

УДК 53.087.7

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ DD-СИНТЕЗА МЕТОДОМ КОДИРУЮЩИХ ДИАФРАГМ НА УСТАНОВКЕ ИСКРА-5

© 2024 г. И. П. Елин^{а, *}, Н. В. Жидков^{а, **}, Н. А. Суслов^а, В. С. Ильин^а,
Р. В. Гаранин^а, Е. В. Поздняков^а

^аРоссийский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37

*e-mail: yelin.ivan.p@gmail.com

**e-mail: zhidkov_nv@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Для визуализации области прохождения ядерных реакций DD-синтеза использован метод регистрации протонов с энергией $E_p = 3.02$ МэВ, образующихся во втором безнейтронном канале, имеющим равную вероятность с реакцией в нейтронном канале. Приведены результаты регистраций на трековый детектор CR-39 области кумуляции плазмы с помощью двух различных кодирующих диафрагм и результаты оценок количества реакций в мишенях с обращенной короной этим методом.

DOI: 10.31857/S0032816224040049 EDN: NZFZMF

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники нейтронов находят важное применение во многих областях науки и техники, включая ядерный топливный цикл, нейтронно-активационный анализ, разведку полезных ископаемых и нефти и т.д. Среди множества способов получения нейтронов, которые обычно основаны на высокоэнергетических ускорителях и реакторах деления путем распада и расщепления изотопов лазерные источники нейтронов представляют особый интерес и в последнее время привлекают к себе большое внимание.

В исследованиях по лазерному термоядерному синтезу при сжатии капсул DT с прямым [1, 2] или непрямым облучением [3] достигнут выход нейтронов около $5 \cdot 10^{13}$ на 30 кДж на лазере Omega [4]. Следует отметить, что на лазере NIF с энергией 1.8 МДж [5] 8.08.21 г. в эксперименте с криогенной DT-капсулой непрямого

облучения был получен выход DT-нейтронов около $4 \cdot 10^{17}$ [6], а в эксперименте 5.12.22 г. по сообщениям СМИ даже вдвое выше, что соответствует КПД использования энергии лазера более 100%. Однако эти инерциальные схемы сжатия требуют кроме дорогостоящих многоканальных лазерных установок очень высокой степени сходимости оболочки по радиусу (~30 раз), которая часто ухудшается из-за гидродинамических неустойчивостей и нестабильностей лазерной плазмы, а также из-за асимметрии облучения.

С другой стороны, исследователей начала привлекать схема с использованием сферически сходящейся плазмы (spherically convergent plasma fusions scheme, SCPF) [7–10], которая во ВНИИ-ЭФ названа мишенью с обращенной короной (МОК) и исследуется с 80-х годов [11–13]. Эта мишень может стабильно и эффективно производить DD-нейтроны без использования

криогенной техники на материалах, содержащих дейтерий, например CD_2 . В 1987г вышла работа японских авторов по результатам исследований аналогичных мишеней с использованием шести лучей установки ГЕККО 12 [14].

В экспериментах по лазерному термоядерному синтезу большое значение имеет определение параметров сжатого топлива, в частности его формы и размеров. Одной из возможных методов получения этих параметров является регистрация изображений сжатого топлива с помощью нейтронов, протонов и других частиц, возникающих в термоядерных реакциях.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На лазерной установке Искра-5 проведена серия экспериментов с мишенями МОК диаметром 2 мм при толщине стенки полипараксилилена (СН) около 7 мкм с внутренним слоем дейтерированного полиэтилена (CD_2) толщиной в диапазоне от 0.09 до 0.7 мкм на первой гармонике лазерного излучения (ЛИ) — $\lambda_{1\omega} = 1.315$ мкм, энергии ЛИ на мишени 500–700 Дж при длительности лазерного импульса $\tau_{0.5} \approx 0.35 \pm 0.05$ нс. В проведенной серии экспериментов использовались один или два канала установки Искра-5. В корпусе мишени выполнены две пары отверстий диаметром по 500 мкм на взаимно перпен-

дикулярных направлениях для ввода излучения и наблюдения кумулирующей плазмы.

Изображение области кумуляции плазмы регистрировалось камерой-обскурой в сравнительно жестких квантах с энергией $h\nu > 1.5$ кэВ как через диагностические отверстия, так и на обзорных изображениях через стенку мишени.

