УДК 544.032.72

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА

Н. Буртебаев[1,2], К. Аргынова[1,3], М. М. Чернявский[4], А. А. Гиппиус[4], Г. В. Калинина[4], Н. С. Коновалова[4], М. Насурлла[1,2], Н. М. Окатьева[1,4], А. Н. Пан[1], Н. Г. Полухина[1,4], Ж. Т. Садыков[1,4,5], Т. В. Щедрина[4], Н. И. Старков[4], Е. Н. Старкова[1,4], И. И. Засавицкий[4]

*Представлены результаты, полученные в тестовом эксперименте по выбору режима травления детекторов из фосфатного стекла, облучённых ускоренными тяжёлыми ионами.*

**Ключевые слова:** детекторы из фосфатного стекла, треки тяжёлых ионов, концентрация травящего раствора, интервалы травления.

*Введение.* В настоящее время осуществляется разработка детекторов на основе фосфатного стекла для регистрации синтезированных сверхтяжёлых элементов. Изучение свойств стекла российского производства в условиях ускорительного эксперимента необходимо для установления возможности его применения для идентификации тяжёлых ионов на Фабрике сверхтяжёлых элементов ОИЯИ. Исследования свойств стекла проводятся с точки зрения возможности определения заряда ускоренных тяжёлых ионов. Тестируются режимы облучения, травления и обработки стёкол, а также методы анализа изображений треков ядер [1–4].

Известно, что некоторые диэлектрические материалы, как природного, так и искусственного происхождения, способны регистрировать прохождение высокоэнергичных заряженных частиц, создающих в этих материалах радиационные повреждения. Величина повреждений зависит от свойств материала и ионизирующей способности частиц

[1] Институт ядерной физики, 050032 Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова, 1.

[2] Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040 Казахстан, Алматы, Проспект аль-Фараби, 71.

[3] Университет им. К. И. Сатбаева, Физико-технический институт, 050032 Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова, 11.

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

[5] Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

(см., напр., [5, 6]). Связь параметров произведённых повреждений с физическими свойствами формирующих их частиц позволяет широко использовать детекторы на основе диэлектрических материалов в экспериментальной ядерной физике.

Для визуализации радиационных повреждений, производимых заряженными частицами в диэлектрике, применяется травление химическими реагентами. Одним из важнейших вопросов обработки диэлектрических детекторов является выбор состава и концентрации травящего вещества, а также интервалов травления, позволяющий получить наиболее полную и точную информацию о свойствах ионизирующей частицы.

Избирательное травление позволяет увеличить и, тем самым, визуализировать дефекты структуры вблизи поверхности детектора, вызванные воздействием ионизирующих частиц. В результате с поверхности детектора вглубь образуются характерные фигуры травления, наблюдаемые в микроскоп. В данной работе представлен анализ условий травления образцов фосфатного стекла марки КНФС-3 производства Лыткаринского завода оптического стекла, облучённых ускоренными тяжёлыми ионами, полученными на резонансном циклическом ускорителе ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ, и их влияние на качество полученных треков. Обоснование выбора марки стекла для детекторов дано в [1]: это 100% эффективность регистрации ионов с зарядами $Z > 20$ и с энергиями выше 20 МэВ и наличие в России промышленной линии, обеспечивающей стабильность свойств стекла данной марки (однородность, высокая термостойкость, низкий коэффициент линейного теплового расширения и др.), имеющих принципиальное значение для работы в условиях ускорительного эксперимента. Проведённые тестовые эксперименты подтвердили возможность регистрации и идентификации ускоренных тяжелых ионов в фосфатном стекле марки КНФС-3.

В статье обсуждается вопрос об оптимальной концентрации травящего раствора и интервалах травления образцов фосфатного стекла для получения необходимой информации о развитии треков в процессе травления.

*Процедура травления.* При избирательном травлении химический реагент проникает в латентный трек со скоростью, превышающей скорость проникновения в неповрежденный материал. В результате на месте латентных треков образуются видимые треки, размер и форма которых могут существенно варьироваться. Наблюдаемые в данном эксперименте треки имеют форму конусов, геометрические параметры которых зависят от зарядов ионизирующих частиц.

