

Термическая устойчивость стекол для детекторов тяжелых ионов

© Е.В. Андреев,¹ П.Ю. Апель,^{1,2} Н.С. Коновалова,² Н.М. Окальева,² Н.Г. Полухина,² Ж.Т. Садыков,²
Н.И. Старков,² Е.Н. Старкова,² Д.М. Стрекалина,² М.М. Чернявский,² Т.В. Щедрина²

¹ Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

✉ e-mail: starkovaen@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 14 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 31 октября 2024 г.

Принято к публикации 11 ноября 2024 г.

Приведены результаты тестовых исследований фосфатных стекол КНФС-3 и SELG, алюмо-кальциевого стекла АКС5, кварцевого стекла КУ-2 и силикатного стекла С48-3 для регистрации тяжелых ионов в условиях высоких температур. Образцы тестируемых стекол облучены тяжелыми ионами на циклотроне U-400 Объединенного института ядерных исследований в Дубне и прошли термическую обработку в муфельной печи. Травление стекол и анализ данных осуществлялись в Лаборатории элементарных частиц ФИАН. Поиск и анализ протравленных треков проведен на автоматизированном измерительном оптическом микроскопе комплекса ПАВИКОМ. Для дальнейших исследований выбраны два из пяти протестированных стекол.

Ключевые слова: стеклянные детекторы для регистрации тяжелых ионов, тестирование стекол с различным составом, отжиг при высоких температурах, обработка изображений на автоматизированном микроскопе.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59478.272-24

Введение

Синтетические и природные диэлектрики, в частности стекла и слюды, находят широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе в экспериментальной ядерной физике. В настоящей работе изучается применимость различных стекол для регистрации сверхтяжелых ядер и продуктов их распада.

Сверхтяжелые химические элементы получают на ускорителях как результат полного слияния ядрамишени и налетающей частицы [1–3]. Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов успешно проводятся, в частности, в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) [4]. В экспериментах ЛЯР элементы от 114 (флеровия) до 118 (оганесона) были получены при взаимодействии ускоренных ионов ^{48}Ca с мишенями из актиноидов, от плутония до калифорния [5]. Чтобы получить элементы тяжелее оганесона, в качестве снаряда и мишени необходимо использовать элементы с большим атомным номером (например, для получения 120-го элемента рассматривается реакция изотопа хрома ^{54}Cr с мишенью из кюрия ^{96}Cm). Для синтеза и исследования свойств сверхтяжелых элементов в ОИЯИ создана Фабрика сверхтяжелых элементов (циклотрон ДЦ-280, газонаполненные сепараторы ядер отдачи GRAND и DGFRS-II) [6], запуск которой был осуществлен в 2020 г.

В экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов на ускорителе пучок налетающих тяжелых ионов про-

ходит через мишень и достигает сепаратора. В сепараторе образующееся новое ядро, траектория движения которого совпадает с направлением пучка, отделяется от других нуклидов (исходного пучка и других продуктов реакции) и передается на детектор. Регистрация сверхтяжелых изотопов с зарядом ядра более 112, получаемых методом горячего синтеза, осуществляется с помощью детектора, фиксирующего время попадания в детектор и координаты имплантированных ядер отдачи, энергий α -частиц распада и продуктов деления. Перенос занимает около 10^{-6} с и, чтобы быть обнаруженным, ядро должно просуществовать в течение по крайней мере этого времени [7]. Синтезированный химический элемент признается обнаруженным, если его ядро не распалось в течение 10^{-14} с [8].

Требования по разделению продуктов реакции, в частности, быстрое действие, соизмеримое со временем жизни выделяемого нуклида, обеспечивается методом газовой термохроматографии, предусматривающим проведение химических процессов в газовой среде [9]. Газохимические методы разделения элементов основаны на переводе радионуклида из газовой в конденсированную фазу. В процессе газохимического разделения элементов создаются условия, когда элементы находятся в разной химической форме, в том числе за счет изменения температуры газа-носителя. Для разделения элементов со сходными свойствами используют газовую термохроматографию, осуществляющую осаждение веществ на колонке с температурным градиентом [10]. Для элемен-

Таблица 1. Этапы термической обработки облученных стекол

Температура	Интервал 1 (равномерный нагрев)	Интервал 2 (выход на режим)	Интервал 3 (выдержка при постоянной температуре)	Интервал 4 (остывание в печи)
До 300°C	25–285°C (90 min)	285–300°C (30 min)	300°C (180 min)	~ 6 h
До 300°C	–	–	300 ± 8°C (10 min)	–
До 500°C	25–475°C (135 min)	475–500°C (30 min)	500°C (180 min)	~ 8 h
До 500°C	–	–	500 ± 10°C (10 min)	–

тов тяжелее 112 переход от сорбции к десорбции может лежать в области температур выше 200°C. При таких температурах использование полупроводниковых детекторов и ядерной эмульсии невозможно, и для этих целей могут использоваться диэлектрические трековые детекторы [11]. Однако в диэлектрических детекторах в условиях высоких температур может происходить отжиг (полное или частичное исчезновение) треков ионов [12]. Помимо свойств детектора, степень отжига зависит от температуры и времени термического воздействия.

В Лаборатории элементарных частиц ФИАН изучаются различные диэлектрические материалы для регистрации сверхтяжелых ядер и продуктов их распада в условиях термохроматографической колонки на Фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ при высоких температурах. В проводимых тестовых экспериментах образцы стекол облучались тяжелыми ионами в транспортном канале ионного пучка резонансного циклического ускорителя U-400. Все образцы облучались ионами ксенона, ускоренными до энергии 475 MeV; образцы кварцевого стекла КУ-2 облучались также на пучке с энергией 160 MeV. Для термической обработки облученных стекол использовалась муфельная печь с программируемым алгоритмом нагрева. Во избежание перегрева выше заданного уровня для продолжительных экспозиций (~ 180 min) использовался двухэтапный режим прогрева (сначала — быстрый нагрев, затем более медленный выход на нужную температуру). Этапы термической обработки облученных стекол представлены в табл. 1.

