

УДК 539.17.01,539.142,539.143

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2019 г. В. Н. Пономарев¹, Г. В. Солодухов^{1, *}, В. Г. Недорезов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: solod@inr.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 27.05.2019 г.

Возникший в последнее время интерес к исследованиям фотоядерных реакций вблизи порога (при энергиях электронов и фотонов ниже 10 МэВ) потребовал создания пучков электронов с улучшенными характеристиками. В настоящей работе представлены результаты работ, позволивших получить на ускорителе ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН пучок электронов со следующими параметрами: энергия пучка регулируется в пределах 4–10 МэВ, энергетическое разрешение (ширина на полувысоте) – от 1% при токах до 6 мкА и 10% при максимальных значениях тока до 300 мкА при частоте повторения импульсов 300 с^{-1} и длительности импульса 3 мкс. Пучки с высоким разрешением получены с применением магнитной системы формирования пучка с поворотом его на 270° . На действующем радиационном комплексе за последнее время выполнен ряд экспериментов по возбуждению ядерных изомеров в области пигми-резонанса, измерению электрон-позитронной конверсии вблизи порога для ряда ядер и др.

DOI: 10.1134/S0367676519090229

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов серии ЛУЭ-8-5 разработаны НИИЭФА имени Д.В. Ефремова предназначены, главным образом, для использования в решении прикладных задач из области физики твердого тела, изучения радиационной стойкости материалов и радиокомпонентов, обработки различного рода сырья, материалов и изделий для медицинских целей и т.д. Они успешно применяются в задачах активационного анализа различных элементов. Ускоритель из этой серии в модификации ЛУЭ-8-5РВ [1] работает в институте ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН, Москва). Его номинальные параметры: энергия электронов 8 МэВ с возможностью регулировки в пределах 6–10 МэВ при ширине энергетического спектра 10% (FWHM).

1. ФИЗИЧЕСКИЙ ИНТЕРЕС

В настоящее время для развития перспективных направлений фундаментальных и прикладных исследований, включая решение проблем ядерного нераспространения и борьбы с терроризмом, активно развиваются фотоядерные исследования при малых энергиях вблизи порога

вылета нуклонов. Работы ведутся, как правило, на источниках гамма-излучения нового поколения с использованием новых типов электронных ускорителей (таких как родотрон, накопительное кольцо с обратным комптоновским рассеянием, мощный фемтосекундный лазер). Эти работы получили название “ядерная фотоника”. Для подготовки к новым экспериментам в лаборатории ядерных реакций ИЯИ РАН отрабатываются методики на базе ЛУЭ-8.

Среди фундаментальных планируемых исследований можно отметить исследования коллективных мод колебаний в ядрах (пигми-резонансы, гигантские резонансы различной мультипольности, приложения к астрофизике). Среди прикладных – глубокая томография массивных объектов, в том числе ядерного топлива, с использованием метода резонансной флюоресценции, неразрушающий обзор крупнотоннажных контейнеров с целью обнаружения ядерных и взрывчатых материалов на новом технологическом уровне, радиационная медицина, наработка изотопов и рентгеновская диагностика.

За последние годы на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8 разработаны и апробированы новые методы квазимонохроматизации тор-

Таблица 1. Основные характеристики пучка электронов ускорителя ЛУЭ-8-5PB после магнитной системы

Энергия пучка плавно регулируется в пределах	4–10 МэВ
Ширина энергетического спектра (FWHM) во всем указанном диапазоне энергий	Лучше 1%
Средний ток пучка электронов, доступный для эксперимента	До 6 мкА
Частота повторения импульсов ускорения	До 300 с ⁻¹
Длительность импульса	3 мкс

можных гамма-пучков на основе моделирования [2]. Совместно с международным учебно-научным лазерным центром (МЛЦ МГУ) ведутся исследования фотоядерных реакций на фемтосекундном лазерном комплексе [3].

Следует отметить, что наряду с совершенствованием параметров пучков электронов и фотонов расширяется перечень методик, пригодных в настоящее время для применения при исследованиях в этом диапазоне энергий. В основном результаты получают в экспериментах по измерению сечений упругого и неупругого рассеяний фотонов с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения. Следует, однако, рассматривать и другие возможности, в частности – прямое измерение полных сечений методом полного поглощения и измерение зависимости выходов спиновых изомеров от энергии фотонов [4].

2. СУЩНОСТЬ РАБОТЫ

Упомянутый выше активный интерес к исследованиям фотоядерных реакций вблизи порогов реакций с вылетом нуклонов, т.е. при энергиях электронов и фотонов ниже 10 МэВ, потребовал создания пучков электронов с улучшенными характеристиками. Ниже описаны результаты работы, позволившей получить на

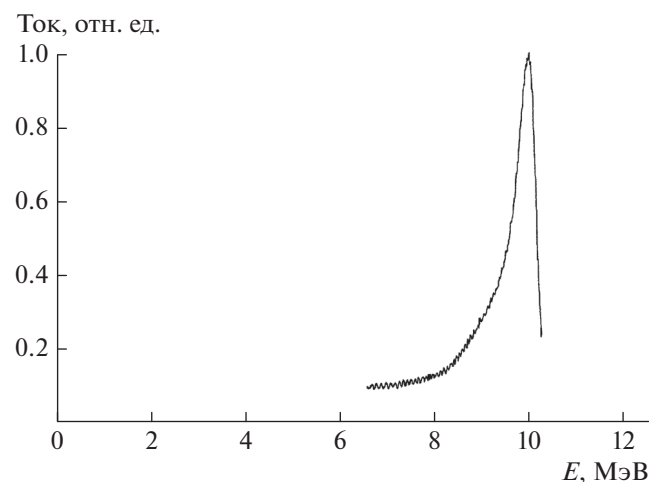


Рис. 1. Типичный спектр электронов на выходе ускорителя (прямой пучок).

