

УДК 539.1.074.823

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДЕТЕКТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ С ^{10}B -КОНВЕРТЕРОМ

© 2021 г. А. А. Каспаров¹, *, С. И. Поташев¹, А. А. Афонин¹, Ю. М. Бурмистров¹, А. И. Драчев¹

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

*E-mail: kasparov200191@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

При разработке нового позиционно-чувствительного ионизационного детектора нейтронов с энергиями выше 1 МэВ моделируются события эмиссии ядер ^7Li и ^4He из слоя ^{10}B . Ожидаемое относительное разрешение по энергии нейтрона составляет ~6%, а эффективность детектора в диапазоне энергий от 1 до 7 МэВ оценивается как $\sim 10^{-7}$. Таким образом появляется возможность определять энергию и координаты нейтрона без измерения времени пролета.

DOI: 10.31857/S0367676521050124

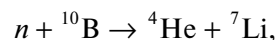
ВВЕДЕНИЕ

Позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) имеют большое применение в физике [1]. ПЧД является одним из основных элементов установки малоуглового рассеяния нейтронов, используемой для исследования сплавов [2] и магнитных структур [3]. На практике широко используются одно- и двухкоординатные газовые ПЧД, в которых конвертером нейтронов служат газы VF_3 и ^3He [4, 5].

В ИЯИ РАН создан двухкоординатный ПЧД тепловых нейтронов на основе ^{10}B [6]. Испытания детектора в потоке медленных и быстрых нейтронов до энергии 7 МэВ показали, что спектр амплитуд вторичных ядер (^4He и ^7Li) в области энергий от 1 до 7 МэВ зависит от энергии нейтрона. Было найдено как расчетным способом, так и в эксперименте, что при высоком пороге регистрации для второго чувствительного газового зазора преимущественно регистрируются события с ядром ^7Li . В этом случае центр тяжести максимума в амплитудном спектре от первого газового зазора увеличивается с ростом максимальной энергии нейтронного потока. Низкая эффективность для быстрых нейтронов позволяет измерять высокую плотность и максимальную энергию потока таких нейтронов на малых расстояниях от центра источника нейтронов [7]. Однако из-за неопределенности угла вылета ядра ^4He или ^7Li из ядерной реакции невозможно найти начальную энергию нейтрона.

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Для определения начальной энергии нейтрона в ИЯИ РАН разрабатывается детектор быстрых нейтронов с ^{10}B -конвертером. Принцип его работы основан на регистрации в ионизационной камере ядер ^4He и ^7Li , образующихся в реакции



которая является основной для быстрых нейтронов. В качестве конвертера выступает тонкий слой ^{10}B , а ионизационная камера, состоит из двух спаренных взаимно перпендикулярных катодов, между которыми располагается анод (рис. 1).

Катоды и аноды представляют собой сетку из параллельных проволок с шагом 2 мм. Зазор между анодом и каждым катодом составляет 5 мм. Внутренний объем детектора заполнен смесью газов аргона и углекислоты.

Сигналы ионизации от газовых зазоров пропорциональны частичным и полным потерям энергии ядер ^4He и ^7Li . Из-за малых пробегов заряженных частиц и достаточно большой толщины газового слоя для полного поглощения регистрируемого ядра, данный детектор может быть использован как $\Delta E-E$ система, и следовательно вторичные ядра могут быть идентифицированы и определены их энергии. Направление частицы (угол вылета) измеряется по срабатыванию двух пар катодных взаимно перпендикулярных прово-

лок. Погрешность в определении угла вылета составляет $\sim 5.7^\circ$.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА**

Проведено Монте-Карло моделирование реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ в слое ${}^{10}\text{B}$ толщиной 3 мкм и регистрацией ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$ с учетом сечения реакции и ионизационных потерь в газовых зазорах.

