

# СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ГАММА-КВАНТОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНОЙ $\beta$ -АКТИВНОСТИ

*Н.И. Айзацкий, В.И. Кулибаба, Н.И. Маслов, В.А. Мац, В.Д. Овчинник, Б.И. Шраменко*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*  
*Харьков, Украина*  
*E-mail: bshram@kipt.kharkov.ua*

Представлены конструкция и принцип работы системы для измерения остаточной поверхностной  $\beta$ -активности образца, облученного пучком тормозного излучения или электронов. В измерительной системе используется тонкий планарный кремниевый детектор с высокой эффективностью регистрации  $\beta$ -частиц, что позволяет надежно идентифицировать их на фоне гамма-квантов  $\beta$ -распада и, тем самым, получить достоверную информацию о распределении  $\beta$ -активности. С использованием данной системы были проведены исследования возможности измерения профилей как интенсивных пучков электронов, так и генерированного ими в конвертере тормозного излучения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследований на пучках электронов и тормозного гамма-излучения наряду с такими параметрами как энергия и интенсивность излучения требуется также знание пространственных характеристик излучения, в частности, плотности распределения пучка в поперечном сечении.

Такое требование с особенной остротой возникает при фотоядерном способе производства радионуклидов, когда от плотности распределения иницирующего пучка гамма-излучения зависит эффективность наработки радионуклидов в заданном объеме изотопной мишени.

Методика определения профиля пучка гамма-квантов по профилю наведенной поверхностной гамма-активности тонких образцов, экспонированных на пучке гамма-излучения, реализована и использовалась в эксперименте [1,2].

Так как бета-распад радиоактивных ядер сопровождается выходом гамма-квантов, то измерение профиля поверхностной остаточной активности образцов, подвергшихся облучению пучками гамма-излучения и электронов, возможно как путем регистрации  $\beta$ -частиц, так и гамма-квантов.

Нами были проведены исследования возможности измерения профилей как интенсивных пучков электронов, так и генерированного ими в конвертере тормозного излучения путем регистрации  $\beta$ -частиц.

Так как остаточная  $\gamma, \beta$ -активность образца обусловлена изотопами, образующимися, в основном, в результате фотоядерных ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, p$ ) и электроядерных ( $e, n$ )-, ( $e, p$ )-реакций, то профиль остаточной  $\gamma, \beta$ -активности тонкого облученного образца отражает профиль первичного пучка гамма-квантов или электронов с энергиями выше порога вышеуказанных ядерных реакций.

Это обстоятельство позволяет получить информацию о профилях исходных пучков в различных энергетических диапазонах путем использования образцов с различными значениями порогов ядерных реакций. Например, для образца из тантала

энергетический порог ( $\gamma, n$ )-реакции равен 7,85 МэВ, а для образца из углерода – 18,75 МэВ.

Одним из наиболее значимых преимуществ этой методики [1,2] перед другими состоит в том, что она позволяет "отсечь" вклад низкоэнергетической части спектров частиц первичных пучков, которые присутствуют (особенно для тормозного излучения) в первичных пучках и препятствуют определению их истинного профиля.

Ниже приведены результаты измерений профилей пучков гамма-излучения и электронов путем регистрации  $\beta$ -частиц, излучаемых тонкими металлическими образцами, облученными на ускорителе ЛУ-40М как непосредственно электронным пучком, так и тормозным излучением этого пучка, генерируемым в танталовом конвертере.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В отличие от других систем аналогичного назначения в разработанной системе используется принцип регистрации  $\beta$ -частиц (а не гамма-квантов) с помощью кремниевого детектора толщиной 300 мкм, что дает возможность надёжно отделить сигналы, создаваемые  $\beta$ -частицами, от сигналов, создаваемых в детекторе гамма-квантами, которые сопровождают бета-распад радиоактивного ядра.

С другой стороны, так как проникающая способность гамма-квантов больше, чем у  $\beta$ -частиц, то принцип регистрации  $\beta$ -частиц, в отличие от гамма-квантов, позволяет более корректно коллимировать их и, следовательно, обеспечить хорошее пространственное разрешение системы.

Принципиальная блок-схема системы показана на Рис.1.

Телесный угол  $\alpha$ , следовательно, и пространственное разрешение измерительной системы задаются свинцовым коллиматором диаметром 1,5 мм, который установлен непосредственно перед детектором, а сканирование активной области осуществляется путём перемещения предметного столика с образцом (по X-координате).

