

Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах $YAG:Nd^{3+}$ *

В.П.Корольков, Р.К.Насыров, А.Г.Полещук, Ю.Д.Арапов, А.Ф.Иванов

Работа посвящена коррекции искажений волнового фронта светового пучка, проходящего через широкоапертурные монокристаллические стержни из $YAG:Nd^{3+}$, которые используются в мощных твердотельных лазерах в качестве активного элемента. Неидеальность кристаллической структуры вызывает деформацию волнового фронта проходящего излучения. С помощью полутонковой технологии созданы конформальные корректоры aberrаций, которые позволили скомпенсировать неоднородности стержней и уменьшить расходимость излучения лазера на порядок. Полученные результаты делают возможным использование оптически неоднородных активных элементов для создания лазеров.

Ключевые слова: лазерный активный элемент, волновой фронт, коррекция aberrаций, конформальный оптический элемент, имитатор.

1. Введение

В настоящее время мощные лазерные комплексы широко применяются в телекоммуникации, обработке материалов, ядерной физике, медицине. Наиболее часто для создания мощных лазеров используют кристаллические активные элементы из $YAG:Nd^{3+}$. Технология роста по методу Чохральского, освоенная отечественной промышленностью, позволяет получить цилиндрические заготовки для активных элементов оптического качества с размерами до 10 мм (число Штреля не менее 0.9). Заготовки большего диаметра выпускаются, но их качество до сих пор остается невысоким.

Искажения волнового фронта при прохождении через оптические элементы являются следствием неоднородности распределения показателя преломления. В кристаллических активных элементах с большой апертурой неравномерность настолько высока, что применение их в качестве активной среды лазера оказывается затруднительным.

Технология получения таких стержней очень трудоемкая, времязатратная и дорогостоящая. При этом выход изделий с высоким оптическим качеством очень мал. Важная задача – улучшение качества стержней. Она может быть решена путем улучшения технологии роста кристаллов, что является достаточно сложным и наукоемким процессом. Наряду с этим для создания лазеров с высоким качеством излучения используют различные способы компен-

сации aberrаций волнового фронта в активном элементе. Такая коррекция для уникальных научных систем проводится, как правило, с помощью адаптивной оптики [1–3], дающей возможность динамической коррекции и оптимизации формы зеркала с целью получения сфокусированного лазерного пучка минимального диаметра. Однако данные системы очень дорогостоящие, они существенно усложняют конструкцию лазера в силу необходимости введения датчика волнового фронта.

В настоящей работе описано использование статических корректоров [4, 5] волнового фронта для исправления статических aberrаций кристаллов. Мы называем такие корректоры конформными оптическими элементами, т. е. оптическими элементами, функция пропускания которых выбирается, исходя из заданных внешних неоптических условий (например, aberrаций лазерного кристалла), а не из набора стандартных оптических поверхностей. Данные элементы с достаточно гладкой фазовой функцией пропускания применялись, например, для коррекции aberrаций лазерного усилителя HELEN [6], однако авторы этой работы не смогли достаточно эффективно скомпенсировать деформацию волнового фронта: число Штреля не превысило 0.2, тогда как для оптически качественной системы оно должно составлять не менее 0.8. Корректоры искажений волнового фронта для лазерных кристаллов должны выдерживать большие плотности мощности, при этом не деградировать, не вносить спектральных искажений, быть компактными и легко встраиваемыми в уже существующие приборы, простыми в настройке и эксплуатации. Разработка экономически эффективной технологии их производства и методики ее применения для широкого круга мощных лазерных систем является весьма актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты использования полутонковой растровой технологии для изготовления широкоапертурных корректоров искажений волнового фронта по фазовым портретам, характерным для активных элементов из $YAG:Nd^{3+}$ с диаметром 20 мм и длиной 100 мм, и рассмотрены вопросы их применения в различных условиях эксплуатации.

* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2012 г.

В.П.Корольков, Р.К.Насыров, А.Г.Полещук. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: victork@iae.nsk.su

Ю.Д.Арапов, А.Ф.Иванов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забабихина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245; e-mail: a.f.ivanov@vniitf.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2012 г., после доработки – 15 ноября 2012 г.

