

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.373

ИССЛЕДОВАНИЕ АПОДИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ЗУБЧАТЫМИ АПЕРТУРНЫМИ ДИАФРАГМАМИ ДЛЯ МОЩНЫХ УСТАНОВОК ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2015 г. С. А. Бельков, доктор физ.-мат. наук; И. Н. Воронич, канд. физ.-мат. наук;
С. Г. Гаранин, член-корр. РАН; Б. Г. Зималин; Н. Н. Рукавишников, канд. физ.-мат. наук;
А. В. Савкин; О. А. Шаров, канд. физ.-мат. наук

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл.

E-mail: rukav@otd13.vniief.ru

Исследовано формирование пространственного профиля интенсивности лазерного пучка в системе “квадратная апертурная зубчатая диафрагма – пространственный фильтр”. Рассмотрено влияние различных форм зубцов диафрагмы, а также углов селекции излучения в пространственном фильтре на формируемый профиль пучка. Проведен анализ дальних зон пучков, сформированных зубчатыми диафрагмами. Особое внимание уделено вопросу сохранения пространственной структуры аподизированных пучков при свободном распространении в пространстве.

Ключевые слова: пространственный профиль пучка, квадратная апертура, аподизация, зубчатая диафрагма, угловая селекция.

Коды OCIS: 110.1220, 110.6980, 140.3300

Поступила в редакцию 17.11.2014

Введение

Достижение мегаджоульного уровня энергии излучения в лазерных установках на неодимовом стекле, предназначенных для проведения исследований в области лазерного термоядерного синтеза, требует применения пучков с минимальным превышением пиковой плотности энергии относительно средней и предельно высоким коэффициентом заполнения рабочей апертуры пучка K_{fill} . Коэффициент K_{fill} определяется как отношение полной энергии реального пучка к энергии пучка такой же апертуры, плотность энергии которого одинакова по всей апертуре и равна пиковой плотности энергии реального пучка [1]. Размер апертуры идеального пучка определяется по некоторому уровню интенсивности на краях пространственного профиля реального пучка. Анализ как отечественных, так и зарубежных работ [2, 3] показывает, что наиболее часто размер апертуры идеального пучка выбирается по уровню $0,01I_{\text{max}}$, где I_{max} – максимальная интенсивность реального пучка.

Применение пучков с высоким коэффициентом заполнения позволяет помимо эффективного энергосъема в усилительных каскадах повысить коэффициент полезного действия преобразования энергии излучения в высшие гармоники, снизить лучевую нагрузку на оптические элементы, что в итоге приводит к увеличению энергии излучения на выходе всей установки. Следует отметить, что рабочее значение K_{fill} необходимо выбирать исходя из параметров конкретной лазерной системы, так как применение пучков с чрезмерно высоким его значением может из-за дифракционных эффектов привести к быстрому росту модуляции в пространственном профиле интенсивности на участках между плоскостями перестроения изображения формируемого пучка и, как следствие, к превышению предельно допустимой пиковой плотности энергии. Согласно работе [1], коэффициент заполнения пучков мощных установок *Beamlet* и NIF менялся в диапазоне 84–87%.

Модуляция интенсивности пространственного профиля пучка, вызванная краевыми дифрак-

ционными эффектами, приводит к увеличению пиковой плотности энергии пучка относительно средней, что вызывает снижение коэффициента заполнения пучка и повышение риска разрушения оптических элементов. Основным методом снижения развития краевых дифракционных эффектов является аподизация пучка, т.е. формирование плавно спадающего профиля интенсивности пучка на краях апертуры. Аподизация позволяет одновременно формировать пучок с высоким коэффициентом заполнения и сохранять пространственный профиль при значительном удалении пучка от плоскости перестроения изображения. К настоящему времени разработано большое количество методов аподизации пучка [4–9], но одним из наиболее эффективных следует признать метод аподизации, основанный на пропускании пучка через систему “зубчатая диафрагма – пространственный фильтр” [10], применяемый, например, на лазерных установках NIF и LMJ. Устройства аподизации с применением зубчатых диафрагм позволяют работать с пучками в широком диапазоне длин волн, высокой плотностью энергии, различной формой апертуры, а также сравнительно просты в изготовлении. Современные технологии позволяют изготавливать зубчатые диафрагмы с высокой (до 10 мкм) точностью, например, методом лазерной резки металла или фотолитографическим способом.

Метод аподизации пучков с применением зубчатых диафрагм предложен в конце 70-х гг. [11], однако широкое применение нашел лишь к середине 90-х гг. с началом создания мощных многоканальных лазерных установок на неодимовом стекле с мегаджоульным уровнем энергии [1]. Именно исследования, связанные с повышенными требованиями к пространственным параметрам излучения данного класса установок, позволили раскрыть весь потенциал зубчатых диафрагм при формировании пространственного профиля пучков.

В настоящей работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка в системе аподизации “зубчатая диафрагма – пространственный фильтр”.

Рассмотрены различные типы зубчатой структуры диафрагм, определены оптимальные углы селекции излучения в пространственном фильтре.

Большое внимание уделено вопросу сохранения пространственного профиля аподизированных пучков в протяженном оптическом тракте.

Показано преимущество применения зубчатых диафрагм в системе аподизации по сравнению с диафрагмами с резким краем.

Расчеты проводились в программе ФРЕНЕЛЬ [12] с использованием специальных шаблонов зубчатых диафрагм, предварительно моделируемых в виде двумерной матрицы из нулей и единиц. Значения коэффициентов заполнения пучков, приведенные в данной работе, определены для трехмерных пространственных профилей расчетных пучков.

Принцип аподизации пучка зубчатыми диафрагмами

Оптическая схема системы аподизации пучка зубчатой диафрагмой приведена на рис. 1.

