

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ**

PACS 52.57.Bc; 52.70.La; 42.30.Wb; 42.55.Ks

**Регистрация томографического изображения мишени при ее прямом облучении в эксперименте на иодной лазерной установке «Искра-5»****С.В.Бондаренко, Р.В.Гаранин, С.Г.Гаранин, Н.В.Жидков, О.В.Орешков, С.В.Потапов, Н.А.Суслов, Н.В.Фролова**

*Представлены результаты экспериментов по прямому облучению микромишени 12 пучками второй гармоники ( $\lambda = 0.66$  мкм) излучения иодного лазера, проведенных на установке «Искра-5». В качестве микромишени использовались стеклянные оболочки диаметром  $\sim 500$  мкм с толщиной стенок  $\sim 1$  мкм, заполненные DT-смесью до давления  $p_{DT} \approx 3 - 4$  атм. В одном из экспериментов осуществлена регистрация томографического изображения микромишени по изображениям, полученным с помощью камер-обскур, расположенных по семи различным направлениям, в рентгеновском излучении с энергией квантов свьезе 1.5 кэВ. Описана процедура восстановления объемной светимости микромишени. Проведенный анализ томографического изображения показал, что сжатая область микромишени имеет сложную несимметричную форму. В ней хорошо видны структурные элементы с размерами 20 – 30 мкм. Совокупность полученных результатов позволила оценить исходную неравномерность освещенности поверхности микромишени лазерным излучением. Среднеквадратичная неоднородность освещенности микромишени, по оценке, составила  $\sim 60\%$ .*

**Ключевые слова:** микромишень, малоракурсная томография, плазма, камера-обскура, рентгеновское излучение.

**1. Введение**

Хорошо известно, что для зажигания термоядерных реакций в DT-топливе его необходимо сжать до высокой плотности, в  $\sim 10^3$  раз превышающей плотность жидкости [1]. Ключевой проблемой при достижении столь высокой плотности является обеспечение высокой симметрии процесса имплозии оболочки. Информацию о симметрии имплозии оболочки, а также о форме и однородности сжатого топлива обычно получают из изображений мишени в корпускулярном, а чаще в рентгеновском излучении. Однако одно такое изображение позволяет получить лишь двумерное распределение характеристик объекта, проинтегрированное вдоль направления наблюдения. Трехмерное представление о симметрии имплозии мишени и состоянии ее сжатой области можно получить с помощью методики регистрации «объемного», томографического, изображения объекта. Методы получения таких изображений хорошо развиты и наиболее широко применяются в медицине [2]. Для получения томографического изображения объекта в просвечивающем или собственном излучении с помощью камер-обскур, расположенных по различным направлениям, регистрируется большое количество его двумерных изображений, и по ним математическими методами восстанавливается трехмерное распределение характеристик объекта. Томографическое изображение объекта позволяет получить распределение характеристик в любом его се-

чении или определить форму поверхности внутри объекта, соответствующей любому уровню сигнала.

Известно несколько примеров применения компьютерной томографии и в исследованиях по ЛТС [3].

**2. Условия экспериментов и постановка измерений**

Методика регистрации томографического изображения микромишени при прямом ее облучении второй гармоникой излучения иодного лазера ( $\lambda \approx 0.66$  мкм) была реализована в эксперименте на установке «Искра-5» [4]. Микромишень представляла собой стеклянную сферическую оболочку диаметром 513 мкм с толщиной стенки 1.3 мкм, заполненную DT-смесью до давления  $p_{DT} = 3$  атм. Лазерное излучение с общей энергией  $2.7 \times 10^3$  Дж фокусировалось на поверхность мишени в пятна диаметром  $\sim 160$  мкм, что заведомо создавало сравнительно неоднородное облучение оболочки. При этом средняя плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени составила  $\sim 4.6 \times 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности лазерного импульса  $\sim 0.6$  нс.

