

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ XE
С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ (ЛЕЙКОСАПФИРОМ)
INTERACTION OF HIGH-ENERGY XE IONS WITH CRYSTALLINE ALUMINUM
OXIDE (LEUCOSAPPHYRE)**

М.Н. Ларичев¹, Г.Е. Беляев^{1,2}, Д. Сидельников^{1,3}, О.В. Белов⁴

M.N. Larichev¹, G.E. Belyaev^{1,2}, D. Sidelnikov^{1,3}, O.V. Belov⁴

¹*ФИЦ Химическая Физика им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия;*

mlarichev@chph.ras.ru

²*ОИВТ РАН, Москва, Россия; ³МФТИ, Москва, Россия;*

⁴*ОИЯИ, Дубна, Россия¹*

The putting of the NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility) megaproject at JINR (Dubna) will not only allow studying the properties of dense baryonic matter, but also opens a new stage in the development of radiation biology, chemistry and radiation materials science. The problem of a comprehensive study of radiation-induced changes in various characteristics of substances, compounds and materials under the influence of ultra-high energy IR (from 1 to 10 GeV/nucleon) is becoming relevant. The ARIADNA infrastructure [1] created within the framework of NICA provides a unique opportunity to study the interaction of high-energy radiation generated by the complex with various forms of matter. The aim of this work is to study the interaction of heavy high-energy ions with compounds that have the ability to incongruent evaporation when heated using crystalline aluminum oxide (sapphire) as an example. These compounds are widely represented in the composition of extraterrestrial rocks, functional and structural materials of space stations and ships. They are exposed to radiation from galactic cosmic rays (GCR) They are exposed to the radiation effects of galactic cosmic rays (GCR), which can be experimentally modeled using NICA radiation.

Запуск в ОИЯИ (г. Дубна) мегапроекта NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility) не только позволит проводить изучение свойств плотной барионной материи, но и открывает новый этап в развитии радиационной биологии, химии и радиационного материаловедения. Становится актуальной проблема комплексного изучения

радиационно-индуцированных изменений различных характеристик веществ, соединений и материалов в условиях воздействия ИИ сверхвысоких энергий (от 1 до 10 ГэВ/нуклон). Инфраструктура ARIADNA, созданная в рамках NICA [1], представляет уникальную возможность для исследования взаимодействия генерируемого комплексом высокоэнергетического излучения с различными формами материи. Целью настоящей работы является изучение на примере кристаллического оксида алюминия (сапфира) взаимодействия тяжелых высокоэнергетических ионов с соединениями, обладающими способностью к инконгруэнтному испарению при их нагревании. Эти соединения широко представлены в составе внеземных пород, функциональных и конструкционных материалов космических станций и кораблей. Они подвергаются радиационному воздействию галактического космического излучения (ГКЛ), которое может быть экспериментально смоделировано с использованием излучения NICA.

Характерной особенностью проявляющего способность к инконгруэнтному испарению оксида алюминия и его кристаллической формы – сапфира является образование при нагревании субоксидов алюминия, молекулы которых являются относительно легко летучими радикалами, переходящими в газовую фазу. В них атом алюминия имеет валентность, отличающуюся от трех. По всем канонам субоксиды должны обладать высокой химической активностью: легко вступать в реакцию с молекулами окружающей среды, рекомбинировать в столкновениях друг с другом и с поверхностью. Однако, эти свойства были подвергнуты ревизии, когда мы в экспериментах по изучению лазерной абляции сапфира среди частиц конденсированной фазы, вылетающих из лазерного кратера, впервые обнаружили летающие пузыри с замкнутой оболочкой из расплава оксида алюминия, раздуваемые газообразными субоксидами алюминия [2, 3]. Измеренная спектральными методами температура поверхности летящих частиц могла достигать 2500-3000 К, а газофазных субоксидов 5000К. Документально зарегистрированное время жизни (полета) пузырей, превышало десятки миллисекунд. Диаметр пузырей лежал в диапазоне от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Это означает, что давление наполняющих их газообразных компонент могло достигать десятков атмосфер.

На рис. 1 приведены фотографии пузырей, сделанные методами высоко скоростной фотографии и растровой электронной микроскопии.

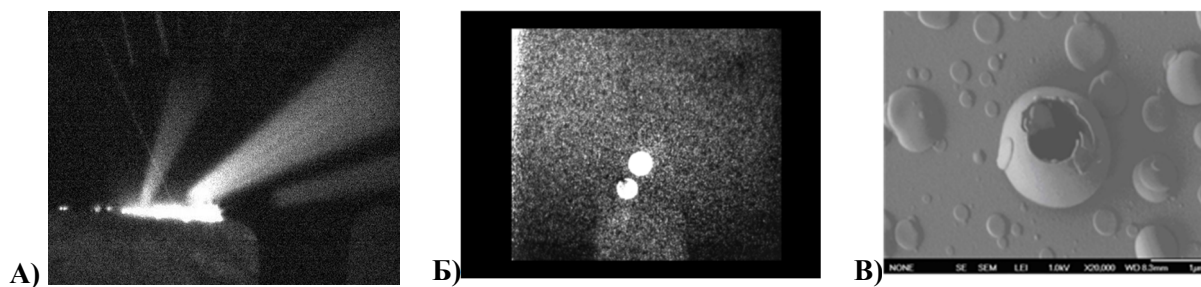


Рис. 1. Микрофотографии: А), Б) миллиметровые летящие пузыри (высокоскоростная фотография); В) разрушенный микронный пузырь на поверхности образца-свидетеля

Полученные ранее и приведенные выше результаты дают основание предполагать, что летучие субоксиды могут образовываться в объеме латентных треков, возникающих при облучении инконгруэнтных соединений (в частности, сапфира) высокоэнергетическими ионами Хе, поскольку выделяющейся при торможении ионов удельной энергии может быть достаточно, чтобы не только расплавить, но и испарить взаимодействующие с ионом области кристалла.