2. Анализ фазовых искажений волнового фронта

Фазовые искажения лазерного пучка в кристаллах активных элементов измеряют с помощью интерферометров различной конструкции [7, 8]. Измерения проводились нами с использованием интерферометра Физо Intellium Z100 [9] с фазовым сдвигом на длине волны $\lambda = 633$ нм (рис.1). Использовалась стандартная схема контроля с плоским опорным волновым фронтом и среднеквадратичным отклонением (СКО) от плоскостности не более $\lambda/20$. Результаты измерений для трех стержней приведены на рис.2.

Поскольку коэффициент преломления кварца, из которого изготавливается корректор, для длин волн 0.633 и

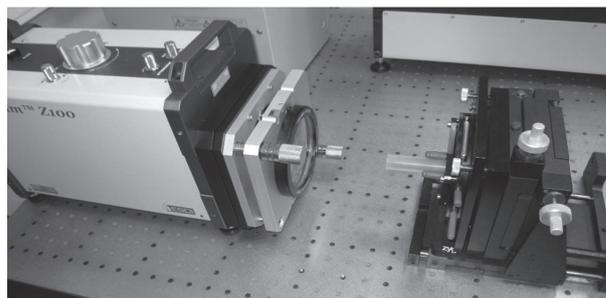


Рис.1. Измерение фазовой карты искажений волнового фронта для стержня с помощью интерферометра.

