

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА,
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

УДК 539.1.074.823

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ
С ПОМОЩЬЮ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО
ДЕТЕКТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВС. И. Поташев^{1,2}, И. В. Мешков², А. А. Афонин¹, Ю. М. Бурмистров¹,
А. И. Драчев¹, С. Х. Караевский¹, А. А. Каспаров¹, В. Н. Пономарев¹,
В. И. Разин¹

Для исследования реакций взаимодействия быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ с легкими ядрами, в частности, с ядром ^{10}B представлен позиционно-чувствительный детектор, являющийся одновременно мишенью нейтронов. Он содержит два слоя бора-10 и систему из проволочных электродов для идентификации вторичных ядер, в частности ^3H и ^4He , и определения потери энергии и угла вылета. Это позволяет определить энергию нейтрона.

Ключевые слова: нейтрон, быстрый, бор-10, тритон, слой, детектор, позиционно-чувствительный, проволочка, газонаполненный.

Введение. Изучение взаимодействия нейтрона с ядром ^{10}B при энергии $E > 1$ МэВ представляет интерес с целью проверки предложенной модели трех тел $^4\text{He}^4\text{He}^3\text{H}$ ядра ^{11}B , а также определения его кластерной структуры [1]. Структура этого ядра исследовалась на Нуклотроне в ОИЯИ с помощью ядерных трековых эмульсий [2]. Кроме того, в реакции $p+^7\text{Li} \rightarrow ^8\text{Be}^*$ при распаде ядра $^8\text{Be}^*$ со временем жизни 10^{-16} с обнаружено указание на аномалию в рамках стандартной модели в распределении угла между электроном и позитроном при образовании этой пары внутри $^8\text{Be}^*$ [3]. Ядро $^8\text{Be}^*$ может также образоваться в реакции $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$. При этом фоновыми для данной реакции выступают реакции $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}^*$ и $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$, сечение которых на

¹ ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: potashev@inr.ru.

порядок выше. Также фоновой реакцией является $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$. Реакцию с образованием $^8\text{Be}^*$ можно выделить с помощью идентификации тритона и регистрацией в совпадении электрон-позитронной пары, образованной при внутриядерной конверсии ядра $^8\text{Be}^*$.

Газовые гибридные детекторы на основе бора-10, которые разрабатывались для регистрации тепловых нейтронов для исследований в физике конденсированного состояния также подходят и для изучения ядерных реакций. В последнее время активно развиваются детекторы на основе твердого слоя изотопа ^{10}B и пропорциональной камеры. Эффективность этого детектора для тепловых нейтронов $\sim 1-3\%$. Однако, если применять этот детектор для регистрации быстрых нейтронов, то эффективность одного слоя при 1 МэВ составит $\sim 0.0001\%$. Разработанный в Китае детектор содержит 10 слоев, имеет чувствительные размеры $200 \times 200 \text{ мм}^2$, разрешение $3 \times 3 \text{ мм}$ и его эффективность при 1 МэВ оценивается как 0.001% [4]. Такие же чувствительные размеры имеет шестислойный детектор из Германии с разрешением оптического контраста 1.5 мм и с оценкой эффективности 0.0003% при 1 МэВ [5]. Однако все эти детекторы используют пленочные сетки газового электронного умножения и поэтому образовавшиеся в реакции вторичные ядра не могут их преодолеть. Поэтому невозможно получить сигналы от нескольких газовых промежутков для идентификации ядра и определить энергию ядра.