На вход системы подается лазерный пучок, полностью покрывающий апертуру зубчатой диафрагмы 1. Как видно из рис. 1, помимо зубчатой диафрагмы схема аподизации включает в себя пространственный фильтр (образован линзами 2, 4 телескопа и селектирующей диафрагмой 3), предназначенный для устранения периодических изменений интенсивности в пучке, возникающих при прохождении частей пучка через зубчатый край диафрагмы. При этом согласно работе [10], при выполнении определенных соотношений между параметрами зубчатой структуры диафрагмы и углами селекции излучения в пространственном фильтре форма пространственного профиля интенсивности на краях апертуры аподизированного пучка повторяет форму функции пропускания излучения прозрачными промежутками между зубцами диафрагмы. Таким образом, изготовление диафрагм с различными типами зубчатой

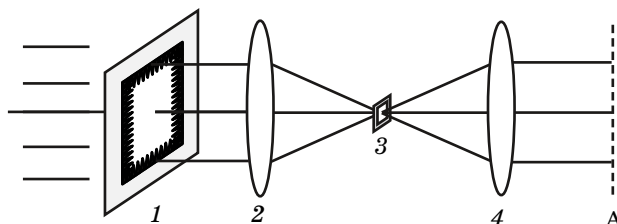


Рис. 1. Оптическая схема аподизации пучка зубчатой диафрагмой. 1 – апертурная зубчатая диафрагма, 2, 4 – линзы телескопа, 3 – селектирующая диафрагма, А – плоскость перестроения изображения зубчатой диафрагмы.

структуры позволяет менять форму краевого пространственного профиля интенсивности и коэффициент заполнения пучка.

В данной работе исследовано формирование пространственного профиля интенсивности лазерного пучка с применением трех различных типов зубчатых диафрагм, а также диафрагмы с резким краем. Форма апертуры диафрагм – квадрат размером 12×12 мм.

Фотографии изготовленных диафрагм с увеличенной частью сторон представлены на рис. 2.

Диафрагма с резким краем представлена на рис. 2а.

Параметры зубчатых диафрагм: формы зубцов – прямоугольная (рис. 2б), треугольная (рис. 2в) и профилированная (супергауссова функция пропускания излучения прозрачного промежутка между зубцами, рис. 2г), высота зубцов порядка 1 мм, период зубчатой структуры – 0,3 мм (рис. 2б), 0,2 мм (рис. 2в, г).

Использованы технологии фотолитографии на стеклянной подложке (прямоугольная и профилированная формы зубцов) и лазерной резки металла (треугольная форма зубцов и диафрагма с резким краем).

Исследовано формирование пространственного профиля интенсивности лазерного пучка с длиной волны излучения 1053 нм.

Ввиду того, что в экспериментальном стенде однородность излучения в пределах апертуры зубчатых диафрагм составляла около 5%, корректно определить вклад в неоднородность пучка, вносимый именно зубчатыми диафрагмами, не представлялось возможным. В связи с этим, ввиду хорошего согласования расчетных и экспериментальных пространственных профилей пучков, коэффициенты заполнения и превышение пиковой плотности энергии над средней на выходе пространственного фильтра, представленные в данной работе, определены для расчетных трехмерных пространственных профилей интенсивности.

Аподизация пучка апертурной диафрагмой с резким краем

Исследования аподизации пучка апертурной диафрагмой с резким краем проведены по схеме, приведенной на рис. 1, с целью последующего сравнения полученных результатов с аналогичными для зубчатых диафрагм.

На рис. 3а–з представлены расчетные и экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности пучков в плоскости перестроения изображения диафрагмы с резким краем при различных углах селекции излучения