В настоящей работе приводятся результаты анализа отожженных и неотожженных образцов стекол с различным составом, облученных тяжелыми ионами на ускорителе ЛЯР ОИЯИ.

В результате химического травления на поверхности образцов могут появляться треки, видимые в оптический микроскоп. Размеры проекции трека на плоскость поверхности стекла определяются с помощью программ, разработанных в Лаборатории элементарных частиц ФИАН для обработки изображений на высокотехнологичном автоматизированном микроскопе. Изображение проекции трека на поверхность стекла при анализе

данных аппроксимируется эллипсом (большая и малая ось эллипса далее в тексте называются соответственно длиной и шириной проекции трека). Ширина проекции трека связана с растравливанием стенок канала и характеризует скорость травления основного материала, а длина проекции характеризует скорость травления вдоль трека, т. е. в области, поврежденной прохождением заряженной частицы, и связана со свойствами этой частицы. По размеру проекции, выделенной на изображении, вычисляется пробег иона до остановки в материале детектора [13]. Измерения и автоматическая запись данных осуществляются на установке ПАВИКОМ [14].

1. Фосфатные стекла

Были протестированы образцы „прочного эрбиевого лазерного стекла“ на фосфатной основе (Strong Erbium Laser Glass, SELG) [15]. Высокое содержание оксидов алюминия и бора в стекле обеспечивают его механическую прочность, химическую устойчивость и тугоплавкость. Температура деформации стекла составляет 755°C.

Для облучения ионами ксенона $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 475 MeV были отобраны четыре образца фосфатного стекла SELG. После облучения образцы были обработаны в 40% растворе плавиковой кислоты HF.

Образцы № 1 и № 2 SELG не подвергались температурному отжигу и травились от 10 до 150 min с шагом 20 min. Видимые треки появились после 60 (образец № 1) и после 70 (образец № 2) min травления. Рис. 1, на котором представлены изображения одного поля зрения поверхности образцов № 1 (рис. 1, *a–c*) и № 2 (рис. 1, *d–f*), иллюстрирует динамику изменения размеров треков на разных этапах травления. Причина задержки во времени появления треков пока непонятна, но подобные эффекты наблюдались и на образцах других стекол. Это может быть связано с тем, что на первых шагах травления скорость травления самого стекла больше скорости травления трека, который „пропадает“ в травленном слое. Позже, когда скорость травления

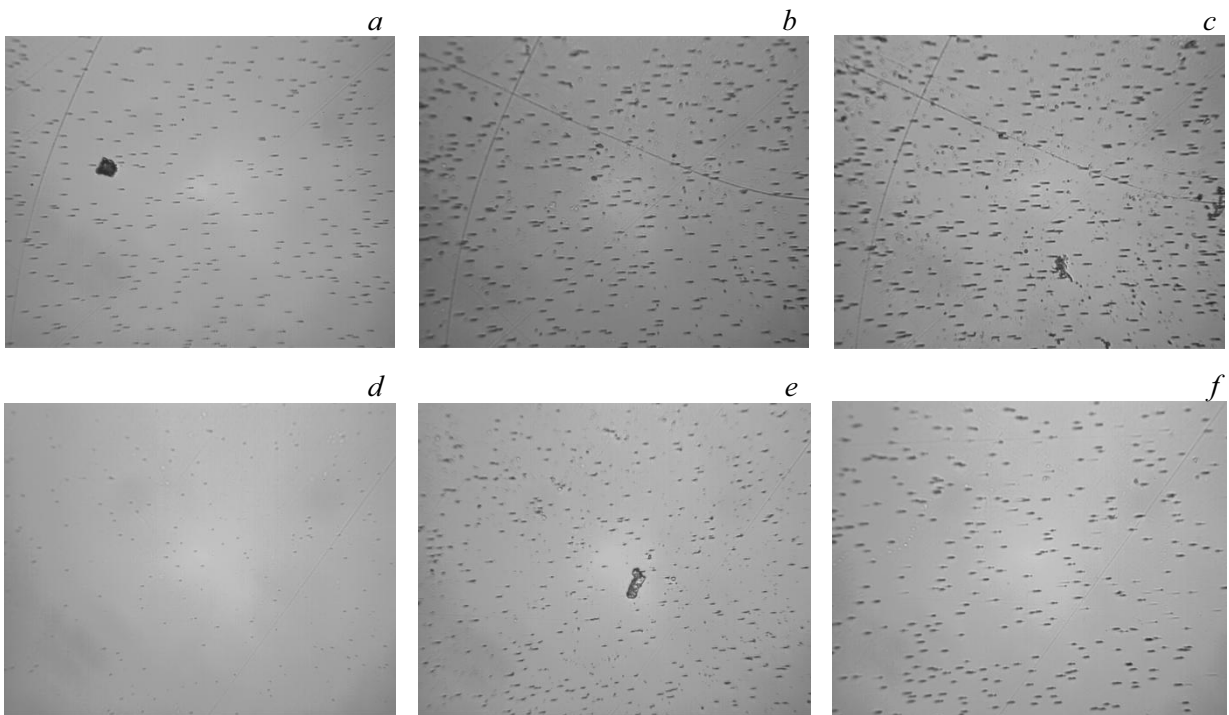


Рис. 1. Изменение размеров кластеров в образцах из фосфатного стекла SELG. Время травления неотожженных образцов: № 1 — 100 (a), 135 (b), 155 (c) и № 2 — 70 (d), 120 (e), 160 min (f). Размер одного поля зрения $280 \times 220 \mu\text{m}$.

