

© 2011 А. Г. Зелинский, В. А. Желтоножский, В. И. Сахно,
Т. В. Ковалинская, Н. В. Халова

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описаны методические решения применения технологических ускорителей электронов для ядерных исследований. Приводятся средства адаптации радиационной установки ИЯИ НАН Украины с ускорителем электронов для исследований сечений электронного возбуждения изомерных состояний ядер. Измерены сечения электронного возбуждения ^{176}Lu и ^{193}Ir при энергии электронов 4 МэВ, которые составили $(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ для $^{176\text{m}}\text{Lu}$ и $(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ для $^{193\text{m}}\text{Ir}$.

Ключевые слова: ускоритель электронов, изомерные состояния.

Процессы возбуждения и разрядки изомерных состояний в атомных ядрах является одним из интенсивно исследуемых направлений современной ядерной физики. Во избежание влияния ядерного потенциала налетающих частиц мишени часто облучают лептонами. В связи с тем, что сечение взаимодействия лептонов с ядрами оказались малыми, произошло снижение интереса экспериментаторов к таким исследованиям в диапазоне низких энергий (до 3 - 4 МэВ), отчасти из-за того, что используемая экспериментальная техника уже не в состоянии обеспечить нужные интенсивности потоков электронов.

Фактором, который способствует дальнейшему прогрессу таких исследований, стало развитие радиационных технологий – промышленного облучения материалов при производстве различных изделий, в медицине и энергетике. Для этих целей создаются новые крупные ускорители электронов с высокими интенсивностями, вплоть до эквивалентной электрической мощности 1 МВт. Поэтому на первый взгляд малозначимые эффекты модификации материалов необходимо изучать и учитывать при разработке новых радиационных технологий с высокоинтенсивными пучками электронов. В новых технологических регламентах необходимо исключить возможность возникновения непредусмотренных веществ или эффектов.

В этом плане изучение процессов образования и разрядки изомерных состояний атомов в различных материалах при взаимодействиях с интенсивными потоками электронов низких энергий стало актуальным и оправдывает усилия по организации новых исследований. Поэтому было предложено рассмотреть возможность организации исследований изомерных состояний на ускорителях электронов с высокими мощностями пучков (хотя бы 3 ÷ 6 кВт). Такие ускорители обычно входят в состав производственных тех-

нологических линий. Они не приспособлены для выполнения научных экспериментов, тем более для ядерных исследований. В ИЯИ НАН Украины на радиационной установке [1] решены проблемы модернизации промышленного ускорителя электронов “Электроника-У005”, позволяющие выполнять исследования ядерных изомерных состояний. Ускорители серии “Электроника” более предпочтительны для этих целей благодаря наличию специального окна для выпуска в атмосферу интенсивного пучка. Это позволяет адаптировать их без вмешательства в конструкцию ускорителя путем модернизации только подпучкового оборудования.

При организации облучений мишеней для ядерных исследований возникает ряд проблем, например:

- возрастание уровня нежелательных излучений в реакционной камере и ухудшение радиационной обстановки в прилегающих к ней технологических помещениях;

- организация подпучковых средств установки; обеспечение соответствующих перемещений и охлаждений облучаемых мишеней;

- необходим более высокий уровень метрологии по сравнению с промышленными технологическими процессами;

- облученные образцы желательно измерять сразу после облучения и др.

Увеличение γ -фона происходит при облучении мишеней для ядерно-физических исследований, содержащих тяжелые (с большим атомным числом) материалы, которые в радиационных технологиях, обычно, отсутствуют. Но особенно сильно увеличивается γ -фон от тормозных γ -квантов, когда производится целевая конверсия пучка посредством установки тормозной мишени. Во избежание ухудшения радиационной обстановки в помещениях установки и на прилегающей территории от возросшего γ -потока при

таких исследованиях внутри реакционной камеры создан отдельный изолированный бокс из свинца толщиной 10 см размерами 120 × 100 × 60 см. Такая защита снижает тормозное γ -излучение до безопасной величины. Этот бокс оборудован различными приспособлениями и устройствами, которые совместно образуют автономную экспериментальную установку.

