

Исследование широкоапертурного комбинированного деформируемого зеркала для мощного импульсного лазера на фосфатном стекле

В.В.Самаркин, А.Г.Александров, Т.Джитсуно, П.Н.Романов, А.Л.Рукосуев, А.В.Кудряшов

Разработано деформируемое зеркало с размерами 410×468 мм, управляемое приводами на основе биморфных пластин и многослойных пьезопакетов. Представлены функции отклика отдельных приводов и измерения плоскостности поверхности деформируемого зеркала. Исследования зеркала с использованием интерферометра и датчика волнового фронта показали возможность точной юстировки поверхности до плоскостности лучше 0.033 мкм (СКО). Продемонстрирована возможность компенсации aberrаций излучения сверхмощного лазера при помощи созданного биморфного зеркала.

Ключевые слова: деформируемое зеркало, актюатор, датчик волнового фронта, лазер на стекле с неодимом.

Измерения излучения мощных лазерных комплексов показали, что реальные aberrации волнового фронта выходного излучения имеют крупномасштабный характер [1]. Это означает, что управляемые гибкие зеркала должны быть эффективны при коррекции именно таких aberrаций. Биморфные деформируемые зеркала обладают возможностью точной компенсации крупномасштабных aberrаций волнового фронта с использованием небольшого количества управляемых электродов. В настоящее время разработаны и успешно применяются биморфные зеркала со сплошной поверхностью диаметром до 150 мм [2]. Однако существует потребность в зеркалах больших размеров; например, в современных лазерах для исследования возможности создания управляемого термоядерного синтеза предполагается использовать оптические системы с зеркалами размером не менее 400 × 400 мм [3, 4]. Отсутствие широкоапертурных биморфных зеркал связано с проблемами при закреплении тонкого и одновременно большого зеркала-мембраны с отношением толщины к поперечному размеру 1/50 и менее. При вертикальной установке зеркала в профиль его поверхности вносятся существенные aberrации, обусловленные напряжениями в местах контактов зеркала с оправой. Кривизна зеркала меняется также из-за гравитации, температурных изменений среды и разогрева лазерным излучением.

Нами было разработано и изготовлено комбинированное деформируемое зеркало, включающее в себя исполнительные элементы как биморфного, так и актюаторного типов. Световая апертура деформируемого зеркала составила 410 × 468 мм. Качество полировки поверхности зеркала было не хуже 2 нм (СКО), плоскостность поверхности до сборки в оправе – не хуже 1.5 мкм. Ди-

электрическое покрытие обеспечивало коэффициент отражения излучения более 99.9% на длине волны $\lambda = 1053$ нм и лучевую прочность не менее 50 Дж/см².

Для минимизации начальных aberrаций зеркала, вызванных механическими напряжениями при креплении, использовались пьезоэлектрические актюаторы, которые располагались по краю металлической основы и поддерживали биморфное зеркало по периметру. Актюатор состоял из корпуса и пьезопакета с размерами 7 × 7 × 18 мм, который можно было подвергать предварительному механическому напряжению (сжатию). Диапазон перемещения каждого актюатора составлял от –8 до +8 мкм при напряжениях ± 80 В. На рис. 1, а представлены конфигурация и схема расположения 100 биморфных электродов и 20 актюаторов на стеклянной подложке толщиной 10 мм. Управляющие электроды представляли собой одну четвертую часть шестиугольной пьезокерамической пластины, приклеенной к задней поверхности стеклянной подложки. Амплитуда деформации поверхности зеркала посредством биморфного электрода составляла от –8 до +12 мкм при подаче напряжения от –300 до +500 В. Фотография деформируемого зеркала представлена на рис. 1, б. Зеркало было исследовано на интерферометриче-

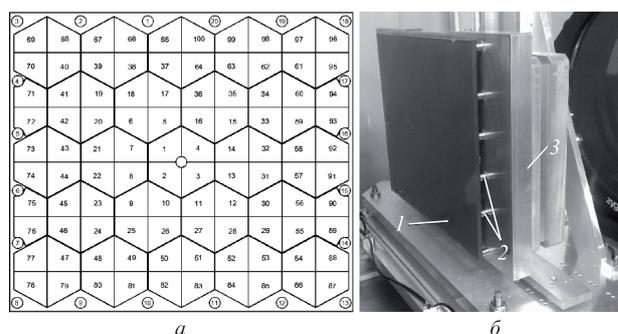


Рис. 1. Комбинированное деформируемое зеркало – схема расположения и конфигурация электродов (а) и фотография зеркала в сборе (б): 1 – подложка с отражающим покрытием; 2 – актюаторы; 3 – металлическая основа.

В.В.Самаркин, А.Г.Александров, П.Н.Романов, А.Л.Рукосуев, А.В.Кудряшов. Московский государственный машиностроительный университет, Россия, 107023 Москва, ул. Б.Семёновская, 38; e-mail: samarkin@nightn.ru, alex@activeoptics.ru
Т.Джитсуно. Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Поступила в редакцию 29 октября 2015 г., после доработки – 3 ноября 2015 г.

