

ФОНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДЕТЕКТОРАХ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА

М. М. Чернявский¹, А. А. Гишпиус¹, Г. В. Калинина¹, Н. С. Коновалова¹,
Н. М. Окатьева¹, Н. Г. Полухина¹, Ж. Т. Садыков^{1,2}, Т. В. Щедрина¹,
Н. И. Старков¹, Е. Н. Старкова¹, И. И. Засавицкий¹

Представлены результаты исследований регистрирующих свойств фосфатного стекла марки КНФС-3 как материала для детекторов тяжёлых ионов. Анализируется вклад возможных источников фона и радиационная устойчивость стекла к воздействию потоков альфа-частиц.

Ключевые слова: детекторы из фосфатного стекла, условия формирования треков ионов, фон альфа-частиц.

Введение. Современные установки для изучения сверхтяжёлых элементов требуют создания детекторов, позволяющих регистрировать и идентифицировать фрагменты спонтанного деления ядер, полученных в результате ядерного синтеза на ускорителях. В качестве возможных кандидатов рассматриваются твердотельные детекторы на основе диэлектрических материалов (стёкол, слюд, пластиков и др.). Эти детекторы являются пороговыми, т. е. нарушение структуры материала при прохождении ионизирующей частицы (латентный трек) формируется, когда удельные энергетические потери dE/dx превышают некоторое пороговое значение для данного материала. В результате химического травления на месте латентного трека образуется значительно превосходящий его в диаметре пустотелый канал, или протравленный трек. Размеры протравленных треков позволяют изучать их с помощью оптического микроскопа.

Помимо этого, существует порог по величине заряда, ниже которого травимые треки не возникают. Подбор материала с определённым порогом обеспечивает регистрацию более тяжёлых частиц при подавлении фона более лёгких. В рассматриваемых экспериментах высокая эффективность регистрации ионов в детекторе должна быть обеспечена

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ninakonovalova@yandex.ru.

² НИТУ «МИСиС», 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

при одновременном подавлении значительного фона альфа-частиц, обусловленного радиоактивностью как синтезированных сверхтяжёлых ядер, так и продуктов их деления.

Существует также собственный фон детектора, представляющий собой дефекты поверхности стекла и треки от спонтанного деления ядер тяжёлых элементов, входящих в состав материала детектора, которые при химическом травлении могут выглядеть как протравленные треки ионов (так называемые “ложные треки”). Этот фон может быть подавлен предварительным отжигом или травлением детектора до облучения [1].

Исследование фоновых явлений в детекторе представляет собой необходимый этап изучения применимости диэлектрического материала в условиях конкретного эксперимента. Ввиду важности проблемы фона при регистрации сверхтяжёлых ядер, в данной работе при изучении применимости фосфатного стекла марки КНФС-3 в качестве материала для детектора ионов на Фабрике сверхтяжёлых элементов ОИЯИ было проведено исследование возможного возникновения протравленных треков альфа-частиц с энергиями, характерными для альфа-распада тяжёлых ядер.

Представленные в работе изображения поверхности стекла получены в ФИАН на автоматизированном измерительном комплексе ПАВИКОМ, который активно используется для обработки экспериментов с применением трековых детекторов [2, 3].

Модельные расчёты. Условием формирования травимого трека является превышение скорости растворения материала в области латентного трека над скоростью растворения основной массы детектора. В нашем эксперименте скорость травления фосфатного стекла в 20HF (20% растворе плавиковой кислоты HF) была определена в интервале 2–2.5 мкм/час, что заметно ниже скорости травления в области трека (5–6 мкм/час) [4]. Одним из параметров, влияющих на процесс формирования треков, является поглощённая доза D (плотность энергии, выделяемой на единицу массы вещества детектора при прохождении ионизирующей частицы). В случае фосфатного стекла марки КФНС-3, необходимое соотношение между скоростями травления возникает при значении $D \geq 5 \cdot 10^7$ Гр [1] ($5 \cdot 10^7$ Гр соответствует 10^9 МэВ/мкм³). Чтобы оценить регистрационные возможности фосфатного стекла по этому критерию, на базе модельного инструментария GEANT4 [5–7] были рассчитаны значения поглощённой дозы D в области прохождения заряженной частицы. Модельные расчёты методом Монте-Карло на основе инструментария GEANT4 позволяют проследить в детекторе частицы (как падающие, так и возникающие в результате взаимодействий), зафиксировать их характеристики и получить значения выделенной энергии в каждом элементе объёма детектора, что позволяет оценить плотность суммарного энергосодержания D .