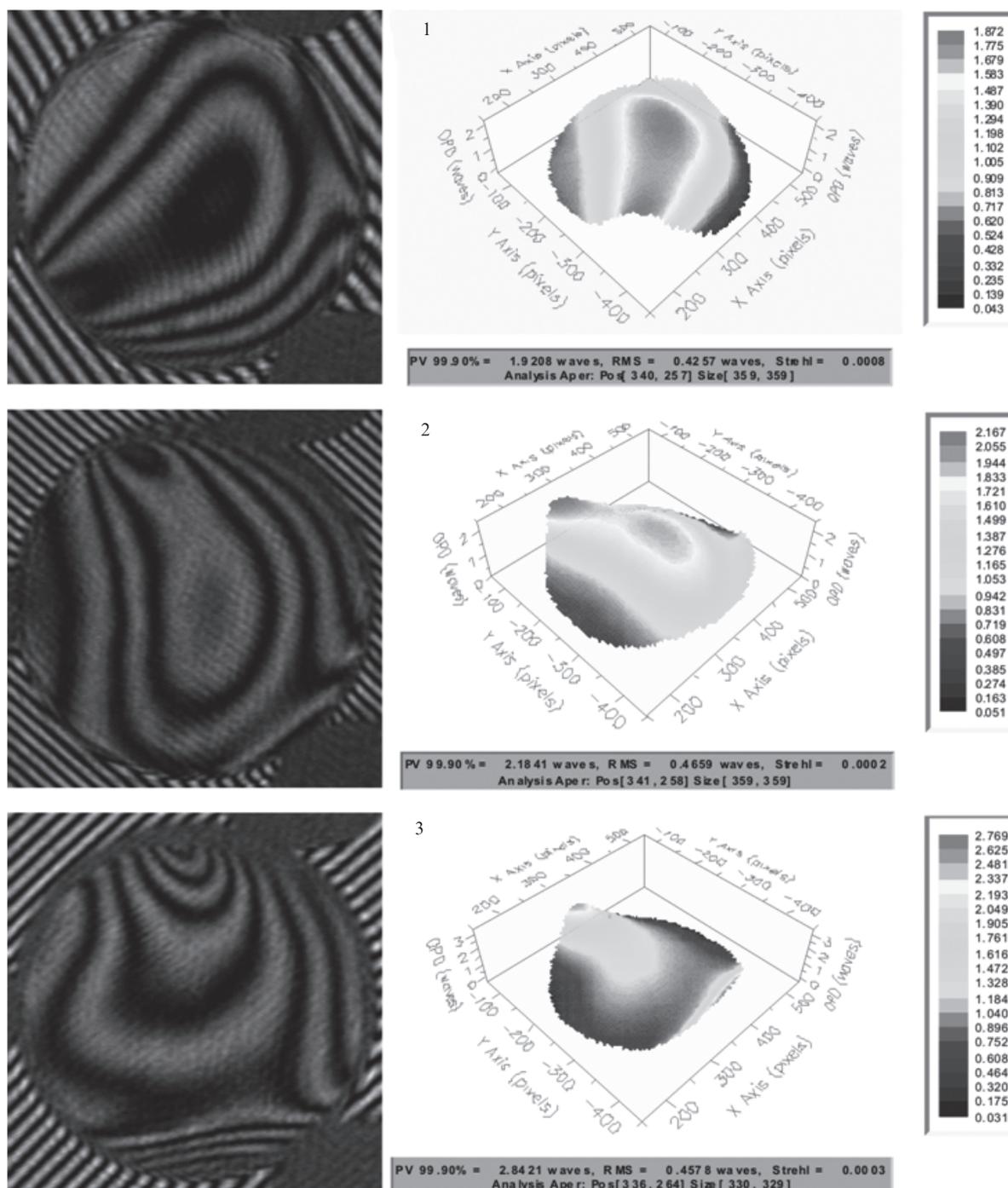


Рис.2. Интерферограммы (слева) и соответствующие им карты фазовых искажений (справа) волнового фронта для трех стержней.

1.064 мкм почти одинаков, можно будет эксплуатировать корректор на обеих длинах волн.

На первом этапе изготавливался корректор для ненагруженного стержня. Дело в том, что под действием излучения накачки в стержне возникают термические искажения показателя преломления активного элемента, которые приводят к деформации волнового фронта. Такие искажения в основном имеют характер так называемой тепловой линзы. В принципе, корректор также может компенсировать и эту линзу, но на практике проще ввести отдельную компенсирующую линзовую систему, которая юстируется для устранения влияния тепловой линзы после запуска генерации лазера.

3. Расчет и изготовление фазовой структуры конформального корректора и дифракционного имитатора искажений стержня на основе фазовых карт

Измеренные фазовые карты содержали большое количество шумов и артефактов, а также высокочастотных искажений. Корректировать такие искажения не имело смысла, т. к. для того, чтобы их убрать, потребовалась бы очень точная юстировка. Поэтому фазовые карты были аппроксимированы полиномами Цернике. Это позволяет компенсировать основные низкочастотные ошибки, причем допуски на юстировку будут достаточно большими, что важно для практического применения. Затем фазовая функция была закодирована в полутоновом шаблоне.

Метод изготовления конформального корректора основан на идее фоторастровой технологии [10], впервые предложенной для изготовления дифракционной оптики. Мы модифицировали этот метод для контактной фотолитографии с зазором. Заданное распределение экспозиции в слое позитивного фоторезиста S1828 формировалось с помощью растриванного фотошаблона, находящегося на расстоянии 0.4–0.5 мм от поверхности фоторезиста. Фоторезист был нанесен на кварцевую подложку. Глубина рельефа в фоторезисте после проявления в щелочном растворе почти пропорциональна экспозиции.

Полутоновый шаблон представлял собой амплитудную дифракционную структуру, сформированную в пленке хрома прямой лазерной записью [11] на круговой записывающей системе CLWS-300IAE в ИАиЭ СО РАН. Его структура состояла из прямоугольных ячеек с частичным заполнением, которое соответствовало расчетной функции распределения экспозиции. Таким образом, полностью заполненная элементарная ячейка соответствовала минимальному пропусканию и, следовательно, максимальной высоте микрорельефа при позитивного фоторезиста как формообразующего материала. Полностью пустая ячейка, наоборот, соответствовала максимальному пропусканию и максимальной глубине микрорельефа. Фрагмент структуры растриванного шаблона показан на рис.3.

Минимальная ширина прозрачных и непрозрачных ячеек была выбрана равной 1.5 мкм из соображений обеспечения ее максимальной воспроизводимости во всем диапазоне изменения скорости сканирования лазерного пучка при записи на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300IAE. Для обеспечения широкого дина-

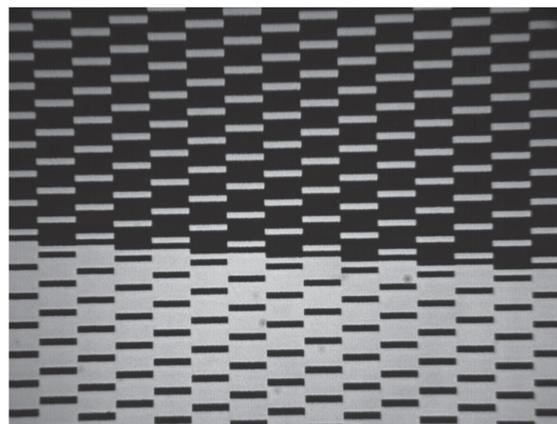


Рис.3. Микрофотография структуры полутонового шаблона.

мического диапазона модуляции экспозиции размер ячеек был выбран равным 20 мкм.