В ИЯИ РАН был разработан позиционно-чувствительный детектор нейтронов $100 \times 100 \text{ мм}^2$ на основе 3 мкм слоя ^{10}B [6]. Этот слой служит одновременно мишенью и передним катодом пропорциональной камеры, наполненной газовой смесью $75\% \text{ Ar}$ и $25\% \text{ CO}_2$. Поскольку анод камеры состоял из шестидесяти 20 мкм проволочек марки ВР20, установленных с шагом 2 мм , то ядра могли свободно двигаться в полном газовом зазоре $2 \times 2 = 4 \text{ мм}$ и сигналы можно было регистрировать как с анодных проволочек через емкости, так и с заднего полоскового катода. Чувствительные полоски катода (60 шт.) и проволочки анода взаимно перпендикулярны друг другу. Использование проволочных сеток, а не сеток газового электронного умножения дает возможность измерения ионизационных потерь вторичного ядра в двух и более газовых промежутках. Корреляцию сигналов от них можно использовать для идентификации различных ядерных реакций под действием быстрых нейтронов. Суммарное сечение всех ядерных реакций под действием нейтрона на ядре ^{10}B в диапазоне энергий от 1 до 7 МэВ составляет $0.1-1 \text{ см}^{-2}$ и величина его достаточна для регистрации нейтронов в потоках от $10^5 \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$. Это позволит регистрировать этим детектором быстрые нейтроны в потоке до $10^{11} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$.

Детектор 100×100 мм². Структура детектора 100×100 мм² на основе 3 мкм слоя ¹⁰B представлена на рис. 1. Быстрый нейтрон взаимодействует с ядром ¹⁰B и в результате образуются ядра: ⁴He, ⁷Li, ³H, ⁸Be и другие ядра. Ядра вызывают сигналы ионизационных потерь в двух последовательных газовых промежутках. Только ядра ⁴He и ³H, обладающие достаточной проникающей способностью, могут вызвать сигналы в обоих газовых промежутках. Измеренные амплитуды сигналов пропорциональны ионизационным потерям, которые существенно различаются для ⁴He и ³H также, как и корреляции этих сигналов. Данный использовался в экспериментах на фотонейтронном источнике на базе ускорителя электронов ЛУЭ-8. Падающий на вольфрамовую мишень электронный пучок генерировал тормозное излучение, фотоны которого производили быстрые нейтроны в бериллиевой мишени. На выходе канала коллиматора длиной 500 и диаметром 30 мм были установлены 5 мм кадмиевый слой и данный детектор на дистанции 1 м от ⁹Be-мишени. Расчетное и измеренное разрешение детектора составляло 2×4 мм. Считывание сигналов с анода (X) и с заднего катода (Y) осуществлялось с двух концов распределенного сопротивления и соответствующая координата определялась по методу деления заряда. В расчетах определялся геометрический центр тяжести лавины, вызванной ионизирующим газ ядром. В эксперименте использовалась маска из кадмия с 1.5 мм щелями, ориентированными вдоль оси X или Y, и была измерена ширина на половине высоты максимума в распределении координаты. Разрешение определяется расстоянием от слоя ¹⁰B до анода (2 мм) и до заднего катода (4 мм), соответственно.

Данный ¹⁰B-детектор 100×100 мм² продемонстрировал избирательность к направлению потока нейтронов и возможность измерений в условиях фона рассеянных нейтронов [7]. Была показана прямая зависимость величины измеренных детектором ионизационных потерь от максимальной энергии нейтронов в потоке [8], то есть возможность определения энергии нейтронов по амплитудам сигналов.

Эксперименты с ¹⁰B-детектором 100×100 мм². Используя корреляции сигналов ионизационных потерь от двух газовых промежутков и их спектры были идентифицированы реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ и $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li} + \gamma$ и, сравнивая их вклады с расчетными, было получено соотношение выходов реакций с вылетом ⁷Li и ⁷Li* в зависимости от максимальной энергии нейтронов [9].

