

ФОРМИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ АПЕРТУРЫ В ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКИ

Провиденская Наталия Андреевна (vniia@vniia.ru), Каменев Владимир Геннадьевич

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Важной особенностью оптической схемы при многокадровой регистрации быстропротекающих процессов с использованием лазерной подсветки является сведение оптических осей нескольких лазеров в одну оптическую ось и формирование аксиально-симметричной синтетической апертуры. Предложено и обосновано расчетом техническое решение на базе конических оптических элементов, позволяющее формировать синтетическую апертуру для четырех входящих пучков.

Ключевые слова: лазерная подсветка, синтетическая апертура, многокадровая съемка, равномерная освещенность, оптическое моделирование.

SYNTHETIC APERTURE FORMATION IN A FOUR-CHANNEL LASER ILLUMINATION SYSTEM

Providenskaya Nataliia Andreevna (vniia@vniia.ru), Kamenev Vladimir Gennadevich

FSUE «VNIIA», Moscow

Convergence of optical axes of several lasers into one optical axis and formation of an axially symmetric synthetic aperture are an important feature of an optical scheme in multiframe recording of fast processes using laser illumination. A technical solution based on conical optical elements, that makes it possible to form a synthetic aperture for four incoming beams, is proposed and calculated justified.

Keywords: laser illumination, synthetic aperture, multi-frame shooting, uniform illumination, optical modeling.

Введение

При изучении свойств конструкционных материалов под действием ударно-волнового нагружения с использованием оптических лазерно-интерферометрических методов существует необходимость обеспечения эффективной лазерной подсветки исследуемых образцов с использованием нескольких импульсных лазеров [1–3]. Для совмещения их пучков без значительных потерь мощности излучения необходимо использовать систему формирования синтетической апертуры [4–7].

Целью работы является моделирование системы формирования синтетической апертуры для обеспечения лазерной подсветки при использовании нескольких источников лазерного излучения.

Были поставлены следующие задачи:

1) разработка системы совмещения лазерных пучков, позволяющей избежать потерь мощности при

сведении пучков и позволяющей с помощью синтетической апертуры расположить на одной оптической оси все сводимые пучки;

2) обеспечение относительной равномерности излучения подсветки на исследуемом объекте с устранением затухания интенсивности от центра пучка к его периферийной части.

Способы формирования синтетической апертуры

Для совмещения оптических осей от нескольких источников подсветки могут использоваться различные технические решения. При использовании относительно тривиального решения на базе делительных кубов [4], кратность потерь возрастает прямо пропорционально числу каналов (рис. 1), поскольку при прохождении каждого делительного куба образуется неиспользуемый канал, забирающий половину мощности.

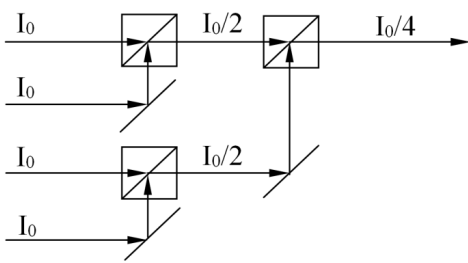


Рис. 1. Совмещение оптических осей на базе системы делительных кубов

Другим возможным способом совмещения пучков является применение смещенных относительно друг друга по спектру пучков от разных источников, объединяемых с помощью дифракционной решетки [5], что существенно усложняет требования к источнику излучения (рис. 2).

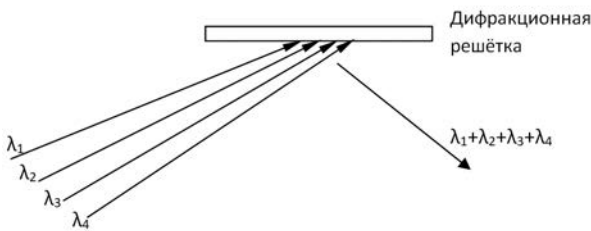


Рис. 2. Совмещение оптических осей на базе дифракционной решетки

Одним из наиболее универсальных вариантов совмещения пучков является использование систем на базе аксионов – конических преломляющих элементов (рис. 3).