Полутоновый шаблон был изготовлен на стандартной фотолитографической пластине размером 127×127 мм, покрытой пленкой хрома. В центре расположены маски для корректоров стержней. На периферии были сделаны различные тестовые структуры для отработки технологии формирования микрорельефа. Групповой подход в использовании нами технологии позволяет формировать одновременно свыше 10 корректоров для различных кристаллов, что существенно снижает затраты на изготовление.

Микрорельеф формировался после проявления экспонированного фоторезиста и затем переносился ионно-плазменным травлением в кварцевую подложку. Скорости травления кварца и фоторезиста в используемой нами установке травления Plasmalab 80Plus примерно одинаковы, поэтому глубина рельефа в фоторезисте выбирается равной той, что задана для плавленого кварца. В результате изготовленный корректор представлял собой оптическую подложку, одна из сторон которой имела форму, компенсирующую абберации стержней, а вторая была отполирована до оптического качества $\lambda/20$.

Каждый корректор был окружен тестовой линейной решеткой с треугольным профилем штрихов, имеющих период 1000 мкм. Эта решетка использовалась для контроля глубины и формы рельефа на всех технологических этапах с помощью оптического профилометра – микроинтерферометра белого света WLI [12]. Типичная форма

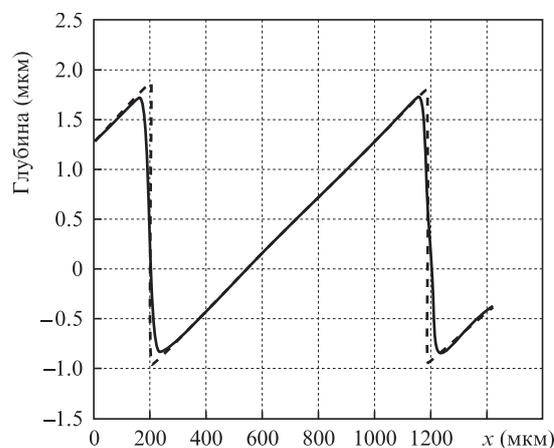


Рис.4. Расчетная (штриховая кривая) и измеренная (сплошная кривая) профилограммы тестовой линейной решетки с периодом штрихов 1000 мкм.

поверхности тестовой решетки показана на рис.4. Применение лазерного интерферометра Intellium Z100 с фазовым сдвигом возможно только для контроля готового корректора, а на стадии формирования рельефа в фоторезисте деструктивная интерференция в слое прозрачной пленки с показателем преломления, отличным от показателя преломления подложки, делает его непригодным. Интерферометр белого света существенно меньше подвержен влиянию интерференции света в пленке в силу некогерентности широкополосного источника, но он может контролировать только небольшие структуры.

4. Изготовление имитатора активного элемента

Изготовление конформального элемента с заданным плавным профилем – сложный многоступенчатый технологический процесс. При этом на разных этапах возникают различного рода погрешности: нелинейность характеристик фоторезиста, неоднородность экспозиции, неоднородность проявления и травления и т.п. Для того чтобы проконтролировать окончательную форму поверхности без участия активного элемента, был изготовлен дифракционный имитатор абберации стержней. С помощью такого имитатора можно определить погрешности изготовления фазового корректора и скорректировать соответствующим образом полутоновой шаблон (рис.5,а) или внести изменения в технологический процесс. Имитатор позволяет провести проверку правильности изготовления корректора в том случае, когда корректируемого стержня нет в наличии.

Имитатор представляет собой линейную амплитудную дифракционную решетку, которая имеет заданные искажения. Волновой фронт отраженного от имитатора светового пучка, дифрагировавшего в первый порядок, приобретает искажения, аналогичные возникающим при его прохождении через ненагруженный стержень активного элемента. Угол наклона имитатора составляет 1° . Вокруг имитатора расположена линейная решетка, которая возвращает свет строго назад при наклоне имитатора на 1° . Это позволяет с высокой точностью выставить имитатор под нужным углом. Имитаторы для трех стержней были изготовлены на одной подложке диаметром 60 мм (рис.5,б).



Рис.5. Фотографии изготовленного полутонового шаблона (а) и дифракционного имитатора стержней (б).

