

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОТОКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, В.А. Шевченко, И.Н. Шляхов, Н.А. Шляхов,
А.Э Тенишев, В.Л. Уваров*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Харьков, Украина*

E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua

Развитие ряда перспективных ядерных технологий (управляемый ускорителем электронов мощный источник нейтронов, производство медицинских изотопов, гамма-активационный анализ и др.) основано на применении высокоэнергетического (>10 МэВ) тормозного излучения (ВТИ) большой интенсивности (>1 кВт/см²). Одной из ключевых проблем диагностики такого излучения является измерение его пространственно-энергетического распределения. Для ее решения использован метод, основанный на совместной экспозиции набора тонких фольг, размер которых превышает поперечный размер потока ВТИ, причем фольги выполнены из материалов, имеющих различный энергетический порог (γ, N)-реакций – метод фотоядерного конвертера (ФК). Восстановление профиля интенсивности ВТИ в каждом энергетическом диапазоне производится на основе измерения распределения поверхностной активности ФК. Для этого используют специально разработанный гамма-сканер. Эксплуатация гамма-сканера показала влияние рассеянного γ -излучения на детекторы, что существенно снижает пространственное разрешение метода. Для его увеличения предложен алгоритм обработки сигналов детекторов, основанный на представлении ФК в виде двумерной матрицы точечных гамма-источников. Применение алгоритма позволяет улучшить пространственное разрешение в 2-3 раза.

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетичное тормозное излучение (ВТИ) с высокой интенсивностью ($>10^3$ Вт/см²) получают путем взаимодействия мощного пучка ускоренных электронов со специальной мишенью – конвертером. В принципе, такие процессы можно с хорошей точностью исследовать методом компьютерного моделирования на основе стандартизованных программных систем (MCNP, GEANT, PENELOPE и др.). Этим методом можно, в частности, рассчитать пространственно-энергетическое распределение потока тормозных фотонов в зависимости от состава конвертера и характеристик пучка электронов. Такой подход целесообразен на начальном этапе разработки и оптимизации фотоядерных технологий. Вместе с тем, в процессе их реализации необходимо получать прямую информацию об интенсивности и профиле потока ВТИ (например, для юстировки мишени и оценки скорости фотоядерных реакций в ней).

Ранее нами было предложено устройство (гамма-сканер) для определения профиля ВТИ путем измерения распределения поверхностной активности фольг из материалов, имеющих разный порог фотоядерных реакций, после их экспонирования в потоке тормозных фотонов [1]. Такую мишень, трансформирующую информацию о профиле и интенсивности ВТИ в распределение активности, называют фотоядерным конвертером (ФК) [2]. Опыт эксплуатации первого образца гамма-сканера [3] позволил выявить ряд недостатков, связанных как с неоптимальным выбором схемного решения прибора, так и с его программным обеспечением.

В данной работе изложены результаты разработки усовершенствованной версии гамма-сканера и метода восстановления профиля ВТИ из результатов сканирования ФК.

2. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ФК

Возможность измерения пространственно-энергетического распределения ВТИ при помощи ФК и гамма-сканера рассмотрим в два этапа:

- определение условий адекватной трансформации профиля ВТИ в распределение активности ФК;
- реконструкция этого профиля по результатам сканирования ФК.

В данном разделе проанализируем требования, которым должен удовлетворять ФК для обеспечения соответствия распределения его активности профилю ВТИ. Для этого рассмотрим процесс объемной активации ФК тормозными фотонами (Рис.1).