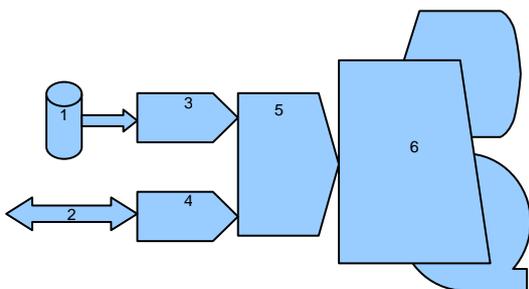


Рис.1. Блок-схема системы:

- 1 – детекторная головка; 2 – столик перемещения образца; 3 – интенсивметр с дискриминацией нижнего уровня; 4 – потенциометр; 5 – многоходовой АЦП; 6 – компьютер с монитором и дисковой памятью

Сигнал индикации перемещения образца в виде напряжения с потенциометра (связанного с предметным столиком) подается на вход «Х» многоходового АЦП типа РСL-1711-L. Активность исследуемой области образца регистрируется полупроводниковым кремниевым детектором размерами  $2 \times 2 \times 0,3$  мм.

Сигнал с детектора после предварительного усиления, дополнительного усиления и формирования в виде сигнала с интенсивметра поступает на вход «Y» того же АЦП. Таким образом, при перемещении образца формируется распределение  $Y=f(X)$  активности образца вдоль линии сканирования. Конструкция системы предусматривает также перемещение образца в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, с помощью микрометрического винта. Измерение таких распределений позволяет определить полный профиль пучка гамма-излучения или электронов на выходе ускорителя на площади  $(40 \times 68)$  мм<sup>2</sup>. Согласно статистическому анализу работы электронных схем в режиме интенсивметра [3] при временах измерений  $T$ , значительно превышающих постоянную времени (RC) накопительной емкости (что практически всегда выполняется), относительная стандартная ошибка  $\sigma(Q)$  измерения среднего значения  $\bar{Q}$  накопительной емкости в конечном счете сводится к выражению:

$$\sigma(\bar{Q})/\bar{Q} = 1/\sqrt{aT}, \quad (1)$$

где  $a$  – скорость счета;  $aT$  – полное число счетов за время  $T$ .

Таким образом, ошибка измерений поверхностной  $\beta$ -активности образца определяется статистической ошибкой.

Общий вид системы показан на Рис.2.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Пространственная разрешающая способность разработанной системы может изменяться в широких пределах путем выбора диаметра коллиматора. Уменьшением диаметра коллиматора пространственную разрешающую способность системы можно сделать сколь угодно малой (вплоть до нескольких десятых миллиметра), однако при этом уменьшается светосила системы и, соответственно, увеличивается время, необходимое для получения измеряемого распределения с хорошей статистикой. Уменьшение

диаметра коллиматора, кроме того, влечет за собой неоправданное увеличение активности измеряемого образца, что также нежелательно. Поэтому в качестве компромиссного варианта был выбран диаметр коллиматора 1,5 мм.



Рис.2. Общий вид системы измерения профиля поверхностной  $\beta$ -активности образца.

(На переднем плане виден столик для перемещения образца и детекторная головка)

При сканировании профиля пучка по оси «Х» пространственная разрешающая способность системы  $\Delta x$  была измерена экспериментально. Она определялась путем измерения зависимости интенсивности  $\beta$ -источника малых размеров (диаметром 0,3 мм) при сканировании им «поля зрения» коллиматора (диаметром 1,5 мм). Такой малопротяженный  $\beta$ -источник  $^{186}\text{Re}$  был получен путем облучения мишени из природного Re на исследуемом пучке тормозного излучения (согласно реакции  $^{187}\text{Re}(\gamma, n)^{186}\text{Re}$ ). Результаты измерений разрешающей способности системы представлены на Рис.3.

