

Формирование пространственного профиля лазерного пучка в тракте мощных неодимовых установок

С.А.Бельков, И.Н.Воронич, С.Г.Гаранин, Б.Г.Зималин, А.В.Савкин, О.А.Шаров

Предложено устройство однокоординатного пространственного профилирования лазерного пучка, которое позволяет в усилительном тракте мощных лазерных установок на неодимовом стекле с широкоапертурными каскадами на основе дисковых активных элементов скомпенсировать пространственные искажения лазерного пучка, возникающие вследствие неоднородного по апертуре распределения коэффициента усиления излучения. Описан принцип действия, порядок расчёта параметров ключевых элементов, а также результаты расчётных и экспериментальных исследований формирования пространственных профилей интенсивности лазерного пучка на выходе предложенного устройства. Рассмотрена возможность применения устройства как в однопучковой, так и в многопучковой оптических системах.

Ключевые слова: однокоординатное профилирование пучка, поляризация, фазовая пластинка, матрица пучков, дисковый усилитель.

1. Введение

В большинстве современных лазерных установок на неодимовом стекле, предназначенных для проведения исследований в области управляемого термоядерного синтеза, в главном усилительном тракте применяются широкоапертурные усилительные каскады на основе дисковых активных элементов (АЭ) [1, 2]. Как правило, диски выполнены в виде прямоугольных плит, ориентированных под углом Брюстера относительно проходящего через каскад излучения. Использование дисковых каскадов в главном усилительном тракте многопроходных лазерных систем позволяет значительно увеличить апертуру усиленного пучка и, как следствие, повысить энергию излучения на выходе установок до мегаджоульного уровня [3]. Одним из недостатков дисковых каскадов следует признать формирование неравномерного по апертуре каскада коэффициента усиления излучения, что приводит к искажениям изначально равномерного пространственного профиля интенсивности пучка. Неоднородность коэффициента усиления возникает вследствие сброса запасённой энергии из-за суперлюминесценции, наиболее значительной вдоль большей стороны прямоугольного АЭ [4]. В пределах одного АЭ неоднородность коэффициента усиления может быть едва заметной, но, поскольку силовой тракт мощных лазерных систем содержит десятки АЭ и, как правило, работает в многопроходном режиме усиления, результирующие искажения пространственного профиля пучка оказываются существенными.

Искажения пучка при усилении можно скомпенсировать, задав на входе силового тракта пространственную

структуру пучка специальной формы. В работах [4, 5] показано, что на входе силового тракта с каскадами на основе дисковых АЭ компенсирующий профиль пучка представляет собой протяжённую вдоль одной координаты параболу с отношением минимального уровня интенсивности к максимальному, примерно равным 0.35. Двумерный и трёхмерный пространственные профили пучков, приведённые в работах [4, 5], представлены на рис.1.

Для формирования компенсирующего профиля (рис.1) применяют специальный фильтр с переменной по апертуре оптической плотностью, который изготавливают нанесением на поверхность прозрачной подложки тонкого слоя хрома разной толщины [5]. Подобные фильтры обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, исключена какая-либо регулировка формы пространственного профиля пучка с применением одного фильтра (при необходимости коррекции профиля требуется изготавливать новый фильтр). Во-вторых, тонкоплёночные металлические покрытия обладают низкой лучевой прочностью, что сильно ограничивает возможности применения подобных фильтров в тракте мощных лазерных систем.

Большинство известных устройств формирования пространственного профиля пучка, обладающих высокой лучевой прочностью, либо предназначены для формирования аксиально симметричного профиля пучка, либо не позволяют проводить регулировку профиля без замены ключевых оптических элементов [6].

Отдельный класс устройств основан на апертурном преобразовании поляризации пучка фазовыми пластинками с последующей поляризационной селекцией. Фазовые пластинки в подобных устройствах, как правило, выполняются в виде плоскосферических линз [4, 7], а формируемый профиль пучка также аксиально симметричный.

В настоящей работе предложено оригинальное устройство [8] однокоординатного формирования и регулировки профиля лазерного пучка (без замены оптических элементов), позволяющее скомпенсировать пространственные неоднородности, вносимые неравномерным по апертуре коэффициентом усиления излучения в силовом

С.А.Бельков, И.Н.Воронич, С.Г.Гаранин, Б.Г.Зималин, А.В.Савкин, О.А.Шаров. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: voronich@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 18 декабря 2014 г., после доработки – 2 февраля 2015 г.