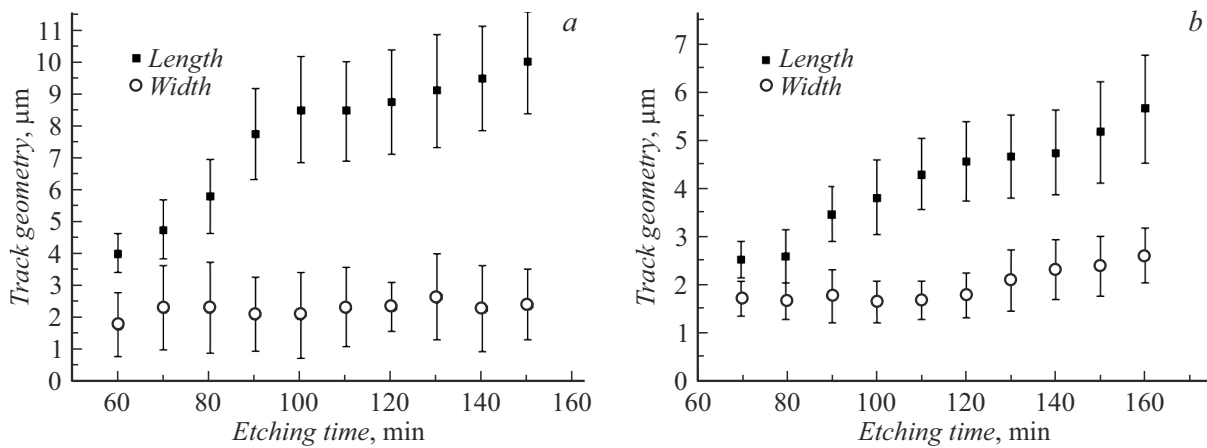


Рис. 2. Размеры протравленных треков в образцах № 1 (a) и № 2 (b) из фосфатного стекла SELG в зависимости от времени травления в 40% HF.

самого стекла становится меньше скорости травления трека, следы появляются.

На рис. 2 представлены результаты измерений размеров треков в неотожженных образцах № 1 и № 2 фосфатного стекла SELG в зависимости от времени травления.

Признаком остановки частицы в детекторе является излом на кривой, показывающей зависимость длины проекции трека от времени травления, когда процесс травления переходит из области трека на основной материал. На рис. 2 это 100 (рис. 2, a) и 120 min

(рис. 2, b). Для определения длины трека иона до остановки необходимо знать величину слоя, стравленного с поверхности образца. Величина стравленного слоя определяется путем взвешивания образца на каждом шаге травления [13]. При небольшой скорости травления изменение веса образца может быть сопоставимо с точностью взвешивания (0.1 mg), что приводит к достаточно большим ошибкам измеренной величины стравленного слоя. Более достоверный результат достигается при измерении скорости травления стекла на большом промежутке времени (более 100 min), когда изменение

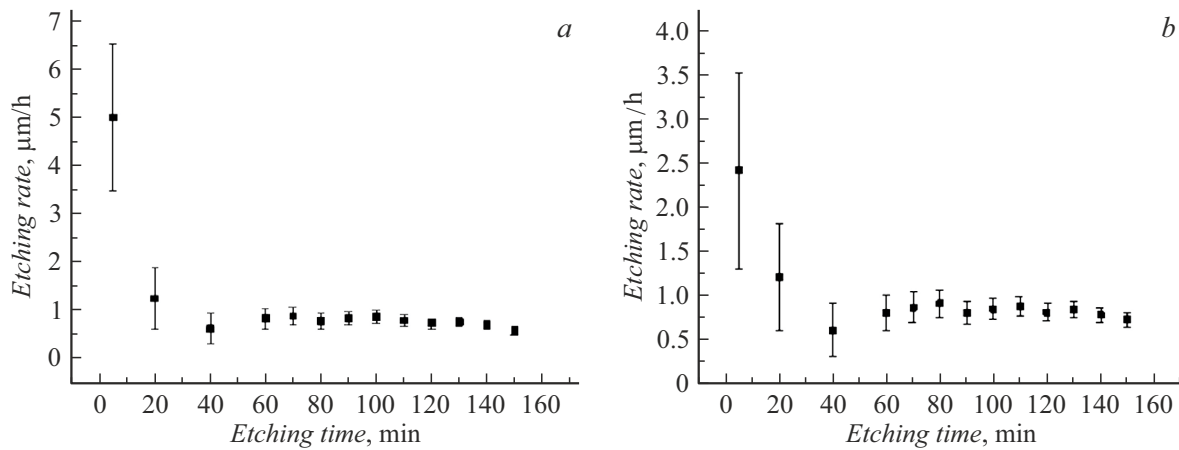


Рис. 3. Скорость травления фосфатного стекла SELG: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2.

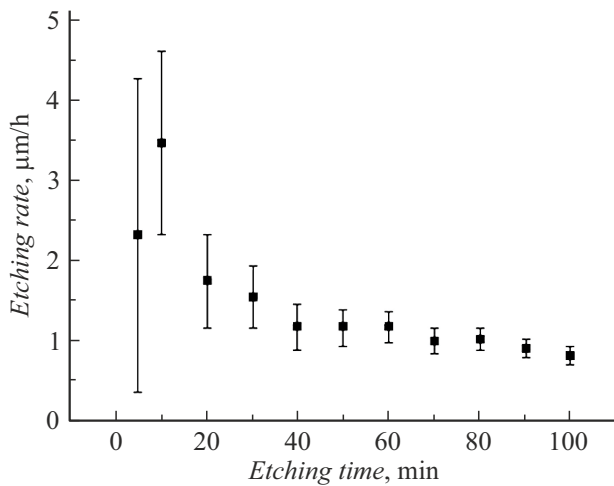


Рис. 4. Скорость травления отожженного образца № 4 фосфатного стекла SELG (температура отжига 500°C).

веса образца превышает 0.5 mg, т. е. $\sim 0.2\%$ веса образца. На рис. 3 представлены графики скорости травления фосфатного стекла SELG для образцов № 1 и № 2.