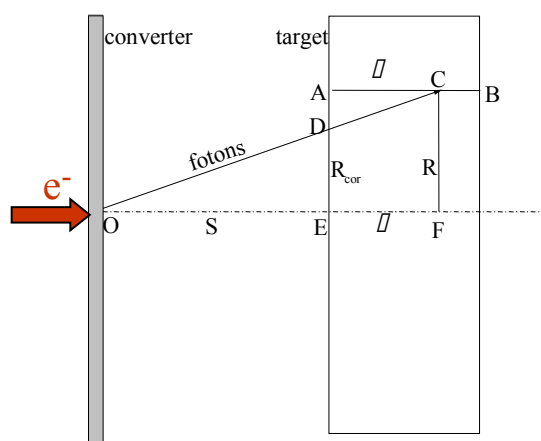


Рис.1. Схема активации ФК

Фотон, вылетающий из конвертера под углом $\angle COF = \alpha$, в точке C, удаленной на расстоянии $CF = R$ от центральной оси OF и на расстоянии $AC = l$ от передней стенки мишени, накапливает некую активность. Эту активность следует отнести к точке D, которая отражает размер фотонного пучка на по-

верхности мишени. Точка D находится на расстоянии $DE=R_{cor}$ от оси OF, которое меньше R на величину $AD=\delta$.

Величина δ следующим образом зависит от положения точки C на линии $AB=L$:

$$\delta(L) = l \operatorname{tg}(\alpha) = l \frac{R}{S+l}, \quad (1)$$

где S – расстояние мишени от конвертера.

Для активностей во всех точках на линии AB следует взять усреднённую величину $\bar{\delta}$, которая в простейшем случае равна:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{2}(\delta(0) + \delta(L)) = R \frac{L}{2(S+L)}, \quad (2)$$

где L – толщина мишени.

Следовательно, активности мишени на расстоянии R от центра соответствует поверхностная плотность фотонного пучка на расстоянии \bar{R}_{cor} , равном:

$$\bar{R}_{cor} = R - \bar{\delta} = K_{cor} \cdot R. \quad (3)$$

При $S=5$ мм для мишеней $L=3.5$ мм, $L=1$ мм и $L=0.1$ мм геометрический поправочный коэффициент соответственно равен $K_{cor}=0.8$, $K_{cor}=0.92$ и $K_{cor}=0.99$.

Таким образом, если абсциссы радиального распределения изотопов в мишени умножить на геометрический фактор K_{cor} , то полученное распределение наилучшим образом соответствует реальному распределению фотонов на поверхности мишени.

На Рис.2 приведены результаты моделирования распределения профиля тормозных фотонов на поверхности мишени и наведенной активности изотопа Mo-99 по реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ в ФК из молибдена толщиной 3.5 мм при энергии электронов $E_0=40$ МэВ. Расчеты выполнялись на основе системы PENELOPE/2006 [4]. Черные точки на рисунке – результат прямого расчёта активности, светлые точки – результат корректировки прямого расчёта, учитывающей геометрию облучения.

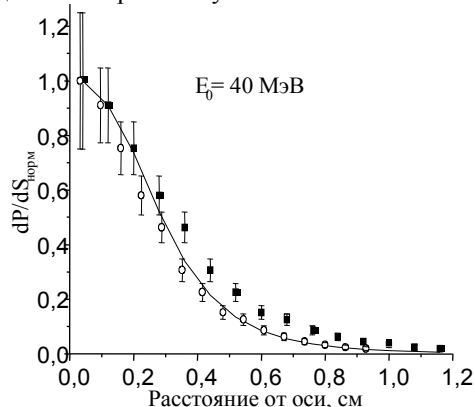


Рис.2. Распределение тормозных фотонов и активности ФК (Mo; 3.5 мм)

Сравнение показывает, что достоверность суждения о размере фотонного пучка по распределению откорректированной наработанной активности мишени заметно возрастает. Можно также сделать вывод, что применение ФК малой толщины (≤ 0.1 мм) обеспечивает наибольшее соответствие между рас-

пределениями потока фотонов и наведенной активностью.

3. ГАММА-СКАНЕР

Реконструкция профиля ВТИ проходит в два этапа:

- измерение распределения поверхностной активности ФК гамма-сканером;
- обработка результатов сканирования с помощью специально разработанного алгоритма.