В экспериментах проводилась отработка метода регистрации изображения области кумуляции плазмы трековым детектором CR-39 в DD-протонах с энергией $E_p = 3.02$ МэВ, возникающих в реакции $D + D \rightarrow T + p + \epsilon(4.03 \text{ МэВ})$, имеющей равную вероятность с нейтронной реакцией $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + \epsilon(3.27 \text{ МэВ})$, т.е. количество нейтронов и протонов, генерируемых в мишени, должно быть одинаково. Изображения формировались с помощью двух различных кодирующих диафрагм. Одна диафрагма представляла собой большое круглое отверстие диаметром около 400 мкм, что сравнимо с ожидаемым размером области генерации DD-протонов. В этом случае формируется так называемое полутеневое кодированное изображение [15]. Другая диафрагма (мультиобскура) представляла собой регулярный плотноупакованный набор отверстий небольшого диаметра, заметно меньшего ожидаемого размера источника, подобно рентгеновской камере обскуре [16]. Изображение такой диафрагмы представлено на рис. 1. Диафрагма содержит 37 отверстий диаметром примерно по 45 мкм с расстоянием между ними по 400 мкм.

Обе диафрагмы изготовлены из танталовой фольги: диафрагма с большим отверстием из фольги толщиной 100 мкм, а мультиобскура из фольги толщиной 15 мкм. Пробег DD-протонов с энергией 3.02 МэВ в тантале составляет 33 мкм, т.е. протоны полностью тормозятся в диафрагме с большим отверстием и проникают сквозь фольгу мультиобскуры, при этом их энергия уменьшается до 2 МэВ. Однако непосредственно перед трековым детектором установлен Al-фильтр толщиной 50 мкм, пробег же 2 МэВ-протона в Al составляет 42 мкм, т.е. протоны, прошедшие сквозь фольгу диафрагмы мультиобскуры, полностью тормозятся в Al-фильтре. Протоны, прошедшие сквозь отверстия в диафрагмах, в Al-фильтре тормозятся до энергии 1.75 МэВ, благоприятной для регистрации трековым детектором CR-39.

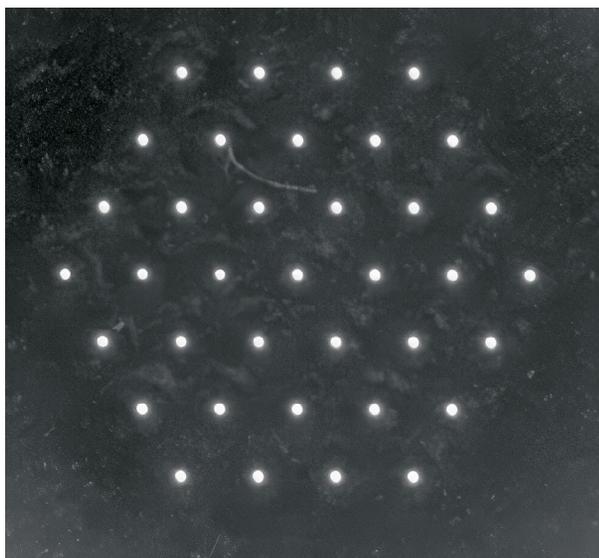


Рис. 1. Изображение мультиобскуры: 1 – МОК-мишень, 2 – регистратор с мультидиафрагмой, 3 – регистратор с диафрагмой с большим отверстием, 4 – индиевый образец, 5–7 – рентгеновские камеры обскуры.

Изображения, зарегистрированные с помощью обеих диафрагм, являются кодированными, поэтому для получения истинного изображения источника необходимо их восстановление. Процедура восстановления для мультиобскуры описана в работе [16]. Изображение за большим отверстием обычно восстанавливают с использованием фурье-анализа. Однако в нашем случае из-за сравнительно небольшого количества треков в изображениях статистические шумы слишком велики для использования фурье-анализа. Поэтому для оценки размеров области, испускающей DD-протоны, предполагая гауссово распределение яркости в источнике излучения, рассчитывали кодированное изображение (свертку) с учетом реального размера отверстия и геометрии регистрации изображения и сравнивали его с экспериментально зарегистрированным изображением. За размер источника принимался подобранный размер с гауссовым распределением, для которого свертка визуальным образом совпадает с экспериментально зарегистрированным изображением без использования каких-либо критериев степени правдоподобия из-за значительных статистических шумов.

