

ШИРОКОАПЕРТУРНАЯ АДАПТИВНАЯ СИЛОВАЯ ОПТИКА

О. Шанин, д.т.н.,
ФГУП НИИ НПО "ЛУЧ", Подольск, oshanin@luch.podolsk.ru

Деление систем адаптивной силовой оптики на два больших класса: для непрерывных и квазинепрерывных мощных лазерных систем [1] и для мощных импульсных лазеров [2] – условное. Как правило, первые работают в реальном масштабе времени и требуют охлаждения. Второй класс работает в момент короткого импульса. Диэлектрические интерференционные покрытия устройств адаптивной оптики должны обладать повышенной лучевой прочностью. В статье приведены характеристики, достигнутые при изготовлении ряда адаптивных зеркал для широкого спектра мощных лазерных установок.

Получения высоких плотностей энергии во время взаимодействия излучения с мишенью является необходимым условием проведения исследований лазерного термоядерного синтеза. Многие страны ведут интенсивные работы по созданию

новых мощных лазерных систем нового поколения. И результаты уже известны: в США – National Ignition Facility (NIF), во Франции – Laser Megajoule (LMJ), в России – установка нового поколения мегаджоулевого уровня. Все эти установки работают в импульсном режиме на длине волны 1,053 мкм

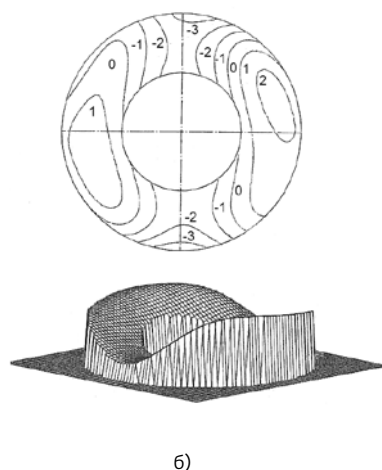
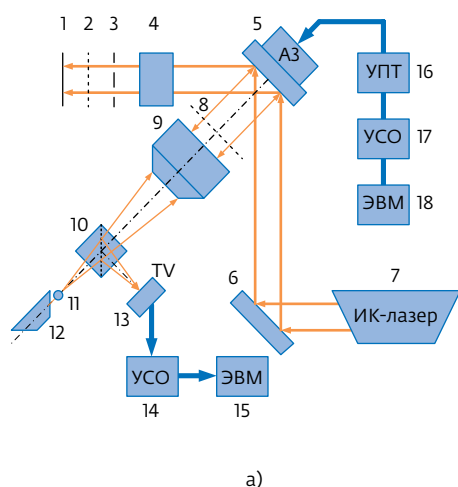


Рис.1. Схема измерений управляемого волнового фронта мощной лазерной установки при плоской поверхности АЗ; а) его типичные топограммы: 1 – экран; 2, 8 – диафрагмы Гартмана; 3 – затвор; 4 – измеритель мощности; 5 – адаптивное зеркало; 6 – поворотное зеркало; 7 – непрерывный ИК-лазер; 9 – объектив; 10 – делительный кубик; 11 – микрообъектив; 12 – диагностический He-Ne-лазер; 13 – телевизионная камера; 14, 17 – устройства сопряжения с объектами; 15, 18 – компьютеры; 16 – блок высоковольтных усилителей постоянного тока; б) изометрическая проекция

с продолжительностью импульса 3–5 нс, в течение которых выдают энергию 2 МДж и выше. В настоящих исследованиях используют модуль установки ИСКРА-6 – установку "Луч" [2]. Также ведут работы по созданию мощных непрерывных химических лазеров [3]. Во всех подобных мощных лазерных системах для корректировки искажений волнового фронта, используют адаптивную оптику [1]. Причина этих искажений – турбулентность на трассе, термические деформации и отклонения элементов оптических деталей от расчетов при их изготовлении. Для уменьшения удельных нагрузок на оптическую поверхность и повышения пространственного разрешения, как правило, используют широкоапертурные адаптивные зеркала [1,2,4].