Основной стеклообразующей компонентой тестируемого оптического фосфатного стекла марки КФНС-3 является пятиокись фосфора P_2O_5 . Стекло включает также незначительные примеси других элементов – бария, кремния, калия, алюминия, олова и др. При моделировании в состав фосфатного стекла, помимо Р и О, были включены более тяжёлые элементы (Ва и Sr), в соответствии со спецификацией изготовителей. Анализировались энергетические потери иона и вторичных электронов в зависимости от расстояния от оси трека до точки наблюдения

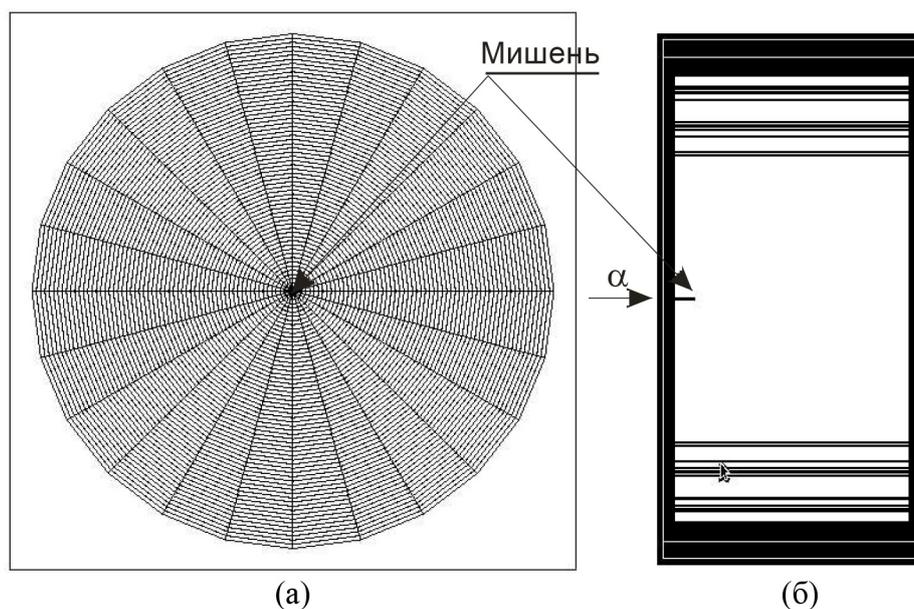


Рис. 1: Схема детектора тяжёлых ионов из фосфатного для модельных расчётов на основе GEANT4: (а) фронтальное изображение; (б) вид сбоку. Направление потока альфа-частиц, указано стрелкой.

В процессе моделирования цилиндрическая мишень из фосфатного стекла диаметром 10 нм и длиной 200 нм была помещена в центр детектора (рис. 1). Мишень облучалась потоком альфа-частиц, направление которого указано стрелкой на рис. 1. Детектор состоял из 120 коаксиальных цилиндрических слоёв стекла толщиной 50 нм с увеличивающимся радиусом; самый большой цилиндр имел радиус 6 мм. Высота цилиндров составляла 2 мм. Каждый цилиндр представлял собой чувствительный элемент, регистрирующий образующиеся в процессе ионизации электроны на определённом расстоянии от трека альфа-частицы. То есть детектор был смоделирован таким образом, что значение величины D определялось в каждом из его 120 сегментов, что позволяло определить величину энерговыделения в каждом сегменте в зависимости от рас-

стояния до трека альфа-частицы. Полученная зависимость для нескольких значений энергии налетающей альфа-частицы (в единицах МэВ/мкм³) представлена на рис. 2. Видно, что необходимая для формирования видимого трека величина энерговыделения $D = 5 \cdot 10^7$ Гр в рассмотренных условиях не достигается даже при энергиях, значительно превосходящих энергию частиц при альфа-распаде.

