.3 приведены две различные реализации оптической схемы четырехпроходного усилителя.

На рис. 1.4 приведен более детальный вариант оптической схемы установки УФЛ-2М, откуда можно видеть, что длина только силового канала составляет ~ 130 м.

Излучение из системы формирования излучения заводится в транспортный пространственный фильтр (ТПФ), после 1-го прохода отражается от широкоапертурного ДЗ, после 2-го прохода через линзу вводится в ячейку Поккельса (ЯП), после 3-го прохода второй раз отражается от широкоапертурного ДЗ и после 4-го прохода направляется на мишень.

Из приведенных примеров видно обилие оптических элементов в схемах и сложность этих схем. Теоретически можно стремиться к созданию идеальных (в смысле отсутствия aberrаций) оптических трактов, но это, во-первых, не обеспечивается имеющимися технологиями, а во-вторых, чрезвычайно дорого. Поэтому во всех мощных импульсных лазерах для компенсации

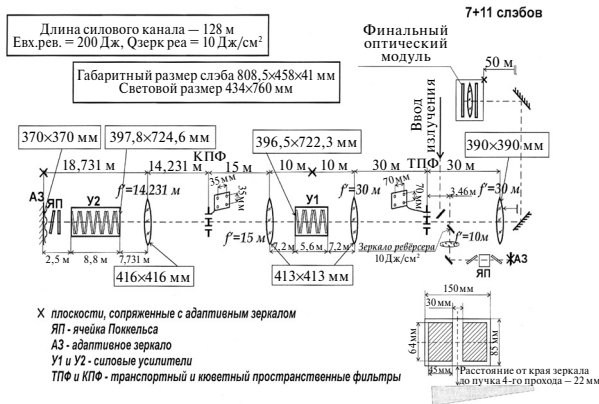


Рис. 1.4. Вариант оптической схемы силового канала установки УФЛ-2М

фазовых aberrаций волнового фронта излучения применяются адаптивные оптические системы. Как правило, это системы фазового сопряжения, работающие по смешанному алгоритму: при коррекции статических aberrаций в активном режиме, а при коррекции термоиндуцированных или тепловых aberrаций — в режиме предустановки нужной формы поверхности деформируемого зеркала. Впрочем, нетрудно представить активный режим работы системы вплоть до выстрела, если в систему в качестве минимизируемой целевой функции будет введено среднеквадратичное отклонение от заданной виртуальной формы поверхности. Классическая адаптивная оптическая система фазового сопряжения содержит датчик волнового фронта (ДВФ), аппаратуру управления и адаптивное или деформируемое зеркало (АЗ или ДЗ).

Требования к ДВФ для прямого управления деформируемым зеркалом по измеренному волновому фронту и управлению с обратной связью существенно различны. В первом случае мы должны иметь ДВФ с достаточно большим динамическим диапазоном, тогда как во втором случае ДВФ выработывает лишь сигнал ошибки (в идеале нулевой) и требования по динамическому диапазону к нему существенно ниже, но появляются требования по линейности, точности и постоянной времени для устойчивой работы контура управления. Последнее несколько смягчается, так как контур управления может быть достаточно медленным. В связи с этим целесообразно использовать в схеме один ДВФ с большим динамическим диапазоном для измерения суммарных aberrаций волнового фронта излучения на выходе излучения из канала. Деформируемое же зеркало может быть размещено в различных местах оптического тракта — от места выхода излучения из системы формирования излучения (входа в силовой канал) до места выхода излучения из канала. Можно также представить систему с двумя зеркалами, расположенными в различных местах оптического тракта (например, как это показано на рис. 1.4).

Размещение зеркала на входе или выходе оптического тракта является крайним случаем с точки зрения предъявления требований к зеркалу. В первом случае затруднительно реализовать достаточное пространственное разреше-