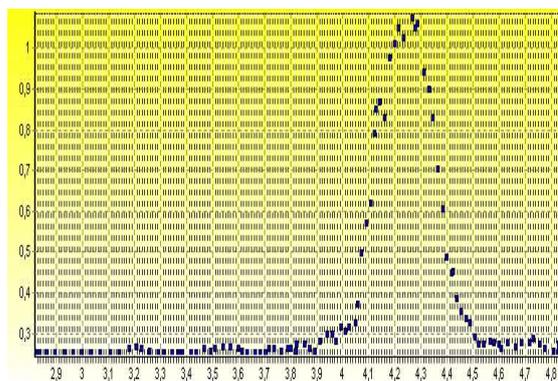


Рис.3. Зависимость интенсивности  $\beta$ -источника  $^{186}\text{Re}$  диаметром  $\Phi=0,3$  мм от его положения при сканировании «поля зрения» коллиматора диаметром 1,5 мм (шкала в сантиметрах)

Как видно из Рис.3, ширина распределения (FWHM), определяющая пространственную разрешающую способность системы  $\Delta x$ , составляет 2,5 мм. Полученная величина разрешающей способности вполне приемлема для практического использования, так как позволяет при умеренной активности образца в течение нескольких минут измерить профиль пучка с хорошей статистикой. С другой стороны, следует отметить, что указанная величина  $\Delta x$  будет существенно сказываться при измерении наведенной активности в пятне малого размера,

сравнимого с  $\Delta x$ . При более широких распределениях активности, с которыми приходится иметь дело на практике, ее влияние будет незначительным.

В настоящей разработке предусмотрена также возможность измерения вклада гамма-квантов бета-распада в измеряемое распределение поверхностной активности. Для этого при измерениях перед коллиматором устанавливался поглотитель из меди, который полностью поглощал бета-частицы и “пропускал” гамма-кванты.

На Рис.4 показаны профили поверхностной бета-активности тонкого образца из молибдена, измеренные с поглотителем и без поглотителя бета-частиц. Образец из молибдена толщиной 90 мкм облучался пучком гамма-излучения с максимальной энергией 40 МэВ. Профили измерены в режиме дискретного перемещения предметного столика с набором активности для выбранного положения образца (измерение “по точкам”).

Из рисунка видно, что при измерениях “по точкам” может быть набрано заданное число отсчетов (статистика) путем выбора длительности измерений в каждом положении образца.

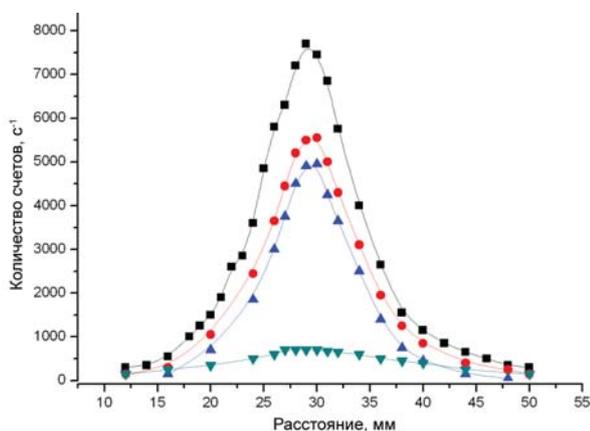


Рис. 4. Профили поверхностной  $\beta$ -активности образца Mo, облученного пучком гамма-излучения: ■ — через 24 часа после облучения; ● — через 48 часов после облучения; ▼ — фон гамма-квантов; ▲ — “чистое” распределение  $\beta$ -активности с вычетом фона гамма-квантов

Путем вычитания фона гамма-квантов получается “чистый” профиль поверхностной  $\beta$ -активности. Строго говоря, вычитание вклада гамма-квантов  $\beta$ -распада не обязательно, так как последние также несут информацию о поверхностной активности образца, однако, в случае прецизионных измерений ширины распределений поверхностной  $\beta$ -активности такой учет вклада гамма-квантов может быть корректно сделан.

Совпадение ширины распределений, измеренных в разные моменты времени после облучения образца доказывает независимость результата измерения от времени “остывания”.

Таким образом, представленные на Рис.4 зависимости величины активности  $\beta$ -частиц от положения детектора при его перемещении вдоль линии сканирования, фактически отражают профиль пучка гамма-излучения, которым был облучен образец.

Ниже представлены результаты измерений профилей пучка тормозного излучения непосредственно за конвертером из тантала толщиной 3,5 мм и профилей пучка электронов ускорителя ЛУ-40М. Для измерения использовались тонкие (~0,1 мм) образцы из различных материалов (молибдена, меди, тантала), которые были облучены пучком гамма-излучения одновременно. Измерения выполнены в режиме непрерывного перемещения облученного образца под детектором.