Схематический вид этой экспериментальной установки показан на рис. 1. Основными ее компонентами являются защитный бокс и подвижный кронштейн. Напротив выпускного окна ускорите-

ля в защитном боксе предусмотрено окно размерами 10 × 10 см для подачи пучка электронов диаметром 3 - 4 см. На кронштейне на высоте пучка закреплены датчики системы измерений характеристик пучка и специальная охлаждаемая подложка для облучаемых мишеней. Кронштейн может перемещаться поперек продольной оси с помощью электропривода с дистанционным управлением. Это дает возможность подавать под пучок облучаемые мишени или какой-либо из датчиков (для измерений пучка).

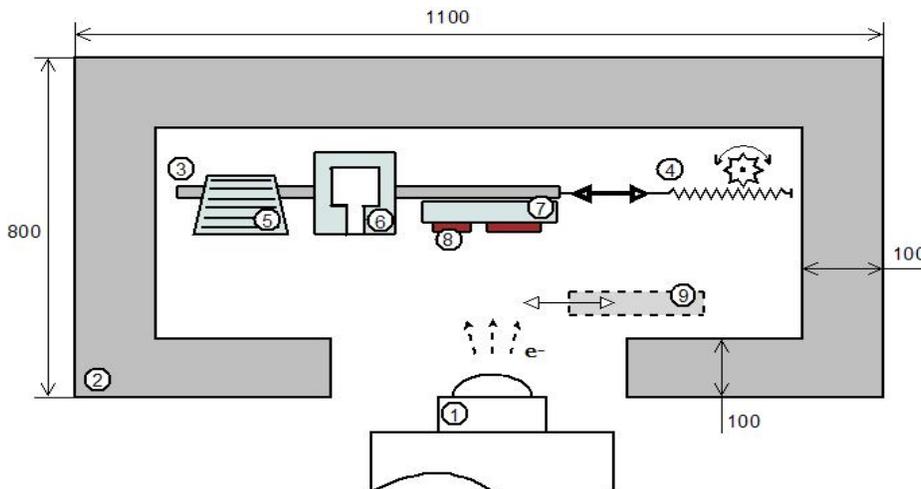


Рис. 1. Схема проведения эксперимента (вид сверху): 1 - выпускное окно; 2 - защитный бокс; 3 - кронштейн; 4 - электропривод; 5 - датчик измерителя энергии; 6 - ЦФ; 7 - подложка для мишеней; 8 - мишени; 9 - конверсионная мишень.

В процессе эксперимента вначале устанавливается нужный режим ускорителя. Для этого под пучок электроприводом вводят цилиндр Фарадея (ЦФ) с площадью входного окна 1 см² и измеряют плотность тока электронов. Возможность плавного перемещения ЦФ позволяет измерять распределение плотности тока в горизонтальном сечении. Поскольку пучок аксиально-симметричный [2], то мы можем определить геометрические границы пучка, в пределах которых его неоднородность приемлема. После установки нужной интенсивности в пучок вводится датчик измерителя энергии [3] и определяется энергетический спектр электронов.

При необходимости осуществляется коррекция величины энергии и плотности тока. Когда необходимые параметры пучка установлены, в него вводится подложка с закрепленными на ней мишенями.

В схеме экспериментальной установки предусмотрена возможность облучения γ -квантами с широким энергетическим спектром (тормозным излучением). Для этого предусмотрена конверсионная мишень из вольфрама, которой можно перекрывать входное окно бокса (с помощью

специальной механики). Толщина конверсионной мишени больше длины пробега электрона максимальной энергии (для данного ускорителя). Мишень обеспечивает полную конверсию энергии электронов пучка в γ -кванты тормозного излучения и исключает прямое попадание электронов на исследуемые мишени. Последнее обстоятельство полезно для калибровки измеряемых процессов по известным изомерам, а также для выделения электронных эффектов при обработке результатов.

Чтобы реализовать перечисленные перемещения, было приспособлено имеющееся на установке оборудование [4]. В результате была создана механическая система, в которой к подвижной каретке, расположенной под потолком реакционной камеры установки, траверсой длиной 1 м прикреплен кронштейн (рис. 2). Подвижная каретка имеет возможность обеспечивать перемещение в трех координатах, на которых имеются датчики положений, информирующие о положениях механизмов (в данном случае – о положении кронштейна относительно выпускного окна ускорителя). Такое техническое решение позволило в защитном боксе разместить только

подпучковое оборудование, а все остальное – на достаточном удалении.