В табл. 1 для каждой энергии нейтрона показано сечение реакции на ${}^{10}\text{B}$, эффективность реакции, а также эффективность регистраций каждого из ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$ при условии, что ядро дало сигнал во втором газовом зазоре при пороге 100 кэВ. Малая эффективность регистрации частиц ${}^4\text{He}$ ($\sim 10^{-6}$) и частиц ${}^7\text{Li}$ ($\sim 10^{-8}$) будет полезна для регистрации высоких потоков $> 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Регистрируя одну из заряженных частиц (зная ее энергию и угол вылета), мы можем восстановить энергию и угол вылета второй заряженной частицы решением уравнений законов сохранения энергии и импульса, а следовательно, и энергию падающего нейтрона. Выбирая высокий порог сигнала, можно подавлять регистрацию ядер ${}^4\text{He}$, в этом случае для более тяжелого ядра ${}^7\text{Li}$ детектор становится детектором полного поглощения. В зависимости от типа регистрируемой частицы, мы можем восстанавливать энергию падающего нейтрона в разных диапазонах (табл. 1).

Для определения ожидаемого энергетического разрешения по энергии нейтронов было проведено кинематическое моделирование реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ при разных энергиях падающих нейтронов: 3, 5 и 7 МэВ.

Энергия и угол вылета ядра ${}^7\text{Li}$ разыгрывались с некоторыми неопределенностями, соответствующими

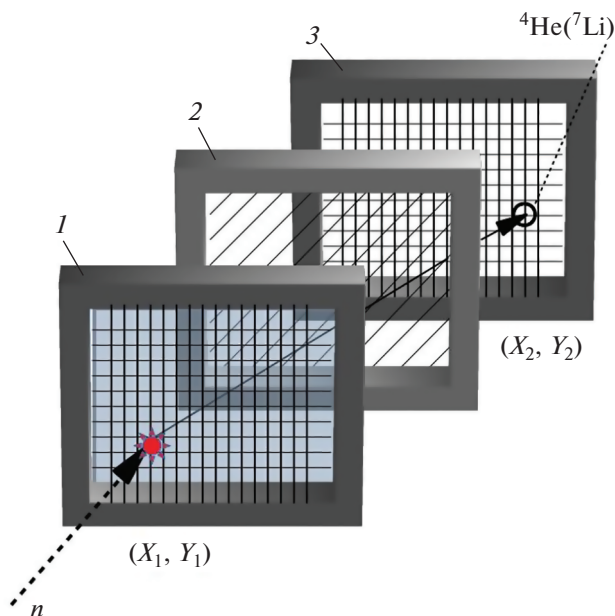


Рис. 1. Принцип регистрации и определения энергии нейтрона в ПЧД посредством измерения энергии и угла вылета одного из ядер ${}^4\text{He}$ или ${}^7\text{Li}$: 1 – поверхность со слоем бора-10 и проволочный катод для измерения координат начальной точки трека ядра; 2 – анод; 3 – проволочный катод для измерения координат конечной точки трека ядра.

щими энергетическому (ΔE) и угловому ($\Delta \Theta$) разрешением детектора. Восстановление энергии падающего нейтрона проводилось решением уравнений законов сохранения энергии и импульса.

На рис. 2 показан восстановленный энергетический спектр падающего нейтрона при энергии 7 МэВ. При этом в расчетах угловое разрешение бралось $\Delta \Theta = 5.7^\circ$, а энергетическое разрешение $\Delta E = 3\%$.

Таблица 1. Результаты моделирования реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$

E_n , МэВ	σ , барн	Эффективность реакции	Эффективность регистрации ${}^4\text{He}$	Эффективность регистрации ${}^7\text{Li}$
1	0.1797	$4.35 \cdot 10^{-6}$	$2.36 \cdot 10^{-8}$	0
2	0.4513	$1.89 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-6}$	0
3	0.3675	$1.54 \cdot 10^{-5}$	$2.45 \cdot 10^{-6}$	0
4	0.2959	$1.24 \cdot 10^{-5}$	$3.51 \cdot 10^{-6}$	0
5	0.10369	$4.35 \cdot 10^{-6}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$1.74 \cdot 10^{-10}$
6	0.1257	$5.27 \cdot 10^{-6}$	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$8.62 \cdot 10^{-9}$
7	0.11405	$4.78 \cdot 10^{-6}$	$2.07 \cdot 10^{-6}$	$2.59 \cdot 10^{-8}$

Для определения энергетического разрешения по энергии нейтрона, данный спектр аппроксимировался асимметричным гауссианом и определялась полная ширина на половине максимума (FWHM) амплитуды.