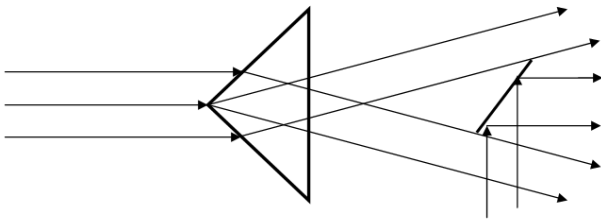


Рис. 3. Совмещение пучков на базе аксиона

В работе [6] с помощью такого решения формируют систему вложенных сходящихся кольцевых пучков, формирующих равномерную засветку в заданной плоскости. В работе [7] представлена более универсальная и легко масштабируемая схема, позволяющая

формировать коллимированные бесселевы пучки, позволяющие минимизировать радиус перетяжки при лазерной обработке материалов. Для обеспечения эффективной подсветки в газодинамике актуальной задачей является разработка системы, объединяющей преимущества устройств, описанных в работах [6, 7] – обеспечение относительно равномерной засветки в коллимированном пучке.

Система из двух аксионов позволяет получать кольцевые коллимированные пучки заданного радиуса и толщины (рис. 4). Кольцевые пучки разного диаметра можно соединить на одной оптической оси. Однако характеристики выходящего пучка зависят как от ряда параметров конических элементов и их взаимного расположения, так и от свойств исходного пучка (рис. 5).

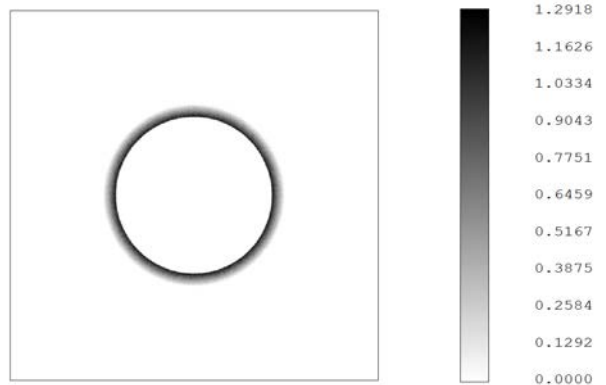


Рис. 4. Трассировка лучей на детектор, прошедших через систему из двух аксионов

Результаты моделирования демонстрируют, что данная схема позволяет формировать синтетическую апертуру для четырех входящих пучков, формируя аксиально симметричную структуру излучения подсветки. Кроме того, важным преимуществом по сравнению с исходным вариантом схемы узла оптической коммутации является то, что в предлагаемой схеме появляется возможность гибкой регулировки параметров выходящего пучка за счет перемещения конусов, входящих в состав схемы.

На рис. 6 приведены графики зависимости диаметров исходящего пучка от расстояния между аксионами при различных диаметрах входящего пучка. Аппроксимируя каждую из расчетных зависимостей уравнением прямой, получаем, что данные уравнения отличаются на постоянное слагаемое.