Все предметы, которые оказываются под пучком, подвергаются принудительному охлаждению струей воздуха от внешнего вентилятора.

Эффективность системы отвода тепла создавалась такой, чтобы предотвратить перегрев и разрушение мишеней и датчиков при максимальной плотности тока пучка электронов.

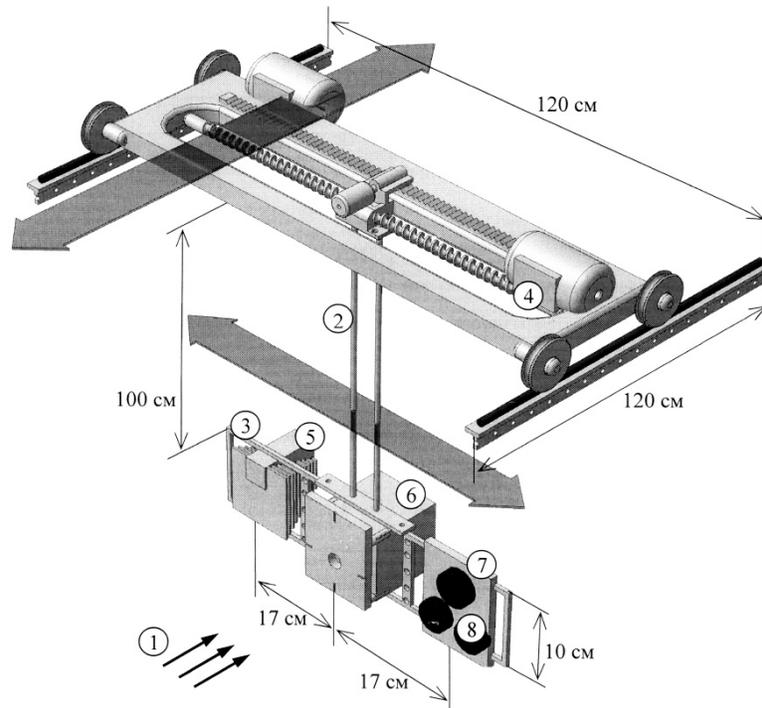


Рис. 2. Схематическое изображение механической системы размещения и передвижения предметов под пучком: 1 - поток электронов; 2 - траверса; 3 - кронштейн; 4 - подвижная каретка; 5 - датчик измерителя энергии; 6 - ЦФ; 7 - подложка для мишеней; 8 - мишени.

Мишени располагались на подложке, размеры которой выбраны из условия одновременного облучения нескольких разных образцов для гарантии идентичности условий облучения, что позволяет проводить сравнительный анализ. В данной серии экспериментов это было на расстоянии 25 см от выпускного окна, где поперечные размеры пучка около 100 см^2 , это площадь, на которой неоднородность потока составляет не более чем $\pm 15 \%$.

Опыт показал, что предложенный путь адаптации промышленных радиационных установок (с ускорителями электронов) для проведения ядерно-физических экспериментов оправдан и позволяет расширить спектр применяемой техники для экспериментов в ядерной физике.

На пучке электронов с энергией $4 \pm 0,5 \text{ МэВ}$ модернизированной радиационной установки ИЯИ НАН Украины нами были проведены исследования процессов электровозбуждения изомерных состояний ^{176}Lu и ^{193}Ir . Интенсивность потока электронов в этих экспериментах составляла $1,5 \cdot 10^{13} \text{ e}^-/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. Неоднородность пучка составляла $\pm 15 \%$. Однако это не оказало особого

влияния на точность результатов, так как поток электронов (и γ -квантов) определялся применением дополнительных мишеней с хорошо известными сечениями.

На рис. 3 и 4 приведены фрагменты γ -спектров. В них наблюдается K_{α} -излучение, связанное с фото-возбуждением матрицы лютеция и распадом $^{176\text{m}}\text{Lu}$ на уровне гафния (см. рис. 3) и сам γ -переход гафния. На рис. 4 из-за большой величины коэффициента внутренней конверсии на K -оболочке ($\alpha_K \sim 100 \%$) для сравнения приведен фрагмент K_{β} -группы иридия. В это K_{β} -излучение дает вклад и фотоионизация матрицы иридия, поэтому расчеты сечения возбуждения выполнялись по данным о γ -интенсивности изомерного $M4$ -перехода с энергией 80 кэВ (см. рис. 4). Присутствие K_{β} -излучения свинца обусловлено фотовозбуждением защиты Ge-детектора. В спектре на рис. 3 K_{α} -излучение свинца мало, так как измерения проводились в течение 3÷4 ч, а на рис. 4 приведены спектры, которые измерялись в течение 10 сут, поэтому, естественно, там фоновое K_{α} -излучение свинца проявилось более ярко.