Моделирование корреляции сигналов от двух газовых промежутков детектора при $E = 3$ МэВ показывает, что области событий для реакций $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ на рис. 2(а) и $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li} + \gamma$ на рис. 2(б) при регистрации ядра ⁴He, и для реакции

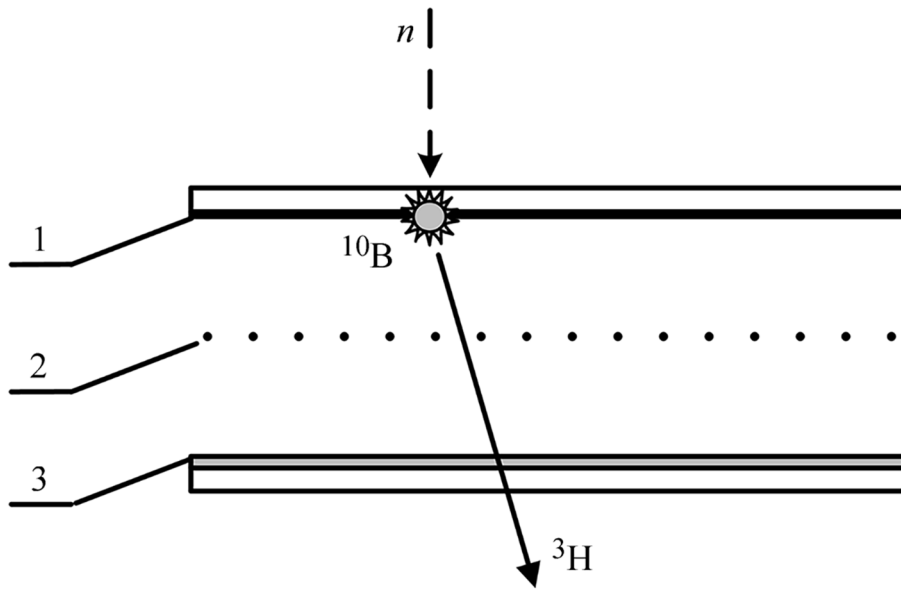


Рис. 1: Структура детектора $100 \times 100 \text{ мм}^2$ на основе 3 мкм слоя ^{10}B . 1 – катод на основе стеклянной пластины со слоем ^{10}B ; 2 – анод из сигнальных проволочек диаметром 20 мкм с шагом 2 мм ; 3 – катод на основе пластины из стеклотекстолита с сигнальными полосками из меди.

$n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$ на рис. 2(в) при регистрации ядра ^3H оказываются локализованы в разных областях диаграммы. Кинематические расчеты реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$ в отличие от реакции с вылетом $^8\text{Be}^*$ показали равномерное распределение по энергии и углам вылета тритона.

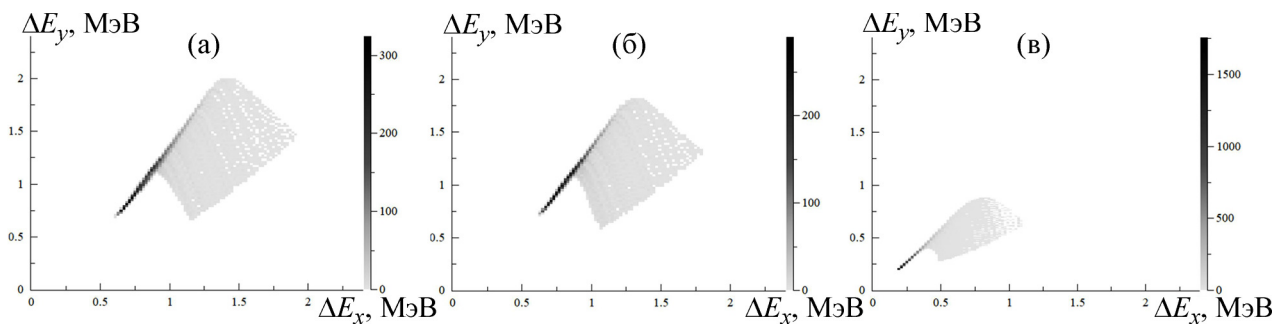


Рис. 2: Моделированные корреляции амплитуд сигналов от двух газовых промежутков детектора при энергии нейтронов $E = 3 \text{ МэВ}$: (а) при регистрации ядра ^4He из реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$; (б) при регистрации ядра ^4He из реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li} + \gamma$; (в) при регистрации ядра ^3H из реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$.