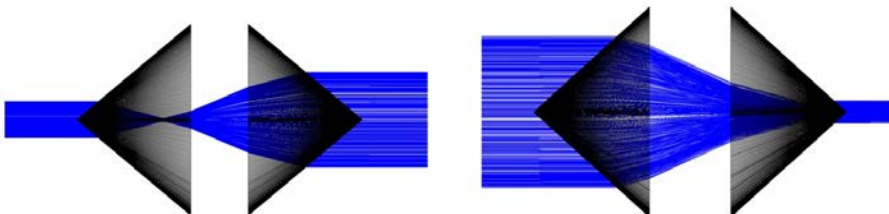


Рис. 5. Ход лучей через систему из двух аксионов

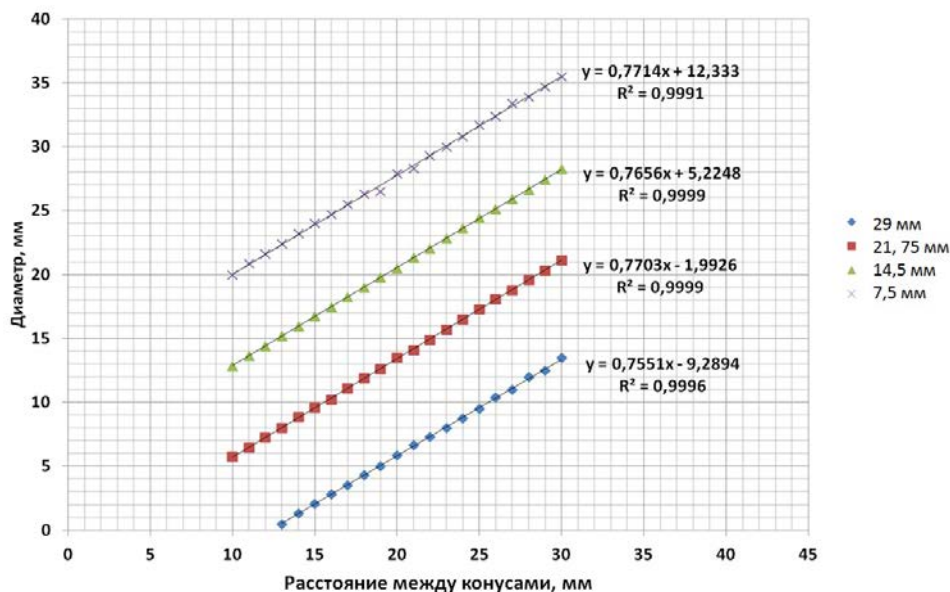


Рис. 6. Диаметр выходного пучка в зависимости от расстояний между аксиконами для различных диаметрах входящего пучка

Построив зависимость данного слагаемого от диаметра входящего пучка, и также аппроксимируя ее уравнением прямой (рис. 7), получаем формулу (1), учитывающую влияние расстояния между аксиконами, хода лучей в самих аксиконах и диаметра входящего пучка на систему из двух аксиконов:

$$d = \Delta x A + d_0 B + C. \quad (1)$$

Применение дополнительной пары аксиконов приводит к инверсии интерактивности внутри кольцевых пучков – меняются местами внешние и внутренние пучки (рис. 8).

Рис. 9 иллюстрирует процесс сжатия широких пучков, проходящих через дополнительную пару аксиконов, и расширение узких пучков.

Для обеспечения равномерности засветки необходимо, чтобы все кольцевые пучки обладали равной площадью. При использовании данного подхода три кольцевых пучка формируются тремя парами аксиконов, а затем общая пара аксиконов производит инверсию градиента интенсивности для этих пучков. Затем центр распределения заполняется стандартным пучком (рис. 10).

На рис. 11 приведены результаты моделирования данной конструкции. Показано обеспечение совмещения четырех пучков и формирования относительно равномерного синтетического пучка.

