

Регистрация изображений сжатой области микромишеней с помощью α -частиц в камере-обскуре с регулярной мультидиафрагмой

Н.А.Суслов

Для регистрации изображений сжатой области микромишеней с помощью α -частиц предложена светосильная диафрагма в виде регулярной мультидиафрагмы. Описана методика восстановления изображений. Приведены результаты регистрации изображений сжатой области микромишеней с помощью α -частиц в экспериментах на лазерной установке «Искра-4».

Ключевые слова: мишени для ЛТС, камера-обскура, α -частицы.

Введение

В экспериментах по ЛТС большое значение имеет определение параметров сжатого DT-топлива, в частности формы и размеров микромишеней, а также степени их сжатия. Одной из возможных методик получения этих параметров является регистрация изображений сжатого DT-топлива с помощью нейтронов, протонов и α -частиц, возникающих в термоядерных реакциях [1–3].

На лазерной установке «ИСКРА-4» [4] было проведено несколько серий экспериментов по облучению высокоаспектных мишеней [5] (аспектное отношение $R/\Delta R > 300$), основные результаты которых представлены в работе [6]. Использование высокоаспектных мишеней позволило в ряде опытов получить высокий (до 10^7) выход нейтронов, достаточный для отработки некоторых методик корпускулярной диагностики состояния сжатого DT-топлива. В частности, с использованием α -частиц и различных видов диафрагм получены изображения сжатой области мишени. О регистрации с помощью α -частиц изображений сжатой области высокоаспектных микромишеней при применении прямолинейной и кольцевой щелевых диафрагм сообщалось ранее в [7].

Светосила обычной камеры-обскуры с одним отверстием диаметром 20 мкм при расстоянии от мишени до диафрагмы 1 см составляет $4 \cdot 10^{-7}$, т. е. даже при выходе α -частиц 10^7 в изображении, полученном с помощью такой камеры, будет примерно от 2 до 6 частиц. Очевидно, что при таком количестве частиц в изображении нельзя определить форму сжатой области, а можно получить лишь некоторую оценку ее размера. Использование диафрагмы с большим числом отверстий, увеличивающим ее светосилу, позволяет получать изображения с помощью α -частиц при относительно невысоком их выходе [8].

В настоящей работе сообщается о регистрации таким методом в экспериментах с высокоаспектными мишенями на установке «Искра-4» изображений сжатой области с помощью специальной регулярной мультидиафрагмы.

1. Постановка измерений

В экспериментах использовались стеклянные оболочки с аспектным отношением свыше 300, наполненные DT-смесью до давления 2–4 атм. Мишени облучались излучением второй гармоники иодного лазера. Энергия лазерного излучения, подведенная к мишени, составляла ~ 250 Дж при длительности лазерного импульса по полувысоте ~ 0.5 нс. Для сглаживания крупномасштабных неоднородностей распределения интенсивности лазерного излучения в пятне облучения использовались рассеиватели. В большинстве экспериментов с большим выходом α -частиц использовалась острая фокусировка лазерного излучения на поверхность мишени.

Для формирования изображений с помощью α -частиц в экспериментах использовались специальные диафрагмы в виде регулярной мультидиафрагмы с 19 или 37 отверстиями. В такой диафрагме отверстия с высокой точностью (~ 1 – 2 мкм) располагались в узлах регулярной сетки с ячейкой в виде равностороннего треугольника, образуя компактную шестиугольную систему. Расстояние между отверстиями выбиралось таким, чтобы расстояние между соседними изображениями в 2–3 раза превышало ожидаемый размер сжатой области. Согласно литературным данным [9] и нашим собственным измерениям, в экспериментах с высокоаспектными мишенями размер области, испускающей α -частицы, не превышал $\sim 1/3$ диаметра мишени. Изображение мультидиафрагмы с 19 отверстиями диаметром 30 мкм и расстоянием между ними 200 мкм представлено на рис.1.