В зависимости от материала детектора, для получения максимальной контрастности треков используются различные режимы химического травления с подбором реа-

гентов, их концентрации, температуры и продолжительности травления. Необходимо отметить, что при длительном травлении контрастность треков уменьшается, что снижает точность измерений. В данном эксперименте фосфатные стекла, облученные ускоренными тяжёлыми ионами, обрабатывались при комнатной температуре в химической лаборатории Физического института им. П. Н. Лебедева растворами плавиковой (фтороводородной) кислоты HF и гидроксида натрия NaOH. Наилучшие результаты были получены при травлении образцов в плавиковой кислоте [3]. Затем была проведена серия тестовых испытаний с целью выбора оптимальных условий травления облучённых стёкол в HF.

На начальном этапе эксперимента травление образцов осуществлялось в 40% растворе плавиковой кислоты 40HF (по спектрометрическому анализу 45.52%; концентрация по массе 520 г/л) производства ООО "Сигма Тек" ГОСТ 10484-78. Исследовались образцы фосфатного стекла размером 10×5×3 мм$^3$, облученные на пучке ионов ксенона $^{132}Xe^{26+}$ с энергией 160 МэВ под разными углами к поверхности.

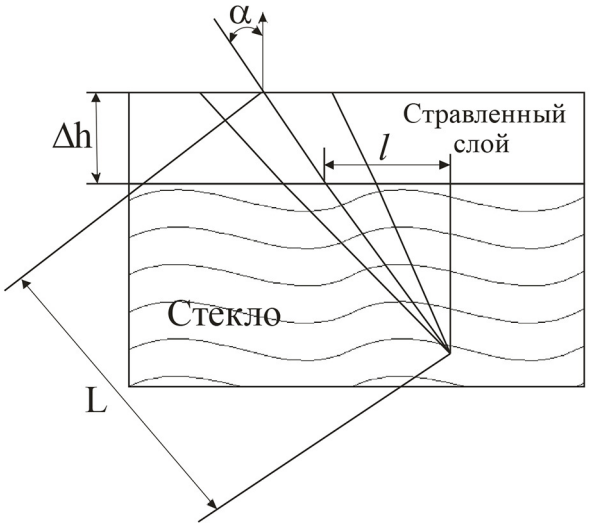



Рис. 1: *Схема травления трека в стекле.*

*Выбор оптимальных условий травления* для определения характеристик трека связан с соотношением скорости травления основного материала детектора $V_м$ и скорости травления в области трека $V_т$. Зная угол $\alpha$ падения пучка, длину проекции l протравленного канала на плоскость детектора и толщину стравленного слоя стекла $\Delta h$, можно оценить полную длину протравленного канала $L$, а с учётом времени травления – скорость травления вдоль трека иона [1]. Алгоритм определения величины стравленного

слоя $\Delta h$ методом взвешивания описан в [4]. На рис. 1 представлена схема травления трека ионизирующей частицы, использованная при оценке величины её пробега и скорости травления трека в стекле. Величину $L$ пробега иона в стекле можно оценить по формуле

$$L = \frac{l}{\sin\alpha} + \frac{\Delta h}{\cos\alpha}.$$

Для выбора оптимальных условий травления облучённых образцов были протестированы три концентрации раствора плавиковой кислоты (3.5%, 20% и 40%) с варьированием интервалов травления. На рис. 2 показано несколько фотоизображений поверхности образцов под микроскопом (увеличение $40^{\times}$) при различных условиях облучения и травления. Некоторые дополнительные количественные параметры травления треков ионов ксенона представлены в табл. 1.

