

Уменьшение aberrаций волнового фронта и расходимости лазерного излучения на установке «Луч» с помощью адаптивной системы

И.Н.Воронич, С.Г.Гаранин, А.И.Зарецкий, Б.Г.Зималин, Г.А.Кириллов, С.М.Куликов, А.Н.Маначинский, В.М.Муругов, А.В.Огородников, С.П.Смышляев, С.А.Сухарев

Описана адаптивная система для компенсации статических и термоиндуцированных aberrаций волнового фронта усилительного тракта лазерной установки «Луч». С помощью этой системы амплитуда aberrаций волнового фронта A силового излучения и среднеквадратичное отклонение σ были уменьшены в ~ 3 раза – от $A = 9.6$ мкм, $\sigma = 2.4$ мкм до $A = 3.2$ мкм, $\sigma = 0.6$ мкм, что позволило уменьшить расходимость излучения в два раза.

Ключевые слова: неодимовый усилитель, адаптивная система, aberrации волнового фронта, расходимость излучения.

В создаваемых крупномасштабных лазерных установках на неодимовом стекле [1, 2] и в модуле «Луч» [3, 4] проектируемой установки «Искра-6» [5] наряду с высокой выходной энергией излучения требуется малая расходимость выходного пучка для получения высоких интенсивностей при фокусировке на мишень. В мощных твердотельных лазерных системах присутствуют aberrации волнового фронта, обусловленные статическими и динамическими («тепловыми») неоднородностями показателя преломления в оптических элементах усилительного тракта, которые увеличивают расходимость и ухудшают качество фокусировки пучка [6, 7]. Статические aberrации обусловлены главным образом неоднородностями в оптических материалах и неточностью обработки поверхности оптических элементов (активные элементы, окна, линзы, зеркала и т. д.). Динамические aberrации обычно возникают из-за нагрева активных элементов излучением накачки.

Для компенсации aberrаций волнового фронта в лазерных системах применяются различные адаптивные системы [1, 8–11], которые позволяют уменьшить расходимость излучения до значений, близких к дифракционной расходимости. Для компенсации aberrаций волнового фронта на установке «Луч» применяется адаптивная система, разработанная на основе многоэлементного деформируемого зеркала [12].

Схема адаптивной системы установки «Луч» представлена на рис. 1. В ее состав входят деформируемое зеркало с блоком управления, входной и выходной датчики волнового фронта (ДВФ) и управляющий компьютер. Входной ДВФ необходим для измерений волнового фронта излучения на входе в усилительный тракт, выходной ДВФ – для измерений на выходе из усилительного тракта.

В адаптивной системе установки «Луч» используется многоэлементное биморфное пьезоэлектрическое деформируемое зеркало (рис. 2, а) и гартмановский ДВФ [13]

И.Н.Воронич, С.Г.Гаранин, А.И.Зарецкий, Б.Г.Зималин, Г.А.Кириллов, С.М.Куликов, А.Н.Маначинский, В.М.Муругов, А.В.Огородников, С.П.Смышляев, С.А.Сухарев. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37

Поступила в редакцию 23 июля 2004 г.

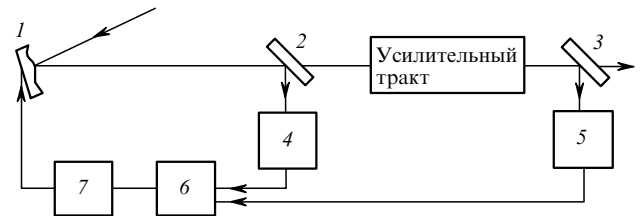


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы: 1 – деформируемое зеркало; 2, 3 – пластины, отводящие излучение на ДВФ; 4, 5 – входной и выходной ДВФ; 6 – управляющий компьютер; 7 – блок управления деформируемым зеркалом.