Экспериментальный график корреляции сигналов для потока с максимальной энергией $E_{\text{макс}} = 5.33$ МэВ также состоит из различной локальной зоны, как это показано на рис. 3.

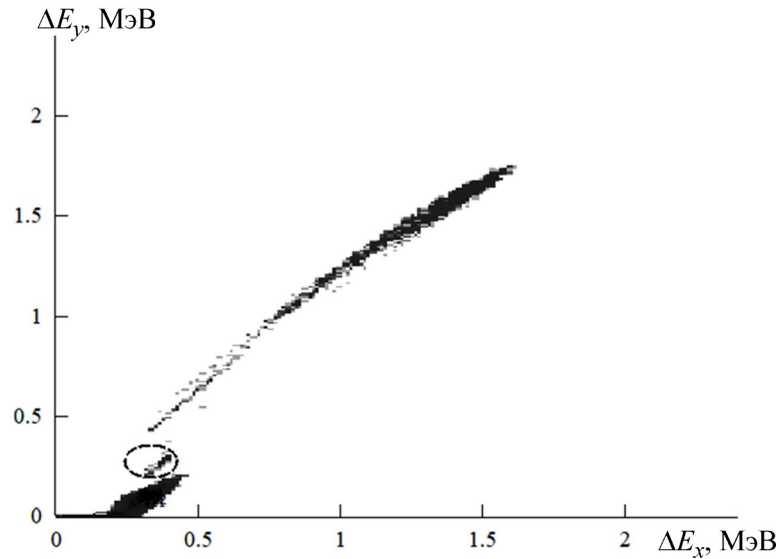


Рис. 3: Экспериментальная корреляция амплитуд сигналов от двух газовых промежутков детектора 100×100 мм² при максимальной энергии нейтронов в потоке $E = 5.33$ МэВ.

Мы предполагаем, что область внутри штрихового эллипса на рис. 3 содержит события с вылетом ядра ${}^3\text{H}$ из реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$, поскольку амплитуды в каждом газовом зазоре менее 1 МэВ, но более 0.3 МэВ по ΔE_x и более 0.2 МэВ по ΔE_y . Область больших амплитуд выше штрихового эллипса преимущественно содержит события регистрации ядра ${}^4\text{He}$ или одновременно ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$. Область малых амплитуд ниже штрихового эллипса преимущественно содержит события регистрации ядра ${}^7\text{Li}$, как это следует из расчетов. Эта интерпретация областей событий согласуется с той, которая приведена в работе [10].

Конструкция нового детектора 50×50 мм². Новый позиционно-чувствительный детектор нейтронов с чувствительными размерами 50×50 мм² наследует основные свойства предыдущего детектора 100×100 мм² и является его развитием [11]. Различия в конструкции нового от предыдущего детектора: 1) он содержит два 3 мкм слоя ${}^{10}\text{B}$ толщиной вместо одного для увеличения эффективности; 2) вместо ${}^{10}\text{B}$ можно использовать другие ядра; 3) он содержит две пары сеток из 50 мкм проволок для измерения двух координат в двух плоскостях, разнесенных по глубине детектора для измерения

угла вылета ядра и получить сигналы от четырех, а не от двух газовых промежутков; 4) многоканальная система считывания увеличит быстродействие детектора. Схематическая конструкция детектора представлена на рис. 4.