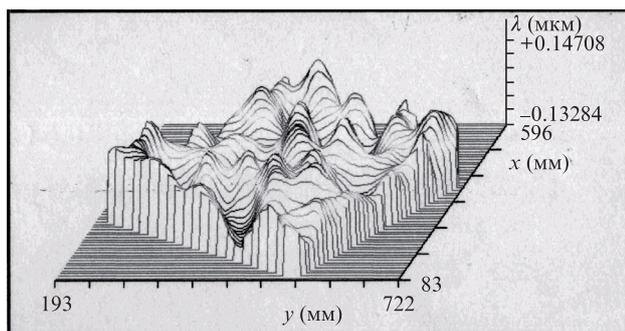


Рис.2. Форма скорректированной поверхности деформируемого зеркала.

ском стенде ZYGO с расширительным телескопом, увеличивающим диаметр диагностического лазерного пучка до 610 мм. Кроме того, часть излучения отводилась на датчик волнового фронта шак-гартмановского типа для измерения формы поверхности. Эталонной поверхностью служило плоское зеркало с ошибкой $\lambda/70$ при $\lambda = 0.632$ мкм (СКО) на световой апертуре 600 мм.

Исходная ошибка поверхности составляла около 30 мкм. После механической регулировки периферийными актюаторами была достигнута плоскостность 2.5 мкм (P-V). Далее после коррекции в замкнутой системе с обратной связью с датчиком волнового фронта при использовании только актюаторов aberrации уменьшились до 1.5 мкм (P-V). При коррекции биморфными электродами с использованием не более 10% диапазона управляющего напряжения была получена плоскостность 0.16 мкм (P-V) и 0.033 мкм (СКО). Для сравнения были сделаны прямые измерения интерферометром, показавшие, что при $\lambda = 0.632$ мкм плоскостность составила 0.280λ (P-V) и 0.05λ (СКО) (рис.2), что совпадает с измерениями датчиком волнового фронта. Полученное качество поверхности обеспечивает число Штреля 0.86.

Исходя из полученных функций отклика биморфных электродов, была численно исследована способность коррекции деформируемым зеркалом искажений волнового фронта выходного излучения лазерной установки «Луч» (РФЯЦ – ВНИИЭФ, Саров) [5], измеренных датчиком волнового фронта. Исходные aberrации лазерного пучка в разложении по 36 полиномам Цернике приведены на рис.3,а.

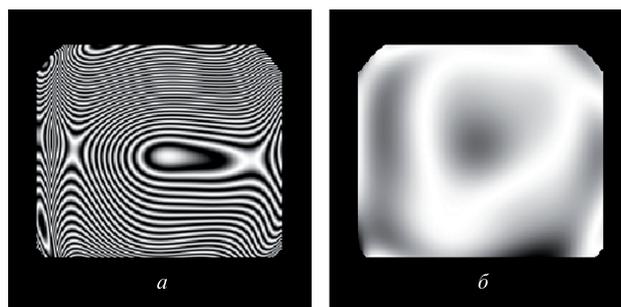


Рис.3. Искажения волнового фронта выходного излучения до (а) и после (б) коррекции деформируемым зеркалом.

Амплитуды данных искажений составляли 17.29 мкм (P-V) и 3.82 мкм (СКО). После разложения этих aberrаций по функциям отклика были вычислены напряжения на электродах для их компенсации и рассчитана остаточная ошибка коррекции волнового фронта. После коррекции СКО составило 0.077 мкм (рис.3,б), что соответствовало числу Штреля 0.81. Это должно позволить фокусировать излучение сверхмощного лазера в пятно с диаметром, определяемым дифракционными эффектами, а следовательно, такое деформируемое зеркало можно было бы использовать в новой российской лазерной установке мегаджоульного класса, создаваемой в РФЯЦ – ВНИИЭФ. В настоящее время представленный корректор волнового фронта установлен в лазерном комплексе LFEX (Япония), на котором получены рекордные значения выходной мощности излучения [6].

1. Александров А.Г., Завалова В.Е., Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Шелдакова Ю.В., Самаркин В.В., Романов П.Н. *Квантовая электроника*, **40**, 321 (2010).
2. Sheldakova J., Samarkin V., Kudryashov A., Rukosuev A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7913**, 79130I (2011).
3. Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S., et al. *Opt. Eng.*, **43**, 2873 (2004).
4. Grosset-Grange C., Barnier J.-N., Chappuis C., Hervé Cortey H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6584**, 658403 (2007).
5. Гаранин С.Г., Голубев А.И., Повышев В.М. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 427 (2013).
6. <http://www.dailytechinfo.org/news/7235-v-yaponii-zapuschen-samy-moschnyy-v-mire-lazer.html>.