Облученные ионами ксенона образцы стекла SELG № 3 и № 4 были отожжены при температурах 300 (образец № 3) и 500°C (образец № 4). Результатом стало разрушение поверхности образца № 4 и отсутствие видимых под оптическим микроскопом протравленных каналов в образце № 3. Скорость травления материала оказалась сопоставимой со средней скоростью травления неотожженных образцов, примерно $0.8\text{--}0.9\ \mu\text{m/h}$ (рис. 4).

Можно провести качественное сравнение полученных результатов с результатами травления фосфатных стекол КНФС-3 (прямое сравнение невозможно, поскольку травление КНФС-3 проводилось в 20%HF). На графике зависимости длины проекции трека от времени травления стекол КНФС-3 можно выделить два участка: более крутой в начале травления, и более пологий после

100–120 min травления [13]. Это объясняется большей скоростью травления в области трека по сравнению со скоростью травления основной массы стекла. После 100–120 min травления (при приближении иона к точке остановки в стекле) скорость изменения длины протравленного канала уменьшается. В зависимости длины треков от времени травления, полученной для неотожженных фосфатных стекол SELG, также просматриваются два участка и изменение наклона с более крутого на более пологий в районе 100–120 min травления, однако в этом случае величина скорости травления в области треков в несколько раз меньше. В отличие от фосфатных стекол SELG отжиг после травления стекол КНФС-3 при температуре 300°C приводил не к исчезновению треков, а только к уменьшению их геометрических размеров [16].

2. Алюмо-кальциевое стекло

Алюмо-кальциевое стекло АКС5 производится на Лыткаринском заводе оптического стекла (ЛЗОС) [17]; стеклообразующим веществом является оксид алюминия. Стекло марки АКС5 характеризуется высокой термостойкостью и хорошими механическими свойствами, температура отжига составляет $680 \pm 10^\circ\text{C}$, температура деформации — 780°C , термостойкость — 90°C . Разработанный технологический процесс позволяет получать образцы толщиной от 3 mm, что связано с высокой кристаллизационной способностью стекла.

Часть облученных образцов стекла марки АКС5 была отожжена после облучения при температуре 300°C. В результате отжига образцы не изменили форму и не получили видимых повреждений. Травление облученных образцов в HF (образцы травлились при концентрациях 10, 20 и 40%) не привело к появлению видимых треков, под действием кислоты поверхность образцов разрушалась. На рис. 5 приведены скорости травления

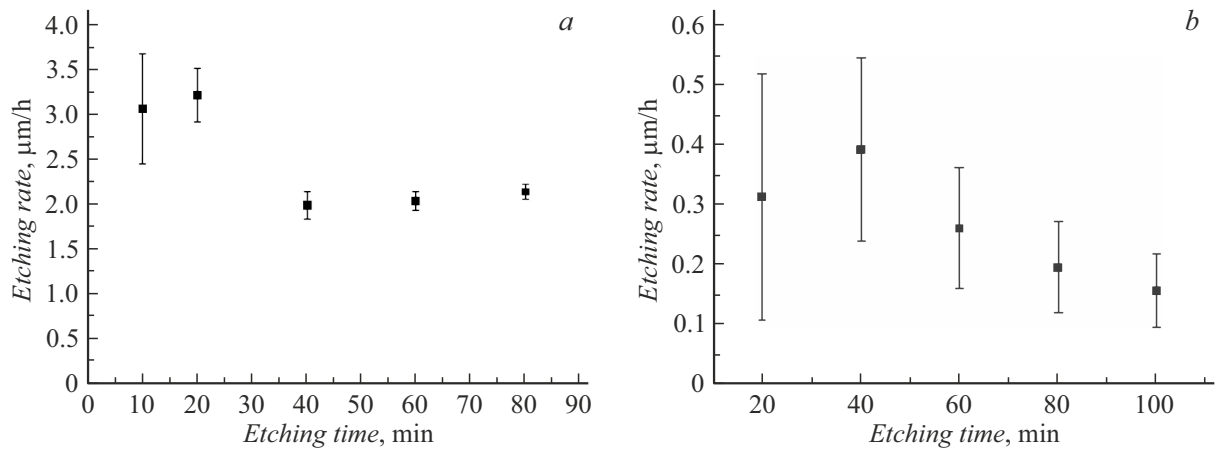


Рис. 5. Скорость травления стекла АКС5: *a* — неотожженного образца в 40% HF; *b* — образца, отоженного при 300°C, в 10% HF.

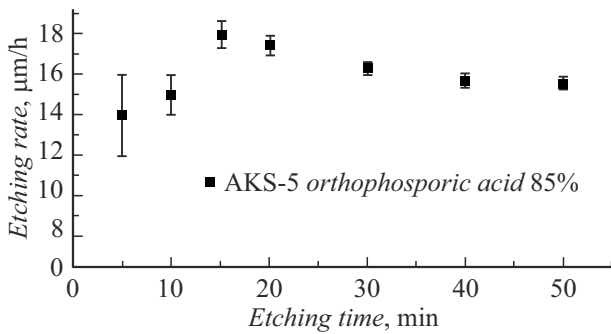


Рис. 6. Скорость травления образца стекла АКС5, протравленного в 85% растворе ортофосфорной кислоты H_3PO_4 .

неотожженного и отоженного образцов в плавиковой кислоте разной концентрации.

Один образец был протравлен в ортофосфорной кислоте H_3PO_4 , которая активно взаимодействует с Al, входящим в состав АКС5. Скорость травления образца в ортофосфорной кислоте с концентрацией 85% в зависимости от интервала травления показана на рис. 6.

При обработке азотной кислотой (концентрация 65%) скорость травления стекла составила $8 \mu\text{m/h}$, при обработке соляной кислотой (концентрация 36%) — $45 \mu\text{m/h}$. Видимые треки ядер отсутствовали в алюмо-кальциевом стекле при всех вариантах обработки.

3. Кварцевое стекло

Кварцевое стекло или оптический плавильный кварц — это однокомпонентное стекло, состоящее из почти чистого кремнезема (диоксида кремния SiO_2) в аморфной форме. Кварцевое стекло характеризуется высокой механической прочностью, заметно превосходящей прочность других оптических материалов, высокой однородностью и термической стойкостью; температура отжига

выше 1000°C. Более подробно свойства кварцевого стекла описаны в [18].