Изложенная методика определения профиля (плотности распределения) пучка гамма-излучения в полной мере относится также к пучкам электронов, тем более, что практически все частицы пучка обладают одинаковой энергией ( $\Delta E / E \approx 2 \dots 3\%$ ).

На Рис.5-7 представлены результаты измерения профилей пучков электронов. Облучаемый образец устанавливался перед конвертером.

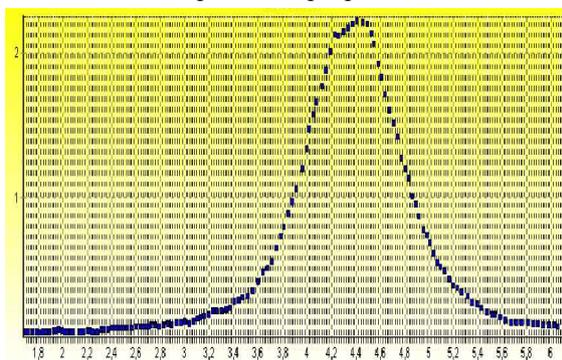


Рис. 5. Профиль пучка тормозного излучения с максимальной энергией 40 МэВ, измеренный на тонком образце Si (шкала в сантиметрах)

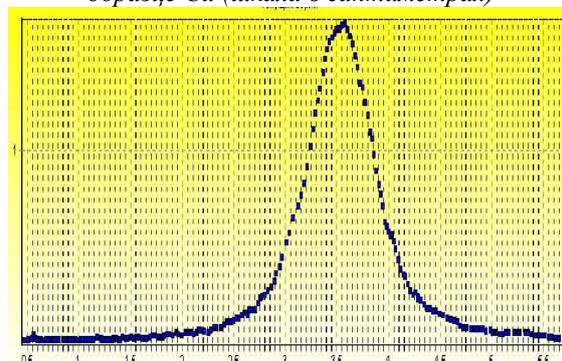


Рис. 6. Профиль пучка тормозного излучения с максимальной энергией 40 МэВ, измеренный на тонком образце Mo (шкала в сантиметрах)

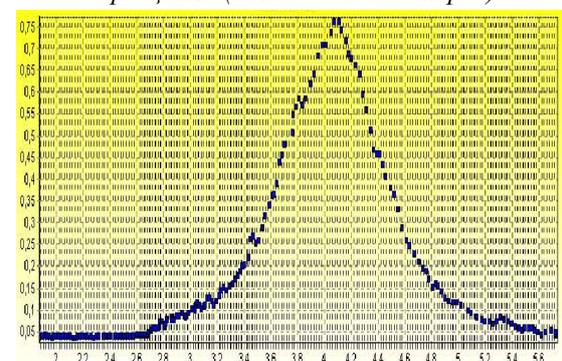


Рис. 7. Профиль пучка тормозного излучения с максимальной энергией 40 МэВ, измеренный на тонком образце Ta (шкала в сантиметрах)

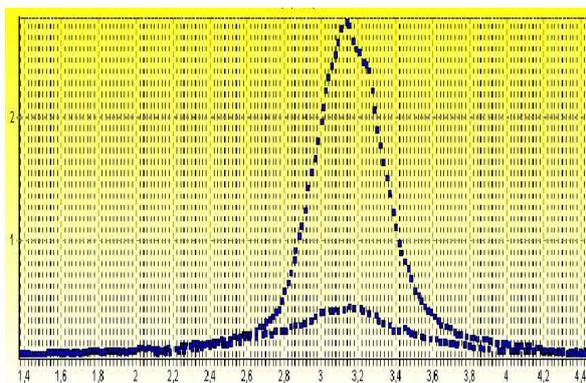


Рис.8. Профиль пучка электронов с энергией в максимуме спектра 40 МэВ, измеренный на тонком образце Си. Распределение с низкой интенсивностью – вклад гамма-квантов