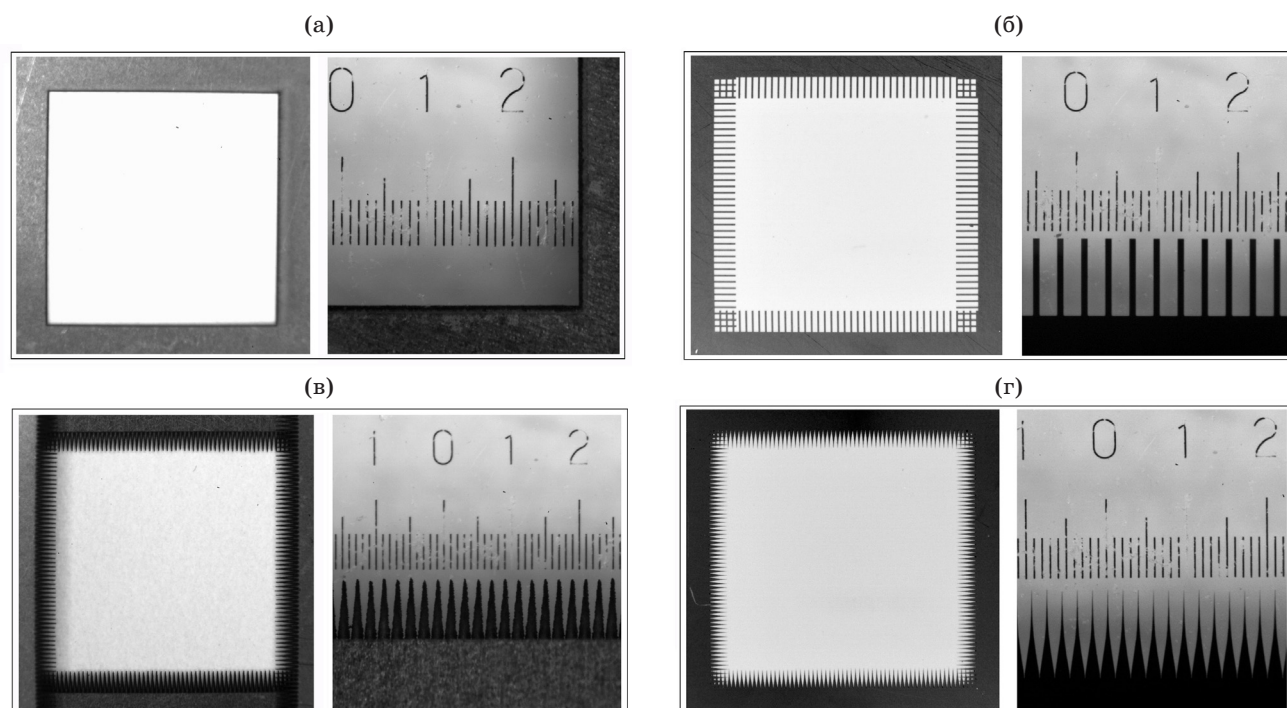


Рис. 2. Фотографии апертурных диафрагм с увеличенной частью сторон (цена малого деления 0,1 мм). Пояснения в тексте.

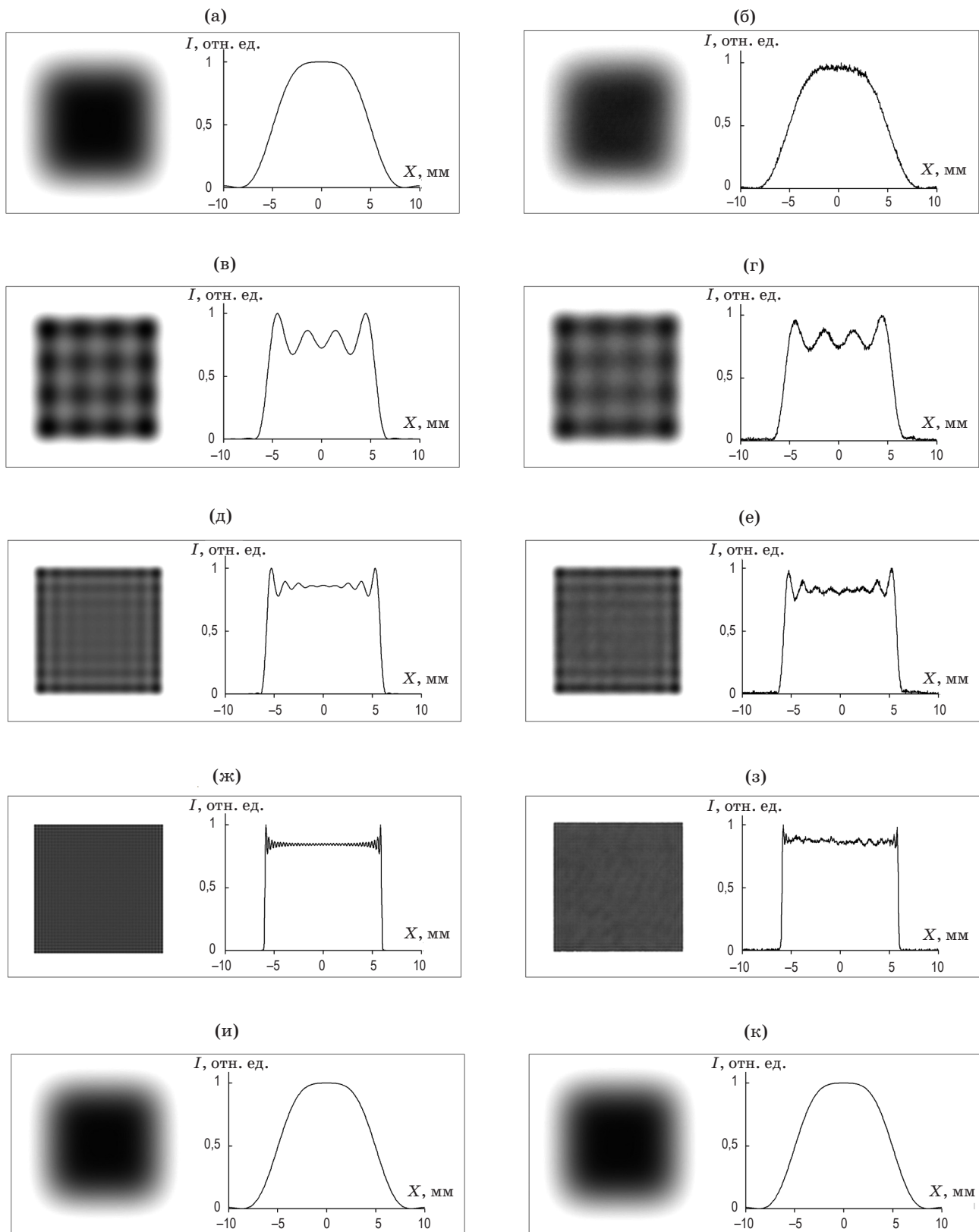


Рис. 3. Расчетные (а, в, д, ж) и экспериментальные (б, г, е, з) ближние зоны с профилями интенсивности пучков на выходе пространственного фильтра в плоскости перестроения изображения диафрагмы с резким краем при углах селекции излучения $1,5\theta_{\text{diffr}}$ (а, б), $4,2\theta_{\text{diffr}}$ (в, г), $9\theta_{\text{diffr}}$ (д, е), $42\theta_{\text{diffr}}$ (ж, з). Расчетные ближние зоны с профилями интенсивности пучков на расстояниях 20 см (и), 40 см (к) от плоскости перестроения изображения диафрагмы с резким краем при $\theta_{\text{sel}} = 1,5\theta_{\text{diffr}}$.

в пространственном фильтре. Угол селекции $\theta_{\text{sel}} = 10_{\text{difr}}$ соответствует углу дифракционной расходимости пучка на квадратной диафрагме размером 12×12 мм. Профиль интенсивности пучка здесь и на последующих рисунках соответствуют сечению трехмерного профиля интенсивности пучка в плоскости, проходящей через центр квадрата апертуры пучка.

