

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ДД-НЕЙТРОНОВ МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ ИНДИЯ НА УСТАНОВКЕ “ИСКРА-5”

© 2020 г. И. П. Елин^{а,*}, Н. В. Жидков^а, Н. А. Суслов^а, Г. В. Тачаев^а

^а РФЯЦ – ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

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

Поступила в редакцию 26.10.2019 г.

После доработки 26.10.2019 г.

Принята к публикации 17.11.2019 г.

Представлены результаты разработки активационного метода измерения выхода ДД-нейтронов по реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ и его применения в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу на лазерной установке “Искра-5”. При интегральном выходе импульсного нейтронного излучения порядка 10^8 нейтронов относительная погрешность измерений составила 35%. Полученные в экспериментах результаты продемонстрировали возможность применения данного активационного метода как на существующих, так и на более мощных лазерных установках.

DOI: 10.31857/S003281622002010X

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров, характеризующих результаты эксперимента по исследованию работы термоядерных мишеней на лазерных установках, является нейтронный выход. Совершенствование методик его измерения – важная задача для исследования. Это особенно актуально с развитием мощных лазерных установок нового поколения.

Фотодиссоциационный йодный лазер “Искра-5” [1] представляет собой 12-канальную систему. Длина волны лазерного излучения на основной гармонике составляет $\lambda = 1.315$ мкм, энергия на выходе одного канала достигает 1000 Дж.

Проведенная ранее на лазерной установке “Искра-5” серия экспериментов с мишенями с обращенной короной (м.о.к.) с использованием основной гармонике лазерного излучения показала высокую эффективность использования энергии лазерного излучения в таких мишенях [2]. В экспериментах с м.о.к. при подведенной к мишени энергии около 10 кДж был зарегистрирован выход ДД-нейтронов $5 \cdot 10^9$. Для серии подобных экспериментов с м.о.к. с использованием второй гармонике лазерного излучения [3] был разработан и проверен экспериментально метод прямой активации индия ДД-нейтронами по реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$.

Методика прямой активации успешно применяется на установке NIF (National Ignition Facility, Ливермор, США) для определения интегрально-

го нейтронного выхода в экспериментах как с ДД-, так и с ДТ-топливом [4]. Для установок с импульсным нейтронным выходом, превышающим 10^{10} нейтронов на лазерный импульс (далее нейтронов/импульс), активационные методики являются наиболее предпочтительными среди всего спектра нейтронных диагностик [5].

В цели настоящей работы входили: оценка возможностей метода прямой активации индия ДД-нейтронами на установке “Искра-5” и перспективы его применения, разработка оптимального варианта размещения активируемого образца в камере взаимодействия, калибровка системы регистрации наведенной активности и проведение измерений выхода ДД-нейтронов в экспериментах с м.о.к.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В первичных реакциях синтеза в дейтериевой плазме в м.о.к. образуется поток нейтронов с энергией 2.45 МэВ. В процессе неупругого рассеяния данных нейтронов в реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ в индии нарабатывается изомер с периодом полураспада $T_{1/2} = 4.49$ ч. Переход изомера в основное, невозбужденное состояние сопровождается испусканием γ -квантов с энергией 336 кэВ и с ветвлением распада 45.8% [6, 7]. По окончании эксперимента, спустя небольшой промежуток времени, образец помещается в германиевый полупроводниковый γ -детектор для определения наведенной активности. Активность изомера определяется по

площади пика соответствующей γ -линии 336 кэВ. По результатам измерений определяется первоначальный выход нейтронов в эксперименте.

Значительное преимущество методов прямой активации различных материалов заключается в том, что сечения активации хорошо известны, поэтому при известных геометрических характеристиках облучаемого образца вместо калибровки метода на источнике нейтронов с использованием монитора достаточно провести калибровку аппаратуры для регистрации вторичного γ -излучения активированного образца. Такую калибровку относительно просто провести с помощью образцовых спектрометрических γ -источников (ОСГИ).

Применение активационных диагностик наиболее распространено при высоких нейтронных выходах, $>10^{10}$ нейтронов/импульс, что заметно превышает ожидаемый в экспериментах на установке “Искра-5” нейтронный выход 10^8 – 10^9 нейтронов/импульс. Поэтому для достижения максимальной чувствительности необходимо поместить образец как можно ближе к мишени, при этом максимально увеличив площадь облучения и массу образца. В то же время необходимо не создавать помех для другого диагностического оборудования, применяемого на камере взаимодействия, и не перекрывать пучки лазерного излучения, воздействующего на мишень. Анализ показал, что в условиях установки “Искра-5” индиевый образец диаметром ≥ 1 см может быть установлен на расстоянии не ближе чем 3.5 см от мишени.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При организации измерений основной задачей была установка индиевого образца на допустимо близком расстоянии от мишени с возможностью максимально быстрого его извлечения после выстрела из вакуумной камеры взаимодействия. Крепление образца в этом случае представляло собой полую штангу с устройством фиксации его положения. Штанга позволяла размещать образец непосредственно вблизи мишени на расстоянии $d = 3.5 \pm 0.1$ см от нее и транспортировать образец после снятия фиксации по полости штанги до вакуумного шлюза.