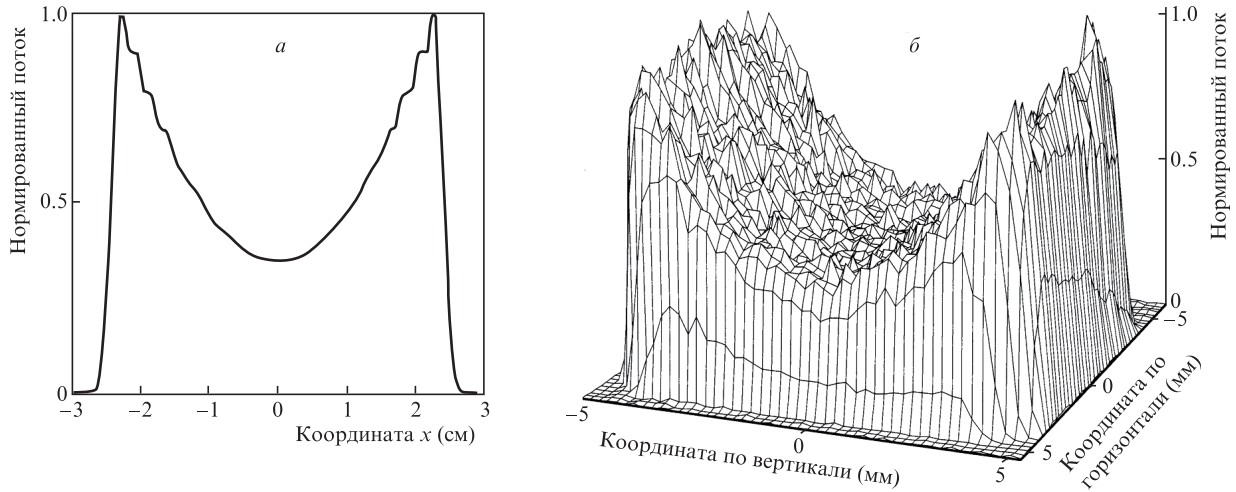


Рис.1. Двумерный (а) и трёхмерный (б) пространственные профили интенсивности пучка на входе силового тракта мощной лазерной установки на неодимовом стекле [4, 5].

тракте мощных лазерных установок на неодимовом стекле с каскадами на основе широкоапертурных дисковых АЭ. Принцип действия устройства основан на неоднородном апертурном преобразовании поляризации исходного излучения по определённому закону с последующей селекцией поляризации выходного пучка. Ключевым элементом устройства является двулучепреломляющая плоскопараллельная пластинка, помещённая между линзами телескопа.

2. Принцип формирования пространственного профиля пучка

На рис.2 представлена оптическая схема предлагаемого устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка [8].

На вход схемы подаётся линейно поляризованный пучок, который, пройдя линзу 2 телескопа, превращается в конус лучей, падающих на поверхность фазовой пластинки 3 под различными углами. В двулучепреломляющей среде фазовой пластинки 3 падающие лучи распадаются на обыкновенный и необыкновенный и распространяются в среде с разными фазовыми скоростями. Зависимость показателя преломления необыкновенной волны от угла между волновым вектором и оптической осью кристалла (ось z) приводит к тому, что для лучей с различными углами падения в разных плоскостях формируются неодинаковые условия изменения показателя преломления необыкновенной волны, а следовательно, неодинаковые изменения состояния поляризации излучения на выходе фазовой пластинки. Посредством поляризатора 5, расположенного после линзы 4 телескопа, изменения поляризации преобразуются в изменения интенсивности.

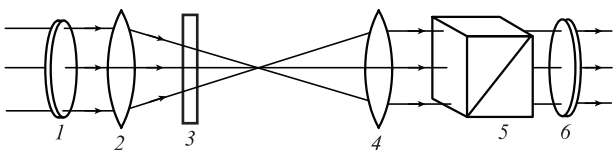


Рис.2. Оптическая схема устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка: 1, 6 – полуволновые фазовые пластинки; 2, 4 – линзы телескопа; 3 – фазовая пластинка; 5 – поляризатор.

Рассчитаем пространственный профиль интенсивности пучка на выходе поляризатора в соответствии со схемой на рис.2. Введём систему координат XYZ так, чтобы фазовая пластинка располагалась в плоскости XY (рис.3).