Изображения регистрировались на пластиковый трековый детектор CR-39 [10] (TASTRAK, Великобритания) с увеличением 2–2.5. Для защиты от воздействия рассеянного лазерного излучения и ионного потока плазмы детектор закрывался Al-фильтром толщиной 5.8 мкм. Во избежание размытия изображения из-за рассеяния α -частиц в фильтре он устанавливался в непосредственном контакте с трековым детектором. После эксперимента для выявления треков α -частиц трековый детектор протравливался в 6N-растворе NaOH при температуре 70°C в течение 16–20 ч.

Трековый детектор CR-39 имеет высокое оптическое качество и низкую интенсивность фоновых треков. Треки

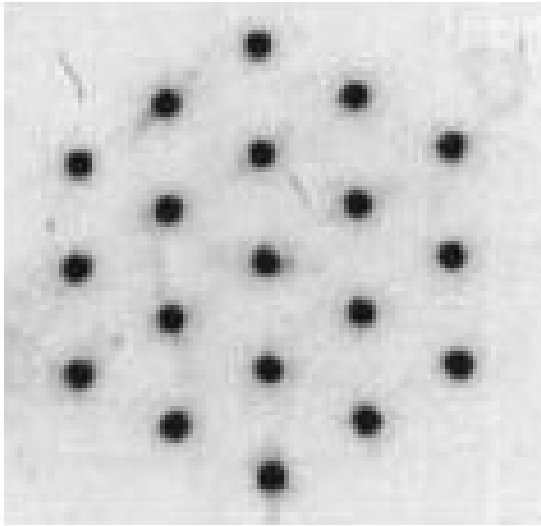


Рис. 1. Изображение мультидиафрагмы с 19 отверстиями диаметром 30 мкм; расстояние между отверстиями 200 мкм.

α -частиц имели практически одинаковый диаметр (~ 15 мкм) и были хорошо различимы под микроскопом. Протравленный трековый детектор фотографировался на фоне масштабной сетки через оптический микроскоп с большим увеличением. По полученным фотографиям координаты отдельных треков на трековом детекторе определялись с погрешностью 3–5 мкм.

2. Методика восстановления изображений

Для моделирования результатов регистрации изображений с помощью регулярной мультидиафрагмы и тестирования применяемой методики восстановления изображения использовалась следующая процедура. В модельном источнике корпускулярного излучения распределение интенсивности $I(r, \varphi)$ задавалось в полярных координатах следующим образом:

$$I(r, \varphi) = I_0 \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{r}{R_{0.5}} \right)^G \right] \times \left[1 + \left(\frac{A}{A+2} \right) \cos(m\varphi) \right], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность в центре источника излучения; $R_{0.5}$ – радиус источника излучения на половине интенсивности; G – степень супергауссова распределения; m – число лучей в источнике излучения; A – амплитуда модуляции, представляющая собой относительное превышение радиуса источника излучения в луче над $R_{0.5}$. Такое распределение позволяет задавать как плавные профили (при малых G), так и крутые, типа полочки (при больших G). Закон азимутального распределения позволяет задавать источник в виде многолучевой звезды.

В соответствии с пространственным распределением яркости из источника случайным образом выбрасываются частицы, которые проходят через мультидиафрагму с учетом реального диаметра отверстий и регистрируются детектором. Анализ показывает, что для мультидиафрагмы с 19 отверстиями при числе зарегистрированных частиц ~ 300 на изображениях от отдельных отверстий уже неплохо угадывается форма источника. Такой источник удобен для моделирования методик реги-

страции изображений в корпускулярном излучении с помощью различных диафрагм: прямолинейной и кольцевой щелевых, обычной и мультидиафрагмы, зонной пластинки Френеля и отверстия большого диаметра. Именно последняя в настоящее время используется для регистрации изображения сжатой области с помощью нейтронов.

Идея восстановления изображения от мультидиафрагмы состоит в следующем. Если бы мы каким-либо образом смогли на трековый детектор с изображениями от мультиобскуры наложить ее проекцию с правильной угловой ориентацией и точным увеличением, соответствующим реальному эксперименту, то, сложив изображения при совмещении в единую точку проекций отдельных отверстий, можно получить искомое изображение источника излучения.