Тестировались образцы кварцевого стекла марки КУ-2, обладающего высокой тугоплавкостью. Результаты тестирования образцов без отжига показали, что это стекло применимо для определения заряда по скорости травления треков разных ядер при фиксированной энергии на нуклон [18].

В дальнейших исследованиях образцы кварцевого стекла марки КУ-2 были облучены на изохронном циклотроне U-400 ЛЯР ОИЯИ, предназначенном для получения пучков ускоренных ионов с атомной массой в диапазоне $A = 4-209$ и энергией $3-29 \text{ MeV/nucleon}$. Облучение проводилось на пучке ионов Xe под углом 45° при двух значениях энергии пучка — 160 и 475 MeV. Во время некоторых облучений образцов ионами с энергией 160 MeV перед стеклянной мишенью был размещен слой поглотителя из ПЭТФ, чтобы получить энергию падающих ионов 80 MeV.

В табл. 2 показаны величины пробега иона Xe в стекле КУ-2 при этих энергиях, полученные с помощью программы SRIM [19], и результаты измерений в неотожженных образцах.

Облученные образцы были протравлены в 2% растворе плавиковой кислоты HF, время травления составило около 200 min с шагом 10 min.

На рис. 7 показаны фотографии треков на поверхности стекла после травления в течение 75 min для разных значений энергии пучка и результаты выделения кластеров, полученных после обработки на ПАВИКОМ. Видно, что доза облучения 10^5 cm^{-2} при энергии 475 MeV (рис. 7, *c, f*) слишком велика, так как треки быстро растравливаются и перекрывают друг друга (плотность облучения имеет большое значение при изучении возможности идентификации треков).

На рис. 8 показаны значения длин проекций треков L_{pr} на поверхность стекла в зависимости от времени травления t , полученные с учетом толщины травленного слоя.

Таблица 2. Расчетные и измеренные параметры треков ионов Хе в кварцевом стекле КУ-2

Энергия, MeV	80	160	475
Пробег ядра Хе, μm (SRIM)	13.5	18.5	37
Точка остановки, min	135	120	100
Длина проекции до точки остановки, μm	4.5 ± 0.5	8 ± 0.8	16 ± 1.2
Толщина стравленного слоя, μm	7.3 ± 0.3	7.2 ± 0.3	7 ± 0.3
Полная длина трека, μm	16.5 ± 1.7	21 ± 1.9	32.5 ± 2.5
Скорость травления трека, $\mu\text{m}/\text{h}$	7.3 ± 0.8	10.5 ± 0.8	19.5 ± 1.2

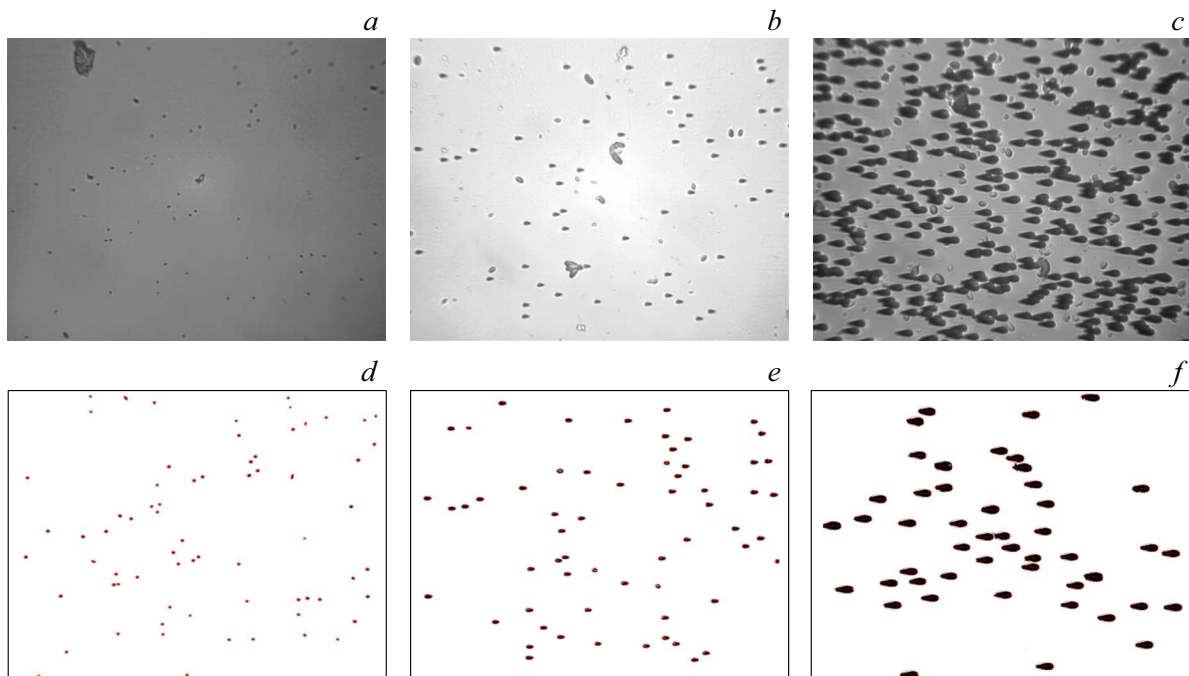


Рис. 7. Верхний ряд: фотографии следов ядер при энергиях 80 (a), 160 (b) и 475 MeV (c) после травления в течение 75 min в 2%HF. Нижний ряд: изображения выделенных кластеров, соответствующих энергиям ионов 80 (d), 160 (e) и 475 MeV (f) (результат обработки на ПАВИКОМ).