Пусть на поверхность фазовой пластинки падает под углом γ_{inc} отдельный линейно поляризованный в плоскости XZ луч, проекции волнового вектора k_{inc} которого на плоскости XZ и YZ составляют с осью Z углы α и β соответственно. Обозначим θ_{zn} – угол между осью z фазовой пластинки и нормалью n к её поверхности. Для расчёта интенсивности излучения на выходе поляризатора используем матричный метод Джонса [9]. Плоскость пропускания поляризатора, расположенного на выходе фазовой пластинки, параллельна оси X. Тогда интенсивность излучения на выходе поляризатора описывается выражением

$$I_x = C^4 + S^4 + 2C^2S^2\cos\delta, \tag{1}$$

где $C = \cos\theta_{zE}$; $S = \sin\theta_{zE}$; θ_{zE} – угол между проекцией оси z фазовой пластинки на плоскость XY и вектором E поляризации исходного излучения; δ – разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами.

Как видно из (1), интенсивность прошедшего через поляризатор излучения зависит от разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, которая, согласно [10], задаётся следующим выражением:

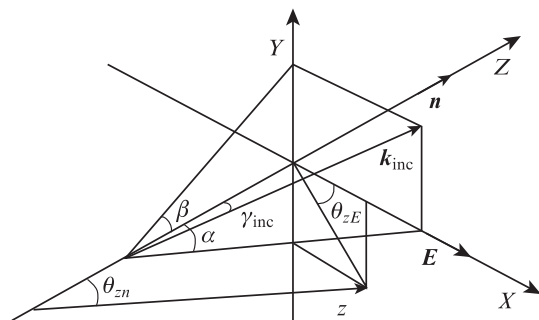


Рис.3. Расположение вектора поляризации E, волнового вектора падающего луча k_{inc} , оси z фазовой пластинки и нормали n к её поверхности в системе координат XYZ.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{h}{\cos \gamma_{\text{refr}}^o} n_o - \frac{h}{\cos \gamma_{\text{refr}}^e} n_e + h \sin \gamma_{\text{inc}} (\tan \gamma_{\text{refr}}^e - \tan \gamma_{\text{refr}}^o) \right], \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения; h – толщина пластинки; γ_{refr}^o и γ_{refr}^e – углы преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; n_o – показатель преломления обыкновенной волны; n_e – показатель преломления необыкновенной волны, зависящий от направления распространения луча в фазовой пластинке.

По формуле (1) с учётом формулы (2) проведён расчёт пространственного профиля интенсивности пучка квадратной апертуры на выходе поляризатора при различных углах θ_{zE} . Плоскость поляризации, плоскость пропускания поляризатора, ось X системы координат принимались параллельными друг другу и вращались одновременно.

На рис.4,а представлена картина интенсивности с пространственным профилем на выходе поляризатора, рассчитанные для фазовой пластинки из кристалла ВВО ($n_o = 1.6551$, $n_e = 1.5426$) толщиной 1.5 мм при $\theta_{zE} = 28.4^\circ$, причём ось z фазовой пластинки расположена в плоскости XU параллельно горизонтальным сторонам квадрата апертуры исходного пучка ($\theta_{zn} = 90^\circ$). Длина волны излучения принималась равной 1053 нм. Видно, что картина интенсивности представляет собой совокупность линий с одинаковым уровнем минимальной интенсивности.

При изменении угла θ_{zn} , когда ось z и нормаль к поверхности фазовой пластинки остаются в той же плоскости, симметрия картины интенсивности нарушается, частота расположения линий одинаковой интенсивности увеличивается, при этом уменьшается их кривизна (рис.4,б,в). В уменьшенном диапазоне углов падения лучей на поверхность фазовой пластинки можно добиться расположения только одной полосы с минимальным уровнем интенсивности в центре картины (рис.4,з).

Одновременным вращением плоскости поляризации исходного пучка и плоскости пропускания поляризатора при фиксированном положении фазовой пластинки можно регулировать уровень минимальной интенсивности излучения в диапазоне от 0 до 1 относительно максималь-

ной интенсивности (в схеме на рис.2 для вращения плоскости поляризации исходного пучка и возврата плоскости поляризации пучка в исходное состояние после прохождения поляризатора применяются полуволновые пластинки 1 и б). Картины интенсивности с пространственными профилями при $\theta_{zE} = 28.4^\circ$, 9.2° и 45° представлены на рис.4,з–е.