5. Экспериментальная проверка изготовленных конформальных корректоров и имитаторов стержней

Изготовленные корректоры и имитаторы были проверены с помощью интерферометра Intellium Z100. Использовалась та же схема измерения, что и для контроля

стержней. На первом этапе проверялось соответствие измеренных фазовых карт дифракционных имитаторов и корректируемых стержней. Корректор и имитатор работают на основе разных принципов и изготавливались по разной технологии. Имитатор изготавливался в виде амплитудного отражающего дифракционного элемента по бинарной технологии, обеспечивающей необходимую точность трансформации волнового фронта, но непригодной в силу малой дифракционной эффективности таких элементов для создания корректоров. Корректор был выполнен по сложной многоступенчатой технологии и работал в режиме пропускания. Таким образом, соответствие фазовых функций этих приборов гарантировало то, что корректор был изготовлен без технологических ошибок.

Плоский пучок проходил через корректор, затем отражался от соответствующего имитатора и проходил через корректор второй раз. В этом случае абберации волнового фронта должны компенсироваться при правильном взаимном расположении корректора и имитатора. На рис.6,а и б показаны измеренные по отдельности интерферограммы имитатора стержня 1 (рис.2) и соответствующего корректора. Они похожи с точностью до фазового сдвига. Фазовая карта на рис.6,в демонстрирует результат их совместной работы после настройки взаимного расположения, а на рис.6,г приведен результат их совместной работы в численном эксперименте, исключая ошибку настройки. В последнем случае пиковая амплитуда искажений уменьшается в два раза. Численный эксперимент показывает, что СКО может достигать $\lambda/40$ на длине волны 633 нм, что намного превышает наши требования.

Корректоры были также проверены вместе с активным элементом в РФЯЦ – ВНИИТФ с помощью датчика Шака – Гартмана на рабочей длине волны. Настройка схемы измерений проводилась таким образом, чтобы искажения волнового фронта были минимальными при сохранении размера световой апертуры.

По результатам проверки (рис.7) было выявлено, что после коррекции СКО волнового фронта для всех активных элементов снизилось до 0.042 мкм и менее, т.е. до $\sim \lambda/15$. При этом, исходя из критерия Маршала для малых волновых аббераций, число Штреля составляет не

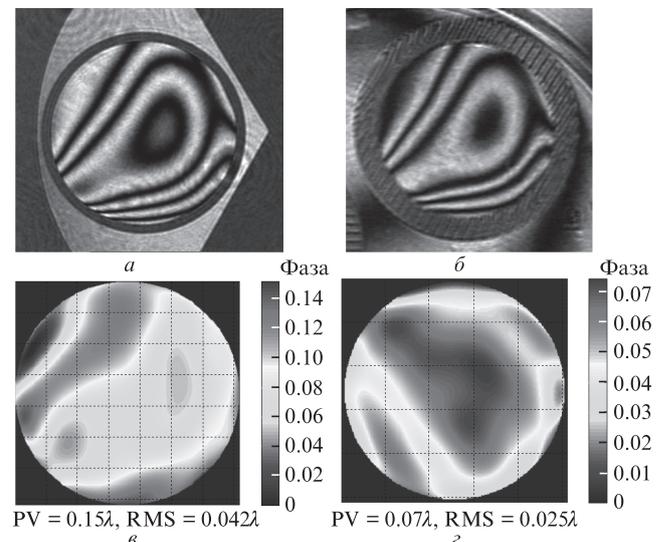


Рис.6. Интерферограммы имитатора (а) и корректора (б) волнового фронта, фазовая карта корректора с имитатором (в), разность фазовых карт имитатора и корректора (г).