(рис. 2, б). Последний состоит из согласующего телескопа, ослабителя излучения, киноформного раstra и CCD-камеры. Киноформный растр располагается в плоскости, сопряженной с плоскостью деформируемого зеркала и крепится к CCD-камере с помощью переходного кольца. Назначение раstra в ДВФ – формирование системы фокальных пятен на приемной матрице CCD-камеры. По величине смещений фокальных пятен от узлов идеальной сетки восстанавливается поверхность волнового фронта.

При измерениях искажений волнового фронта на входе усилительного тракта установки сначала измеряется волновой фронт входного импульсного излучения лазера ($\lambda = 1.053$ мкм), который при необходимости выпрямляется деформируемым зеркалом. Затем с помощью выходного ДВФ анализируется волновой фронт излучения

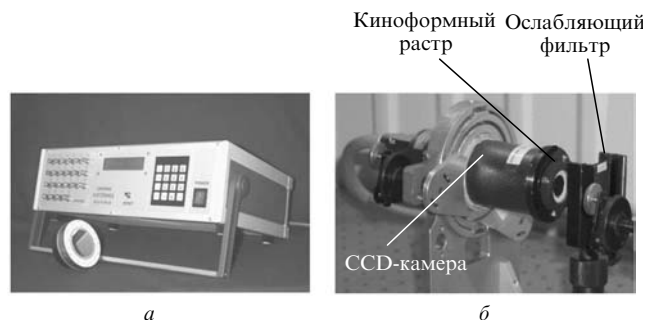


Рис. 2. Фотографии основных элементов адаптивной системы: деформируемого зеркала с блоком управления (а) и датчика волнового фронта (б).

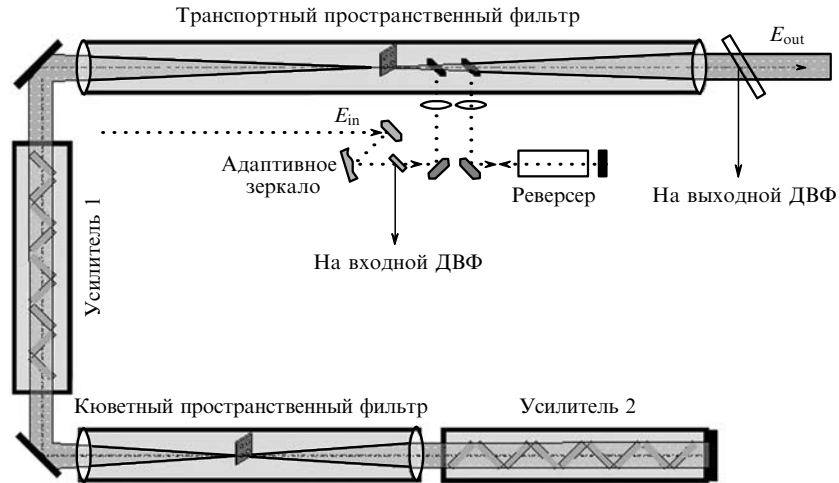


Рис.3. Схема установки «Луч».