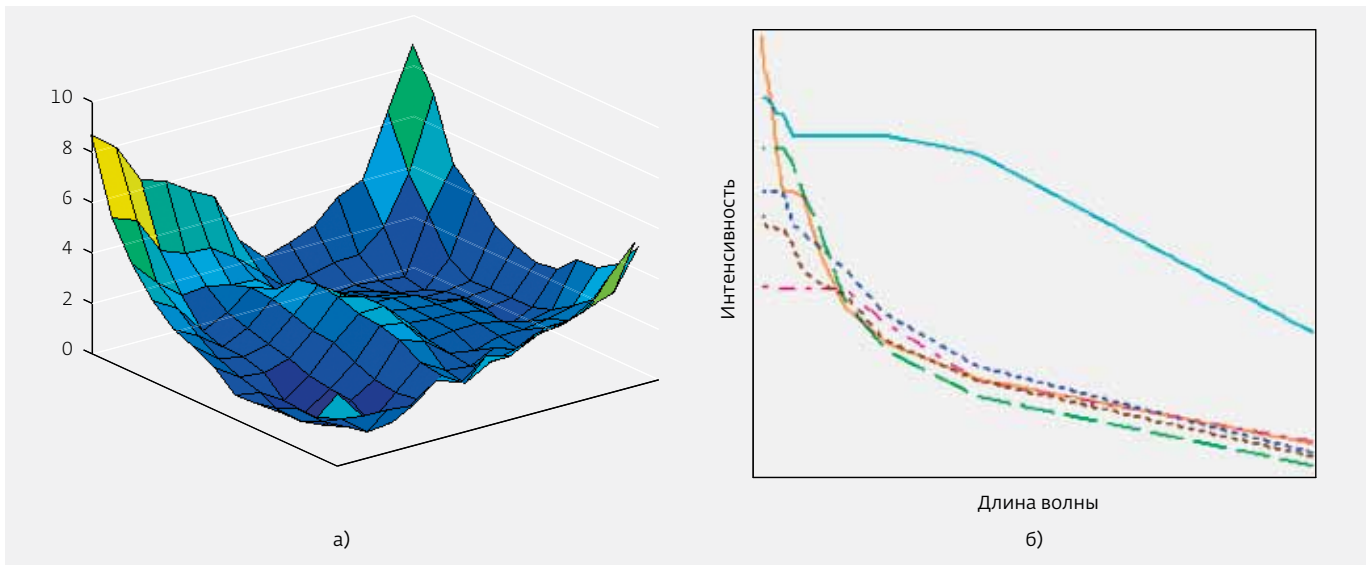


Рис.2. Типичный волновой фронт (ВФ) излучения мощной импульсной установки на фосфатном стекле: а) структура ВФ; б) сопоставление пространственных спектров ВФ в различных пусках

Измерения и анализ искажений волновых фронтов реальных установок позволяют выявить закономерности появления тех искажений, которые им присущи. Эти данные затем будут использованы при проектировании основных элементов адаптивных оптических систем – датчика волнового фронта (ДВФ) и адаптивного зеркала. Адаптивная оптика должна компенсировать aberrации волнового фронта: статические (погрешности изготовления и юстировки элементов оптического тракта) и динамические (термодеформации оптических элементов и турбулентность на трассе).

ПОЛУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ЗЕРКАЛ

Наш подход к проектированию адаптивных зеркал (АЗ) состоит из нескольких этапов. Сначала мы проводим измерения и выполняем спектральный анализ aberrаций волновых фронтов реальной установки. Затем задаем величину остаточной ошибки коррекции реальных волновых фронтов. После этого рассчитываем минимально необходимое количество приводов, план их размещения по поверхности АЗ, необходимые амплитудные характеристики. Такая технология проектирования в общих чертах описана в работе [5], а применительно к установке "Луч" – в работе [2].