Следует отметить, что важно лишь относительное положение отдельных изображений относительно соответствующих проекций отверстий. При этом распределение интенсивности в источнике в принципе может быть восстановлено лишь по нескольким отдельным изображениям. Таким образом, задача восстановления изображения состоит в правильном определении параметров проекции мультидиафрагмы. Эта идея и заложена в простом методе восстановления изображения источника излучения.

Для восстановления изображения в первом приближении в качестве базовых выбираются центры тяжести двух наиболее удаленных изображений и на их основе определяются проекции остальных отверстий, относительно которых «сворачивается» изображение, являющееся первым приближением. Затем центр тяжести одного из базовых изображений фиксируется, а положение второй базовой точки варьируется в окрестности с заданным размером вокруг центра тяжести второго базового изображения. Это позволяет одновременно варьировать и увеличение и угловую ориентацию проекции мультидиафрагмы. Для каждой новой второй базовой точки восстанавливается промежуточное изображение и вычисляется его среднеквадратичный радиус. Последний служит оценкой восстановленного изображения. За оптимальное восстановленное изображение принимается изображение с минимальным среднеквадратичным радиусом. Анализ показывает, что при большом числе частиц в изображениях от отдельных отверстий ($\sim 10-20$) изображение источника, восстановленное по центрам тяжести базовых изображений, дает уже хорошее приближение.

Следует отметить, что мультидиафрагма позволяет получить изображение, когда число частиц в изображении от отдельного отверстия в среднем меньше единицы, т. е. частиц в изображениях от некоторых отверстий нет совсем.

Для совмещения отдельных изображений при восстановлении можно использовать и другой метод. Если α -частицы регистрировать без защитного Al-фильтра, то их треки будут получаться на фоне изображения мишени с помощью ионов, которые можно использовать в качестве репера при совмещении отдельных изображений. По сравнению с энергией α -частиц энергии ионов малы и их пробеги в трековом детекторе заметно короче. Поэтому при оптимальном времени травления можно получить контрастные треки α -частиц на фоне изображения мишени с помощью ионов. Существенно, что такой способ на-

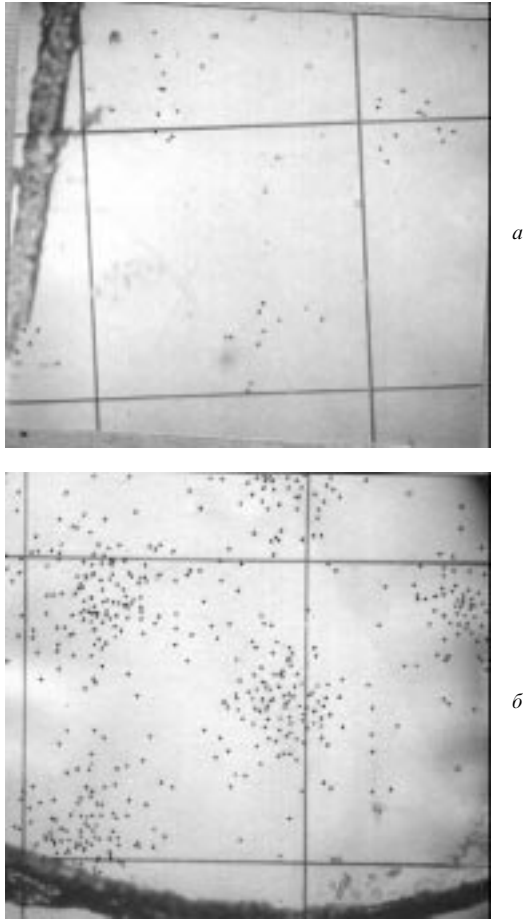


Рис.2. Изображения трековых детекторов с изображениями в α -частицах от нескольких отверстий на фоне масштабной сетки со стороной 1 мм, полученные в опытах 1 (а) и 2 (б) с разным выходом α -частиц.