ускорителе ЛУЭ-8-5PB пучок электронов с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Исходная форма спектра электронов на прямом пучке, типичная для ускорителей этого класса, показана на рис. 1. Высокое энергетическое разрешение, требуемое для упомянутых выше исследований, достигнуто в данной работе за счет значительного продольного расширения электронного сгустка вследствие различия длин траекторий электронов разных энергий и последующего выделения части спектра электронов. Для этого использована магнитооптическая система – растяжитель [5] с двумя магнитами с радиусами равновесных траекторий 150 мм, поворачивающими пучок на 135° каждый. Измеренные энергетические распределения электронов во всем диапазоне энергий показаны на рис. 2, из которого видно, что контролируемый шаг изменения энергии электронов может составлять менее 100 кэВ.

Медленная регулировка тока пучка осуществляется за счет изменения тока накала, быстрая – регулировкой высокого напряжения на источнике электронов. Изменение энергии пучка в пределах

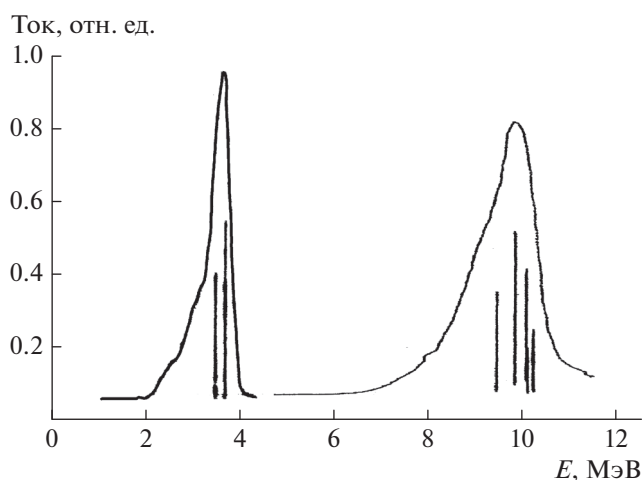


Рис. 2. Спектры электронов после прохождения элементов магнитной системы. Два широких спектра – после поворота пучка на 135°. Их максимумы соответствуют 3.6 и 9.9 МэВ. Узкие линии под ними – после поворота на 270°. Видны отчетливо разрешенные линии с энергиями (слева направо): 3.5 и 3.7 МэВ; 9.4, 9.8, 10.1 и 10.3 МэВ. Интенсивность в максимуме около 1 мкА.

4–10 МэВ достигается путем изменения напряжения на катоде магнетрона и, существенным образом, за счет изменения частоты СВЧ-излучения магнетрона. Этот метод реализуется с помощью примененного нами нестандартного комплекса контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющего постоянно отслеживать, регулировать и поддерживать оптимальные для каждого режима работы магнетрона частоту и спектр излучения. Оснащение комплекса ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН магнитооптической системой растяжки пучка и применяемым набором контрольной СВЧ-аппаратуры для данного типа ускорителей представляется уникальным и позволяет обеспечить необходимые условия для проведения высокоточных современных экспериментов, в том числе и в области ядерной фотоники.

Для получения абсолютных значений величин, измеряемых в эксперименте, неременной процедурой является нормирование аппаратурных данных. С этой целью на ускорителе обеспечена возможность контроля основных параметров процесса облучения, их запись и запоминание для дальнейшей обработки.

На действующем радиационном комплексе выполнен ряд экспериментов по делению ядер актиноидов вблизи порога, возбуждению ядер-изомеров в области пигми-резонанса и измерению электрон-позитронной конверсии для ряда ядер вблизи порога реакций с вылетом нуклонов.

Следует отметить, что наличие реальной возможности использования в эксперименте пучка электронов в диапазоне 4–10 МэВ с разрешением не хуже 100 кэВ и интенсивностью в импульсе порядка 10^{13} электронов за 3 мкс является, с одной стороны, уникальной, а с другой стороны – даже избыточной для обычно применяемых детекторов. Добавим, что эта избыточность дает экспериментатору возможность широкого применения различных дополнительных фильтров и методик для повышения качества получаемого экспериментального материала.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 16-12-10039.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грызлов А.И., Кудинов И.В., Мунтян В.И. и др. // Третье всесоюз. сов. по проб. уск. заряд. частиц в нар. хоз. (Ленинград, 1979). Т. 1. С. 254.
2. Зуев С.В., Недорезов В.Г., Конобеевский Е.С. и др. // ЯФ. 2018. Т. 81. С. 409; Zuyev S.V., Nedorezov V.G., Konobeevski E.S. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. P. 442.
3. Туринге А.А., Недорезов В.Г., Савельев А.Б. // ЭЧАЯ. Т. 49. С. 999; Turinge A.A., Nedorezov V.G., Saveliev A.B. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 569.
4. Недорезов В.Г., Конобеевский Е.С., Зуев С.В. и др. // ЯФ. 2017. Т. 80. С. 423.
5. Громов А.М., Солoduхов Г.В. // XII сов. по уск. заряд. частиц. (Москва, 1990). Т. 2. С. 275.