Анализ aberrаций волнового фронта непрерывных систем показывает, что решающий вклад

в увеличение расходимости пучка, которая снижает плотность излучения на объекте, вносят возмущения самого источника, тепловое самовоздействие и aberrации системы оптического тракта (СОТ). Амплитуда устанавливающихся за доли секунды искажений соизмерима с величиной нескольких длин волн. Причина их появления – это влияние термических деформаций зеркал резонатора и СОТ, а также возникновение в канале сформированного пучка тепловых линз. Типичная форма волнового фронта непрерывных лазеров и схема измерений волнового фронта (ВФ) представлены на рис.1. На топограмме числами обозначены искажения в единицах длин волн излучения ИК-лазера. Величина амплитуды искажений линейно зависит от мощности установки, а пространственный спектральный состав определяют в основном несколько составляющих низкого порядка. В силу этих особенностей, как правило, для контроля ДВФ и АЗ и расположения проектируемых управляющих приводов используют ограниченное число точек.

Анализ волновых фронтов (рис.2) импульсных систем показывает совпадение их пространственных спектров в различных пусках. Он также позволяет сформулировать требования к пространственному разрешению ДВФ и АЗ [2]. Исходя из полученной информации по волновым фронтам и назначенной остаточной ошибки коррекции, определяют требуемую амплитуду

Таблица 1. Технические характеристики систем для ТМЛР

Тип системы охлаждения	Характерные размеры и материал	Достигнутые характеристики, $\alpha_{пр} \cdot 10^{-5}$, Вт/(м ² К)	Предлагаемые размеры и материал	Возможные характеристики, $\alpha_{пр} \cdot 10^{-5}$, Вт/(м ² К)
Канальная	$d_r = 1-2$ мм; Cu, Mo	0,8-1,2	Практически достигнут технологический предел	Практически достигнут предел
Канальная многоярусная	$n = 2$; $\delta_k = 1$, $\delta_p = 0,8$; $h_k = 3,5$; 2,0 мм; Cu	1,35	$n = 3-5$; $\delta_k = h_k = 0,2$ мм, $h_k = h_{неп} = 0,2-0,5$ мм; Cu	4-80
Модифицированная канальная	$\epsilon = 0,5$; $\delta_p = \delta_k = 1$, $d_r = 1,45$; $h_k = 1,0-2,7$ мм; Cu	0,9-1,2	Нет	Нет
Вафельная	$d_r = 1,6-2,5$ мм; Cu, Mo; $K \sim 1000$ 1/м	1,2-1,4	$\epsilon = 0,5-0,75$, $\delta_p = 0,3-1,0$ мм, $h_k = 0,5-2,0$ мм; $K \sim 1000$ 1/м; Cu	2,5
Псевдощеточная	$d_r = 0,13-0,50$ мм; Mo	0,6-0,8	$d_r = 0,13-0,50$ мм; Cu	1,6-1,8
Микроканалы	$d_r = 0,13$ мм; Cu	1,7-1,8	$d_r = 0,1$ мм; Cu	2,4-2,6
Струйная	$d_r = 1$ мм; Cu	0,3	Медное оребрение	2,0-2,5
Компланарная	$d_r = 1$ мм	1,2	Нет	Нет

* d_r – гидравлический диаметр канала; h_k – высота канала; $h_{неп}$ – высота перегородки; ϵ – коэффициент пористости; n – число ярусов; δ_p – ширина ребра; δ_k – ширина канала; K – коэффициент оребрения; $\alpha_{пр}$ – коэффициент теплоотдачи, приведенный к оптической поверхности

перемещения оптической поверхности АЗ, число приводов и план их размещения на апертуре. Например, для установки "Луч" было определено шахматное размещение 61 привода на апертуре [4].

УСТРОЙСТВО АДАПТИВНЫХ ЗЕРКАЛ И ПРОБЛЕМЫ ИХ СОЗДАНИЯ

Конструкция АЗ (рис.3 и 4) всегда состоит из силовой основы, системы приводов и оптического блока (ОБ). Для импульсных АЗ практически удается реализовать независимость формы оптической поверхности от температуры. Этого достигают путем согласования коэффициентов линейного расширения ОБ и основы [3]. Для непрерывных систем на практике это выполнить невозможно, так как длительное лучевое воздействие и необходимость охлаждения АЗ не позволяют получить полную независимость формы поверхности от температуры.