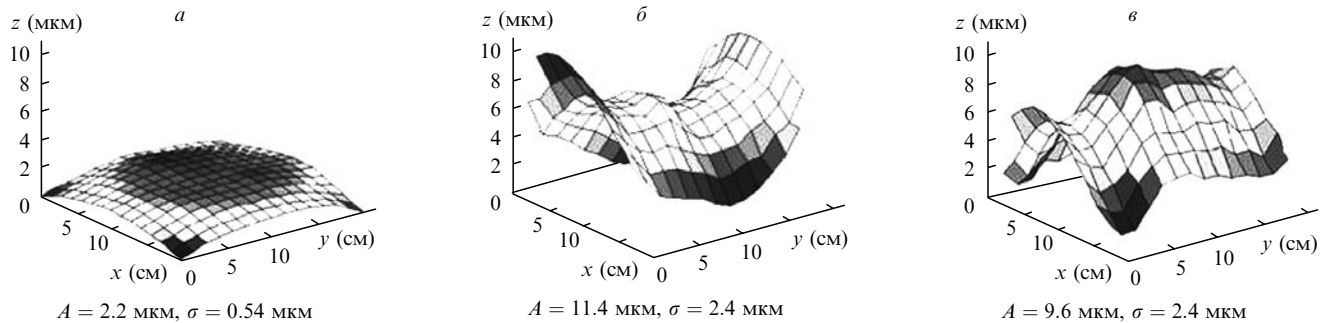


Рис.4. Aberrации волнового фронта лазерного излучения на входе в усилительный тракт (а), статические aberrации усилительного тракта (б), статические и «тепловые» aberrации усилительного тракта (в) (z – фаза в оптических длинах).

на выходе усилительного тракта установки и определяются искажения в оптическом тракте при «холодных» усилителях 1 и 2 (рис.3) [4]. После измерения статических искажений волнового фронта проводится измерение полных искажений в усилительном тракте при накачке усилителей 1 и 2. С учётом полученных статических и динамических aberrаций волнового фронта в деформируемое зеркало вносятся «предыскажения» для компенсации aberrаций волнового фронта в рабочем режиме на выходе лазера.

На рис.4 приведены результаты измерений волнового фронта лазерного излучения на входе и выходе усилительного тракта установки «Луч». Волновой фронт характеризуется двумя параметрами: амплитудой aberrаций A и среднеквадратичным отклонением σ .

Волновой фронт на входе в усилительный тракт имеет небольшие отклонения от гладкого: $A = 2.2$ мкм, $\sigma = 0.54$ мкм (рис.4,а). Статические aberrации усилительного тракта (рис.4,б) измерены при регистрации импульсного излучения без накачки усилительных каскадов. Максимальные aberrации наблюдаются на краях апертуры. На рис.4,в приведены суммарные (статические и «тепловые») aberrации, измеренные для импульсного излучения с накачкой усилительных каскадов 1 и 2 при напряжении на конденсаторных батареях $U_p = 18$ кВ, обеспечивающем коэффициент усиления $g_0 = 3.7 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

Из приведённых выше результатов видно, что амплитуда суммарных aberrаций волнового фронта при накачке усилителей $A = 9.6$ мкм, а среднеквадратичное отклонение $\sigma = 2.4$ мкм, что меньше, чем в случае статичес-

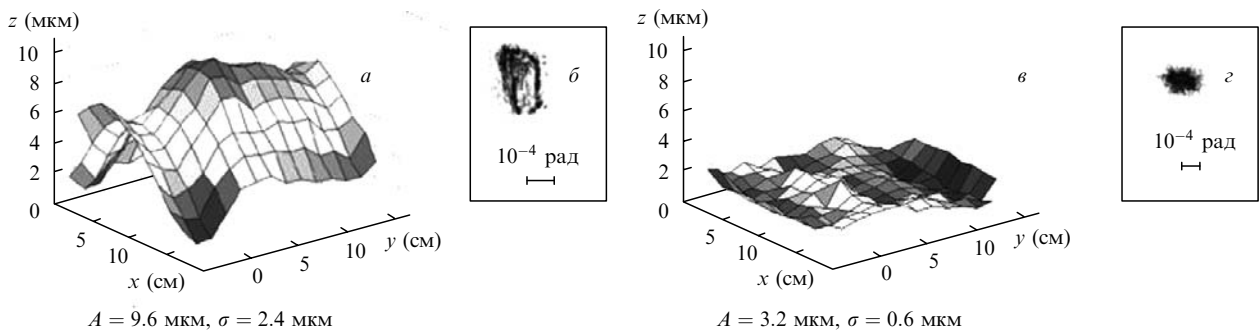


Рис.5. Результаты коррекции aberrаций волнового фронта силового лазера при $U_p = 18$ кВ (а, в) и распределения интенсивности излучения в дальней зоне (б, з) до подачи напряжения на деформируемое зеркало (а, б) и после трёх итеративных коррекций напряжения (в, з) (z – фаза в оптических длинах).