Гамма-сканер предназначен для визуализации распределения плотности наведенной активности фотоядерного конвертера и является конструктивным продолжением системы, описанной в [3]. Конструктивно система, как и в начальном варианте, состоит из:

- детекторной головки (ее конструкция аналогична приведенной в работе [3]);
- устройства прецизионного позиционирования ФК (относительно детекторной головки);
- электронных блоков и ЭВМ.

3.1. УСТРОЙСТВО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МИШЕНИ

Особенностью устройства позиционирования в данном варианте прибора является возможность сканирования только одной мишени – ФК (Рис.3).

Это позволило уменьшить габариты устройства, а также снизить влияние фона от соседних активных мишеней.

Основные характеристики устройства:

- габариты – 200×200×120 мм;
- вес – не более 0,5 кг;
- минимальный шаг перемещения каретки – 0.14 мм;
- максимальная скорость перемещения – 7 мм/с;
- время подготовки к работе – не более 1 мин.;
- время наработки на отказ – не менее 10000 час.

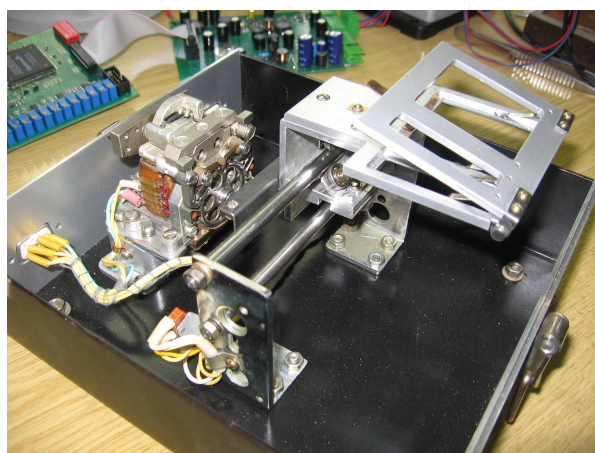


Рис.3. Устройство позиционирования ФК

3.2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОНИКИ

Блок-схема системы измерения распределения поверхностной активности ФК приведена на Рис.4.

В ее состав входят:

- блок детектирования, состоящий из системы перемещения ФК и детекторной головки с 16-ю предварительными усилителями;
- 16-ти каналный дискриминатор;
- 16-ти каналный счетчик;

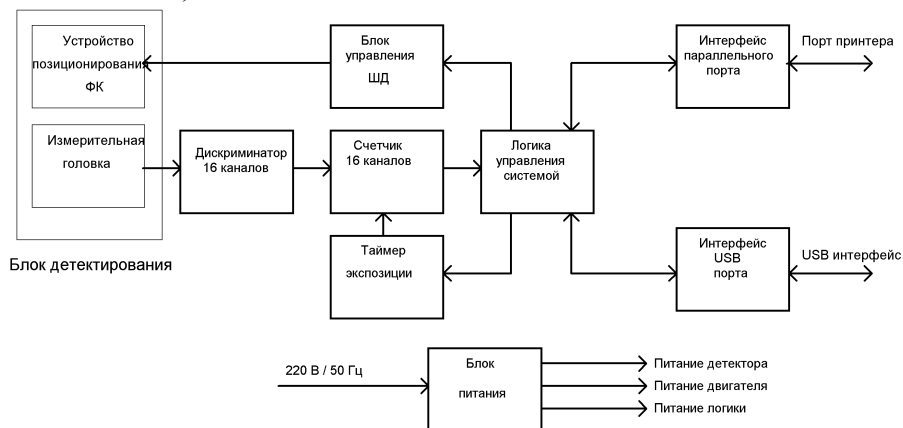


Рис.4. Блок-схема гамма-сканера

Принципиальным отличием данной системы является отказ от интерфейса КАМАК и переход на интерфейс USB. В результате, вся система управления и источник вторичного электропитания поместились на двух печатных платах размерами 100x125 мм (см. Рис.5).