Изображения регистрировались с небольшим увеличением в диапазоне от 1.3 до 1.5. Расстояние от мишени до диафрагм составляло около 13 мм. Расположение регистраторов в камере взаимодействия представлено на рис. 2.

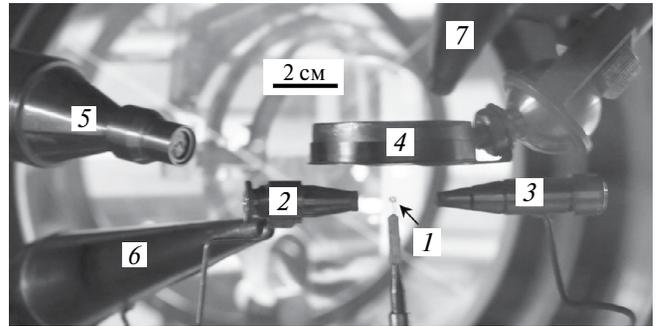


Рис. 2. Расположение регистраторов в камере взаимодействия.

После эксперимента трековые детекторы травились в 6N-растворе NaOH при температуре 75°C в течение примерно 20 ч. Затем трековые детекторы с выявленными треками фотографировались с помощью микроскопа, и проводилась необходимая обработка изображений для определения размеров области, в которой происходит генерация DD-протонов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Примеры зарегистрированных изображений трековых детекторов и результатов их обработки представлены на рис. 3 и 4. Экспериментальные зависимости распределения плотности треков от радиуса на изображениях за отверстием большого диаметра строились относительно центра масс всего набора треков. Отметим, что центр масс характеризуется минимальной суммой квадратов радиусов (моментом инерции)

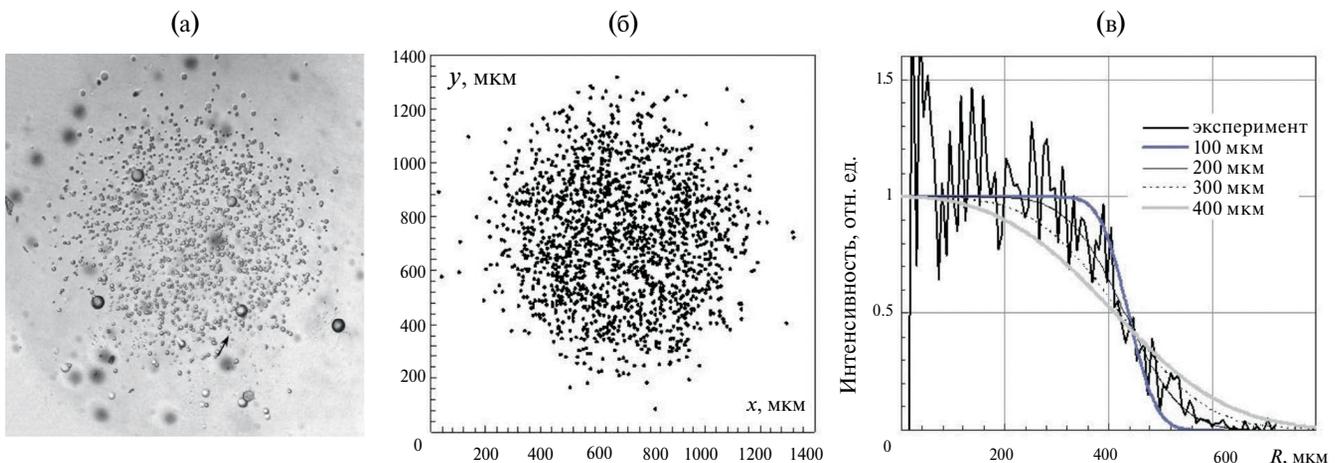


Рис. 3. Пример результата регистрации с помощью отверстия большого диаметра: а – вид трекового детектора с треками протонов, стрелкой указан один из треков, б – координаты треков кодированного изображения, в – сравнение расчетных профилей кодированного изображения для источников с гауссовым профилем различной ширины с экспериментальной зависимостью.

всего набора треков. На графике расчетных профилей кодированного изображения для сравнения с экспериментальной зависимостью приведены расчетные кривые для источников с гауссовым профилем различной ширины. Из графиков следует, что диаметры области, испускающей DD-протоны, на половине

максимальной интенсивности в предположении ее гауссова профиля составляют примерно 200–250 мкм с точностью не хуже ± 50 мкм.