Для получения томографического изображения микромишени использовался набор ее изображений в собственном рентгеновском излучении. Изображения формировались с помощью семи камер-обскур, расположенных достаточно равномерно вокруг микромишени на фланцах вакуумной камеры установки «Искра-5» в ее верхней и нижней полусферах. Каждая камера-обскура имела набор отверстий с диаметрами 9 – 30 мкм. Такие диаметры отверстий в целом обеспечивали широкий динамический диапазон регистрации ( $\sim 10^3$ ). Изображения регистрировались на рентгеновскую фотопленку УФ-4 с увеличением 4.3 – 4.6.

В качестве фильтров использовалась бериллиевая

С.В.Бондаренко, Р.В.Гаранин, С.Г.Гаранин, Н.В.Жидков, О.В.Орешков, С.В.Потапов, Н.А.Суслов, Н.В.Фролова. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: suslov@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 12 мая 2010 г.

фольга толщиной 20 мкм. Такие фильтры являются «серыми» с энергией отсечки 1.5 кэВ, поэтому зарегистрированные изображения формируются излучением с достаточно широким спектром. Для пересчета плотностей почернения в плотности потоков рентгеновских квантов характеристическая кривая фотопленки была восстановлена путем сравнения двух изображений, зарегистрированных за отверстиями различного диаметра.

При восстановлении томографического изображения обрабатывались одновременно все изображения, зарегистрированные с различных направлений, поэтому их яркости были скорректированы с учетом конкретных размеров отверстий камер-обскур, расстояний и коэффициентов увеличения. По оценкам, суммарная погрешность привязки изображений по яркости находилась в пределах  $\pm 20\%$ .

Важным моментом при восстановлении томографического изображения является правильная пространственная привязка друг к другу изображений, полученных с различных направлений. За центр изображений принимался центр окружности, описанной вокруг видимого контура оболочки. По оценке, положение центра в плоскости микромишени определялось с точностью  $\sim 5$  мкм. Для получения угловой привязки изображений был проведен дополнительный, калибровочный, эксперимент по облучению стеклянной нити излучением четырех каналов установки, так что изображение нити было видно во всех семи направлениях наблюдения. Неизменная угловая ориентация диафрагм в ходе основного и калибровочного экспериментов, а также хорошо известная геометрия расположения рядов отверстий на диафрагмах многоканальных камер-обскур и использование в калибровочном эксперименте в качестве мишени нити, однозначно задающей в пространстве некоторое направление, позволили определить угловую ориентацию изобра-

жений относительно друг друга. Анализ показал, что погрешность угловой привязки изображений указанным методом составляет не более  $1^\circ$ .

Зарегистрированные в эксперименте изображения приведены в табл.1. Видно, что свечение оболочки неоднородно. На всех изображениях хорошо видно свечение сжатой области в центре оболочки, которая имеет сложную форму. На изображениях, полученных с помощью камер, расположенных в верхней полусфере, видна тень от нити подвеса оболочки.

### 3. Трехмерная реконструкция томографического изображения

Проблема восстановления внутренней структуры объекта по малому числу его проекций (малоракурсная томография) относится к классу так называемых некорректных задач. Это связано с тем, что число неизвестных в такой задаче пропорционально  $N^3$ , где  $N$  – размерность (число разбиений) области, в которую входит исследуемый трехмерный объект, а число известных величин пропорционально  $kN^2$ , где  $k$  – число проекций (ракурс). В результате при  $k < N$  система уравнений оказывается существенно недоопределенной. Этим малоракурсная томография отличается от традиционной медицинской томографии, в которой число ракурсов может быть достаточно большим.

В наших экспериментах реконструкция выполнялась по полученным двумерным изображениям, каждое из которых есть интеграл от светимости искомого объекта вдоль определенного направления наблюдения. Предполагалось, что каждый элемент матрицы изображения является интегралом от светимости искомого трехмерного объекта вдоль узкого луча (рис.1). Применяемый нами алгоритм реконструкции основан на методе последовательных приближений. С его помощью можно подобрать такое распределение светимости в трехмерной области реконструкции, которое дало бы наименьшую квадратичную невязку между заданными и рассчитанными двумерными изображениями. В силу недоопределенности системы уравнений такое распределение светимости может быть не единственным.