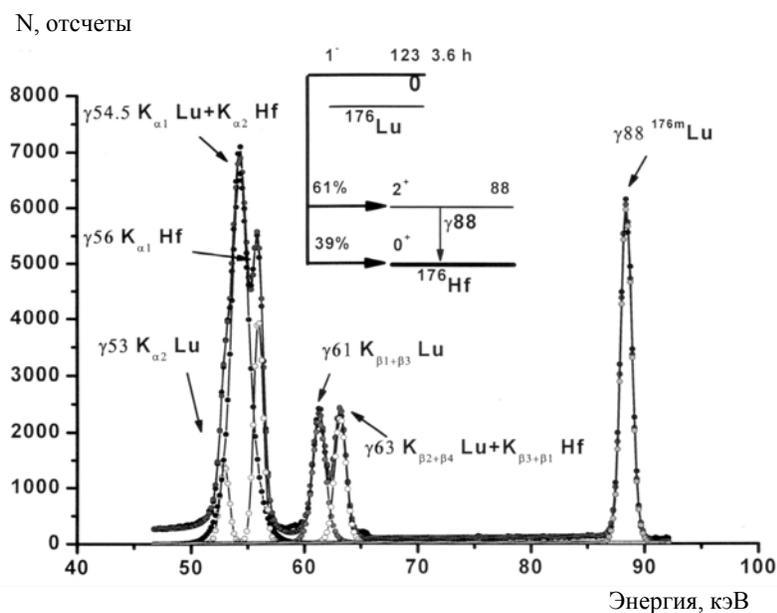


Рис. 3. Фрагмент γ -спектра распада ^{176m}Lu .

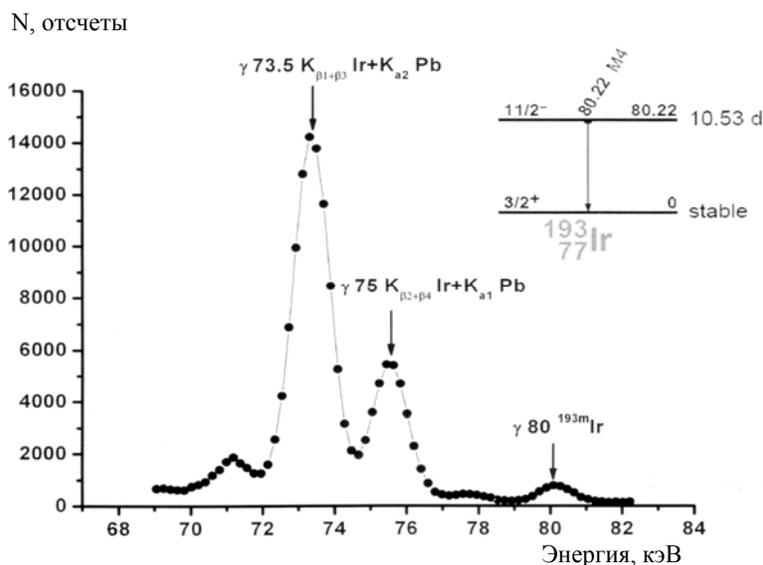


Рис. 4. Фрагмент γ -спектра распада ^{193m}Ir .

Следовательно, нами впервые наблюдается возбуждение электронами низких энергий изомеров в ^{176}Lu и ^{193}Ir . Причем активности этих радионуклидов были достаточны и для изучения таких ядерных процессов как внутренняя конверсия γ -лучей.

Полученные сечения возбуждения изомерных состояний в мишенях из естественных смесей лютеция и иридия составляют: $\sigma(^{176m}\text{Lu}) = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$, $\sigma(^{193m}\text{Ir}) = (1,2 \pm 0,1) \times 10^{-29} \text{ см}^2$.

Основная погрешность в сечениях обусловлена ошибками в определении потока. Другие ошибки не превышают $(2 \div 3) \%$. Вклад γ -компоненты составляет $(10 \div 20) \%$, который опреде-

лялся облучением электронами и тормозными квантами от этих электронов.