Организация охлаждения адаптивных зеркал является нетривиальной и противоречивой задачей. Для обеспечения приемлемого коэффициента термической стабильности

вследствие подогрева хладагента $K_{Тхлад}$ через сравнительно тонкий (3-8 мм) оптический блок диаметром до 0,5 м его нужно как можно больше прокатать. С другой стороны, для обеспечения геометрической стабильности поверхности вследствие перегрева оптического блока (коэффициент $K_{Тстаб}$) необходимо организовать разветвленную систему охлаждения. Система должна обладать высоким коэффициентом теплоотдачи. Благодаря такой конструкции, растет гидросопротивление системы. Результаты систематических исследований теплообмена [4] в системах охлаждения лазерных зеркал позволяют

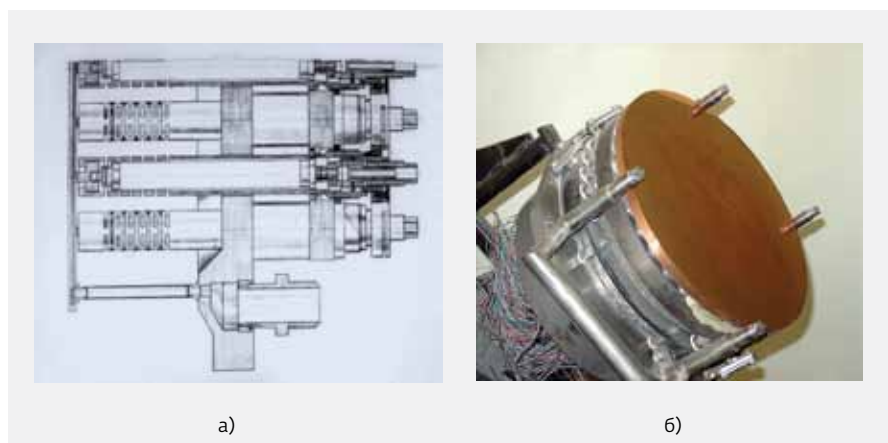


Рис.3. Адаптивное зеркало (АЗ) для установки непрерывного действия: а) конструктивная схема; б) внешний вид охлаждаемого АЗ

оптимизировать конструкцию ОБ и получить низкие $K_{Тхлад}$ и $K_{Тстаб}$. В табл. 1 приведены величины уже достигнутых и возможных расчетных коэффициентов теплоотдачи.

Длительное циклическое воздействие на ОБ накладывает ограничения на применяемые материалы. В наших экспериментах мы контролировали коэффициент светорассеяния оптической поверхности в зависимости от числа циклов при характерных для зеркал данной геометрии и известных перемещениях поверхности. Естественно, по мере увеличения числа циклов колебаний поверхности ее оптические свойства деградируют, а коэффициент светорассеяния (КСР) растет. Отражательные свойства меди деградирует экспоненциально уже при числе циклов, меньшем $6 \cdot 10^6$. При числе циклов $8 \cdot 10^6$ КСР достигает 35%, и на поверхности происходят необратимые изменения. Для молибдена деградация свойств носит линейный характер, и она значительно меньше (при наборе $35 \cdot 10^6$ циклов КСР увеличивается незначительно с 1 до 6%). Известны также случаи проявления пластической деформации на поверхности медных зеркал после их длительного хранения вследствие релаксации

остаточных (после обработки поверхности) напряжений. Наш опыт подсказывает, что изготавливать из меди высокочастотные зеркала