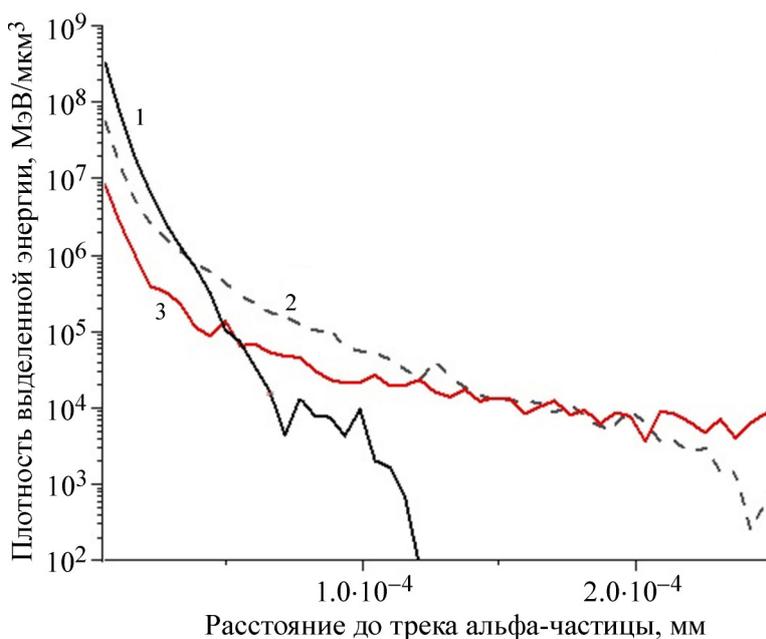


Рис. 2: Плотность энерговыделения D альфа-частиц с энергиями 4 МэВ (1), 10 МэВ (2) и 40 МэВ (3) в фосфатном стекле в зависимости от расстояния до трека частицы.

Необходимо отметить, что рассчитанный по программе SRIM [8] пробег альфа-частиц в фосфатном стекле составляет ~ 25 мкм, т. е. при условиях, необходимых для формирования треков альфа-частиц, длина протравленных треков превысила бы толщину стравленного слоя стекла ($1 \div 2.5$ мкм, см. [4]), и они были бы видны под микроскопом.

Эксперимент. В серии тестовых экспериментов образцы стекла марки КНФС-3 размером $10 \times 5 \times 3$ мм³ облучались потоком альфа-частиц со средней энергией 5.5 МэВ на радиоактивном источнике Pu^{238} . Образцы были разделены на две группы: время облучения первой группы составляло 16 минут (соответствующий интегральный поток альфа-частиц $\sim 10^7$ см⁻²); второй – 24 часа (соответствующий интегральный поток альфа-частиц $\sim 10^9$ см⁻²). Обе группы травилась в 20HF при комнатной температуре в два этапа, 30 и 60 минут.

Поверхности всех образцов были просмотрены под оптическим микроскопом при увеличении $40\times$. Ни в одном из образцов треки альфа-частиц не были обнаружены. На рис. 3 приведены изображения одного и того же поля зрения поверхности образца с временем травления 30 минут (рис. 3(а)) и 60 минут (рис. 3(б)).