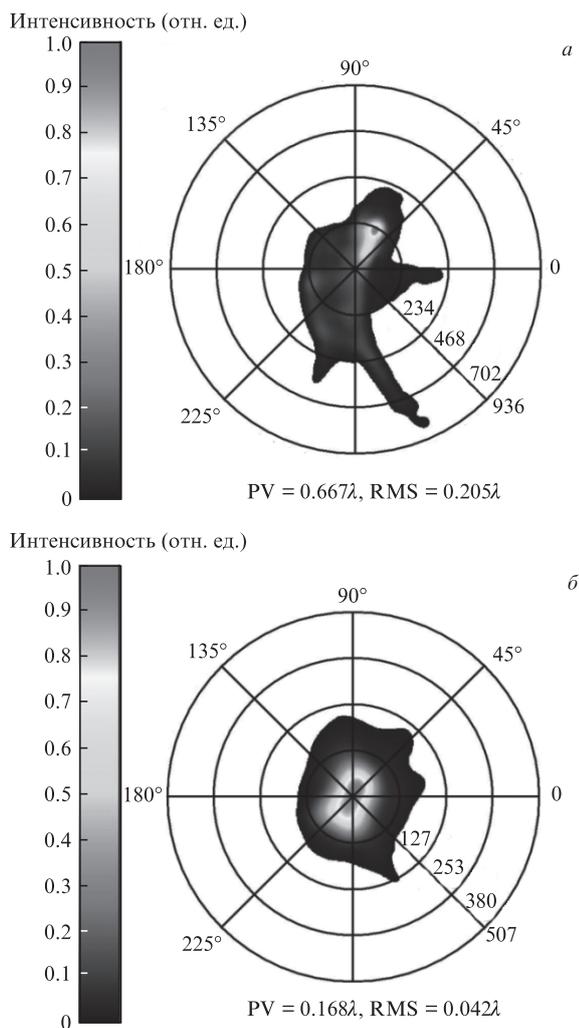


Рис.7. Функции рассеяния точки для активного элемента без коррекции (а) и после его коррекции (б) в полярных координатах (значения полярного радиуса даны в микрометрах).

менее 0.93. Испытания действующей лазерной системы с конформальным корректором показали, что расходимость излучения была снижена в 10 раз [13].

Также была экспериментально определена лучевая стойкость изготовленных корректоров. При воздействии импульсного лазерного излучения с длиной волны 1.064 мкм и длительностью 4 нс она составила не менее 17 Дж/см².

6. Заключение

Используемые в настоящее время методы коррекции и улучшения качества излучения мощных твердотельных лазеров (ОВФ, адаптивная оптика, пространственная

фильтрация) достаточно эффективны, однако они приводят к увеличению массогабаритных параметров, усложнению конструкции лазера, снижению его надежности и КПД. Альтернативным способом коррекции искажений волнового фронта, позволяющим совместить предельную яркость излучения и высокий КПД лазера, является применение конформальных оптических элементов. Достоинство этих элементов – простота в эксплуатации, минимальные массогабаритные параметры, минимальные потери при использовании антиотражающего покрытия.

Для апробации конформальных корректоров нами были измерены фазовые карты активных элементов из YAG: Nd³⁺ с диаметром 20 мм и длиной 100 мм. На основе измерений были рассчитаны и изготовлены корректирующие элементы. После этого была проведена совместная экспериментальная проверка процессов компенсации искажений волнового фронта в условиях, аналогичных тем, в которых были получены фазовые портреты. Показано, что СКО волнового фронта после коррекции составили не более чем $\lambda/20$ на 80% апертуры.

Использованная технология изготовления позволяет создавать корректоры с глубиной рельефа до 3–4 мкм при диаметре светового пучка не менее 20 мм. Испытания лучевой прочности корректоров показали, что порог разрушения превышает 17 Дж/см² на длине волны 1.064 мкм при длительности импульсов 4 нс. Расходимость выходного излучения лазерной системы при использовании конформального корректора была снижена в 10 раз [13].

Работа выполнялась при частичной поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта №112 СО РАН, проекта 24-8 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, а также грантов РФФИ № 12-02-00974-а и 12-02-01118-а.

1. Stephens R.R., Lind R.C. *Opt. Lett.*, **3**, 79 (1978).
2. Kudryashov A.V., Weber H. *Laser Resonators: Novel Design and Development* (Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 1999).
3. Гаранин С.Г., Маначинский А.Н., Стариков Ф.А., Хохлов С.В. *Автометрия*, **48** (2), 30 (2012).
4. Lobachev V.V., Strakhov S.Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 666 (1998).
5. Bett T.H. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4440**, 93 (2001).
6. Naynam C.A., Wegner P.J., Auerbach J.M., et al. *Appl. Opt.*, **46**, 3276 (2007).
7. Храмов В.Ю. Докт. дис. (С.-Петербург, ЛИТМО, 2002).
8. Микерин С.Л., Пальчикова И.Г., Угожаев В.Д. *Автометрия*, **41**(1), 71 (2005).
9. http://www.engsynthesis.com/pdfs/ESDI_Intellium_Z100_DS.pdf.
10. Полещук А.Г. *Автометрия*, **26** (3), 66 (1991).
11. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 1295 (1999).
12. <http://breitmeier.de/en/optical-profilometry/wli-lab>.
13. Арапов Ю.Д., Полещук А.Г., Корольков В.П. и др. *Материалы молодежной конкурс-конференции «Фотоника и оптические технологии–2012»* (Новосибирск, 2012, с. 32).