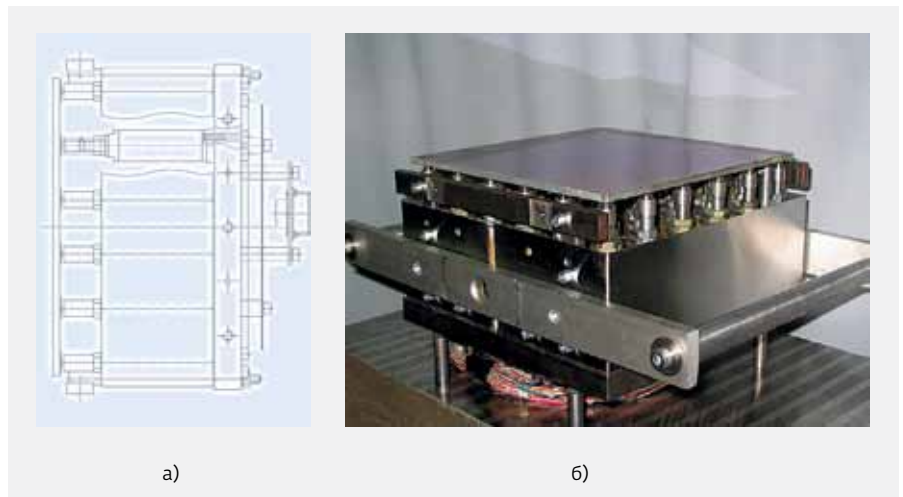


Рис.4. АЗ для импульсной установки: а) конструктивная схема; б) внешний вид



Рис.5. Внешний вид пьезопроводов: а) для охлаждаемых АЗ; б) для неохлаждаемых АЗ

Таблица 2. Характеристики созданных адаптивных силовых зеркал для непрерывных (АЗ 1–АЗ 6) и импульсных (АЗ 7, АЗ 8) систем

Параметры	АЗ 1	АЗ 2	АЗ 3	АЗ 4	АЗ 5	АЗ 6	АЗ 7	АЗ 8
Апертура, мм	250	210	400	500	500	420	220×220	220×220
Управл. апертура, мм	160	210	300	424	424	338	200	200
Число приводов	19	19	37	61	61	37	61	61
Упаковка	Гексагональная						Шахматная	
Шаг, мм	40	40	50	53	53	56	28,3	28,3
Тип приводов	ПП-1	ПП-2	ПП-2	ПП-1	ПП-1	ПП-2	ПП-0,5	ПМ-1
Толщина ОБ, мм	3,65	7,7	6,5	7,0	7,0	8,0	5,0	5,0
Управл. напр., В	±300	±300	±300	±300	±300	±300	±300	0-100
Амплитуда, мкм	±20	±7	±14	±12	±12	±13	±17,4	19,8
Гистерезис, %	19	17	17	18	18	17	15	13
Частота 1 рез., Гц	1850	2370	200	720	1200	1480	2000	1500
Тип системы охлаждения	КСО	КСК	КСК	КСП	КСП	КСО	Б/О	Б/О
ДР, МПа	0,35	0,35	0,18	0,5	0,5	0,85	Нет	Нет
Расход, кг/с	1,0	0,75	1,26	4,0	4,0	4,0	Нет	Нет
$K_{T, \text{стаб}}$, мкм/К	0,87	0,6	0,05	0,6	0,6	0,1	0	0
$K_{T, \text{хлад}}$, мкм/К	1,3	1,0	1,5	0,06	0,06	0,1	Нет	Нет
КЗО, %	98,0	98,5	98,5	98,3	98,4	98,6	99,3	99,3
Масса, кг	51,8	35	100	120	100	70	26	16

как модулирующие, так и корректирующие, не рекомендуется.

Применяемый в АЗ пьезоэлектрический привод (рис.5) работает в диапазонах напряжений ±300 В и 0-100 В и дает перемещения в свободном состоянии соответственно до ±40 мкм и до 40 мкм. При работе на высоких частотах пьезоэлектрический привод разогревается, и этот эффект уменьшает динамический диапазон АЗ. Гистерезис в зависимости от типа используемой

пьезокерамики составляет 13–25%. Этот привод вкуче с созданной электронной аппаратурой управления обеспечивает точность позиционирования 5 нм. В ряде конструкций АЗ предусмотрена замена отдельных пьезоприводов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ

Конструкторско-технологическая отработка проводилась как на экспериментальных образцах и макетах, так и на полномасштабных АЗ.