Задача реконструкции трехмерных объектов по их проекциям сводится к решению интегрального уравнения

$$m_s(\mathbf{r}_0) = \int_{V_{\text{тг}}} \mu(e_s \tau + \mathbf{r}_0) d\tau, \quad (1)$$

где  $\mu(\mathbf{r})$  – искомая светимость объекта в точке  $\mathbf{r}$ ;  $m_s(\mathbf{r}_0)$  – лучевая сумма, определяемая на изображении объекта в точке  $\mathbf{r}_0$  для  $s$ -го луча проектирования;  $e_s$  – единичный вектор в направлении наблюдения;  $\tau$  – расстояние от плоскости регистрации до точки  $\mathbf{r}$ ; интегрирование проводится по объему исследуемого объекта  $V_{\text{тг}}$ .















При проведении численных расчетов интеграл заменяется системой линейных уравнений

$$m_{sgl} = \sum_i \sum_j \sum_k V_{ijksgl} \mu_{ijk}, \quad (2)$$

$$i, j, k, g, l = 1, \dots, 200, \quad s = 1, \dots, 7,$$

где индексы  $g, l$  задают координаты элемента изображения объекта в плоскости регистрации для  $s$ -го луча, а

Табл.1. Сравнение двумерных изображений микромишени после реконструкции с результатами эксперимента.

$s$	$\theta$ (град)	$\varphi$ (град)	Двумерные изображения	
			Эксперимент	Расчет
1	43	-10		
2	43	-80		
3	43	170		
4	43	100		
5	137	-135		
6	137	135		
7	137	45		

Примечание. Углы  $\theta$  и  $\varphi$  определяют направление наблюдения камерами-обскурами в сферической системе координат.

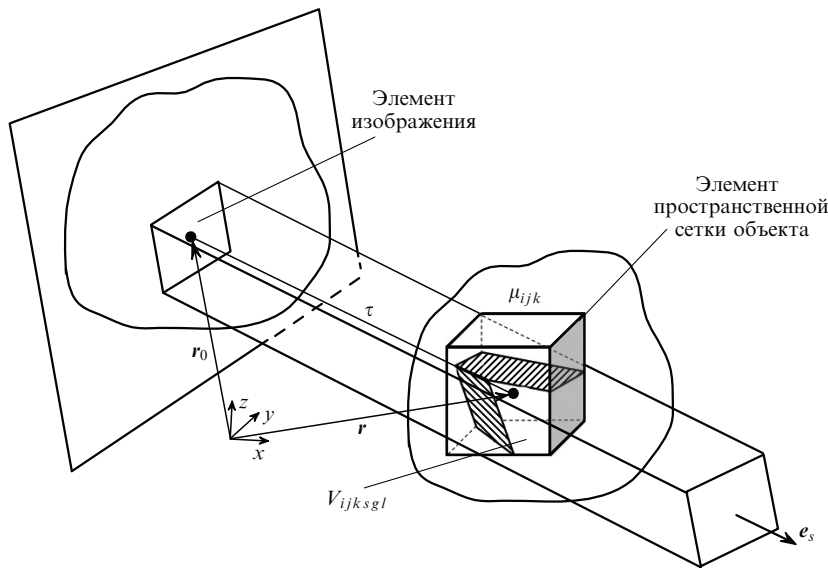


Рис.1. Иллюстрация физического смысла весовых коэффициентов в лучевых суммах.

индексы  $i, j, k$  – координаты элемента объекта;  $V_{ijkl}$  – «весовой коэффициент» (см. рис.1), представляющий собой объем, вырезаемый лучом проектирования из элемента пространственной сетки объекта.