Таблица 1

*Количественные параметры травления треков* $^{132}Xe^{26+}$ *с энергией* 160 *МэВ в стекле, в соответствии с рис.* 2

| Образец | (а) | (б) | (в) | (г) | (д) | (е) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 45° | 60° | 60° | 45° | 60° | 80° |
| Концентрация, % | 3.5 | 20 | 20 | 40 | 40 | 40 |
| $\Delta h$, мкм | 0.7 | 3.3 | 2.6 | 4.0 | 4.5 | 4.9 |
| $l$, мкм | 3.5 | 7.8 | 10 | 12.7 | 14 | не определено |
| Время травления $t$, мин | 80 | 80 | 60 | 15 | 15 | 15 |
| $L$, мкм | 6 | 15.6 | 16.7 | 23 | 25.1 | не определено |
| $V_{\text{м}}$, мкм/час | 0.53 | 2.5 | 2.6 | 16 | 18 | 19.6 |
| $V_{\text{т}}$, мкм/час | 6 | 11.7 | 12.5 | 94 | 100.4 | не определено |

Как видно из представленных данных, пробег зарегистрированных ионов составляет не более нескольких десятков микрон, т. е. точки их остановки находятся в пределах образца, как показано на рис. 1.

Отдельно следует обратить внимание на случай травления треков ионов, входящих в стекло под углом 80° к нормали. Максимальная глубина такого трека в стекле составляет 4 мкм. Поскольку толщина слоя, стравленного за 15 минут в 40HF, составляет немногим более 4 мкм (см. табл. 1), это означает, что трек уже полностью стравился, и под микроскопом можно наблюдать только неглубокую лунку от дальнейшего растравливания стекла.