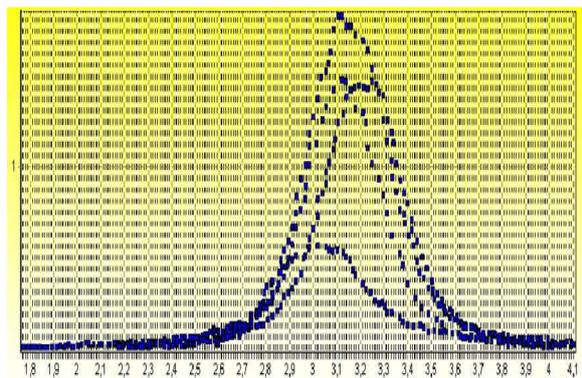


Рис.9. Измеренные распределения профиля пучка электронов (см. Рис.6) соответствуют сканированию поперечных размеров пучка на различных расстояниях от его центра (в порядке расположения распределений слева направо): +2 мм; 0; -1 мм; -2 мм

На Рис.8. и 9 хорошо видна асимметрия распределений, описывающих профиль пучка, что указывает на несимметричность формы самого пучка электронов. Полученная информация может быть использована для настройки режима оптимальной фокусировки пучка ускорителя.

## MEASURING SYSTEM OF ELECTRONS AND GAMMA-RADIATION BEAM PROFILES BY MEASUREMENT OF SURFICIAL $\beta$ -ACTIVITY DISTRIBUTION

*M.I. Ayzatskiy, V.I. Kulibaba, N.I. Maslov, V.A. Mats, V.D. Ovchinnik, B.I. Shramenko*

The system allows to measure distribution of surficial  $\beta$ -activity target, which radiation-exposed in the stream of gamma-radiation or electrons. The profile of residual  $\beta$ -activity of the thin radiation-exposed target corresponds the profile of primary beam of gamma-radiation or electrons with energies higher than threshold of nuclear reactions. Activity of the explored area of target is registered a semiconductor silicon detector. Distribution of activity target along the line of scan-out is formed by the multiport ADC. The system allows to define the profile of gamma-radiation or electrons beams on the output of accelerator.

## СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛЮ ПУЧКА ГАМА-КВАНТІВ ТА ЕЛЕКТРОНІВ ПО РОЗПОДІЛЕННЮ ПОВЕРХНЕВОЇ $\beta$ -АКТИВНОСТІ

*М.І. Айзацький, В.І. Кулибаба, М.І. Маслов, В.О. Мац, В.Д. Овчинник, Б.І. Шраменко*

Представлено конструкцію та принцип роботи системи для виміру залишкової поверхневої  $\beta$ -активності зразка, опроміненого пучком гальмового випромінювання або електронів. У вимірювальній системі використовується тонкий планарний кремнієвий детектор з високою ефективністю реєстрації  $\beta$ -частинок, що дозволяє надійно ідентифікувати їх на тлі гамма-квантів  $\beta$ -розпаду і, тим самим, одержати достовірну інформацію про розподіл  $\beta$ -активності. З використанням даної системи були проведені дослідження можливості виміру профілів як інтенсивних пучків електронів, так і генерованого ними в конвертері гальмового випромінювання.

## ВЫВОДЫ

1. На основе регистрации  $\beta$ -частиц остаточной активности разработана система (методика) измерения профиля пучков электронов или гамма-излучения по распределению поверхностной  $\beta$ -активности образца, облученного этими пучками.

2. Разработанная система позволяет измерять профили пучков гамма-излучения в наиболее интересной области энергий – ядерноактивной (выше порога фотоядерных реакций –  $\geq 8$  МэВ), с приемлемой для практических потребностей пространственной разрешающей способностью.

3. Измерения профиля пучка гамма-излучения, выполненные с использованием образцов из различных материалов, дают практически одинаковые результаты.

4. Так как процесс измерения профиля пучка занимает несколько минут, разработанная методика в сочетании с быстрой доставкой облученного образца к измерительной системе (пневмопочтой) открывает дополнительные возможности в настройке режима работы ускорителя для получения требуемых пространственных характеристики пучков электронов или гамма-излучения применительно к производству изотопов фотоядерным способом.

Работа выполнена при поддержке гранта УНТЦ, # P228.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б.И. Шраменко. *Электромагнитное излучение, генерируемое пучками электронов и позитронов высоких энергий в монокристаллах и аморфном веществе*. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Харьков, 2003.
2. В.И. Никифоров, Р.И. Помагалюк, В.А. Шевченко и др. Система измерения профиля потока высокоэнергетического тормозного излучения // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"* (49). 2008, №3, с.196-200.
3. *Измерение характеристик ядерных реакций и пучков частиц*. М.: "Мир", 1965.

Статья поступила в редакцию 20.09.2009 г.