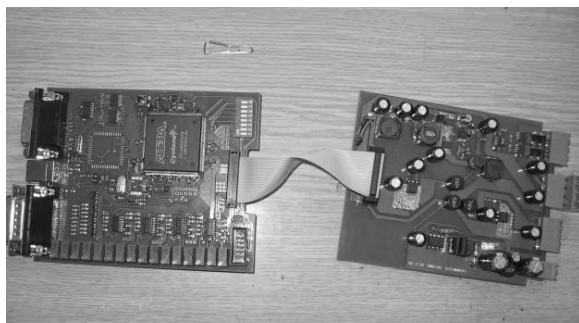


Рис.5. Внешний вид электронных блоков гамма-сканера

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВТИ

4.1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментального исследования параметров ВТИ был создан прототип источника на энергию электронов 40 МэВ на базе ускорителя ЛУ-40 [5]. Общая схема прототипа со средствами диагностики излучения приведена на Рис.6.

Непосредственно на выходе ускорителя ЛУ-40 размещен сенсор 1, с помощью которого ведется мониторинг положения оси пучка относительно оси конвертерного устройства. Последнее включает корпус 3 из Al, в котором расположены 4 пластины из Та (поз.4), каждая толщиной 1 мм. Пластины охлаждаются проточной водой.

Пучок электронов попадает на пластины через входное окно 2 (нерж.сталь; 0.3 мм). В задней части корпуса 3 находится герметизирующая крышка-стакан 5, внутри которой размещены по две фольги –

- блок управления шаговым двигателем устройства позиционирования ФК;
- формирователь временных интервалов (таймер экспозиции);
- интерфейс USB;
- интерфейс EPP;
- источник вторичного электропитания.

ФК из Мо и Cu (поз.6). Расстояние между наборами фольг составляет 45 мм. Такая геометрия избрана для возможности измерения наряду с пространственно-энергетическим распределением тормозных фотонов также их углового расхождения. За узлом конвертера находится толстостенная свободновоздушная ионизационная камера 7 типа ИКВ-6. Ионизационный ток камеры пропорционален потоку энергии (мощности) тормозного излучения.

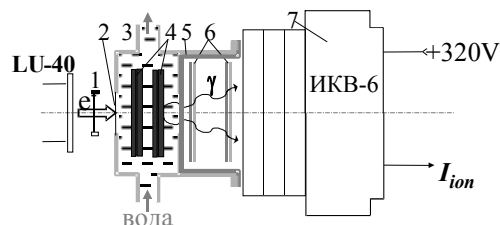


Рис.6. Схема прототипа источника ВТИ

После активации ФК извлекались из облучательного устройства и устанавливались в гамма-сканер.

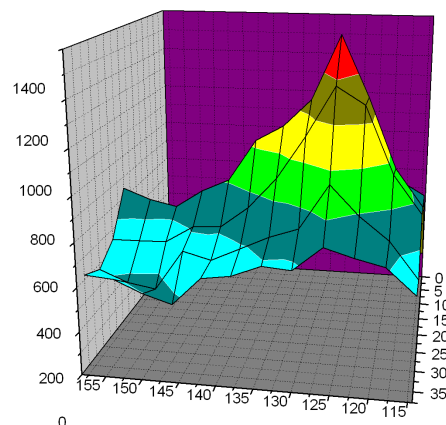


Рис.7. Распределение активности ФК (молибден)

a – без обробки; b - с обробкою

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное оборудование и программное обеспечение для диагностики потока тормозного излучения с использованием фотоядерного конвертера позволяет определять пространственно-энергетическую структуру излучения, на основе которой возможна оптимизация размера мишеней, их юстировка в потоке фотонов с максимальной плотностью, а также оценка скорости генерации изотопов при фотоядерном производстве.