На рис. 4 представлен результат того же эксперимента, который свидетельствует о том, что общее изображение от мультиобскуры на трековом детекторе содержит лишь 29 изображений

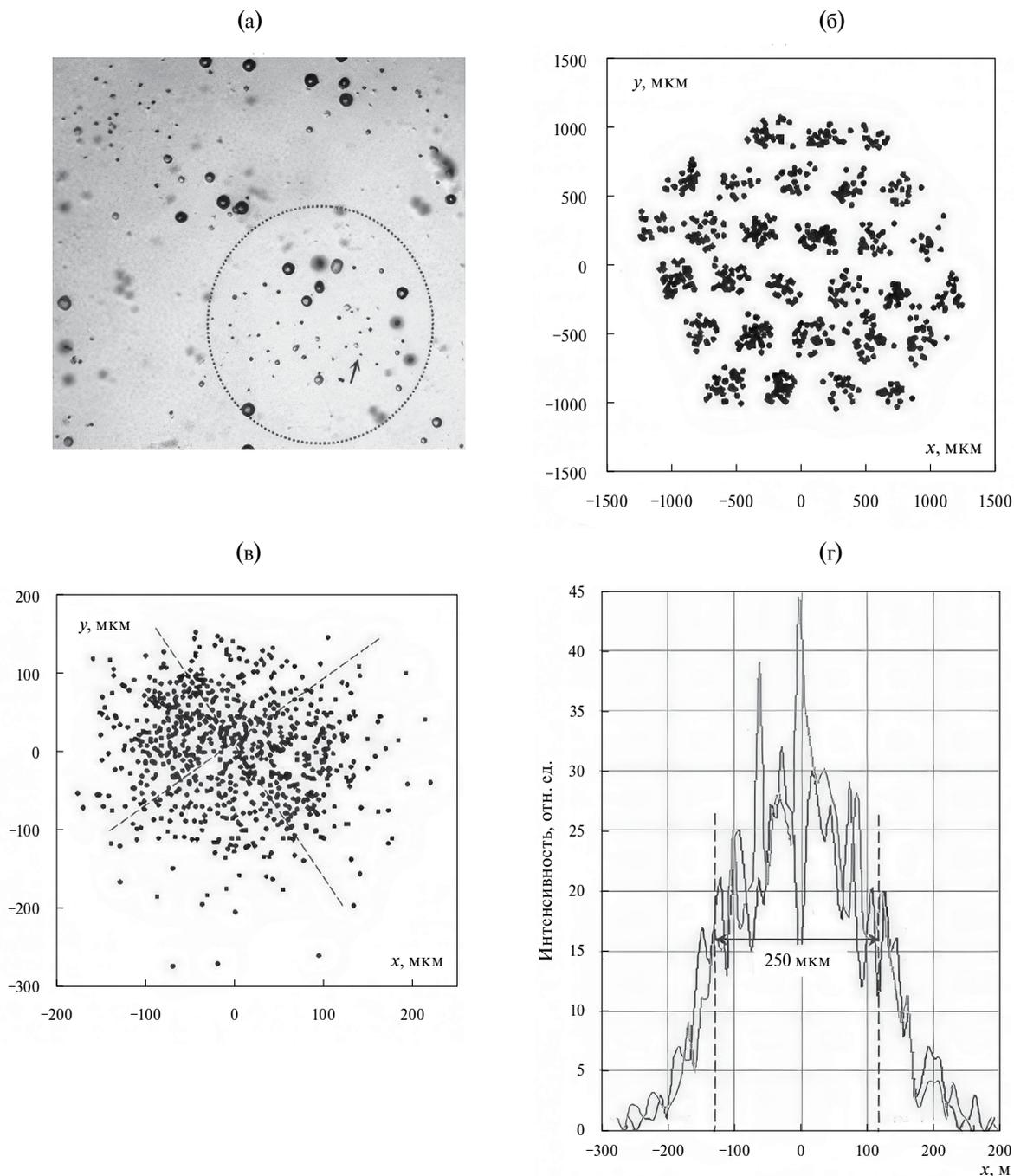


Рис. 4. Пример результата регистрации области кумуляции с помощью мультиобскуры: **а** – вид трекового детектора с группами треков, одна группа окружена пунктирной линией, стрелкой указан трек отдельного протона, **б** – координаты 29 групп треков, **в** – восстановленное изображение области кумуляции плазмы в DD-протонах, **г** – профиль изображения области вдоль штриховых линий на рис. **в**.