Сравнительный анализ пространственных профилей интенсивности пучков, представленных на рис.1 и 4,з, показал, что максимальное расхождение интенсивности на отдельных участках профилей составляет менее 5%, что позволяет считать предложенное устройство пригодным для формирования и регулировки требуемого пространственного профиля пучка на входе силового тракта мощных неодимовых установок с широкоапертурными дисковыми АЭ.

Приведённая на рис.2 оптическая схема может быть дополнена зубчатой апертурной диафрагмой, установленной на входе схемы, и селектирующей диафрагмой, установленной в общей фокальной плоскости линз телескопа. Данная компоновка оптической схемы позволит одновременно с формированием внутренней структуры пространственного профиля задавать размер и форму апертуры, а также проводить аподизацию пучка.

Необходимо отметить, что оптическая схема на рис.2 требует стабильности длины волны излучения. Например, исследования показали, что изменение длины волны излучения на $\Delta\lambda = \pm 1$ нм при $\lambda = 1053$ нм приводит к поперечному сдвигу положения уровня минимальной интенсивности, при котором разность уровней максимальной интенсивности на краях апертуры пучка составляет 10% при изначальных одинаковых значениях. Кроме того, проведённые для фазовой пластинки из кристалла ВВО расчёты показали, что аналогичный сдвиг уровня минимальной интенсивности происходит при изменении температуры кристалла на 14°C .

Применение широкополосного излучения приводит к тому, что для каждой спектральной компоненты уровень минимальной интенсивности в пространственном профиле поперечно смещается по апертуре пучка. Результирующий пространственный профиль складывается из сово-

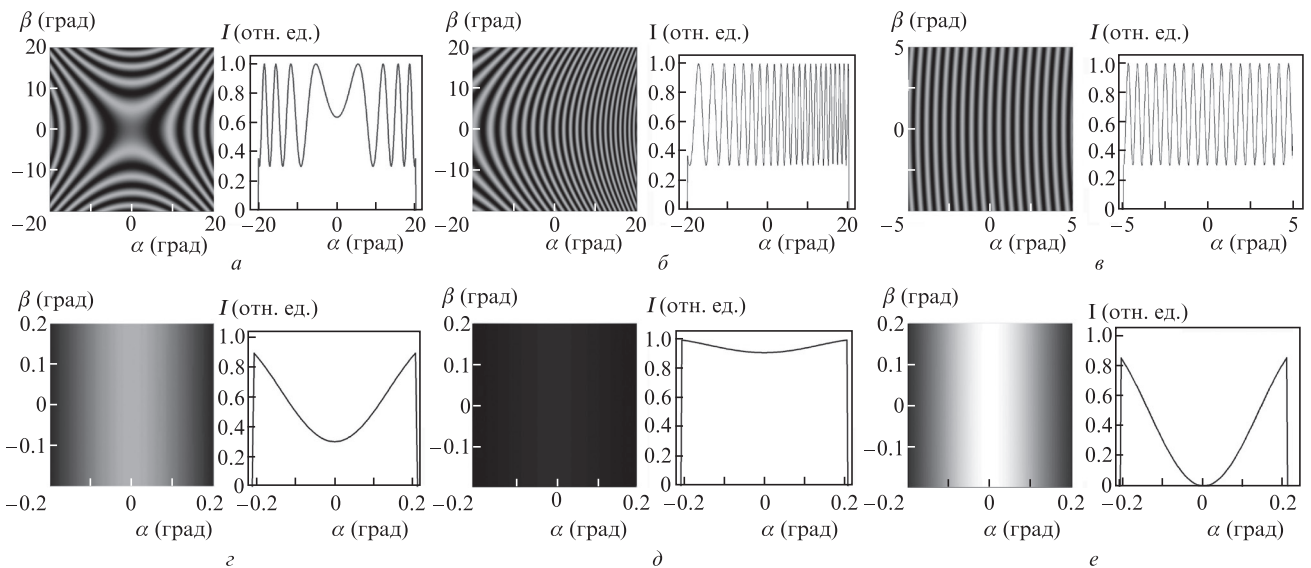


Рис.4. Расчётные картины интенсивности излучения с пространственными профилями на выходе поляризатора при углах θ_{zE} и θ_{zn} , равных 28.4° и 90° (а), 28.4° и 80° (б), 28.4° и 40° (в, з), 9.2° и 40° (д), 45° и 40° (е).