Перегиб функции $L_{pr}(t)$ указывает на переход от травления поврежденных ионом областей материала к травлению неповрежденного стекла [18]. Точки перегиба на рис. 8 соответствуют 135, 120 и 100 min для энергий 80, 160 и 475 MeV соответственно. Данные о длине проекции трека до остановки (табл. 2) позволяют получить зависимость скорости травления от энергии иона (рис. 9). Так, скорость травления треков ионов с энергией 160 MeV согласуется с величиной $11.2 \pm 0.6 \mu\text{m}/\text{h}$, полученной в [18]. Ранее в работе [13] обсуждался алгоритм определения заряда по скорости травления треков для разных ионов при фиксированной энергии на нуклон.

Два образца стекла КУ-2, облученные ионами Хе с энергией 475 MeV, были отожжены при температурах 300 и 500°C в муфельной печи ЛЯР (табл. 1). На рис. 10, a показана зависимость длины проекции трека в отожженном образце от времени травления. Точка перегиба на графике соответствует времени травления 100 min и длине проекции трека $\sim 10 \pm 1.1 \mu\text{m}$. Для образцов, облученных ионами с энергией 475 MeV, отжиг при температуре 500°C снижает скорость травления в области трека более, чем в три раза по сравнению с неотожженными образцами (рис. 9); при этом скорость травления основного материала после отжига остается прежней.

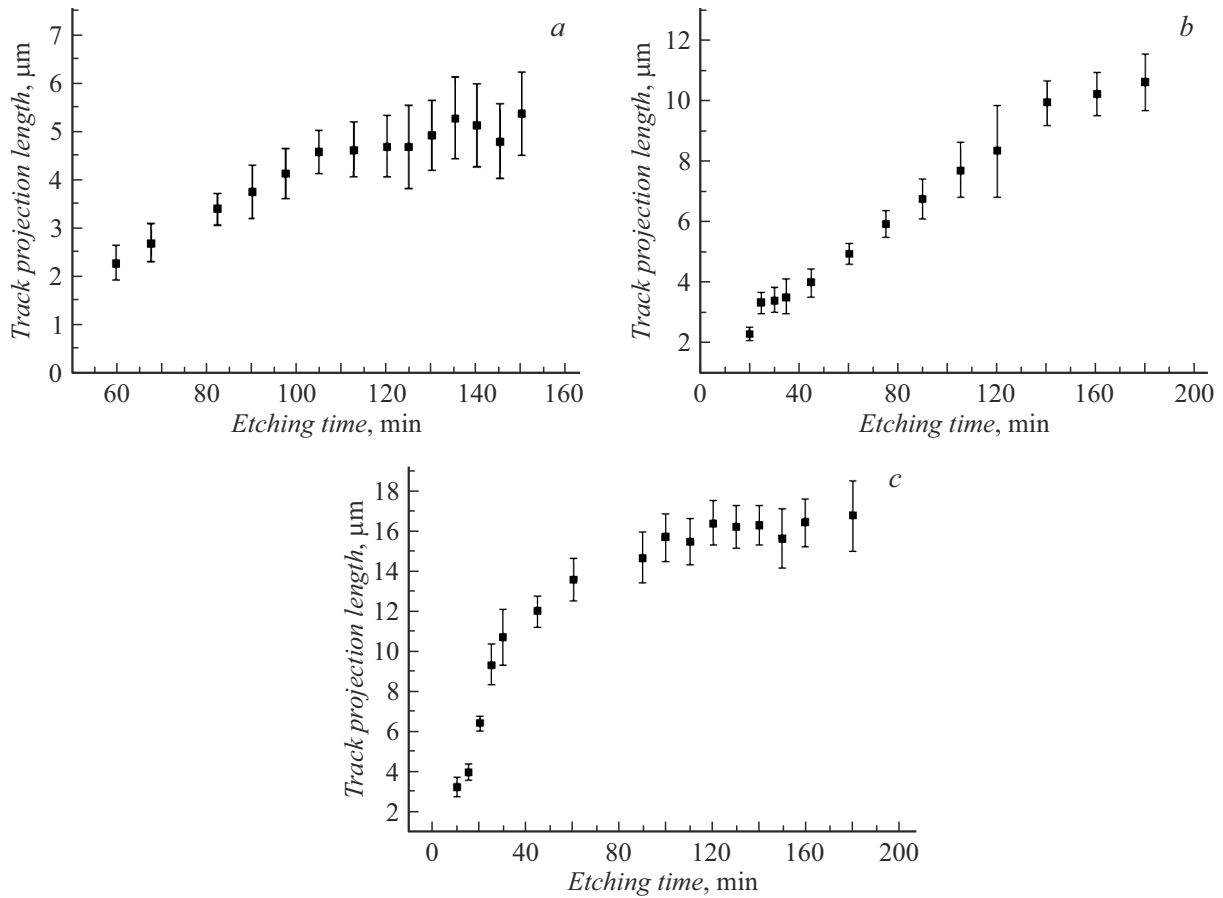


Рис. 8. Зависимость длины проекции трека на поверхность стекла от времени травления (функция $L_{pr}(t)$) при энергии пучка 80 (a), 160 (b) и 475 MeV (c).

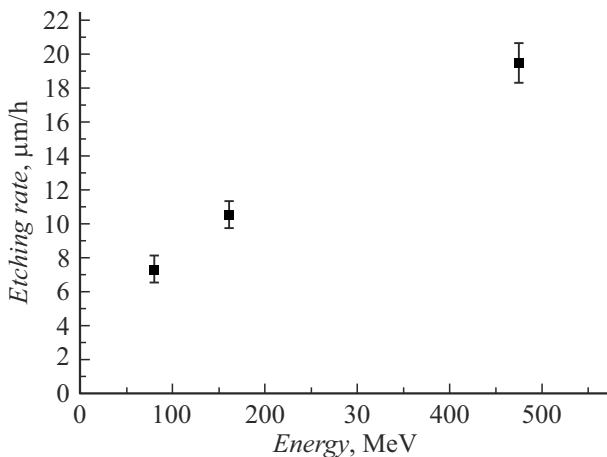


Рис. 9. Зависимость скорости травления треков в кварцевом стекле КУ-2 от энергии ионов Хе.