Подробные исследования в диапазоне углов селекции от $\theta_{\text{sel}} = 1,50_{\text{difr}}$ до $\theta_{\text{sel}} = 60_{\text{difr}}$, частично представленные на рис. 3а–з, показали, что во всех ближних зонах, кроме случая $\theta_{\text{sel}} = 1,50_{\text{difr}}$, присутствует модуляция интенсивности излучения, частота которой увеличивается по мере увеличения угла селекции излучения. При угле селекции $1,50_{\text{difr}}$ формируется пучок с аподизированными краями и формой пространственного профиля, близкой к супергауссову профилю второго порядка с коэффициентом заполнения, рассчитанным по трехмерному пространственному профилю интенсивности, $K_{\text{fill}} \approx 40\%$. Следует отметить, что по уровню интенсивности 1% от максимальной размер апертуры пучка составляет $16,7 \times 16,7$ мм при $\theta_{\text{sel}} = 1,50_{\text{difr}}$, в то время как без селекции – 12×12 мм.

Анализ рис. 3а–з показал, что пиковое значение плотности энергии на апертуре пучка формируется вблизи углов квадрата. Во всех рассмотренных случаях, кроме $\theta_{\text{sel}} = 1,50_{\text{difr}}$, превышение пиковой плотности энергии относительно средней составляет $\delta \geq 36\%$.

Проведен расчет ближних зон и пространственных профилей интенсивности пучка на расстояниях ΔL 20 и 40 см от плоскости перестроения изображения диафрагмы с резким краем при угле селекции излучения в пространственном фильтре $1,50_{\text{difr}}$. Результаты расчетов представлены на рис. 3и, к.

Из рис. 3и, к видно, что при углах селекции $1,50_{\text{difr}}$ не происходит заметных изменений пространственного профиля при удалении пучка от плоскости перестроения изображения диафрагмы в рассмотренных пределах.

Аподизация пучка апертурными зубчатыми диафрагмами

Диафрагма с прямоугольной формой зубцов

На первый взгляд, прямоугольная форма зубцов исключает возможность формирования плавного спада интенсивности излучения на краях апертуры пучка ввиду резкого перепада

функции пропускания излучения прозрачным промежутком между зубцами. Тем не менее, проведенные исследования показали, что в определенном диапазоне углов селекции аподизация пучка возможна. На рис. 4а–з представлены ближние зоны с профилями интенсивности пучков в плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с прямоугольной формой зубцов при различных углах селекции излучения в пространственном фильтре. Подробные исследования в диапазоне углов селекции от $4,80_{\text{difr}}$ до 54_{difr} , частично представленные на рис. 4а–з, показали, что аподизированный пучок без значительной модуляции интенсивности пространственного профиля формируется только в диапазоне углов селекции излучения от 6_{difr} до $6,6_{\text{difr}}$. Анализ расчетных профилей выявил превышение пиковой плотности энергии относительно средней при $\theta_{\text{sel}} = 6_{\text{difr}}$, составляющее $\delta \approx 1,6\%$, при $K_{\text{fill}} \approx 70\%$.

Проведены исследования пространственного профиля интенсивности пучка на расстояниях 20 и 40 см от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с прямоугольной формой зубцов при угле селекции излучения в пространственном фильтре 6_{difr} . Экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности пучков представлены на рис. 4и, к.

Из рис. 4и, к видно, что пучок сохраняет структуру пространственного профиля и размер апертуры в пределах рассмотренных расстояний. Превышение пиковой плотности энергии относительно средней при $\Delta L = 40$ см, согласно расчетным ближним зонам, составляет $\delta \approx 2\%$.

Диафрагма с треугольной формой зубцов

Исследованы ближние зоны с профилями интенсивности пучков, сформированных зубчатой диафрагмой с треугольной формой зубцов, в диапазоне углов селекции излучения от 12_{difr} до 54_{difr} . Результаты исследований частично представлены на рис. 5а–з. Проведенный анализ расчетных ближних зон показал, что превышение пиковой плотности энергии относительно средней в диапазоне углов селекции от 12_{difr} до 18_{difr} составляет $\delta > 6\%$, при углах от 24_{difr} до 30_{difr} – $\delta \approx 3\%$, при углах от 36_{difr} до 54_{difr} – $\delta = 1,5\%$. Коэффициент заполнения пучка при $\theta_{\text{sel}} = 36_{\text{difr}}$ составляет $K_{\text{fill}} \approx 80\%$.

Проведены исследования пространственного профиля интенсивности пучка на расстояниях 20 и 40 см от плоскости перестроения