На рис. 3 показаны различные зависимости FWHM от углового и энергетического разрешений детектора для энергии нейтрона $E_n = 3$ МэВ

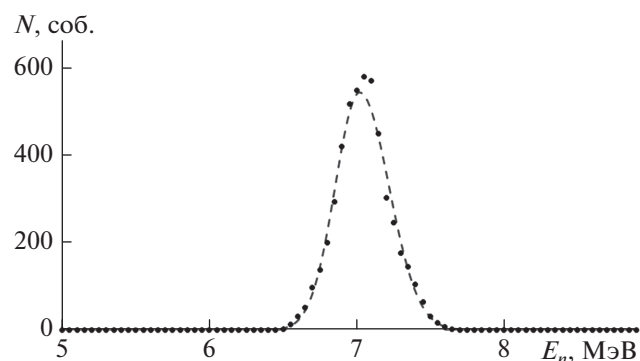


Рис. 2. Восстановленный энергетический спектр падающего нейтрона для энергии 7 МэВ при $\Delta E = 3\%$ и $\Delta\Theta = 5.7^\circ$.

Таблица 2. Зависимость FWHM от энергии падающего нейтрона при $\Delta E = 3\%$ и $\Delta\Theta = 5.7^\circ$

E_n , МэВ	FWHM, МэВ	ϵ , %
3	0.19	6.3
5	0.31	6.2
7	0.42	6

(рис. 3а и 3б) и $E_n = 7$ МэВ (рис. 3в и 3г). Для наглядности точки соединены линией.

Для проектируемого детектора погрешности в определении угла регистрируемой частицы и ее энергии будут составлять $\sim 5.7^\circ$ и 3% , соответственно. В табл. 2 показана зависимость FWHM от энергии падающего нейтрона. Энергетическое разрешение составляет порядка 6% и слабо зависит от энергии нейтронов (в области энергий 1–7 МэВ).