ряду с определением размеров сжатой области позволяет находить ее положение относительно центра мишени.

3. Результаты регистрации и восстановления изображений

В настоящей работе регистрируются и восстанавливаются изображения сжатой области высокоаспектных мишеней, полученные с помощью мультидиафрагм с 19 и 37 отверстиями. На рис.2 представлены фотографии трекового детектора с изображениями сжатой области микромишени с помощью α -частиц от нескольких отдельных отверстий, зарегистрированными в двух опытах с разным выходом α -частиц. Восстановленные по результатам регистрации изображения сжатой области и гistogramмы распределения треков в двух взаимно перпендикулярных сечениях представлены на рис.3. Видно, что в обоих случаях сжатая область имеет практически круглую форму. В опыте 1 размер изображения сжатой области (на полувысоте интенсивности), полученный с помощью α -частиц, составлял 100–110 мкм при диаметре мишени 400 мкм, а в опыте 2 он был равен 135–145 мкм при диаметре мишени 404 мкм. Отметим, что число зарегистрированных α -частиц с учетом светосилы камеры-обскуры хорошо совпадает с нейтронным выходом.

Очевидно, что методика регистрации изображения сжатой области с помощью регулярной мультидиафрагмы в сочетании с трековым детектором может быть с успехом использована для получения изображений и с помощью протонов, возникающих при DD-реакции, что особенно важно при использовании микромишеней с таким $\rho\Delta R$ (ρ – плотность оболочки), что α -частицы будут полностью тормозиться в стенке мишени, а испускаться будут лишь протоны DD-реакции, обладающие большей проникающей способностью.