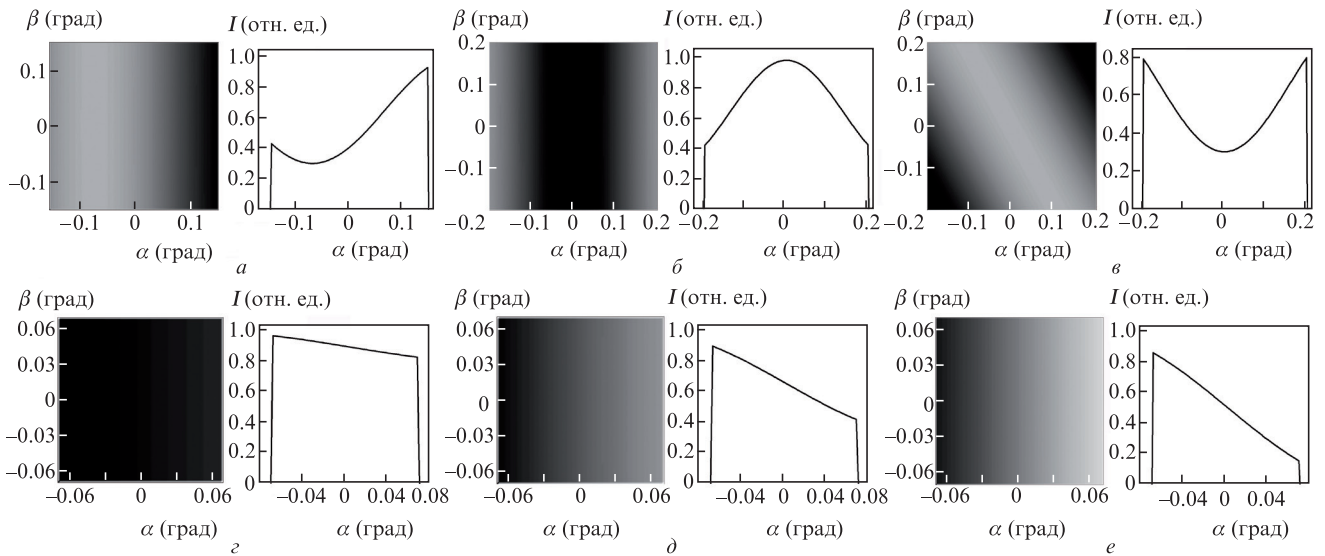


Рис.5. Расчётные картины интенсивности с пространственными профилями пучков на выходе поляризатора при наклонах фазовой пластинки (*a*, *b*), вращении фазовой пластинки вокруг оптической оси системы (*в*), изменении угла θ_{zE} при уменьшенном диапазоне углов падения лучей на поверхность фазовой пластинки (*г*–*е*).

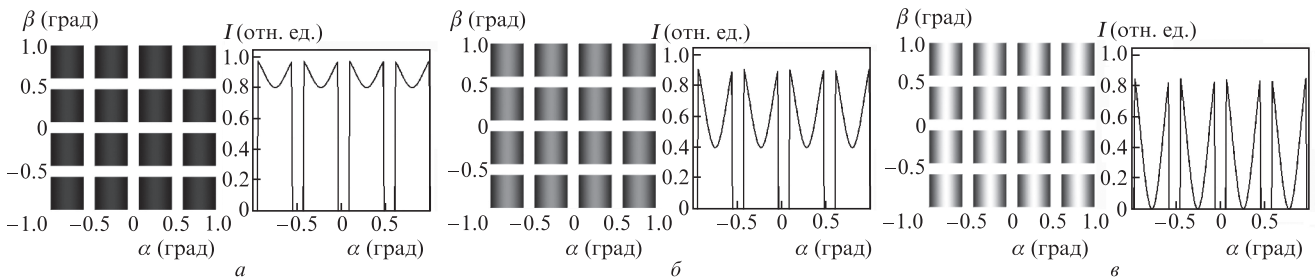


Рис.6. Расчётные картины интенсивности с профилями интенсивности матрицы пучков на выходе поляризатора при $\theta_{zE} = 13.3^\circ$ (*a*), 25.4° (*б*) и 45° (*в*).