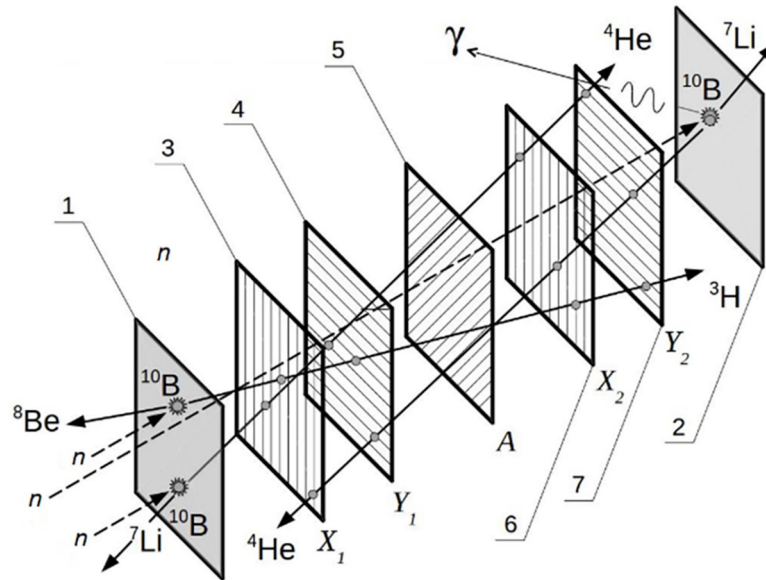


Рис. 4: Детектор $50 \times 50 \text{ мм}^2$: 1 и 2 – слои ^{10}B на подложках из кремния; 3 – Al_2O_3 керамика-стеклотекстолитовые рамки с проволочками катода координаты X_1 и 4 – сетки координаты Y_1 ; 5 – рамка с 20 мкм проволочками анода A; 6 – рамки с проволочками сетки координаты X_2 и 7 – катод координаты Y_2 . Шаг проволочек составляет 2 мм. Distанции составляют: между анодом и ^{10}B -слоями 7.7 мм, анодом и сетками X_1 и Y_2 по 6 мм, анодом и сетками X_2 и Y_1 по 4 мм, сетками X_1 и Y_1 (сетками X_2 и Y_2) по 2 мм. Детектор заключен в герметичный корпус с электрическими разъемами.

Эффективность и разрешение ^{10}B -детектора $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Новый позиционно-чувствительный детектор $50 \times 50 \text{ мм}^2$ разрабатывался как мишень и одновременно детектор быстрых нейтронов с измерением энергии нейтрона по величинам ионизационных потерь в четырех последовательных газовых промежутках и углов вылета вторичных ядер ^3H (^4He , ^7Li). Используется газовая смесь $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ при атмосферном давлении. По сравнению с детектором $100 \times 100 \text{ мм}^2$ он имеет вдвое большую эффективность и обеспечивает полное поглощение вторичных альфа-частиц за счет втрое большей толщины газа при энергии нейтронов до 4 МэВ. Расчетная оценка эффективности для быстрых нейтронов $\sim 0.0001\%$. При энергиях от 3 до 20 МэВ сечение исследуемой реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + X$ увеличивается и находится в диапазоне 0.05–

0.2 α , в то время как сечение реакций с испусканием ядра ${}^7\text{Li}$ падает от 0.5 до 0.03 α . Ионизационные потери ядра ${}^4\text{He}$ при фиксированной энергии в $2^2 \times 4/3 = 5.3$ раза больше, чем для ядра ${}^3\text{H}$. Поэтому детектор позволит выделить данную реакцию на фоне реакций $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ и $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li} + \gamma$ при $E_0 = 5.82$ МэВ, для которой сечение реакции $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + X$ имеет максимум. Корреляция суммы потерь в двух первых зазорах детектора и суммы потерь в двух последних зазорах для ${}^4\text{He}$ из реакций $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ и $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li} + \gamma$ представлены на рис. 5(а) и рис. 5(б), а для ${}^3\text{H}$ из реакции $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$ представлена на рис. 5(в). Ожидаемое разрешение по восстановленной из кинематики реакции энергии нейтрона $\sim 6\%$ при 1–7 МэВ [12].