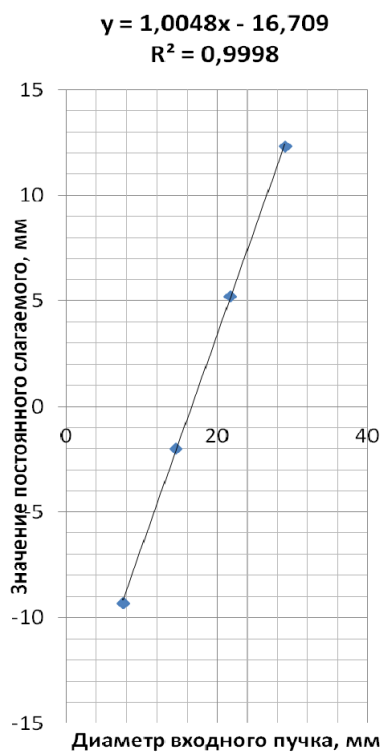


Рис. 7. Зависимость слагаемого от диаметра входящего пучка

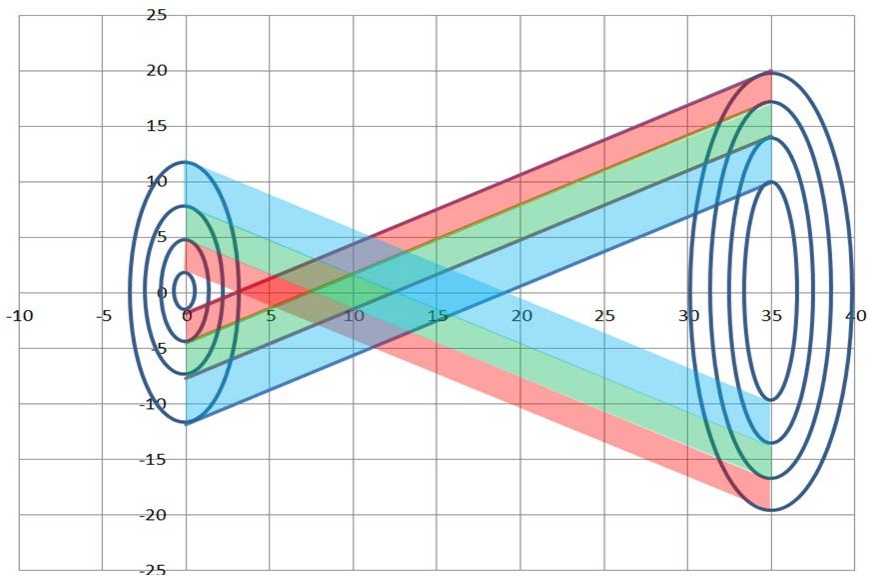


Рис. 8. Инверсия пучков при прохождении через вторую пару аксионов

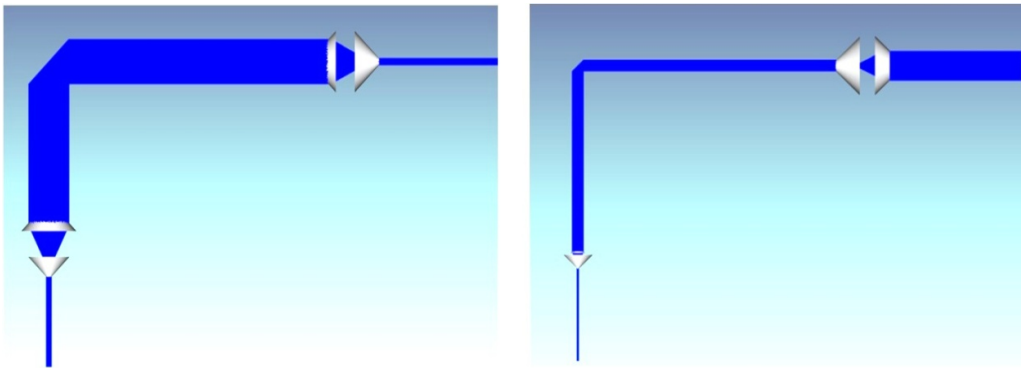


Рис. 9. Сжатие широких входящих пучков и расширение узких при прохождении кольцевых пучков через дополнительную пару аксионов