купности профилей каждой спектральной компоненты, что, в первую очередь, приводит к изменению уровней минимальной и максимальной интенсивности, которые при увеличении ширины спектра стремятся к общему среднему значению. Тем не менее расчёты показывают, что увеличение ширины спектра излучения, например, до 5 нм приводит к изменению отношения минимальной и максимальной интенсивности в пучке на 4%, что можно компенсировать дополнительным изменением угла θ_{zE} .

В ряде приложений может потребоваться изменение направления полосы одинаковой интенсивности в апертуре пучка. В этом случае необходимо сначала повернуть на требуемый угол вокруг оптической оси системы фазовую пластинку \mathcal{Z} и дальнейший отсчёт угла θ_{zE} вести относительно установленного положения оси z . Некоторые дополнительные возможности формирования пространственного профиля пучка на выходе поляризатора представлены на рис.5.

3. Формирование пространственного профиля нескольких пучков

Картина интенсивности, приведённая на рис.4,в, показывает, что, задав соответствующий диапазон углов падения лучей на поверхность фазовой пластинки \mathcal{Z} (см. рис.2), можно сформировать в картине интенсивности на выходе поляризатора 5 несколько полос с чередующимся уровнем одинаковой интенсивности. Если исходное излу-

чение подаётся в виде матрицы параллельных пучков заданной апертуры, расположенных на определённом расстоянии друг от друга, то каждый пучок может быть совмещён с одной из таких полос. В этом случае изменение угла θ_{zE} позволит регулировать уровень минимальной интенсивности одновременно во всех пучках.

На рис.6 представлены расчётные картины интенсивности с пространственными профилями матрицы из 16 пучков, формируемые на выходе поляризатора при различных углах θ_{zE} для фазовой пластинки из кристалла KDP ($n_o = 1.4944$, $n_e = 1.46035$, $\theta_{zn} = 43^\circ$) толщиной 5 мм. Видно, что минимальный уровень интенсивности меняется одинаково во всех пучках одновременно, следовательно, однопучковую оптическую схему устройства можно применять для формирования пространственного профиля нескольких пучков, что может оказаться полезным в тракте многоканальных лазерных установок.

4. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальная отработка устройства формирования пространственного профиля пучка велась по схеме на рис.2 с применением специально сформированного аподизированного пучка квадратной апертуры ($\lambda = 1053$ нм). В экспериментах по отработке однопучкового варианта оптической схемы размер апертуры пучка составлял 12×12 мм, фокусное расстояние первой линзы телескопа $f_1 =$

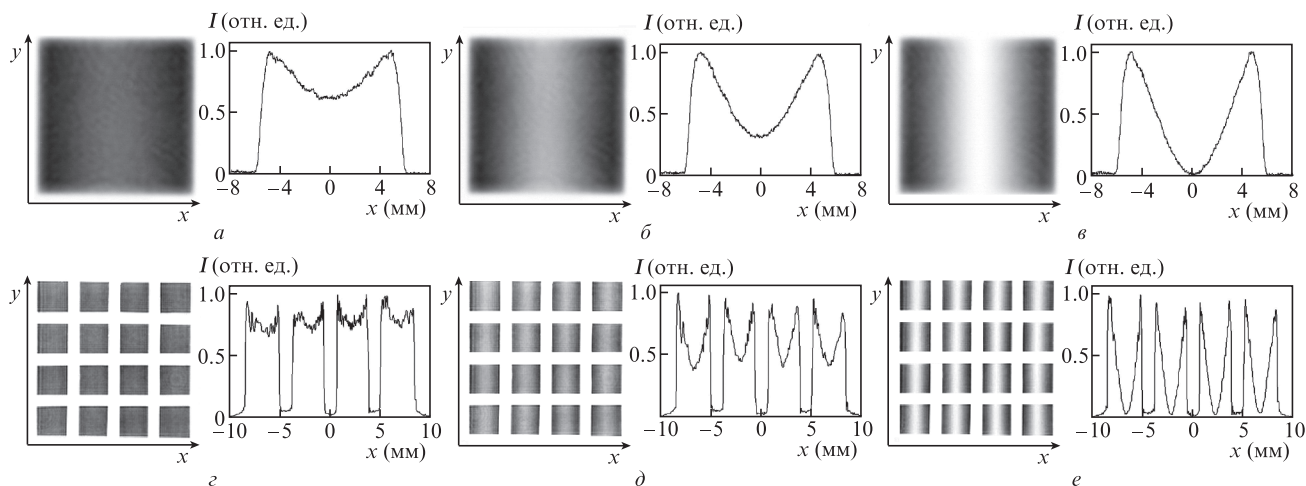


Рис.7. Экспериментально измеренные ближние зоны с профилями интенсивности пучков на выходе однопучкового (a – c) и 16-пучкового (d – f) варианта устройства пространственного профилирования при углах $\theta_{zE} = 19.6^\circ$ (a), 28.4° (b), 45° (c , e), 14° (d) и 21° (f).