На рис. 10 показаны скорости травления неотожженного образца кварцевого стекла КУ-2 (рис. 10, b) и образца, отожженного при температуре 500°C (рис. 10, c). Видно, что скорость травления непостоянна и для отожженного образца демонстрирует более резкое падение

при увеличении времени травления, по сравнению с неотожженным образцом. Таким образом, в кварцевом стекле марки КУ-2 треки сохраняются даже при отжиге в течение 10 h при температуре 500°C, однако изменяют при этом свои характеристики. Это обстоятельство необходимо учитывать при использовании стекла этой марки в качестве детектора.

4. Силикатное стекло С48-3

Было протестировано силикатное стекло С48-3 (производство Лыткаринского завода оптического стекла), образцы которого были подвергнуты травлению в растворах плавиковой, азотной, соляной и ортофосфорной кислот той же концентрации. Плавиковая кислота разрушила поверхность образца; остальные кислоты не взаимодействовали с образцом: изменение веса не наблюдалось, поверхность не разрушалась. Видимые треки не были зафиксированы ни в одном из протравленных образцов.

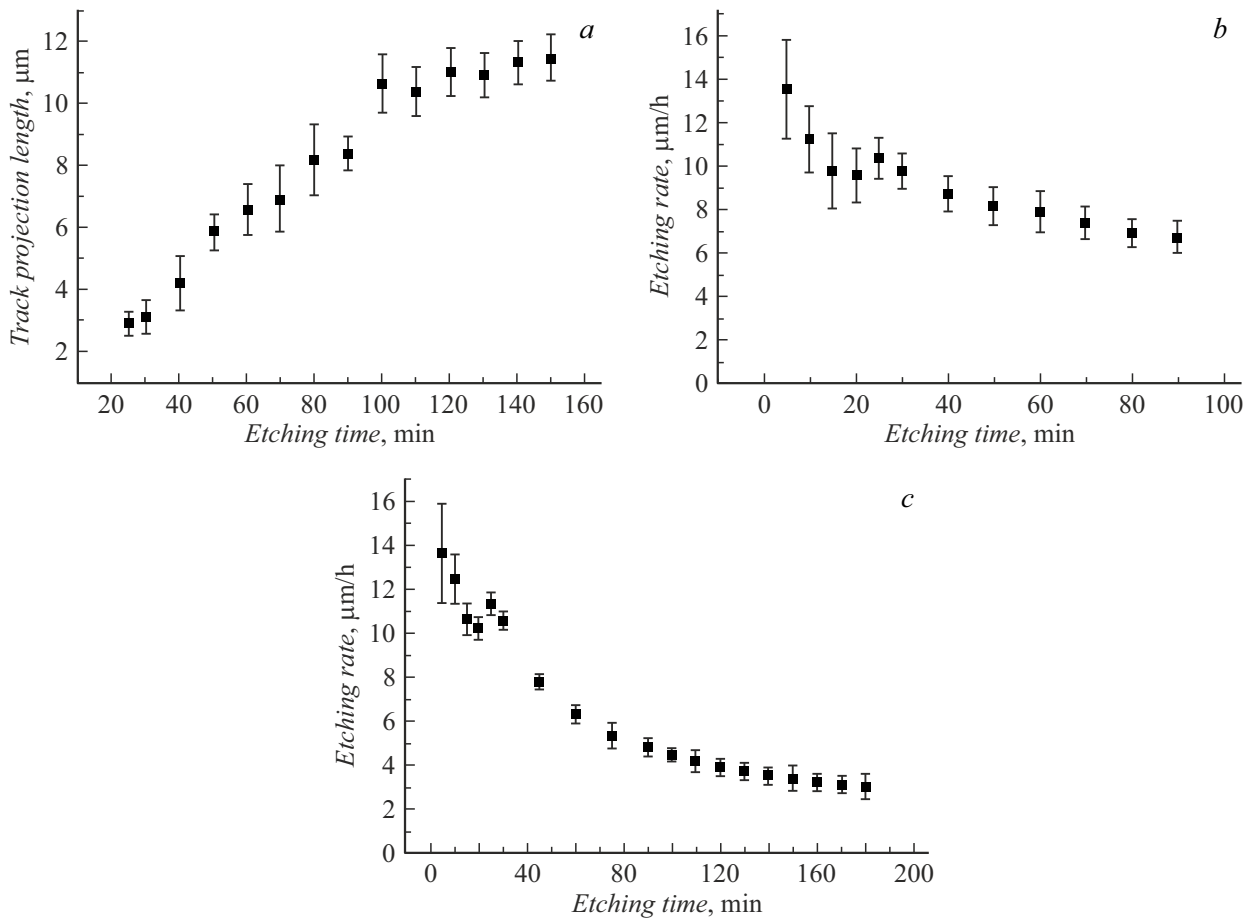


Рис. 10. *a* — зависимость длины проекции трека от времени травления для образца стекла КУ-2, подвергнутого отжигу при температуре 500°C; *b* — скорость травления неотожженного стекла КУ-2, образец № 1; *c* — скорость травления стекла КУ-2, отожденного при 500°C, образец № 2.

Заключение

В работе приводятся результаты исследований стекол с различным химическим составом для использования в качестве детекторов тяжелых ионов при высоких температурах. Согласно полученным результатам, протестированные стекла можно разделить на несколько категорий.

— Стекла, в которых видимые треки не были обнаружены на оптическом микроскопе ни при каких условиях обработки, как с нагреванием так и без него (алюмокальциевое АКС5 и силикатное С48-3).

— Фосфатные стекла, в которых в результате обработки при комнатной температуре треки были зарегистрированы, но при отжиге образцов после облучения либо не наблюдались (стекло SELG), либо существенно меняли геометрические параметры (стекло КНФС-3). При облучении нагретых образцов КНФС-3 характеристики треков менялись слабо.