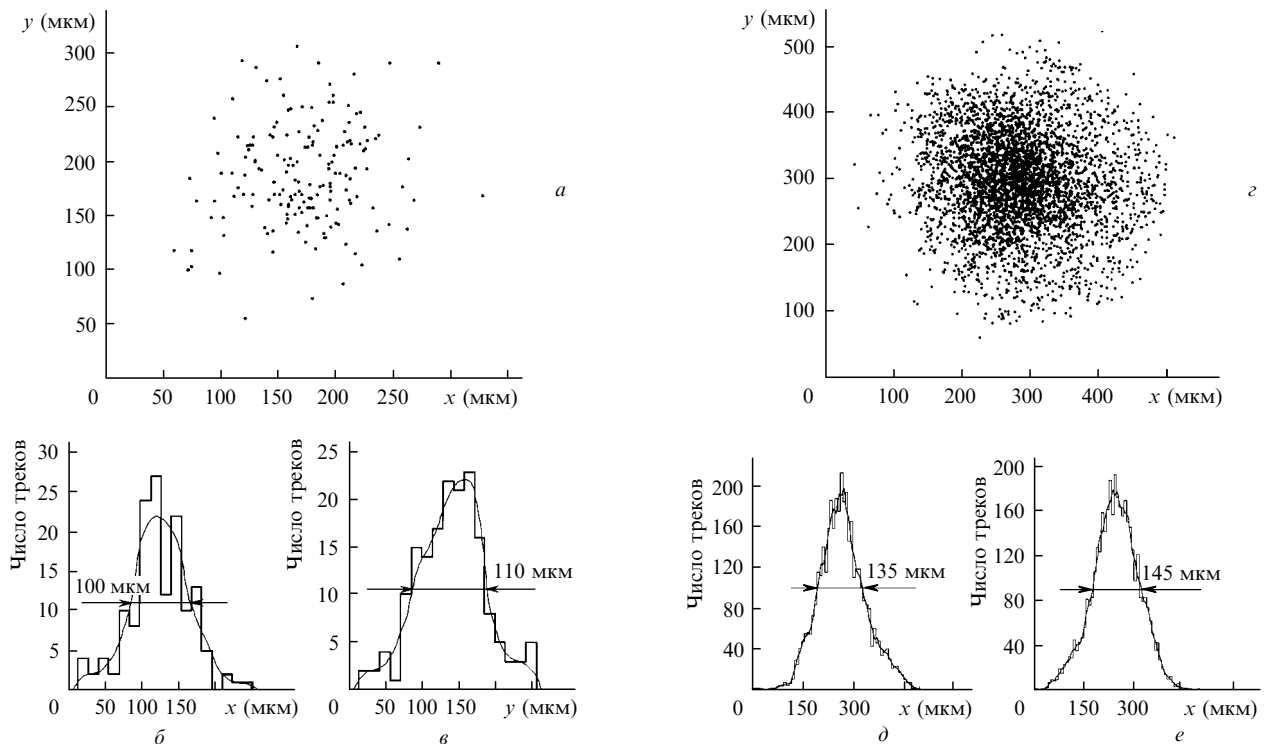


Рис.3. Восстановленные изображения сжатой области (а, с) и гistogramмы распределения треков в двух взаимно перпендикулярных сечениях, полученные при диафрагме с 19 (б, в) и 37 (д, е) отверстиями.

Заключение

Для использования в камере-обскуре при регистрации сжатия микромишени с помощью α -частиц предложена светосильная диафрагма с регулярно расположенными отверстиями. Разработан простой метод восстановления изображения корпускулярного источника с использованием такой диафрагмы.

В экспериментах с высокоаспектными мишенями на лазерной установке «Искра-4» с помощью мультидиафрагмы с 19 и 37 отверстиями зарегистрированы и восстановлены изображения в α -частицах сжатого ДТ-топлива.

Описанная светосильная диафрагма в виде регулярной мультидиафрагмы может быть с успехом использована для получения двумерных изображений источников корпускулярного излучения при относительно небольшом числе находящихся в них частиц. Сжатая область имеет практически круглую форму размером $\sim 1/3$ начального диаметра мишени. Полное число зарегистрированных α -частиц хорошо согласуется с выходом нейтронов.

Автор выражает свою искреннюю благодарность Г.Г.Кочемасову, С.А.Сухареву и С.Г.Гаранину за организацию и поддержку экспериментов с высокоаспектны-

ми мишенями, а также А.И.Зарецкому и коллективу сотрудников лазерной установки «Искра-4» за их проведение.

1. Ress D., Lerche R.A., Ellis R.J. *Science*, **241**, 956 (1988).
2. Chen Y.-W., Yamanaka M., Miyanaga N. et al. *Optics Comms*, **73**, 337 (1989).
3. Slivinsky V.W., Brooks K.M., Ahlstrom H.G. et al. *Appl. Phys. Letts*, **30**, 555 (1977).
4. Воронич И.Н., Ефимов Д.Г., Зарецкий А.И. и др. *Изв. АН СССР. Сер. Физика*, **54**, 2024 (1990).
5. Yamanaka M., Mima K., Yamanaka C. *Phys. Fluids*, **31**, 2884 (1988).
6. Бельков С.А., Бессараб А.В. и др. *ЖЭТФ*, **101**, 80 (1992).
7. Суслов Н.А., Бессараб А.В., Зарецкий А.И. и др. *Физика плазмы*, **24**, 151 (1998).
8. Fenimore E.E., Cannon T.M. *Appl. Optics*, **17**, 337 (1978).
9. Fews A.P., Lamb M.J., Savage M. *Optics Comms*, **94**, 259 (1992).
10. Fews A.P., Henshaw D.L. *Nuclear Instruments and Methods*, **197**, 517 (1982).

N.A.Suslov. Imaging of compressed microtarget regions by α -particles in a camera obscura with a regular multi-pinhole diaphragm.

Imaging of compressed regions of microtargets with α -particles by means of an optically efficient multi-pinhole regular diaphragm is proposed. The image reconstruction technique is described. The experimental results for imaging of compressed microtarget regions with α -particles in the 'Iskra-4' laser facility are reported.