ние на апертуре  $50 \times 50$  мм (шаг между приводами должен быть не более 3,5 мм) и затрудняется угловая селекция на первых проходах излучения в усилителе. Во втором случае необходима высокая лучевая стойкость (гарантированный запас по лучевой прочности должен превышать плотность выходной энергии ( $10 \text{ Дж/см}^2$ ) в 1,5–2 раза [8]) широкоапертурного ( $\sim 580 \times 420$  мм) зеркала и его большой динамический диапазон, а также ухудшается угловая селекция на последних двух проходах. Установка в тракте двух деформируемых зеркал может несколько снизить требования к каждому из зеркал, но удвоит количество элементов адаптивной оптической системы. При размещении зеркала за усилителем У2 излучение отражается от него дважды — после 1-го и 3-го проходов. Очевидно, этот вариант наиболее сбалансирован с точки зрения как угловой селекции и коррекции излучения по всему оптическому тракту, так и предъявляемых к зеркалу требований. Кроме того, установка зеркала за усилителем У2 позволяет снизить требования по лучевой прочности покрытия и требования к приводу как по динамическому диапазону, так и по его силовым свойствам. При этом также снизится емкость и стоимость привода, мощность и стоимость управляющей аппаратуры и, соответственно, стоимость системы в целом.

Частота следования импульсов в современных МЛУ невелика — один–два выстрела в смену. В перспективе при коммерческом получении термоядерной электроэнергии она должна быть увеличена до 10–15 выстрелов в секунду. На установке NIF после выстрела слэбы остывают до нужной кондиции от 4 до 8 часов [32]. На рис. 1.5 приведена хронограмма подготовки к выстрелу для установки LMJ (один выстрел за  $\sim 3$  часа). После включения обратной связи в системе управления волновым фронтом примерно за полчаса перед выстрелом производится коррекция статических aberrаций волнового фронта к плоскому и начинается юстировка системы. На рисунке показано, что за время юстировки производится три сеанса подстройки ВФ, то есть процессы юстировки и коррекции ВФ согласованы. За пять минут до выстрела в режиме замкнутой обратной связи также за три итерации производят предустановку термоиндуцированной aberrации. Для записи формы волнового фронта непосредственно перед выстрелом обратная связь размыкается и перед датчиком волнового фронта устанавливается ослабитель излучения. В это время система должна поддерживать предустановленную форму волнового фронта (которая, как будет видно дальше, довольно далека от плоскости). Измерение волнового фронта производится после ламповой накачки слэбов в момент выстрела. При идеальной коррекции форма волнового фронта должна быть плоской.

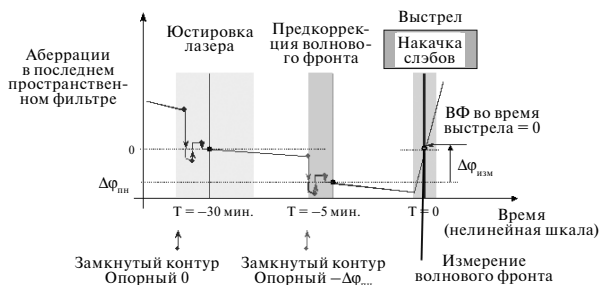
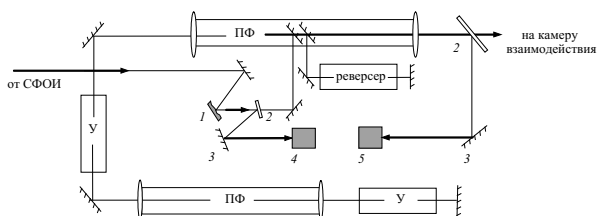


Рис. 1.5. Хронограмма подготовки к выстрелу



**Рис. 1.6.** Схема адаптивной системы с малым деформируемым зеркалом в составе установки «Луч»: 1 — малое деформируемое зеркало; 2 — пластины, отводящие излучение на ДВФ; 3 — зеркала; 4 — входной ДВФ; 5 — выходной ДВФ. СФОИ — система формирования опорного импульса; ПФ — пространственные фильтры; У — усилители

Вкратце рассмотрим примеры применения адаптивных систем в ИМЛУ, реализованные на практике в составе установки «Луч» [27].

Схема расположения элементов адаптивной системы с малым деформируемым зеркалом в составе установки «Луч» представлена на рис. 1.6. Импульс лазерного излучения СФОИ падает на деформируемое зеркало 1. Часть излучения с помощью пластины 2 и зеркала 3 направляется на входной ДВФ 4. Прошедшее через пластину 2 излучение направляется в сторону многопроходного усилительного тракта. После последнего прохода через усилители излучение выводится из ТПФ. Малая доля излучения с помощью пластины 2 и зеркала 3 направляется на выходной ДВФ 5.