Наличие вакуумного шлюза позволяло после эксперимента изымать образец из вакуумной камеры взаимодействия в течение нескольких минут, не дожидаясь установления в ней атмосферного давления. Это сократило время задержки между выстрелом и началом измерения γ -активности образца с 2–3 ч до 10 мин, что весьма значимо, учитывая период полураспада ^{115m}In , равный 4.49 ч. К сожалению, небольшое сечение транспортного канала штанги ограничивало раз-

мер образца до его эффективной площади 0.79 ± 0.06 см².

Для предотвращения деформации и плавления под воздействием плазмы и рассеянного лазерного излучения индиевый образец был защищен алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм.

Нейтронный выход в эксперименте определялся по соотношению, которое было получено с учетом результатов работы [7] и условий реализации метода на установке “Искра-5”:

$$Y = \frac{C - B}{a_{\phi} \epsilon_D \epsilon_S n \sigma(E) \epsilon_B V (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})},$$

где C – площадь γ -пика с фоном; B – площадь фона; a_{ϕ} – доля нейтронов, попавших на образец; ϵ_D – эффективность детектора; ϵ_S – коэффициент, характеризующий самопоглощение излучения в образце; n – концентрация атомов изотопа ^{115}In в образце; $\sigma(E)$ – сечение поглощения в образце нейтронов с $E_n = 2.45$ МэВ; ϵ_B – ветвление распада; V – объем образца; λ – постоянная распада; t_1, t_2 – время начала и конца измерения наведенной активности образца соответственно.

Согласно [8], минимально измеряемая активность определяется соотношением:

$$A_{\min} = \frac{1 + 2\delta\sqrt{n_{\phi}T}}{\delta^2 \epsilon_S \epsilon_D T},$$

где $T = t_{\phi} + t$ – общее время измерения; t_{ϕ} – время измерения фона; t – время измерения активности; n_{ϕ} – скорость счета фона; δ – требуемая относительная погрешность измерения. Полагая $\delta = 0.5$, можно определить минимально измеримый выход нейтронов в геометрии эксперимента как $Y \approx 1.4 \cdot 10^8$ нейтронов/импульс.

Калибровка эффективности регистрации γ -квантов германиевым детектором проводилась с использованием калиброванного источника γ -квантов ^{133}Ba из набора ОСГИ на γ -линии с энергией $E = 356$ кэВ, что близко к измеряемой в методе линии γ -излучения изомера ^{115}In ($E = 336$ кэВ). При размещении источника ^{133}Ba на поверхности детектора измеренная эффективность регистрации детектором составила $\epsilon_D = 0.093 \pm 0.002$, что в пределах погрешности совпадает с известными литературными данными [7], полученными в близких условиях.

Для оценки доли нейтронов, перерассеянных от камеры взаимодействия, было проведено моделирование эксперимента с применением метода Монте-Карло в программе MCNPX. По результатам моделирования доля перерассеянных нейтронов составила менее 5% от общего значения. В процессе рассеяния нейтроны теряют энергию, и сечение поглощения в индии для них снижается в разы, что уменьшает их влияние на активность образца до 2–3% от общего значения.

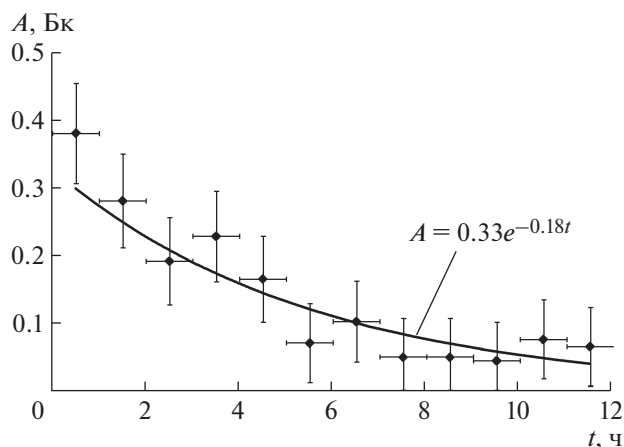


Рис. 1. Активность A изомера в индиевом образце после эксперимента. Точки – результаты эксперимента, линия – экспоненциальная аппроксимация результатов экспериментов.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Метод измерения нейтронного выхода путем прямой активации индия на лазерной установке “Искра-5” был испытан экспериментально в серии опытов с м.о.к. при использовании второй гармоники лазерного излучения и всех 12-ти каналов установки [9].

Измерения были проведены в шести экспериментах. В двух экспериментах выход нейтронов превысил порог минимально измеримого с учетом погрешностей. Пример измерения ниспадающей наведенной активности изомера индиевого образца после эксперимента показан на рис. 1. Активность, определенная в ходе измерений, представлена отдельными точками и соответствующей экспоненциальной линией аппроксимации.