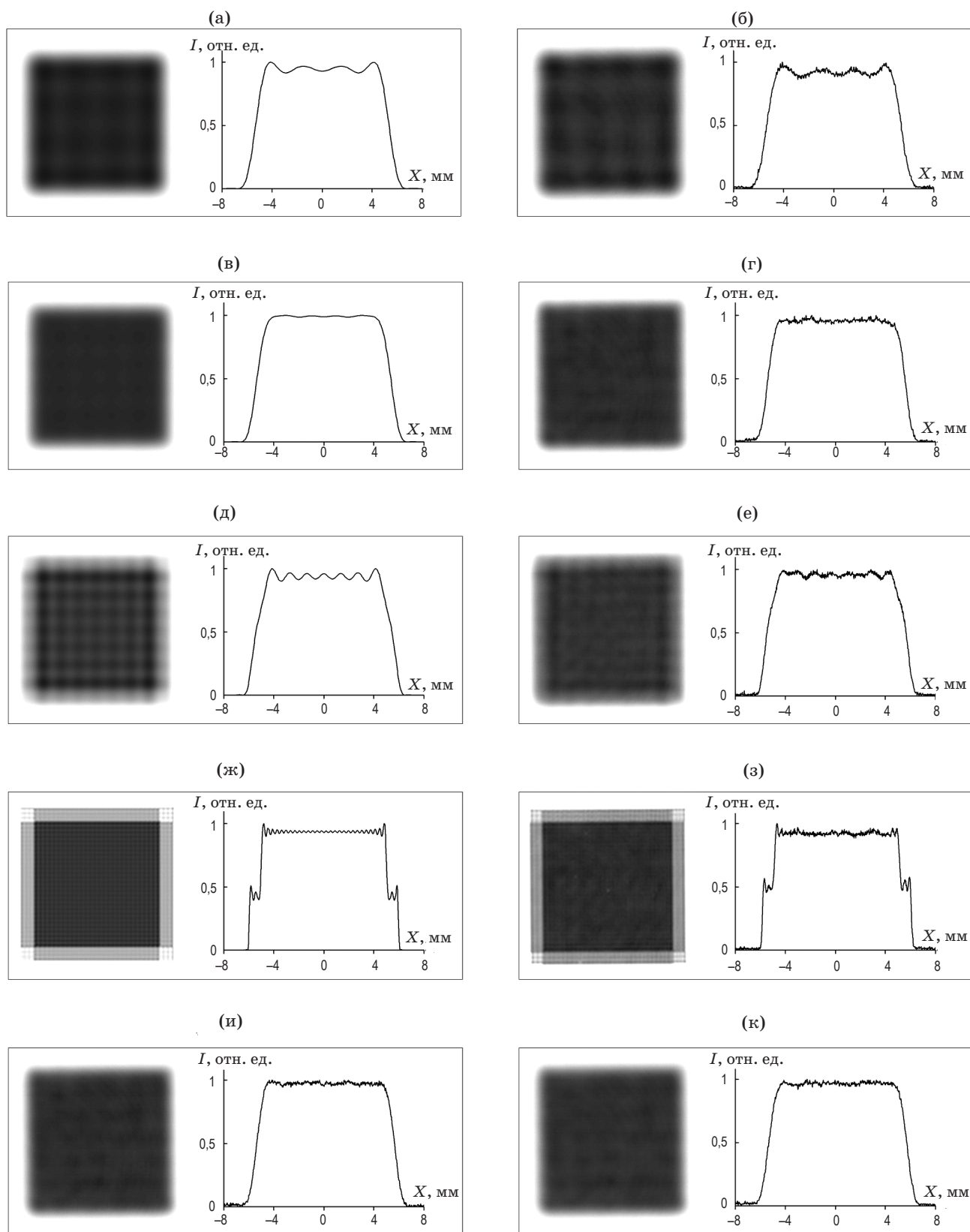


Рис. 4. Расчетные (а, в, д, ж) и экспериментальные (б, г, е, з) ближние зоны с профилями интенсивности пучков на выходе пространственного фильтра в плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с прямоугольной формой зубцов при углах селекции излучения $4,8\theta_{\text{diffr}}$ (а, б), $6\theta_{\text{diffr}}$ (в, г), $9\theta_{\text{diffr}}$ (д, е), $36\theta_{\text{diffr}}$ (ж, з). Экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности пучков на расстояниях 20 см (и), 40 см (к) от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с прямоугольной формой зубцов при $\theta_{\text{sel}} = 6\theta_{\text{diffr}}$.