120 см, фазовой пластинкой служил кристалл α -ВВО толщиной 1.5 мм с углом $\theta_{zn} = 40^\circ$. В экспериментах по обработке многопучкового варианта оптической схемы исходный лазерный пучок размером 17×17 мм посредством матрицы диафрагм с резким краем предварительно разделили по апертуре на 16 параллельных пучков размером $\sim 3.3 \times 3.3$ мм (расстояние между пучками 1.3 мм). В качестве фазовой пластинки применялся кристалл KDP (толщина 5 мм, $\theta_{zn} = 43^\circ$), $f_1 = 70$ см. Экспериментально измеренные ближние зоны с пространственными профилями интенсивности пучков на выходе устройства формирования профиля пучка при различных значениях угла θ_{zE} представлены для однопучкового варианта на рис.7, a – c , а для 16-пучкового – на рис.7, d – f .

Экспериментальные результаты (рис.7) хорошо согласуются с расчётами, они подтвердили возможность практической реализации предложенного устройства, позволяющего формировать и регулировать в широких пределах пространственный профиль одного или нескольких лазерных пучков. Локальные пространственные неоднородности интенсивности профилей пучков на рис.7, d – f связаны с влиянием дифракционных эффектов, заметно проявляющихся при малых размерах апертур пучков.

5. Заключение

Предложена, рассчитана и экспериментально исследована оригинальная оптическая схема устройства формирования пространственного профиля лазерного пучка для компенсации пространственных искажений, обусловленных неоднородным по апертуре коэффициентом усиления излучения в силовом тракте мощных лазерных установок на неодимовом стекле с широкоапертурными дисковыми АЭ. Показана возможность формирования профиля пучка, форма которого практически совпадает с аналогичной формой пучков, применяемых в тракте со-

временных лазерных установок. Достоинством устройства является возможность регулировки формы пространственного профиля пучка в широких пределах без замены оптических элементов. Предложен вариант оптической схемы устройства с применением зубчатой апертурной диафрагмы, посредством которой одновременно с пространственным профилированием можно проводить аподизацию пучка. Для многоканальных лазерных систем предложена схема устройства, выполненная на базе однопучкового варианта, но позволяющая проводить одновременную регулировку пространственного профиля сразу нескольких лазерных пучков. Устройство может оказаться наиболее полезным на стадии ввода в эксплуатацию мощных неодимовых установок, когда отработка различных режимов усиления потребует оперативной коррекции пространственного профиля интенсивности лазерных пучков на входе главного усилительного тракта установки.

1. Van Wouterghem B.M., Murray J.R., Campbell J.H., Speck D.R., Barker C.E., Smith I.C., Browning D.F., Behrendt W.C. *Appl. Opt.*, **36**, 4932 (1997).
2. Cavallier C., Fleuret N., Di-Nicola J.-M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5580**, 443 (2005).
3. Burkhart S.C., Bliss E., Di Nicola P., Kalantar D., Lowe-Webb R., McCarville T., Nelson D., Salmon T., Schindler T., Villanueva J., Wilhelmsen K. *Appl. Opt.*, **50**, 1136 (2011).
4. Van Wouterghem B.M., Salmon J.T., Wilcox R.W. *Inertial Confinement Fusion*, **5**, 45 (1995).
5. Auerbach J.M. *Inertial Confinement Fusion*, **5**, 80 (1995).
6. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1990, с. 156).
7. Паперный С.Б., Серебряков В.А., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **5**, 2059 (1978).
8. Зималин Б.Г., Савкин А.В., Шаров О.А. Патент РФ № 2410735 (приоритет от 27.01.2009).
9. Джеррард А., Бёрч Д.М. *Введение в матричную оптику* (М.: Мир, 1978).
10. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973, с. 642).