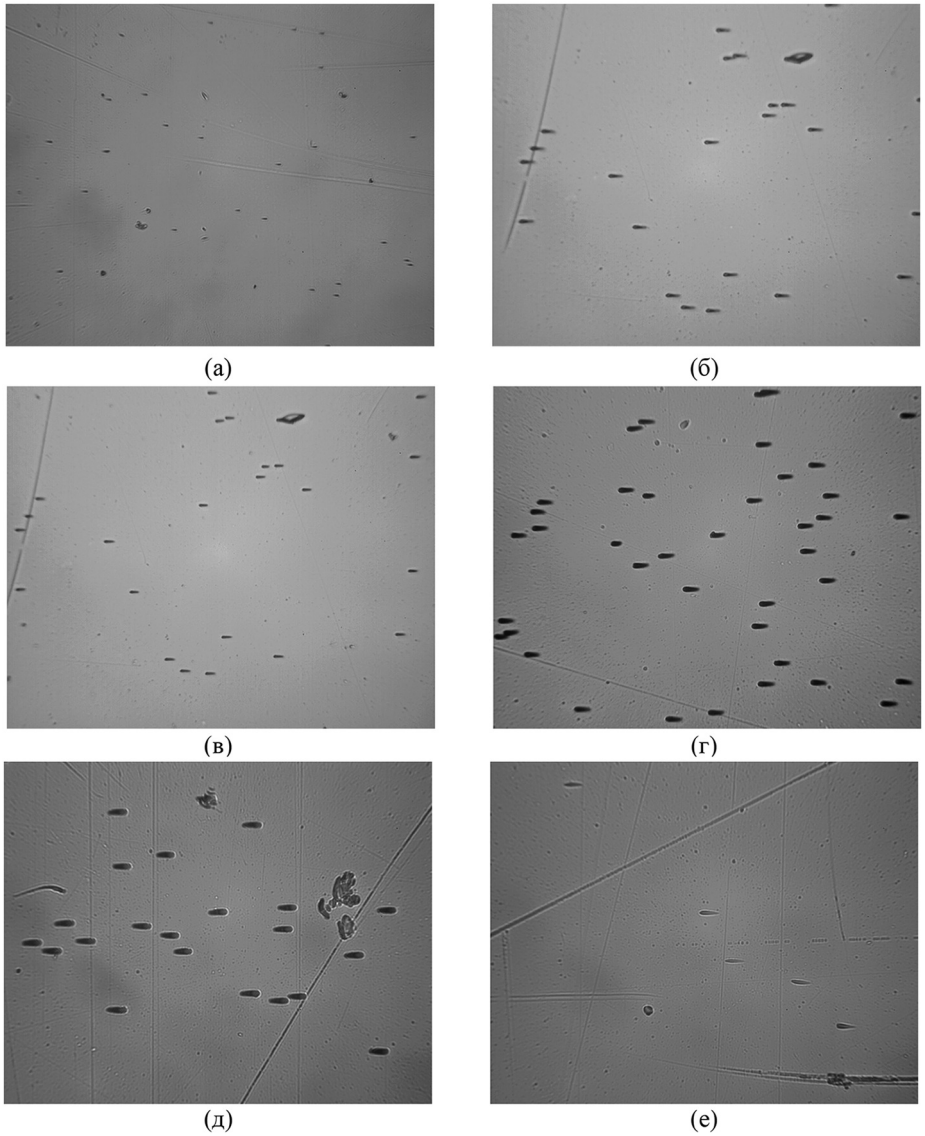



Рис. 2: *Фотографии поверхности образцов (увеличение* $40^{\times}$*), облучённых пучком ионов* $^{132}Xe^{26+}$ *с энергией* 160 *МэВ при разных углах падения и протравленных в растворе HF различной концентрации. Размер поля зрения* $280{\times}220$ *мкм*$^2$*: (а) концентрация* 3.5%*, время травления* 80 *мин, угол падения пучка* 45°*; (б) концентрация* 20%*, время травления* 80 *мин, угол падения пучка* 60° *к нормали; (в) концентрация* 20%*, время травления* 60 *мин, угол падения пучка* 60° *к нормали; (г) концентрация* 40%*, время травления* 15 *мин, угол падения пучка* 45°*; (д) концентрация* 40%*, время травления* 15 *мин, угол падения пучка* 60° *к нормали; (е) концентрация* 40%*, время травления* 15 *мин, угол падения пучка* 80° *к нормали.*

С проблемой оптимального травления напрямую связан вопрос о временных интервалах, через которые измеряются геометрические параметры треков. В нашем случае, травление в 40HF происходило слишком быстро, и момент травления, при котором могла быть достигнута максимальная контрастность трека, был пропущен. Концентрация по массе раствора 40 г/л (примерно 3.5% раствор HF), напротив, оказалась недостаточной для появления видимых треков за приемлемое время обработки. Последовательный подбор концентрации травящего раствора и интервалов травления показал, что травление в растворе с концентрацией по массе 200 г/л (примерно 20% раствор HF) позволяет наблюдать развитие треков в фазе максимальной контрастности, что позволило разработать алгоритм "разделения" треков от различных ионов. Методика определения заряда основана на фиксации точки остановки иона в материале детектора и оценке величины его пробега [4].

Необходимо отметить, что травление образцов, облучённых ионами с разными зарядами и углами падения к поверхности детектора, требует индивидуального режима обработки. Так, при облучении ионами с меньшими зарядами или падающими под малым углом к поверхности и уходящими в стекло на небольшую глубину, травление образцов и поэтапное измерение характеристик протравленных треков должно осуществляться с меньшими интервалами (порядка нескольких минут). Для каждого измеренного трека строится зависимость, показывающая изменение размеров лунок (диаметров или осей эллипса) от времени травления, и определяется скорость этих изменений. На основе этих данных может быть получена оценка заряда иона (см. [4]).

*Заключение.* На основе проведенных тестовых исследований была определена оптимальная концентрация травителя (плавиковой кислоты) и интервалы травления для получения наилучшей контрастности треков ионов $^{132}Xe^{26+}$ с энергией 160 МэВ, при которых возможна их идентификация.

Работа выполнена при поддержке программы #BR10965191 (Комплексные исследования в области ядерной и радиационной физики, физики высоких энергий и космологии для разработки конкурентоспособных технологий) Министерства образования и науки Республики Казахстан.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М. М. Чернявский и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(10), 69 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622100062.

[2] Л. А. Гончарова, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Е. Н.Старкова, Ядерная физика и инжиниринг **11**(1), 12 (2020). DOI: https://doi.org/10.1134/S1063778820090112.
[3] K. Argynova, N. Burtebayev, M. M. Chernyavsky, et al., Phys. At. Nucl. **84**(6), 866 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821060065.
[4] K. Argynova, N. Burtebayev, M. M. Chernyavsky, et al., Universe **8**(9), 474 (2022). DOI: https://doi.org/10.3390/universe8090474.
[5] А. Б. Александров, В. А. Алексеев, А. В. Багуля и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(12), 23 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619120042.
[6] Тан Найнг Со, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(12), 42 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621120083.

Поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.
После доработки 5 марта 2023 г.
Принята к публикации 6 марта 2023 г.