из 37 изображений от отдельных отверстий диафрагмы. На рис. 4в на восстановленном двумерном изображении видно, что область, испускающая протоны, несколько “смазана” в одном направлении. Зависимости на рис. 4г показывают, что средний диаметр области составляет примерно 250 мкм, что близко к размеру, полученному от изображения за большим отверстием в пределах погрешностей, что с точностью до тех же ± 50 мкм совпадает с диаметром на полувысоте интенсивности рентгеновских изображений.

Эффективность регистрации протонов трековым детектором CR-39 близка к 100% [15], поэтому количество зарегистрированных в изображениях треков с учетом светосилы используемых диафрагм может быть использовано для определения выхода ядерных реакций DD-синтеза. Выход DD-протонов в предположении их изотропного испускания в проведенных экспериментах по изображениям за диафрагмой с большим отверстием составил $(1-2.4) \cdot 10^7$. В целом же выход протонов систематически примерно в два раза ниже, чем выход нейтронов, измеренный методом прямой активации индия [17]. Эта разница может быть обусловлена тем, что, как показано в работе [15], при регистрации заряженных частиц, в частности протонов, имеются потенциальные источники ошибок из-за изменений траектории при взаимодействии с электрическими и магнитными полями [18], а также в результате рассеяния как на мишени, так и на оборудовании в целом и, кроме того, статистическими погрешностями обработки ограниченного числа регистрируемых событий, особенно в случае мультиобскуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность всем сотрудникам установки Искра-5 за подготовку и помощь в проведении экспериментов.

Статья посвящается светлой памяти коллеги и прекрасного экспериментатора Николая Александровича Сулова, внесшего неоценимый вклад в постановку экспериментов, обработку и подготовку результатов для печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McCrorry R.L., Meyerhofer D.D., Betti R., et al.* // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055503. <https://doi.org/10.1063/1.2837048>
2. *Collins T.J.B., Marozas J.A., Anderson S., et al.* // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 056308. <https://doi.org/10.1063/1.3693969>
3. *Lindl J.D., Amendt P., Berger R.L., et al.* // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 339. <https://doi.org/10.1063/1.1578638>
4. *Regan S.P., Goncharov V., Igumenshchev I.V., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 025001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.025001>
5. *Döppner T., Callahan D.A., Hurricane O.A., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 055001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.055001>
6. *Abu-Shawareb H., Acree R., Adams P., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. P. 075001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.075001>
7. *Ren G., Yan J., Liu J., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 165001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.165001>
8. *Abe Y, Sunahara A., Lee S., et al.* // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. P. 233506. <https://doi.org/10.1063/1.5016531>
9. *Satoh N., Watari T., Nishihara K., et al.* // Plasma Fusion Res. 2018. V. 13. P. 2401028. <https://doi.org/10.1585/pfr.13.2401028>
10. *Hohenberger M., Meezan N.B., Riedel W.M., et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 033544. <https://doi.org/10.1063/5.0040877>
11. *Бессараб А.В., Долголева Г.В., Зарецкий А.И. и др.* // ДАН СССР. 1985. Т. 282. № 4. С. 857.
12. *Бессараб А.В., Гайдаш В.А., Долголева Г.В. и др.* // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. С. 716.
13. *Гаранин С.Г., Душина Л.А., Елин И.П., и др.* // ЖЭТФ. 2019. Т. 155. С. 759. <https://doi.org/10.1134/S0044451019040199>
14. *Daido H., Yamanaka M., Mima K., et al.* // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. P. 2195. <https://doi.org/10.1063/1.98937>
15. *DeCiantis J.L., Séguin F.H., Frenje J.A., et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2006. V.77. P. 043503. <https://doi.org/10.1063/1.2173788>
16. *Сулов Н.А.* // КЭ. 2000. Т. 30. №8. С. 715. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n08ABEN001796>
17. *Елин И.П., Жидков Н.В., Сулов Н.А., Тачаев Г.В.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 9. <https://doi.org/10.31857/S003281622002010X>
18. *Кравченко А.Г., Литвин Д.Н., Лазарчук В.П., Мургуев В.М., Петров С.И., Сенюк А.В., Прянишников И.Г.* // ПТЭ. 2004. №2. С. 25.