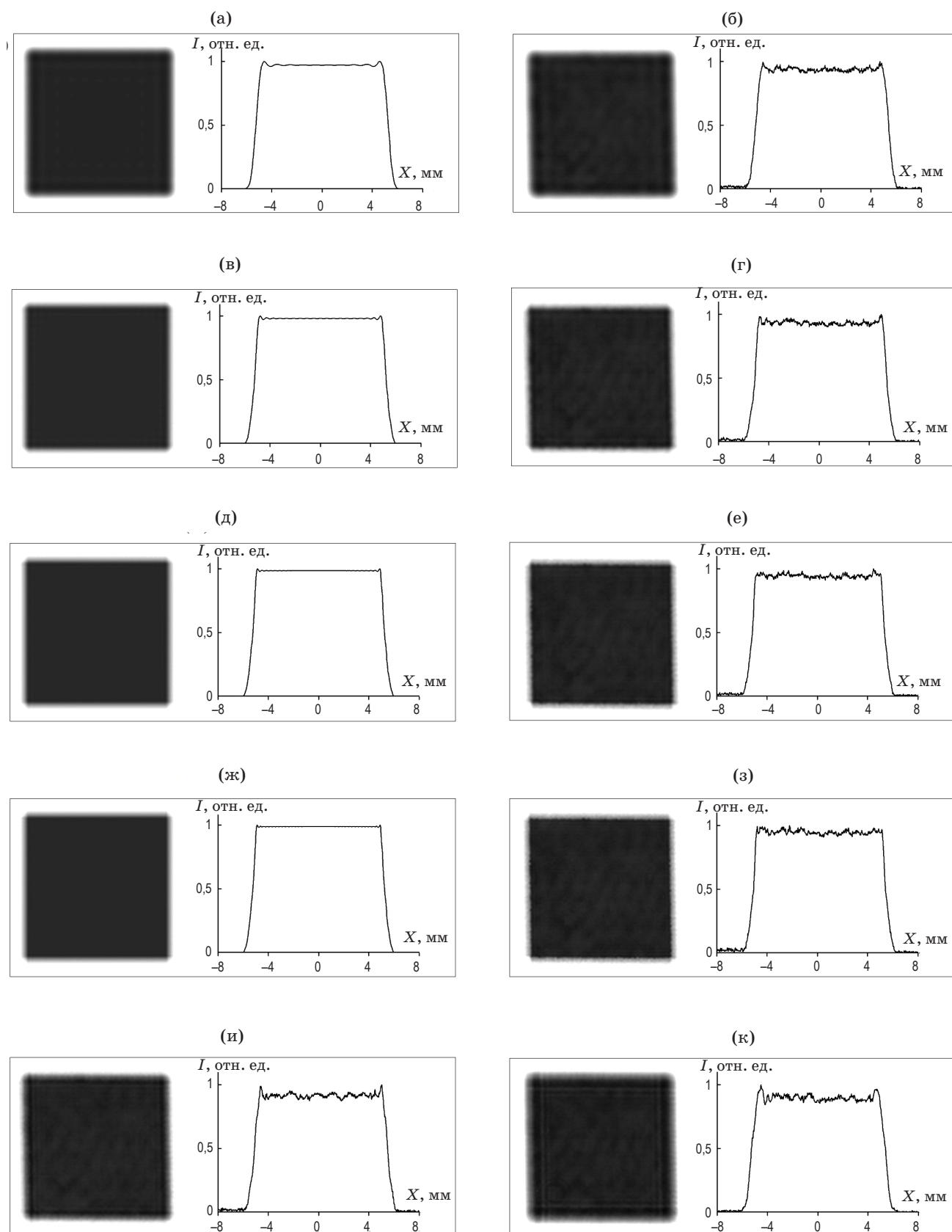


Рис. 5. Расчетные (а, в, д, ж) и экспериментальные (б, г, е, з) ближние зоны с профилями интенсивности пучков на выходе пространственного фильтра в плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с треугольной формой зубцов при углах селекции излучения 120_{diffr} (а, б), 240_{diffr} (в, г), 360_{diffr} (д, е), 480_{diffr} (ж, з). Экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности пучков на расстояниях 20 см (и), 40 см (к) от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с треугольной формой зубцов при $\theta_{\text{sel}} = 360_{\text{diffr}}$.

изображения зубчатой диафрагмы с треугольной формой зубцов при угле селекции излучения в пространственном фильтре $36\theta_{\text{difr}}$. Экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности представлены на рис. 5и, к.

Из рис. 5и, к видно, что при распространении пучка от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы в ближней зоне формируются заметные перепады интенсивности. Анализ расчетных ближних зон выявил увеличение превышения пиковой плотности энергии в пучке δ относительно средней с 1,5 до 8 и 11% при удалении пучка от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы на расстояния 20 и 40 см соответственно. Столь значительный рост пиковой плотности энергии можно объяснить наличием участков сравнительно резкого подъема уровня интенсивности излучения на краях пространственного профиля, что и является причиной быстрого развития дифракционных возмущений в распространяющемся пучке.

Диафрагма с профилированной формой зубцов

Профиль зубцов диафрагмы выбран исходя из условия формирования функции пропускания излучения прозрачными промежутками между зубцами в виде супергауссовой функции 14-го порядка. Расчетный коэффициент заполнения пучка, образованного трехмерной супергауссовой функцией 14-го порядка, составляет $K_{\text{fill}} \approx 87\%$, что соответствует значению коэффициента заполнения пучков лазерной установки NIF. Исследованы ближние зоны и профили интенсивности пучков, сформированных зубчатой диафрагмой с профилированной формой зубцов в диапазоне углов селекции излучения от $12\theta_{\text{difr}}$ до $54\theta_{\text{difr}}$. Результаты исследований частично представлены на рис. 6а–з. Проведенный анализ расчетных ближних зон показал, что превышение пиковой плотности энергии в пучке δ относительно средней в диапазоне углов селекции от $12\theta_{\text{difr}}$ до $20\theta_{\text{difr}}$ составляет 1–5%, при углах от $20\theta_{\text{difr}}$ до $54\theta_{\text{difr}}$ – $\delta \leq 1\%$, при углах $\theta_{\text{sel}} \geq 60\theta_{\text{difr}}$ в ближней зоне начинается просматриваться зубчатая структура. Коэффициент заполнения пучка при $\theta_{\text{sel}} = 36\theta_{\text{difr}}$ составляет $K_{\text{fill}} \approx 87\%$.

Исследования пространственного профиля интенсивности пучка на расстояниях 20 и 40 см от плоскости перестроения изображения зубча-

той диафрагмы при угле селекции излучения в пространственном фильтре $36\theta_{\text{difr}}$, представленные на рис. 6и, к, показали, что превышение пиковой плотности энергии над средней составляет $\delta \approx 0,3\%$ при $\Delta L = 0$ см, $\delta \approx 1,1\%$ при $\Delta L = 20$ см и $\delta \approx 2,5\%$ при $\Delta L = 40$ см. Учитывая известное соотношение между поперечным и продольным увеличением телескопа, согласно которому продольное увеличение пропорционально квадрату линейного увеличения [13], можно заключить, что увеличение телескопами размера апертуры аподизированного пучка с 12×12 мм до 400×400 мм (размер апертуры пучка в силовом тракте установки NIF [1]) приведет к эквивалентному сохранению пространственной структуры пучка и значений $\delta \approx 1,1\%$ и $\delta \approx 2,5\%$ на расстояниях 222 и 444 м соответственно, что значительно превышает максимальное расстояние свободного распространения пучка в лазерных установках масштаба NIF.

Исследованы распределения интенсивности излучения в дальней зоне пучков, сформированных зубчатыми диафрагмами. Ввиду того, что зубчатая диафрагма содержит два вертикальных и два горизонтальных ряда периодической зубчатой структуры, следует ожидать, что в дальней зоне помимо центрального максимума интенсивности, форма и размер которого определяются дифракцией излучения на квадратной диафрагме, также будут формироваться побочные максимумы интенсивности, эквидистантно расположенные относительно центрального максимума.