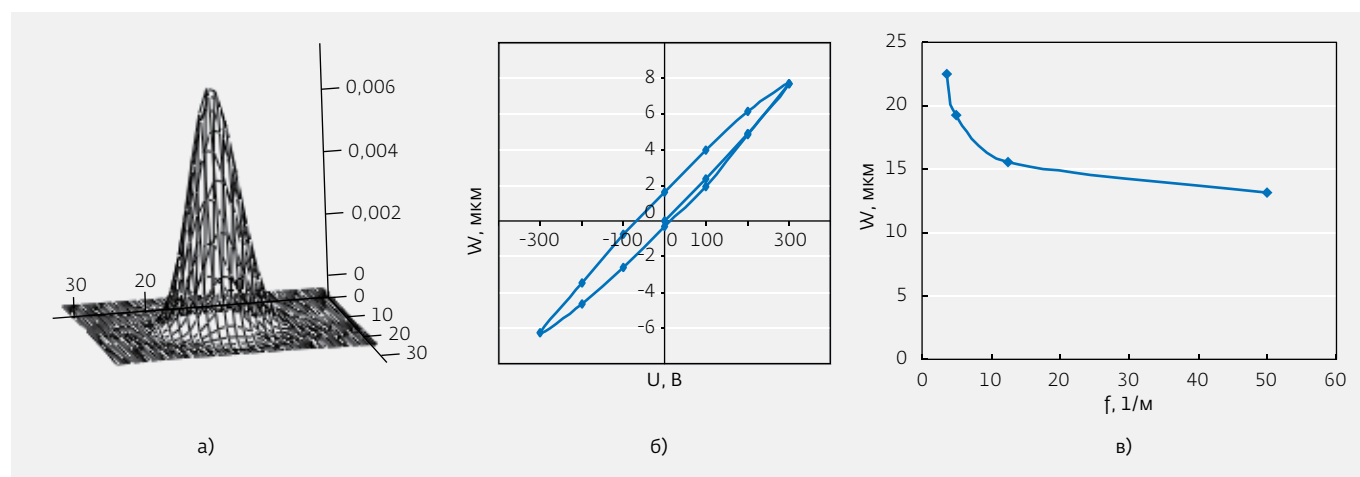

Рис.6. Типичные результаты измерений АЗ: а) функция отклика; б) гистерезис центрального привода; в) пространственное разрешение



Таблица 3. Некоторые виды покрытий лазерных зеркал

Длина волны, мкм	Материалы слоев	Максимальное число слоев, шт.	Максимальный коэффициент отражения, %	Лучевая стойкость
0,193	MgF ₂ / LaF ₃ MgF ₂ / NdF ₃	46	98,5	2 Дж/см ² ; 25 нс
0,248 – 0,308	SiO ₂ / Al ₂ O ₃ SiO ₂ / HfO ₂	45	99,6	3 Дж/см ² ; 25 нс
0,53 – 1,06	SiO ₂ / (HfO ₂ ZrO ₂)	29	99,9	50 Дж/см ² ; 10 нс, 10 Гц
2,7–3	SiO ₂ / ZrO ₂	21	99,8	500 Дж/см ² ; 300 мкс
10,6	Cu / ThF ₄ / ZnSe	8	99,8	В непрерывном режиме определяется конструкцией зеркала

При этом измеряли различные характеристики (рис.6). Экспериментальная отработка показала, что практически невозможно достичь "идеального" плоского состояния исходной формы оптической

поверхности. Причина кроется в ошибках, созданных при механической обработке тонкой пластины, искажениях ее поверхности при нанесении высокопрочных диэлектрических покрытий, искажениях формы поверхности при соединении ее с системой приводов. Удовлетворяющее заданию начальное качество можно достичь предварительной механической юстировкой формы поверхности. Юстировка определяется благодаря разработанному методу контроля формы оптической поверхности в реальном масштабе времени и реализации оптимального алгоритма управления. В качестве примера на рис.7 приведены формы оптической поверхности зеркала АЗ 8 после сборки и механической юстировки.