Реконструкция трехмерного объекта выполнялась по программе, в которой для уменьшения недоопределенности исходных данных и повышения качества реконструкции используется дополнительная информация, содержащаяся в первых производных функции  $m_s(r_0)$ . При восстановлении размерность матрицы области реконструкции составляла  $200 \times 200 \times 200$  элементов, а размерность матриц двумерных изображений –  $200 \times 200$  элементов. На заданные (экспериментально полученные) двумерные изображения накладывалась маска в виде круга диаметром, равным 1.25 от диаметра микромишени. За пределами этого круга интенсивность изображений полагалась равной нулю. Это позволило аккуратно учесть свечение плазмы, разлетевшейся за пределы микромишени. Реконструкция проводилась без учета поглощения излучения в объеме мишени.

В табл.1 представлены зарегистрированные в эксперименте и рассчитанные после восстановления изображения. Видно, что эти изображения визуально практически не различаются.

Восстановленные проекции сжатой центральной области в трех взаимно перпендикулярных направлениях по уровню половины максимальной светимости представлены в табл.2. Сжатая область в центре мишени имеет сложную форму. В изображении этой области хорошо видны структурные элементы с размерами 20–30 мкм, а смещение наиболее яркой ее части от центра мишени составляет  $\sim 30$  мкм.

Табл. 2. Основные проекции реконструированной сжатой области.

Схема реконструкции	Вид сверху	Вид спереди	Вид справа
	<p>250 мкм</p>	<p>250 мкм</p>	<p>250 мкм</p>

В эксперименте был зарегистрирован нейтронный выход  $Y_n = 2 \times 10^8$ .

Как отмечалось выше, томографическое изображение позволяет получить информацию о любом фрагменте микромишени. Объемную светимость плазмы можно проинтегрировать по радиусу до некоторой глубины и получить функцию  $\Phi(\theta, \varphi)$ , отражающую пространственное распределение освещенности оболочки. При этом предполагается, что интенсивность свечения в рентгеновском излучении прямо пропорциональна плотности потока лазерного излучения. Распределение  $\Phi(\theta, \varphi)$ , полученное при интегрировании светимости плазмы оболочки по глубине до  $R = 0.5R_{lg}$ , где  $0.5R_{lg}$  – примерный радиус, до которого сожмется оболочка за время действия лазерного излучения, представлено на рис.2. Видно, что вместо ожидаемых двенадцати пятен облучения на поверхности оболочки выделяются четыре-пять наиболее ярко светящихся областей, при этом отдельные области поверхности практически не освещаются.

Характерные пространственные масштабы неоднородностей в распределении  $\Phi(\theta, \varphi)$  можно проанализировать с помощью гармонического анализа. Параметр

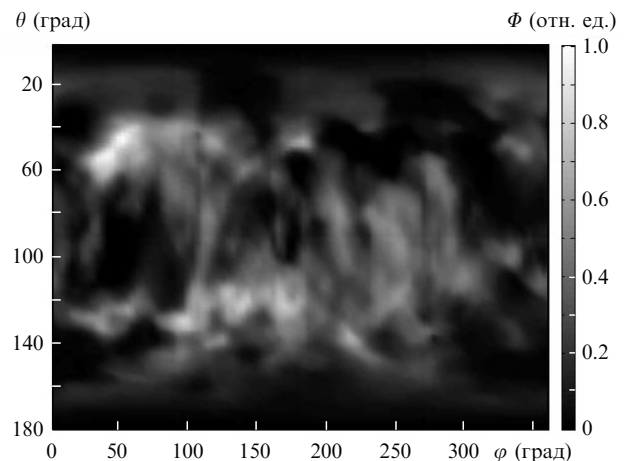


Рис.2. Восстановленное угловое распределение  $\Phi(\theta, \varphi)$  освещенности оболочки.