На рис. 7 представлены картины и распределения интенсивности пучков на выходе зубчатой диафрагмы с профилированной формой зубцов в фокальных плоскостях линз с фокусными расстояниями 270 см (нормальная засветка матрицы CCD камеры) и 40 см (повышенная засветка матрицы CCD камеры).

Из рис. 7а следует, что распределение интенсивности центрального максимума практически совпадает с аналогичным распределением, формируемым диафрагмой с резким краем. На рис. 7б видны первые побочные максимумы интенсивности, обусловленные прохождением части пучка через зубчатую структуру диафрагмы. Таким образом, когда через селектирующую диафрагму пространственного фильтра начинают проходить побочные максимумы интенсивности, в ближней зоне аподизированного пучка начинает отчетливо просматриваться зубчатая структура.

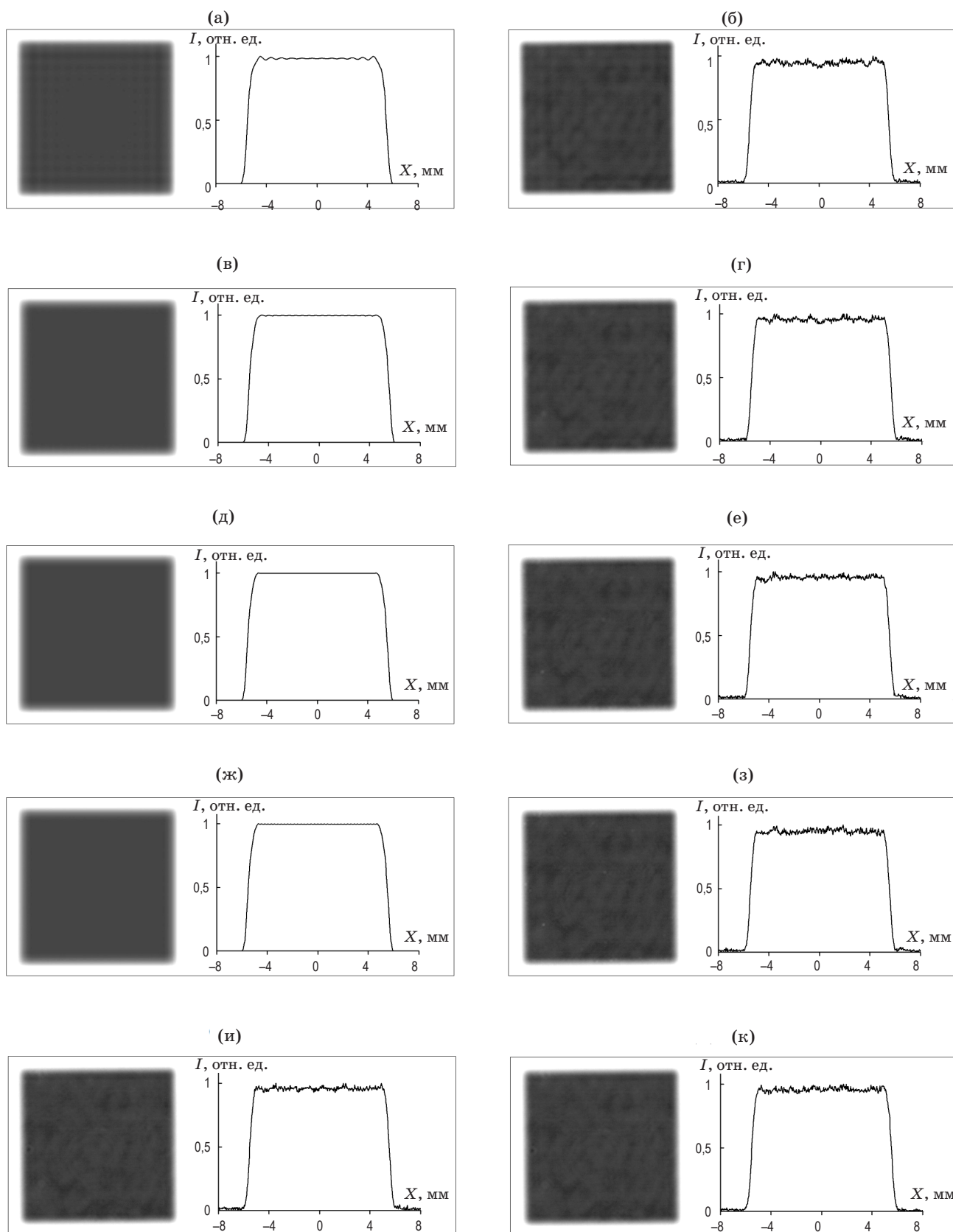


Рис. 6. Расчетные (а, в, д, ж) и экспериментальные (б, г, е, з) ближние зоны с профилями интенсивности пучков на выходе пространственного фильтра в плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с профилированной формой зубцов при углах селекции излучения 150_{diffr} (а, б), 240_{diffr} (в, г), 360_{diffr} (д, е), 480_{diffr} (ж, з). Экспериментальные ближние зоны с профилями интенсивности пучков на расстояниях 20 см (и), 40 см (к) от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы с профилированной формой зубцов при $\theta_{\text{sel}} = 360_{\text{diffr}}$.