Работа выполнена при поддержке НТЦУ, контракты №3151 и №P228.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.P.Karasyov, V.I.Nikiforov, R.I.Pomatsalyuk, et al. Methods of Bremsstrahlung Monitoring for Photonuclear Technologies // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigation"*. 2006, №2, p.204-206.
2. G.N. Kim et al. Activities at Pohang Neutron Facility // *Proc. Workshop on Nucl. Data Production and Evaluation, Pohang, Korea, Aug.25-26, 2000.* p.1-10.
3. S.P. Karasyov, V.I. Nikiforov, R.I. Pomatsalyuk, et al. High-Intensity Bremsstrahlung Monitoring System for Photonuclear Technologies // *EPAC'06, Edinburg, June 2006*, p.1235-1237.
4. F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea and J. Sempau. "PENELOPE-2006 A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport" // *OECD Nuclear Energy Agency, Issyles-Moulineaux, France, 2006.*
5. K.I. Antipov, M.I. Ayzatsky, Yu.I. Akchurin, et al. S-Band Electron Linac with Beam Energy of 30... 100 MeV // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigation"*. 2004, №5, p.135-138.
6. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, O.A. Repikhov, et al. Electron Linac Production of Co-57 for Gamma-Chamber Calibration // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigation"*. 2001, №5(39), p.200-202.

MEASURING SYSTEM OF HIGH-ENERGY BREMSSTRAHLUNG PROFILE

V.I. Nikiforov, R.I. Pomatsalyuk, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyakhov, N.A. Shlyakhov, A.Eh. Tenishev, V.L. Uvarov

The development of a number perspective nuclear technologies (high-power neutron-source driven by electron Linac, medical isotopes production, gamma-activation analysis etc.) is based on application high-energy (>10 MeV) bremsstrahlung (HEB) with high-intensity (>1 kW/cm²). One of the key problems in diagnostics of such radiation is the measurement of its space-energy distribution. For its solution the method based on a joint activation of a set of thin metal foils, which size exceeds cross sectional dimension of a HEB flux is used. The foils are made from materials having a different threshold of (gamma, N) reactions – method of the photonuclear converter (PNC). The profile of HEB intensity in each energy range is reconstructed from measured distribution of a PNC surface activity. For this purpose one use specially designed gamma-scanner. The exploitation of the gamma-scanner has shown acting of scattered gamma-radiation on detectors, that essentially degrades the spatial resolution of the method. For its increase the processing logic of signals from detectors, based on representation of PNC by the two-dimensional matrixes of dot gamma - sources is offered. The application of this algorithm allows to improve the spatial resolution of a method by 2-3 times.

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛЮ ПОТОКУ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

В.І. Нікіфоров, Р.І. Помацалюк, В.А. Шевченко, І.М. Шляхов, М.А. Шляхов, А.Е. Тенішев, В.Л. Уваров

Розвиток ряду перспективних ядерних технологій (кероване прискорювачем електронів потужне джерело нейтронів, виробництво медичних ізотопів, гамма-активаційний аналіз та ін.) засновано на застосуванні високоенергетичного (>10 MeV) гальмівного випромінювання (ВГВ) великої інтенсивності (>1 кВт/см²). Однією з ключових проблем діагностики такого випромінювання є вимірювання його просторово-енергетичного розподілу. Для її рішення використано метод, заснований на спільній експозиції набору тонких фольг, розмір яких перевищує поперечний розмір потоку ВГВ, причому фольги виконані з матеріалів, що мають різний енергетичний поріг (γ ,N)-реакцій – метод фотоядерного конвертера (ФК). Встановлення профілю інтенсивності ВГВ у кожному енергетичному діапазоні проводиться на основі вимірювання розподілу поверхневої активності ФК. Для цього використовують спеціально розроблений гамма-сканер.

Експлуатація гамма-сканера показала вплив розсіяного γ -випромінювання на детектори, що істотно знижує просторове розділення методу. Для його збільшення запропоновано алгоритм обробки сигналів детекторів, заснований на представленні ФК у вигляді двовірної матриці точкових гамма-джерел. Застосування алгоритму дозволяє поліпшити просторове розділення у 2-3 рази.