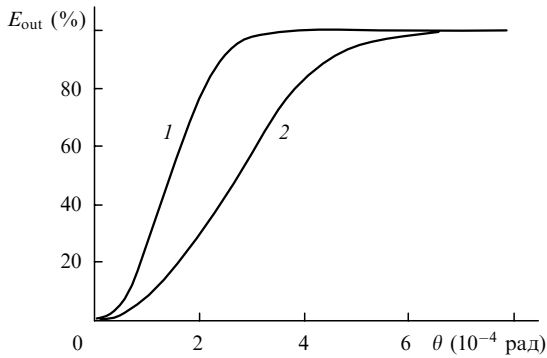


Рис.6. Угловые распределения энергии на выходе установки E_{out} в обычных условиях (1) и при компенсации искажений адаптивной системой (2); θ – угол расходимости.

ких aberrаций ($A = 11.4$ мкм, $\sigma = 2.4$ мкм), т. е. «тепловые» aberrации частично компенсируют статические aberrации усилительного тракта.

По результатам измерений параметров волновых фронтов рассчитаны управляющие напряжения для деформируемого зеркала и проведена коррекция aberrаций волнового фронта силового излучения установки «Луч». На рис.5 показаны поверхности волнового фронта и экспериментально измеренные картины распределения интенсивности излучения в дальней зоне на выходе усилительного тракта до подачи напряжения и после трёх итеративных коррекций напряжения на деформируемом зеркале. Из рис.5 видно, что после трёх итераций корректировки напряжения на деформируемом зеркале aberrации волнового фронта силового лазера уменьшились в ~ 3 раза – от $A = 9.6$ мкм, $\sigma = 2.4$ мкм до $A = 3.2$ мкм, $\sigma = 0.6$ мкм. На рис.6 представлены угловые распределения энергии на выходе установки в обычных условиях и при компенсации искажений с помощью адаптивной системы.

Из рис.5 и 6 видно, что картина распределения излучения при работе адаптивной системы стала более симметричной и расходимость излучения по уровню 0.8 уменьшилась в два раза.

Таким образом, на установке «Луч» реализована адаптивная система на основе многоэлементного управляемого деформируемого зеркала, которая позволила уменьшить aberrации волнового фронта усилительного тракта установки в три раза, а угловую расходимость излучения – в два раза.

Авторы благодарят В.В.Атучина, А.Г.Сафронова и И.С.Солдатенкова за изготовление элементов адаптивной системы.

1. LLNL. *ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility* (Virginia: Springfield, 1997, v. 7, No. 3).
2. Andre M.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3047**, 38 (1996).
3. Безнасюк Н.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. В сб.: *IV Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2002, с. 82).
4. Воронич И.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. *Квантовая электроника*, **33** (6), 485 (2003).
5. Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A., Kirillov G.A., Kochemasov G.G., Murugov V.M., Rukavishnikov N.N., Sukharev S.A. *Fusion Engin. Design*, **44**, 51 (1999).
6. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М.: Наука, 1988).
7. Cherezova T., Chesnokov S., Kaptsov L., Samarkin V. Kudryashov A. *Appl. Opt.*, **40** (33), 6026 (2001).
8. Харди Дж.У. *Труды ИИЭР*, **66** (6), 31 (1978).
9. Рагульский В.В. *Обращение волнового фронта при ВР света* (М.: Наука, 1990).
10. Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **22** (11), 1113 (1995).
11. Chanteloup J.-Ch., Loiseaux B., Huignard J.-P., Mourou G., Baldi H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3047**, 227 (1996).
12. Безнасюк Н.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. В сб.: *Научные труды РФЯЦ – ВНИИЭФ* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2002, с. 232).
13. Herrmann J. *J. Opt. Soc. Am.*, **70** (1), 28 (1980).