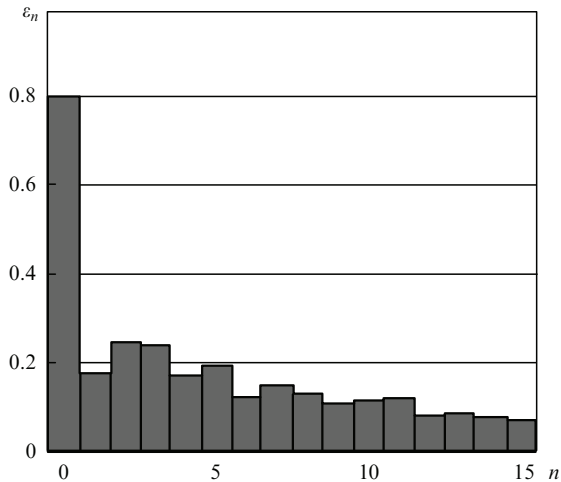


Рис.3. Значения параметра  $\varepsilon_n$ , рассчитанные по распределению  $\Phi(\theta, \varphi)$  для сферических гармоник порядка  $n$ .

$$\varepsilon_n = \left[ \alpha_{n0}^2 + \sum_{m=1}^n (\alpha_{nm}^2 + \beta_{nm}^2) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

будучи пропорциональным коэффициентам разложения  $\alpha_{n0}$ ,  $\alpha_{nm}$  и  $\beta_{nm}$  нормированного распределения  $\tilde{\Phi}(\theta, \varphi)$  по полной системе нормированных сферических гармоник порядка  $n$ , характеризует вклад этих гармоник в распределение  $\tilde{\Phi}(\theta, \varphi)$ . Он является вращательным инвариантом и может рассматриваться как характеристика неоднородности в распределении освещенности. На рис.3 приведены значения  $\varepsilon_n$  для распределения  $\Phi(\theta, \varphi)$ .

Видно, что в целом с ростом номера гармоник их вклад в распределение освещенности уменьшается. Нулевая гармоника является наиболее интенсивной, среди остальных гармоник наиболее интенсивные – вторая и третья. Среднеквадратичная неоднородность освещенности оболочки составляет  $\sim 60\%$ .

#### 4. Заключение

В эксперименте, проведенном на двенадцатиканальной лазерной установке «Искра-5», при прямом облучении сферической микромишени второй гармоникой излучения иодного лазера реализована методика регистрации ее рентгеновского томографического изображения. Томографическое изображение восстановлено по семи двумерным изображениям микромишени, полученным с различных направлений с помощью камер-обскур, в рентгеновском излучении с энергией квантов свыше 1.5 кэВ. Проекция восстановленного томографического изображения практически не отличается от исходных изображений, зарегистрированных в эксперименте.

Из восстановленного томографического изображения видно, что поверхность оболочки в проведенном эксперименте освещена лазерным излучением неравномерно. В разложении освещенности мишени по сферическим гармоникам нулевая гармоника является наиболее интенсивной, среди остальных гармоник наиболее интенсивные – вторая и третья. Среднеквадратичная неоднородность освещенности мишени по проведенной оценке составила  $\sim 60\%$ . Восстановленная сжатая область имеет сложную форму. В ней хорошо видны структурные элементы с размерами 20 – 30 мкм.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, работающим на лазерной установке «Искра-5», за подготовку и проведение экспериментов, В.М.Изгородину и А.В.Веселову за изготовление микромишеней, а также А.В.Бессарабу и С.А.Белькову за полезное обсуждение полученных результатов.

1. Lind J. *Phys. Plasmas*, **2**, 3933 (1995).
2. Хермен Г. *Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии* (М.: Мир, 1983).
3. Nishimura H., Niki H., Miyayaga N., et al. *Rev. Sci. Instr.*, **56**, 1128 (1985).
4. Annenkov V.I., Bessarab A.V., Vatulin V.V., Zhidkov N.V., et al. *Proc. XXIX ECLIM* (Madrid, Spain, 2006, pp 62–67).