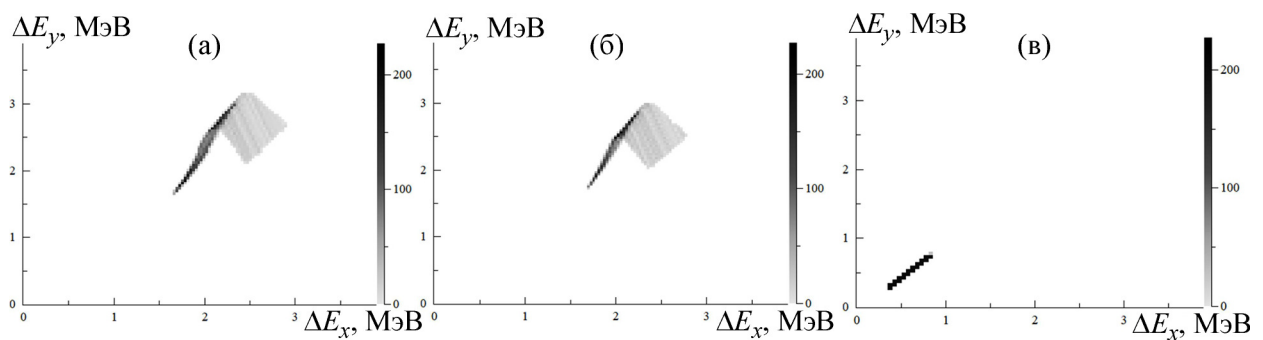


Рис. 5: Расчётная корреляция суммы потерь от двух первых зазоров детектора и от двух последних зазоров для: (а) ${}^4\text{He}$ из реакции $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$; (б) ${}^4\text{He}$ из реакции $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li} + \gamma$; (в) ${}^3\text{H}$ из $n+{}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$ с углами вылета $< 75^\circ$ ядра ${}^4\text{He}$ или ${}^3\text{H}$.

Заключение. Разработан и изготовлен позиционно-чувствительный детектор нейтронов с двумя слоями ${}^{10}\text{B}$ с ожидаемой эффективностью к быстрым нейтронам $\sim 0.0001\%$ с измерением координат X_1, Y_1, X_2 и Y_2 для изучения реакций с вылетом ${}^3\text{H}$ и ${}^4\text{He}$ и может применяться также для изучения других реакций на ядрах: ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}, {}^9\text{Be}, {}^{10}\text{B}, {}^{11}\text{B}$.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. В. Дубовиченко, ЖЭТФ **140**(2), 256 (2011). DOI: 10.1134/S106377611106015X.

- [2] М. Карабова, Д. А. Артеменков, В. Браднова и др., *Ядерная физика* **72**(2), 329 (2009). DOI: 10.1134/S106377880902015X.
- [3] A. J. Krasznahorkay, M. Csatos, L. Csige, et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 042501 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.042501.
- [4] J. Zhou, Q. Xiu, X. Zhou, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **953**, 163051 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.163051.
- [5] M. Kohli, F. Allmendinger, W. Haubler, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **828**, 242 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.05.014.
- [6] С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, Е. С. Конобеевский и др., *Поверхность. Рентг., Синхр. и Нейтр. Исслед.*, № 10, 108 (2021). DOI: 10.31857/S1028096021100162.
- [7] И. В. Мешков, С. И. Поташев, А. А. Афонин и др., *Известия РАН. Серия физическая* **84**(4), 497 (2020). DOI: 10.31857/S0367676520040195.
- [8] С. И. Поташев, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров и др., *Известия РАН. Серия физическая* **85**(10), 1385 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521100227.
- [9] С. И. Поташев, А. А. Каспаров, В. Н. Пономарев, *Известия РАН. Серия физическая* **86**(9), 1301 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522090241.
- [10] F.-J. Hambsch, I. Ruskov, *Nucl. Sci. Eng.* **156**(1), 103 (2007). DOI: 10.13182/NSE07-A2689.
- [11] С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, А. А. Каспаров, Патент России на изобретение Патент RU 2788834 С1 от 26.04.2022, опубликован 24.01.2023.
- [12] А. А. Каспаров, С. И. Поташев, А. А. Афонин и др., *Известия РАН. Серия физическая* **85**(5), 694 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521050124.

Поступила в редакцию 9 апреля 2024 г.

После доработки 29 июля 2024 г.

Принята к публикации 30 июля 2024 г.