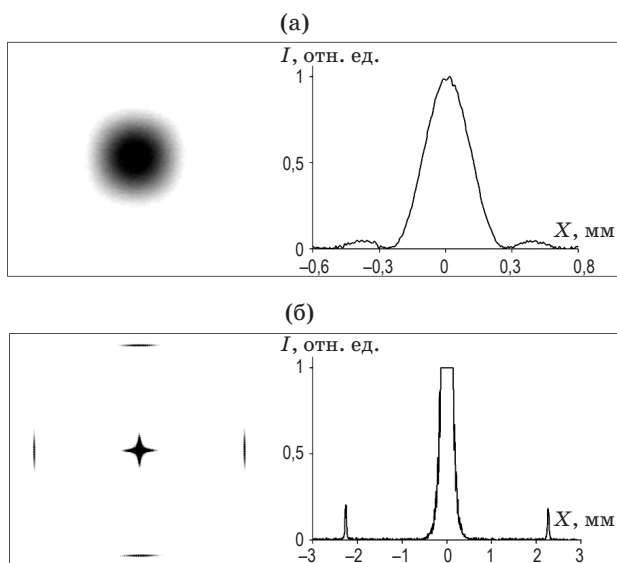


Рис. 7. Экспериментальные картины интенсивности с пространственными профилями в дальней зоне пучков на выходе зубчатой диафрагмы с профилированной формой зубцов при фокусном расстоянии линзы 270 см (а) и 40 см (режим повышенной засветки матрицы CCD камеры) – (б).

Закключение

Проведенные исследования показали, что система аподизации пучка на основе диафрагм с резким краем при условии однородного распределения интенсивности излучения по апертуре исходного пучка не позволяет формировать пучок с равномерным пространственным профилем и коэффициентом заполнения более 40%, поэтому ее применение в тракте совре-

менных мощных лазерных установок не может быть рекомендовано. Тем не менее, учитывая высокую стабильность пространственного профиля пучка при распространении, данная система аподизации может найти применение в лазерных установках, первоочередной задачей которых является именно сохранность пространственной структуры при удалении пучка на максимальное расстояние, и при этом в таких лазерных установках допускаются большие потери энергии излучения.

Среди рассмотренных типов зубчатых диафрагм наилучшие результаты, с точки зрения максимального коэффициента заполнения (87%), низкого значения превышения пиковой плотности энергии относительно средней (не более 1%), а также сохранности пространственного профиля при распространении пучка, получены для диафрагм с супергауссовой функцией пропускания излучения прозрачным промежутком между зубцами, поэтому данный тип диафрагм наиболее подходит для применения в мощных установках для лазерного термоядерного синтеза.

Отдельного внимания заслуживает диафрагма с прямоугольной формой зубцов, на основе которой был построен первый вариант системы аподизации пучка мощной лазерной установки “Луч” [14]. Формируемый пространственный профиль показал высокую стабильность при увеличении апертуры пучка до 200×200 мм, что позволило достичь уровня энергии излучения на выходе одного канала установки 3,3 кДж [14].

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Wonterghem B.M., Murray J.R., Campbell J.H., Speck D.R., Barker C.E., Smith I.C., Browning D.F., Behrendt W.C. Performance of a Prototype for a Large-Aperture Multipass Nd:Glass Laser for Inertial Confinement Fusion // Appl. Opt. 1997. V. 36. № 21. P. 4932–4952.
2. Борисова Н.Ф., Гаврилова М.А., Губа Б.С., Стариков А.Д., Эльц В.К. Формирование лазерного пучка с равномерным пространственным распределением // Квант. электрон. 1991. Т. 18. № 3. С. 355–358.
3. Van Wonterghem B.M., Salmon J.T., Wilcox R.W. Beamlet Pulse-Generation and Wavefront-Control System // Inertial Confinement Fusion. 1995. V. 5. № 1. P. 45–51.
4. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1976. 156 с.
5. Крыжановский В.И., Седов Б.М., Серебряков В.А., Цветков А.Д., Яшин В.Е. Формирование пространственной структуры излучения в твердотельных лазерных системах аподизирующими и жесткими диафрагмами // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 2. С. 354–359.
6. Лукишова Г.С., Минуэй Мендес Н.Р., Тулайкова Т.В. Исследование мягкой диафрагмы на основе фотоокисления редкоземельной примеси во флюорите, используемой в качестве внутрирезонаторного элемента ИАГ:Er³⁺-лазера // Квант. электрон. 1994. Т. 21. № 2. С. 126–128.

7. *Непомнящих А.И., Токарев А.Г., Фигура П.В., Черняго Б.П.* Материал для аподизирующей диафрагмы и способ его изготовления // Патент Российской Федерации № 2032193. 1990.
8. *Потемкин А.К., Катин Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартьянов М.А., Матвеев А.З., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А.* Компактный лазер на фосфатном стекле с неодимом с энергией 100 Дж и мощностью 100 ГВт для накачки параметрического усилителя чирпированных импульсов // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 4. С. 302–310.
9. *Barczys M., Bahk S.-W., Spilatro M., Coppenbarger D., Hill E., Hinterman T.H., Kidder R.W., Puth J., Touris T., Zuegel J.D.* Deployment of a Spatial Light Modulator-Based Beam-Shaping Systems on the OMEGA EP Laser // 2013. Proc. SPIE. V. 8602. P. 86020F-1–86020F-12.
10. *Auerbach J.M., Karpenko V.M.* Serrated-Aperture Apodizers for High-Energy Laser Systems // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 15. P. 3179–3183.
11. *Trenholme J.B.* Laser Program. Lawrence Livermore National Laboratory. P.O. Box 5508. Livermore. Calif. 94550 USA (personal communication, 1 March 1978).
12. *Епатко И.В., Малютин А.А., Серов Р.В., Соловьев Д.А., Чулкин А.Д.* Новый алгоритм численного моделирования распространения лазерного излучения // Квант. электрон. 1998. Т. 25. № 8. С. 717–722.
13. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976. 299 с.
14. *Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Ильяев Р.И., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Курунов Р.Ф., Муругов В.М., Сухарев С.А.* Канал мощной установки “Луч” для ЛТС с энергией импульса 3.3 кДж и длительностью 4 нс // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 4. С. 299–301.