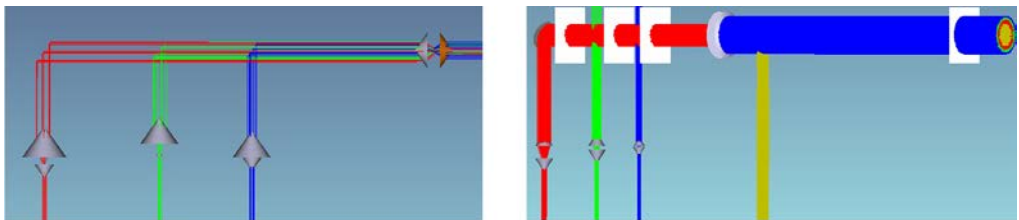


Рис. 10. Моделирование системы тремя кольцевыми пучками и центральным стандартным пучком

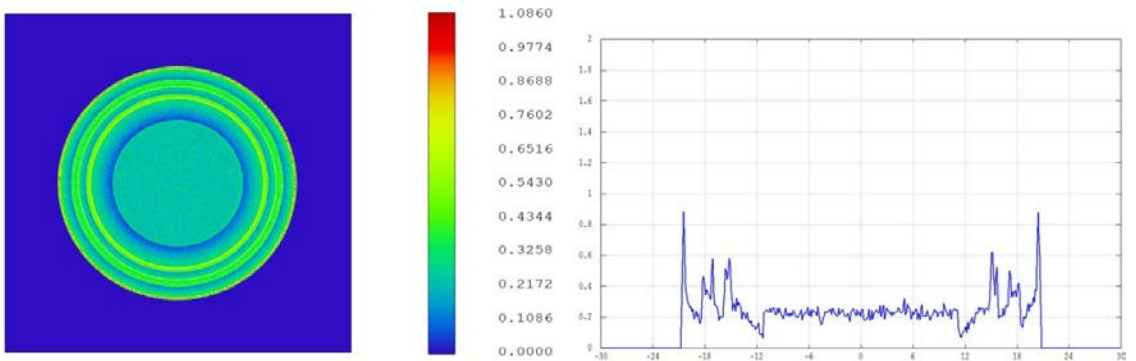


Рис. 11. Результаты моделирования синтетической апертуры

Заключение

1. Предложены и обоснованы расчетом технические решения, направленные на оптимизацию метода подсветки объектов газодинамических испытаний за счет применения системы аксиконов, обеспечивающих возможность использования нескольких импульсных лазеров, сводимых на одну оптическую ось.

2. Исследовано распределение интенсивности при различных параметрах оптических элементов, найдена оптимальная конфигурация для обеспечения наибольшей равномерности излучения в лазерном пучке. Получены основные соотношения для системы из двух аксиконов, позволяющие рассчитывать параметры кольцевых пучков.

3. Показано формирование пучка подсветки с отсутствием спада интенсивности в краевой части.

Список литературы

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография / Под ред. д-ра физ.-мат. наук Жерноклетова М. В. – 2-е изд., доп. и испр. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005. С. 428.

2. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. д-ра техн. наук Михайлова А. Л. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С.322.

3. Андреев А. Н., Дубовик А. С., Дегтярева В. П., Монастырский М. А., Щелев М. Я. Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстропротекающих процессов. Москва: Логос. 2002. С. 284.

4. Wernet, M. Development and application of a MHz frame rate digital particle image velocimetry system / M. Wernet, and A. Opalski // AIAA Paper, 2004. – No. 2004–2184. P. 1–7.

5. Пат. № US9927621B2, G02B27/0927. Method and apparatus for fiber-laser output-beam shaping for beam combination / Eric C. Honea, Yongdan Hu. Дата публикации: 27.03.2018.

6. Пат. № US20200276667A1, G02B5/001. Systems and methods for direct laser melting of metals using non-diffracting laser beams/ Robert John Filkins, Subhrajit Roychowdhury, Juan Borja, Thomas Adcock. Дата публикации: 03.09.2020.

7. Пат. № JP6267620B2, G02B27/10. Laser Beam Synthesizer/ Tōru Nagai. Дата публикации: 24.01.2018.