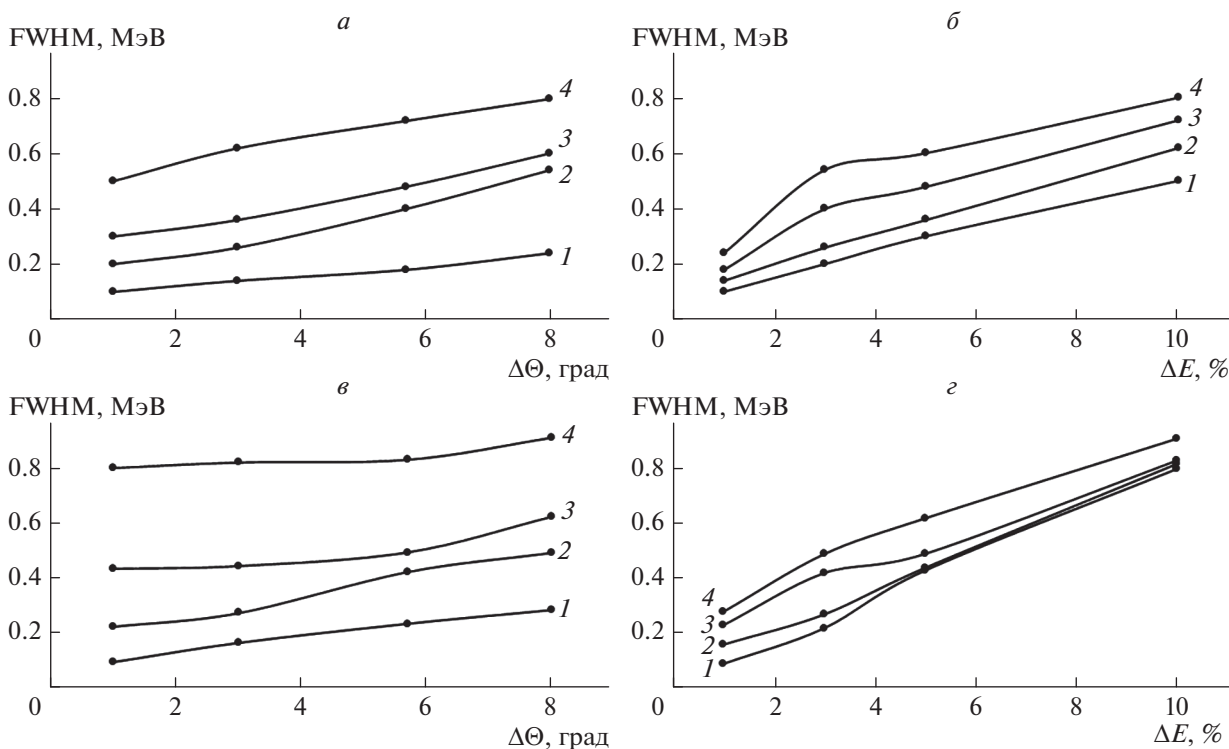


Рис. 3. Зависимость FWHM от углового разрешения детектора при 1 – $\Delta E = 1\%$, 2 – $\Delta E = 3\%$, 3 – $\Delta E = 5\%$, 4 – $\Delta E = 10\%$ для а – $E_n = 3$ МэВ и в – $E_n = 7$ МэВ; зависимость FWHM от энергетического разрешения детектора при 1 – $\Delta\Theta = 1^\circ$, 2 – $\Delta\Theta = 3^\circ$, 3 – $\Delta\Theta = 5.7^\circ$ и 4 – $\Delta\Theta = 10^\circ$ для б – $E_n = 3$ МэВ и г – $E_n = 7$ МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯИ РАН разрабатывается детектор быстрых нейтронов ($E_n > 1$ МэВ) с ^{10}B -конвертером, принцип работы которого заключается в регистрации вторичных ядер ^4He и ^7Li . Моделирование показало, что разрабатываемый детектор малую эффективность регистрации ($\sim 10^{-7}$) вторичных ядер ^4He и ^7Li , что будет полезно для регистрации высоких потоков $> 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Энергетическое разрешение детектора по энергии нейтронов оценивается $\sim 6\%$ и слабо зависит от энергии нейтронов (в области энергий 1–7 МэВ). В зависимости от типа регистрируемой частицы, можно восстанавливать энергию падающего нейтрона в двух диапазонах (> 1 МэВ при регистрации ^4He и > 5 МэВ при регистрации ^7Li).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tranquada J.M., Xu Guangyong, Zaliznyak I.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 350. P. 148.
2. *Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J. et al.* // J. Alloys Comp. 2013. V. 550. P. 9.
3. *Avdeev M.V., Balasoiu M., Aksenov V.L. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 270. P. 371.
4. *Fried J., Harder J.A., Mahler G.J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2002. V. 478. P. 415.
5. *Nasir R., Aziz F., Mirza S.M. et al.* // Nucl. Eng. Technol. 2018. V. 50. No. 3. P. 439.
6. *Potashev S., Burmistrov Yu., Drachev A. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. No. 012160.
7. *Potashev S., Drachev A., Burmistrov Yu. et al.* // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. Art. No. 05010.

Efficiency and energy resolution calculation under developing of fast neutron detector with ^{10}B -converter

A. A. Kasparov^{a,*}, S. I. Potashev^a, A. A. Afonin^a, Yu. M. Burmistrov^a, A. I. Drachev^a

^aInstitute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: kasparov200191@gmail.com

Under developing new position-sensitive ionization detector of fast neutrons with energies above 1 MeV events of ^7Li and ^4He nucleus emission from ^{10}B layer is simulated. The expected relative resolution of the neutron energy is $\sim 6\%$ and the detector efficiency in the energy range from 1 to 7 MeV is estimated as $\sim 10^{-7}$. Thus, it becomes possible to determine the energy and coordinates of the neutron without measuring the time of flight.