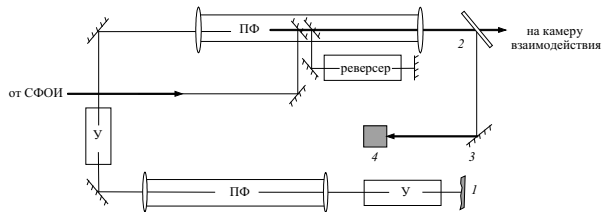
Далее будет показано, что наиболее сбалансированным вариантом с точки зрения угловой селекции и коррекции излучения по всему усилительному тракту, а также предъявляемых к адаптивному зеркалу требований (лучевая прочность покрытия, динамический диапазон и силовые свойства привода) является установка зеркала в усилительном тракте так, чтобы излучение отражалось от него дважды — после первого и третьего проходов. Схема расположения элементов широкоапертурной адаптивной системы в составе установки «ЛУЧ» представлена на рис. 1.7.

При работе по обеим схемам (рис. 1.6 и 1.7) во время подготовки к выстрелу с помощью выходного ДВФ анализируется волновой фронт юстировочного лазера на выходе и регистрируются статические aberrации усилительного тракта. Деформируемое зеркало изгибается таким образом, чтобы волновой фронт на выходе стал плоским.

Непосредственно перед выстрелом деформируемое зеркало вносит «предыскажения», обратные по знаку ожидаемым «тепловым» aberrациям, и выходной ДВФ конфигурируется для измерения импульсного волнового фронта. Измеренные ошибки волнового фронта импульсного излучения дают дополнительную информацию для коррекции «предыскажений» в следующем выстреле.

На рис. 1.8 приведены фотография и схема расположения управляющих элементов малого биморфного пьезоэлектрического деформируемого зеркала.

Световая апертура зеркала — круг диаметром 52 мм, коэффициент отражения на длине волны 1,053 мкм — 99%, количество управляющих элементов — 21, расположение управляющих элементов — осесимметричное, чув-



**Рис. 1.7.** Схема широкоапертурной адаптивной системы в составе установки «Луч»: 1 — широкоапертурное деформируемое зеркало; 2 — пластина, отводящая излучение на ДВФ; 3 — поворотное зеркало; 4 — ДВФ. СФОИ — система формирования опорного импульса; ПФ — пространственные фильтры; У — усилители

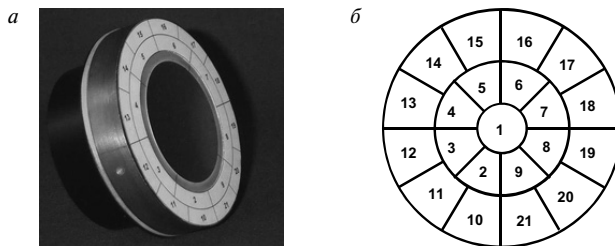
ствительность управляющих элементов — 15 мкм/кВ, электромеханический гистерезис —  $\sim 15\%$ , управляющие напряжения —  $\pm 300$  В, максимальная локальная деформация — 5 мкм.

На рис. 1.9 приведены фотография и схема расположения управляющих элементов широкоапертурного деформируемого зеркала на пьезоэлектрических толкателях.

Световая апертура зеркала —  $220 \times 220$  мм, коэффициент отражения на длине волны 1,053 мкм — 99%, количество управляющих элементов — 61, расположение управляющих элементов — шахматное, чувствительность управляющих элементов — 100 мкм/кВ, электромеханический гистерезис —  $\sim 15\%$ , управляющие напряжения — 0–120 В, максимальная локальная деформация — 12 мкм.

На установке Beamlit при коррекции ВФ деформируемым зеркалом с размерами  $70 \times 70$  мм и имеющем 39 приводов (расположенных аналогично ДЗ NIF), размещенном на входе в силовой канал на первой гармонике достигалась расходимость  $(2,3\text{--}2,46) \cdot 10^{-5}$  рад по уровню 80% энергии при дифракционной расходимости  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  рад [36]. Целевая расходимость излучения установки NIF после силового канала на первой гармонике составляла пять дифракционных пределов при специфицированной мощности 18,75 кДж [46].

В заключение следует обратить внимание на то, что адаптивная система в ИМЛУ (система управления волновым фронтом) имеет более широкие функции, нежели чем коррекция волнового фронта. Ее элементы использу-



**Рис. 1.8.** Малое деформируемое зеркало: а — фотография; б — схема расположения управляющих элементов