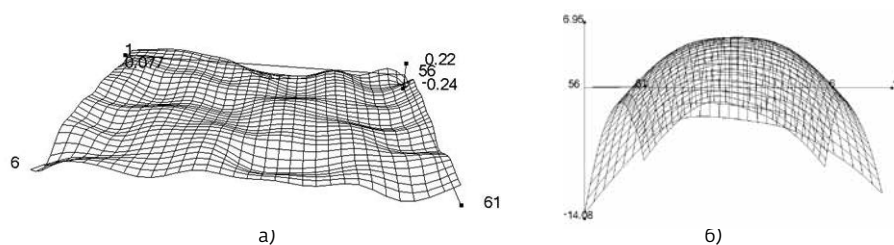


Рис. 7. Форма оптической поверхности АЗ 8 после: а) сборки (отклонение от плоскости составляет 21 мкм и СКО = 4,527 мкм); б) механической юстировки (отклонение от плоскости составляет 0,46 мкм и СКО = 0,07 мкм)

Характеристики силовых адаптивных зеркал, достигнутые в ходе работ, приведены в табл.2: амплитуда перемещения поверхности составляет ± 20 мкм; размер управляемой апертуры превышает 400 мм; число приводов достигает 61; расстояние между приводами колеблется от 30 до 60 мм; частота первого резонанса – более 2000 Гц; поддержание термической стабильности для охлаждаемых зеркал – на уровне одной десятой градуса, а для неохлаждаемых зеркал – термическая стабильность.

Следует также подчеркнуть, что на предприятии ФГУП "НИИ НПО "ЛУЧ" освоена технология нанесения высокопрочных лазерных интерференционных отражающих покрытий для широкого диапазона длин волн (табл.3). Это позволяет изготавливать адаптивную оптику для мощных лазерных систем [6, 7].

Таким образом, проведена отработка ряда адаптивных зеркал для широкого спектра мощных лазерных установок. Но самый главный результат – это получение обобщенных физических, технических и расчетно-теоретических решений вопросов создания устройств адаптивной силовой оптики, созданные базы данных по материалам и элементам, разработанные методология проектирования и испытаний, а также технология изготовления элементной базы и собственно широкоапертурных силовых адаптивных зеркал с заданными наперед характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тараненко В.Г., Шанин О.И.** Адаптивная оптика в приборах и устройствах. – М.: ФГУП "ЦНИИАТО-МИНФОРМ", 2005.
2. **Бокало С.Ю., Гаранин С.Г., Григорович С.В. и др.** Деформируемое зеркало на основе пьезоэлектрических приводов для адаптивной системы установки "Искра-6". – Квантовая электроника, 2007, т. 37, № 8, с. 691.
3. **Гаранин С.Г.** Мощные лазеры в РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Мощные лазеры и исследования физики высо-

ких плотностей энергий: Сборник тезисов докладов X Харитоновских чтений. – Саров, 2008, с. 133-13.

4. **Бокало С.Ю., Жупанов В.Г., Ляхов Д.М. и др.** Широкоапертурная адаптивная оптика для мощных лазеров со сверхкороткой длительностью импульса. – Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий: Сборник тезисов докладов X Харитоновских чтений. – Саров, 2008, с. 177-178.

5. **Ляхов Д.М., Шанин О.И.**

Оптимальное управление формой оптической поверхности гибкого зеркала. – Известия РАН. Сер. Физическая, 1995, т.9, №6, с.55.

6. **Шанин Ю.И., Шанин О.И.** Интенсификация теплоотдачи в системах охлаждения лазерных зеркал. Интенсификация теплообмена. – Труды 4-й российской национальной конференции по теплообмену. – Изд. дом МЭИ, 2006, т.6, с. 297.
7. **Бабаянц К.Г., Жупанов В.Г., Ключев Е.В. и др.** Диэлектрические покрытия с высокой лучевой стойкостью для различных диапазонов длин волн. – Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий: Сборник тезисов докладов X Харитоновских чтений. – Саров, 2008, с. 69.