В проводящихся в настоящее время экспериментах для облучения ориентированных кристаллов лейкосапфира используется ионы Хе с энергией 4.8 ГэВ/нуклон. Оценки показывают, что диаметр латентного трека, в объеме которого может достигаться температура кипения оксида алюминия, составляет до 10 нм. Это означает, что в данном объеме будет образовываться перегретый расплав оксида алюминия, который будет частично вытекать через входное и выходное отверстия треков в окружающую среду в виде потока летучих субоксидов и релаксирующего перегретого расплава Al_2O_3 , а также частично остывать и релаксировать в объеме латентного трека, формируя новую пространственную структуру со свойственными ей дефектами. Отметим, что ввиду высокой, приближающейся к скорости света скорости облучающих ионов источник тепловыделения при образовании латентного трека может рассматриваться как мгновенный, что значительно упрощает рассматриваемую задачу. При обозначенных энергиях ионов интерес представляют оба канала релаксации радиационно перегретого оксида алюминия.

На рис. 2 представлены микрофотографии дефектов, наблюдаемых на поверхности сапфира после ее облучения высокоэнергетическими ионами Хе с энергией 3,8 ГэВ/нуклон.

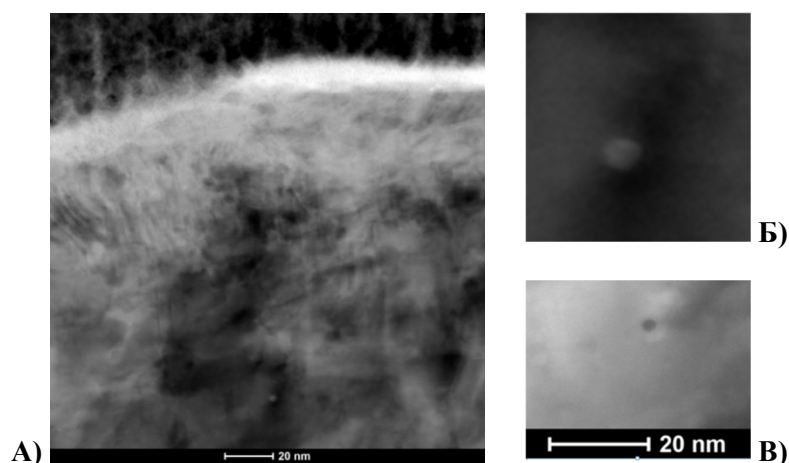


Рис. 2. А) ПЭМ фотографии (Bright Fild and Haadf STEM images): А) облученной поверхности сапфира; Б) увеличенное изображение выхода латентного трека на поверхности А; В) тот же дефект (Haadf STEM режим)

Анализ данных ПЭМ позволяет сделать вывод, что образующиеся в результате облучения латентные треки в сапфире являются полыми, что явно может свидетельствовать об уносе вещества мишени в окружающую образец среду. Отметим, что полученные данные коррелируют с результатами, представленными в работе [4], в которой исследовалось облучение сапфира ускоренными ионами фуллерена.

В ходе дальнейшего выполнения работы предполагается, что на основе радиационных превращений, происходящих под воздействием высокоэнергетических ионизирующих излучений в соединениях, являющихся составными компонентами внеземных пород и минералов, будут:

- сделаны выводы о путях превращения форм внеземной материи (породы) под действием космического излучения;
- проверена гипотеза об образовании в ходе радиационных превращений летучих субоксидов, для соединений, характеризующихся способностью к инконгруэнтному испарению;
- сделаны выводы о возможности практического применения подобных превращений, в том числе в целях освоения окружающего Землю космического пространства,
- получена информация, прогнозирующая поведение микроэлектроники и элементов техники, содержащих исследуемые вещества и соединения, в условиях радиационного воздействия и воздействия космического излучения.

[1] <https://nica.jinr.ru/ru>

- [2] Mikhail N. Larichev, Grigori E. Belyaev, Ilya G. Stepanov, et al., Application of two-color pyrometer for studying of flying luminous particles: Products of alumina laser ablation //Review of Scientific Instruments. – 2019. – Т. 90. – №. 4.
- [3] Ларичев М.Н., А.М. Величко, Г.Е. Беляев, et al., Изучение конденсированной фазы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения высокой мощности с кристаллической окисью алюминия, ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2016, том 80, № 4, с. 445–449
- [4] S.M.M. Ramos, N. Bonardi, B. Canut, et al., Damage creation in-Al₂O₃ by MeV fullerene impacts, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 143 (1998) 319±332