— Кварцевое стекло КУ-2, в котором треки наблюдались при всех условиях обработки. При отжиге после облучения треки в кварцевом стекле сохранялись, но

меняли свои геометрические характеристики (требует дальнейшего исследования). На следующем этапе тестирования кварцевого стекла предполагается исследование образцов КУ-2, облученных в нагретом состоянии.

Таким образом, на данном этапе исследований фосфатное стекло КНФС-3 и кварцевое стекло КУ-2 представляются применимыми для использования в качестве материала для детекторов тяжелых ионов на Фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ, но требуют дальнейшего тестирования. Для стекла SELG необходимо провести дополнительные исследования по анализу температурного воздействия в различных режимах.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом по программе „Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами“ (проект № 23-12-00054).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.В. Волков. *Ядерные реакции глубокоэластичных передач* (Энергоиздат, М., 1982)
- [2] Yu.Ts. Oganessian, A. Sobczewski, G.M. Ter-Akopian. *Phys. Scr.*, **92**, 023003 (2017). DOI: 10.1088/1402-4896/aa53c1
- [3] Б.С. Ишханов, Т.Ю. Третьякова. *Вестник Московского университета, серия 3: Физика, астрономия*, **3**, 3 (2017).
- [4] Yu.Ts. Oganessian, U.K. Utyonkov. *Rep. Prog. Phys.*, **78**, 036301 (2015). DOI: 10.1088/0034-4885/78/3/036301
- [5] Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, D. Ibadullayev, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, M.G. Itkis, A.V. Karpov, N.D. Kovrizhnykh, D.A. Kuznetsov, O.V. Petrushkin, A.V. Podshibiakin, A.N. Polyakov, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, L. Schlattauer, V.D. Shubin, M.V. Shumeiko, D.I. Solovyev, Ys.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.Yu. Bodrov, A.V. Sabelnikov, A. Lindner, K.P. Rykaczewski, T.T. King, J.B. Roberto, N.T. Brewer, R.K. Grzywacz, Z.G. Gan, Z.Y. Zhang, M.H. Huang, H.B. Yang. *Phys. Rev. C*, **106** (2), 026412 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevC.106.026412
- [6] S. Dmitriev, M. Itki, Y. Oganessian. *EPJ Web Conf.*, **131**, 08001 (2016). DOI: 10.1051/epjconf/201613108001
- [7] V. Zagrebaev, A. Karpov, W. Greiner. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **420**, 012001 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/420/1/012001
- [8] R.C. Barber, P.J. Karol, H. Nakahara, E. Vardaci, E.W. Vogt. *Pure Appl. Chem.*, **83** (7), 1485 (2011). DOI: 10.1351/PAC-REP-10-05-01
- [9] Т.С. Зварова, И. Звара. *Разделение трансураниевых элементов при помощи газовой хроматографии хлоридов* (Р6-4911, Объедин. ин-т ядерных исследований, Дубна, 1970)
- [10] Б.Л. Жуйков. *Методы разделения летучих элементов и оксидов в поиске сверхтяжелых элементов и при получении радиоизотопов* (Автореф. канд. дисс., МГУ, М., 1982)
- [11] Р.Л. Флейшер, П.Б. Прайс, Р.М. Уокер. *Треки заряженных частиц в твердых телах* (Энергоатомиздат, М., 1981) [R.L. Fleisher, P.B. Price, R.M. Walker. *Nuclear tracks in solids* (Washington University, St. Louis, University of California Press, 1975)]
- [12] С. Дюррани, Р. Балл. *Твердотельные ядерные детекторы* (Энергоатомиздат, М., 1990) [S.A. Durrani, R.K. Bull. *Solid state nuclear track detection: Principles, methods and applications* (Pergamon Press, Oxford, NY., 1987)]
- [13] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Г.В. Калинина, Н.С. Коновалова, Т.Н. Квочкина, М. Насурлла, Н.М. Окатьева, А.Н. Пан, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. *КСФ*, **49** (10), 69 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622100062 [N. Burtebayev, K. Argynova, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, G.V. Kalinina, N.S. Konovalova, T.N. Kvochkina, M. Nassurlla, N.M. Okateva, A. Pan, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zaslavitskii. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49** (10), 350 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622100062]
- [14] A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, N. Polukhina, N. Starkov, T. Shchedrina. *Measurement*, **187**, 110244 (2022). DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110244
- [15] G. Karlsson, F. Laurell, J. Tellefsen, B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, S. Sverchkov. *Appl. Phys. B*, **75**, 1 (2002). DOI: 10.1007/s00340-002-0950-4
- [16] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Н.С. Коновалова, Т.Н. Квочкина, М. Насурлла, Н.М. Окатьева, А.Н. Пан, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. *ЖЭТФ*, **161** (4), 616 (2022). DOI: 10.31857/S0044451022040162 [N. Burtebayev, K. Argynova, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, N.S. Konovalova, T.N. Kvochkina, M. Nassurlla, N.M. Okateva, A.N. Pan, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zaslavitskii. *J. Exp. Theor. Phys.*, **134**, 528 (2022). DOI: 10.1134/S1063776122040033]
- [17] Л.И. Авакянц, А.Н. Игнатов, Е.Ю. Крехова, В.И. Молев, А.Е. Поздняков, С.Н. Сизов, В.Ф. Суркова. *Опт. журн.*, **80** (4), 3 (2013). [L.I. Avakyants, A.N. Ignatov, E.Yu. Krekhova, V.I. Molev, A.E. Pozdnyakov, S.N. Sizov, V.F. Surkova. *J. Opt. Technol.*, **80** (4), 204 (2013). DOI: 10.1364/JOT.80.000204]
- [18] П.Ю. Апель, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Г.В. Калинина, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. *КСФ*, **51** (5), 3 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600062 [P.Yu. Apel, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, G.V. Kalinina, N.S. Konovalova, N.M. Okateva, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zaslavitskii. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **51** (4), 117 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600062]
- [19] J.F. Ziegler. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **219–220**, 1027 (2004). DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.208