Постоянная распада для кривой аппроксимации, построенной по экспериментальным точкам, составляет $\lambda_{\text{аппр}} = (5.1 \pm 1.5) \cdot 10^{-5}$, а для изомера $^{115\text{m}}\text{In}$ $\lambda_{\text{изом In}} = 4.3 \cdot 10^{-5}$ [6]. Таким образом, падение активности индиевого образца, облученного в эксперименте, по скорости распада соответствует распаду изомера $^{115\text{m}}\text{In}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам измерений, представленных на рис. 1, в эксперименте нейтронный выход составил $(1.7 \pm 0.6) \cdot 10^8$ нейтронов/импульс. По результатам измерений другими диагностиками, применяемыми на установке “Искра-5”, усредненный нейтронный выход в этом эксперименте составил $(2.1 \pm 0.5) \cdot 10^8$ нейтронов/импульс, что свидетельствует о совпадении результатов в пределах погрешности измерений. При увеличении нейтронного выхода до уровня $>1 \cdot 10^9$ нейтро-

нов/импульс относительная погрешность измерения, согласно расчетам, снизится до менее чем 0.15. Таким образом, убедительно продемонстрирована способность измерения данным методом интегрального выхода импульсного нейтронного излучения в экспериментах по термоядерному синтезу на лазерных установках с относительно невысоким нейтронным выходом.

ВЫВОДЫ

В экспериментах на лазерной установке “Искра-5” реализован метод измерения интегрального выхода импульсного нейтронного излучения посредством прямой активации индия. Результаты измерений показали, что в имеющихся условиях чувствительность метода составила примерно 10^8 нейтронов/импульс при относительной погрешности ~ 0.35 , а увеличение выхода нейтронов свыше 10^9 при сохранении геометрии облучения образца приводит к снижению относительной погрешности до менее чем 0.15. По сравнению с другими методами измерения нейтронного выхода описанный метод имеет такие преимущества, как относительно простая процедура калибровки и возможность масштабирования параметров, что позволяет измерять как большие, так и малые нейтронные выходы. Таким образом, можно говорить о значительных перспективах применения метода измерения нейтронного выхода путем активации индия как на существующих лазерных установках, так и на потенциально более мощных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив сотрудников установки “Искра-5” за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков В.И., Багрецов В.А., Безуглов В.Г., Виноградский Л.М., Гайдаш В.А., Галахов И.В., Гашеев А.С., Гузов И.П., Задорожный В.И., Ерошенко В.А., Ильин А.Ю., Каргин В.А., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Кротов В.А. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 5. С. 536.
2. Бессараб А.В., Гайдаш В.А., Долголева Г.В., Жидков Н.В., Изгородин В.М., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Курнин А.В., Литвин Д.Н., Муругов В.М., Насыров Г.Ф., Пунин В.Т., Рогачев В.Г., Сеник А.В., Суслов Н.А., Тачаев Г.В., Шемякин В.И. // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. Вып. 6. С. 1800.
3. Анненков В.И., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Виноградский Л.М., Гайдаш В.А., Галахов И.В., Гарагин С.Г., Ершов В.П., Жидков Н.В., Зильберберг В.В., Зубков А.В., Калипанов С.В., Каргин В.А., Кириллов Г.А., Коваленко В.П. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 11. С. 993.

4. *Bleuel D.L., Yeamans C.B., Bernstein L.A. Bionta R.M., Caggiano J.A., Casey D.T., Cooper G.W., Drury O.B., Frenje J.A., Hagmann C.A., Hatarik R., Knauer J.P., Gatu Johnson M., Knittel K.M., Leeper R.J. и др.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83. 10D313. <https://doi.org/10.1063/1.4733741>
5. *Jarvis O.N., Clipham E.W., Hone M.A., Laundry B.J., Pillon M., Rapisarda M., Sadler G.J., Belle P., Verschuur K.A.* // *Fusion Tech.* 1991. V. 20. № 3. P. 265. <https://doi.org/10.13182/FST91-A29668>
6. *Маслов И.А., Лукницкий В.А.* Справочник по нейтронному активационному анализу. Л.: Наука, 1971.
7. *Cooper G.W., Ruiz C.L.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. V. 72. P. 814. <https://doi.org/10.1063/1.1320997>
8. *Дементьев В.А.* Измерение малых активностей радиоактивных препаратов. М.: Атомиздат, 1967.
9. *Гаранин С.Г., Душина Л.А., Елин И.П., Жидков Н.В., Изгородин В.М., Калмыков Н.А., Коваленко В.П., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н., Петров С.И., Поздняков Е.В., Рогачев В.Г., Стародубцев К.В., Суслов Н.А., Тачаев Г.В., Чаунин А.Е.* // *ЖЭТФ.* Т. 155. Вып. 4. С. 759. <https://doi.org/10.1134/S0044451019040199>