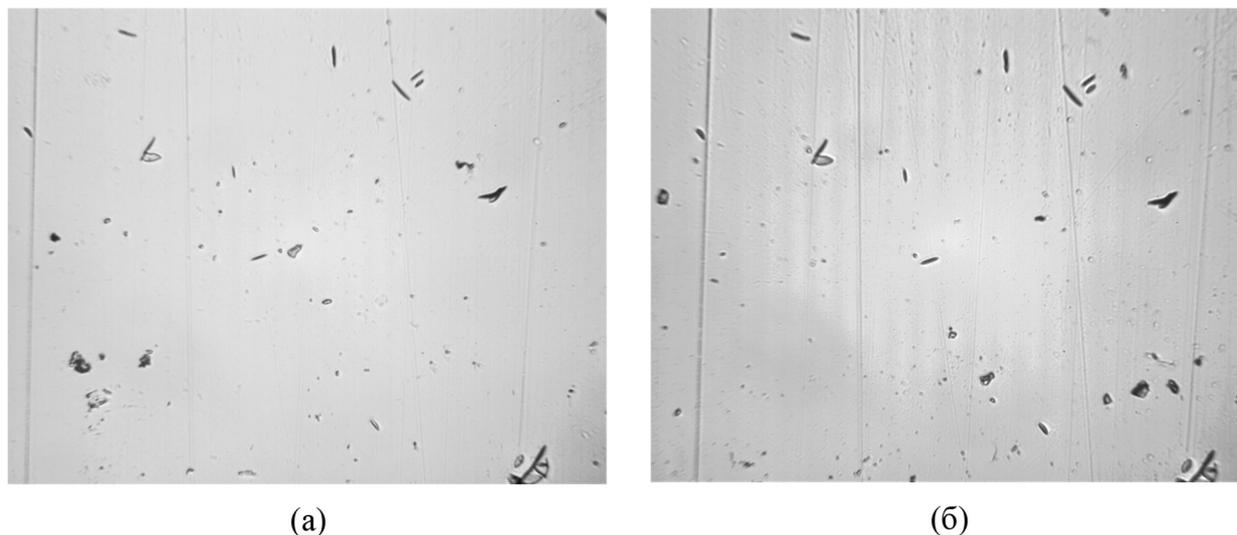


Рис. 3: Фотографии одного и того же фрагмента поверхности фосфатного стекла (увеличение $40\times$), облучённого альфа-частицами, после травления в течение 30 (а) и 60 минут (б). Размер поля зрения 280×220 мкм².

На поверхности образца видны отдельные пятна, которые по своим форме и размерам могут быть приняты за треки. Эти пятна случайным образом разбросаны по поверхности образцов, в то время как треки альфа-частиц должны быть сосредоточены в некоторой области поверхности и одинаково направлены. Кроме того, плотность наблюдаемых пятен слишком мала по сравнению с ожидаемой плотностью треков 10^7 и 10^9 см⁻². Поэтому мы рассматриваем эти пятна как результат травления механических дефектов поверхности образца. Небольшое различие в расположении дефектов объясняется тем, что при более длительном травлении (рис. 3(б)) некоторые дефекты, наблюдаемые на рис. 3(а), исчезли вместе со стравленным слоем, но при этом вскрылись новые.

Полученный результат подтверждает отсутствие чувствительности исследуемого фосфатного стекла к воздействию альфа-частиц, в том числе образовавшихся в результате радиоактивного распада ядер.

Заключение. Показано, что в эксперименте по регистрации ионов в фосфатном стекле фон треков альфа-частиц от распада тяжёлых ядер будет подавлен по отношению к трекам тяжёлых фрагментов спонтанного распада синтезированных сверхтяжёлых ядер.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Николаев, *Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях* (изд-во Политехнического ун-та, Спб, 2012).
- [2] А. Б. Александров, В. А. Алексеев, А. В. Багуля и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(12), 23 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619120042.
- [3] Н. С. Коновалова, А. С. Коновалов, Н. М. Окатьева и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(6), 26 (2021). DOI: 10.3103/s106833562106004x.
- [4] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М. М. Чернявский и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(10), 69 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622100062.
- [5] S. Agostinelli, J. Allison, et al. (on behalf of GEANT4 Collaboration), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **506**, 250 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [6] J. Allison, K. Amako, et al. (on behalf of GEANT4 Collaboration), IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**(1), 270 (2006). DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- [7] J. Allison, K. Amako, et al. (on behalf of GEANT4 Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A **835**, 186 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
- [8] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **268**, 1818 (2010). DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.

Поступила в редакцию 15 марта 2023 г.

После доработки 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 18 апреля 2023 г.