Необходимо отметить, что данные об электронвозбуждении очень малочисленны и в основном выполнялись в 50 - 60-е годы прошлого века (см. например [5, 6]). В основном в этих работах измерялись возбуждения изомеров кадмия и индия. Нами ранее [7] также были выполнены исследования на этих ядрах и были получены результаты, хорошо совпадающие с данными других авторов.

Результаты эксперимента позволяют сделать некоторые выводы.

1. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования ядерных изомеров.

2. Электровозбуждение ядерных изомеров электронами с энергией 4 МэВ – высокоэффективный процесс, который позволяет нарабатывать изомеры и для других экспериментов, в частности для изучения эффектов высших порядков в процессе внутренней конверсии изомерных γ -переходов.

3. В радиационных технологиях применяют источники электронов и γ -квантов в технологическом диапазоне энергий (0 ÷ 10) МэВ. Принято

считать, что при этом радиоактивность не образуется и даже не предусматривается дополнительный контроль наличия остаточной активности. Наши эксперименты свидетельствуют, что это не совсем так. Это обстоятельство может ограничить применимость радиационных технологий. Чтобы прояснить ситуацию, необходимо провести масштабные исследования. Установка, на которой это можно сделать, имеется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Томчай С.П., Сахно В.И., Вишневецкий И.Н. и др.* Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины // Атомная энергия. - 2003. - Т. 94, вып. 2. - С. 163 - 166.
2. *Сахно О.В.* Дослідження і розробка методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ІЯД НАН України. - К., 2008.
3. *Зелінський А.Г.* Разработка технических средств измерения энергии ускоренных электронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. - 2008. - № 2. - С. 191 - 192.
4. *Сахно В.И., Сахно А.В., Зелінський А.Г. и др.* Разработка технологических процессов радиационной модификации фиброматериалов с применением ускорителей заряженных частиц // Ядерні та радіаційні технології. - 2007. - Т. 7, № 1 - 2. - С. 14 - 18.
5. *Chertok B.T., Booth E.C.* Nuclear excitation by 1 MeV to 3 MeV electrons // Nucl. Phys. - 1965. - Vol. 66. - P. 230 - 240.
6. *Booth E.C., Brownson J.* Electron and photon excitation of nuclear isomers // Nucl. Phys. - 1967. - Vol. 98. - P. 529 - 541.
7. *Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Зелінський А.Г. и др.* - Возбуждение изомеров в (e, e')-рассеянии // Ядерна фізика та енергетика. - 2006. - № 1 (17). - С. 20 - 23.

**А. Г. Зелінський, В. О. Желтоножський, В. І. Сахно,
Т. В. Ковалінська, Н. В. Халова**

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Описано методичні рішення застосування технологічних прискорювачів електронів для ядерних досліджень. Наводяться засоби адаптації радіаційної установки ІЯД НАН України з прискорювачем електронів для досліджень перерізів електронного збудження ізомерних станів різних ядер. Проведено вимірювання перерізів електронного збудження ^{176}Lu та ^{193}Ir при енергії електронів 4 МэВ, що становлять $(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ для $^{176\text{m}}\text{Lu}$ та $(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ для $^{93\text{m}}\text{Ir}$.

Ключові слова: прискорювач електронів, ізомерні стани.

**A. G. Zelinsky, V. O. Zheltonozhsky, V. I. Sakhno,
T. V. Kovalinska, N. V. Khalova**

IMPLEMENTATION OF THE TECHNOLOGICAL ELECTRONS ACCELERATOR FOR NUCLEAR RESEARCH

Methodical decisions of application of technological electrons accelerator for nuclear researches are described. Tools of adaptation of the radiation installation of Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine with the electrons accelerator for research of cross sections of electronic excitation of the isomer states of different nucleon are given. Cross sections of electro-excitation in ^{176}Lu and ^{193}Ir at energy of electrons 4 MeV, which is $(3.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-29} \text{ cm}^2$ for $^{176\text{m}}\text{Lu}$ and $(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-29} \text{ cm}^2$ for $^{193\text{m}}\text{Ir}$ is measured.

Keywords: electrons accelerator, isomer states.

Поступила в редакцію 15.03.11,
после доработки - 15.06.11.