

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ОЛИВИНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗАРЯДОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЯДЕР

Тан Найнг Со¹, Н. Г. Полухина^{1,2}, Н. И. Старков¹

В статье представлен алгоритм определения толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов галактических ядер из метеоритов. Приводятся результаты расчётов, связанные с точками пересечения проекций траекторий ядер на поверхности кристалла на разных стадиях. Показано, что механизм работает для контроля операций среза при поиске следов галактических ядер в оливинах из метеоритов с хорошей точностью.

Ключевые слова: ОЛИМПИЯ, сверхтяжёлые ядра, метеорит.

В лаборатории элементарных частиц ФИАН в рамках проекта ОЛИМПИЯ проводятся исследования треков сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливина из метеоритов [1]. Отдельные фрагменты кристаллов извлекаются из метеорита и упаковываются в эпоксидную таблетку. В одной такой таблетке размером $2 \times 1 \times 0.5$ см³ располагается от нескольких до 20 кристаллов. На рис. 1 приведена фотография одной из таких таблеток. Процедура обработки включает несколько этапов, на каждом из которых производится травление, поиск и обработка треков под микроскопом с последующим срезом слоя 50–100 мкм оливина. Затем процедура повторяется. Задачей исследования является построение зарядового распределения галактических сверхтяжёлых элементов ($Z > 50$) [1].

В процессе обработки появляется необходимость уточнения толщины срезанного слоя. Её величина участвует в алгоритме вычисления длины трека и в итоге влияет на оценку заряда ядра [2]. Полная толщина срезанного слоя складывается из двух частей. Первый срез связан с необходимостью убрать сетку на поверхности протравленного кристалла, состоящую из многочисленных коротких треков ядер группы железа.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: dr.thannaingsoe.lpiras@gmail.com.

² НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

Длина этих треков 10–15 мкм, а плотность порядка $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-2}$. На рис. 2 приведен пример изображений такой сетки на микроскопе. Поскольку эти треки затрудняют распознавание и анализ треков тяжёлых ядер, производится прецизионная шлифовка поверхности кристалла на глубину 15–20 мкм. В результате этой процедуры сетка ядер группы железа убирается.

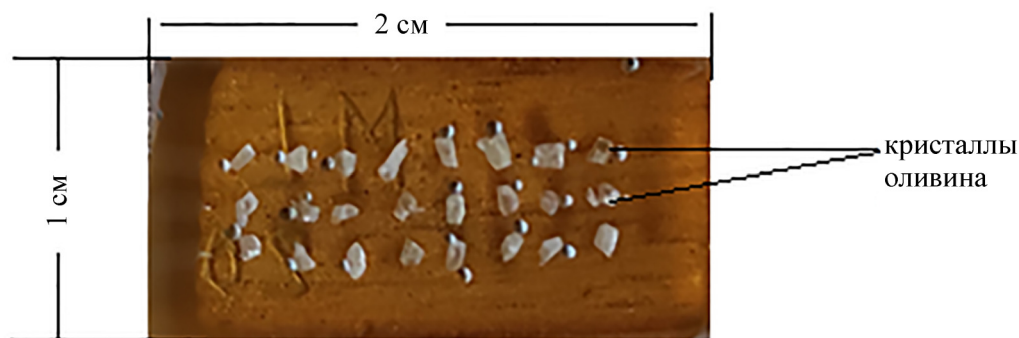


Рис. 1: Фотография эпоксидной таблетки с кристаллами оливина из метеоритов, используемой при исследовании галактических сверхтяжёлых ядер.

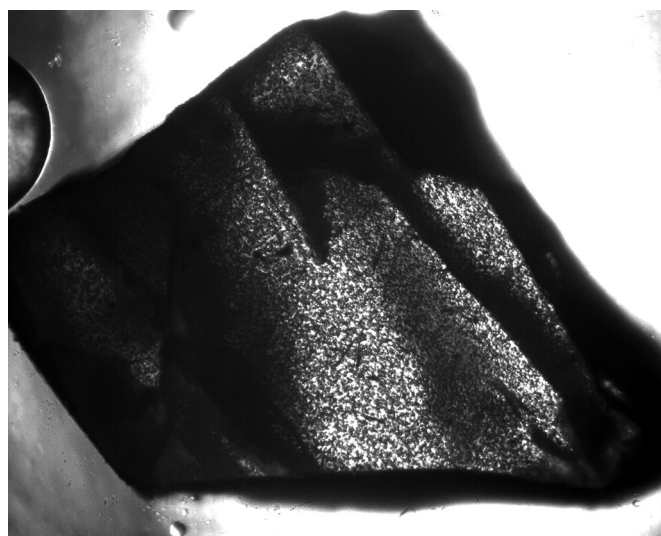


Рис. 2: Изображение сетки из коротких треков ядер группы железа. Размер изображения $1360 \times 1090 \text{ мкм}^2$.

Второй срез – основной срез оливина после травления и обработки на микроскопе при подготовке очередной стадии. Величина этого среза составляет 50–100 мкм в зависимости от результатов предыдущей стадии.

При поэтапной обработке треков тяжелых ядер часть треков, проходящих под достаточно большим углом к поверхности кристалла и имеющих достаточную энергию, обнаруживаются и на следующей стадии после среза и шлифовки. В этом случае определение полной длины трека и заряда соответствующего ядра требует точного знания толщины среза. Эта величина контролируется при непосредственном проведении операций среза и шлифовки, но для проверки их точности необходим дополнительный контроль, поскольку от этого зависит точность определения заряда ядра. Для осуществления такого контроля был разработан специальный алгоритм, суть которого заключается в следующем.

Изучаемые ядра имеют значительную массу и энергию, поэтому их траектории внутри оливина представляют собой прямую линию и на изображении микроскопа их протравленные каналы видны как небольшие отрезки разной длины и толщины, лежащие на этой прямой, – проекции протравленного канала на поверхность кристалла. На рис. 3 представлены изображения на микроскопе одного и того же кристалла из таблетки на рис. 1 после первой (а) и второй (б) стадий. В этом кристалле были обнаружены три трека, которые появляются на обеих стадиях (обозначены цифрами 1, 2 и 3). Аппаратура микроскопа позволяет с большой точностью измерить координаты X , Y и Z начала и конца протравленного канала в системе координат микроскопа.

Перед началом измерений на изображении кристаллов производится задание начала системы координат микроскопа. Поскольку довольно толстый слой оливина срезается, на кристаллах, как правило, отсутствуют какие-либо метки (пятна, царапины и т. п.), способные связать системы координат микроскопа и кристалла на разных стадиях.

При переходе к следующей стадии обработки часть треков ядер, чьи глубины проникновения в кристалл были больше толщины среза, появляются на следующей стадии. Новые следы расположены на тех же прямых, но их проекции сдвинуты по сравнению с проекциями на предыдущей стадии. Величина смещения связана с толщиной среза и углом к поверхности кристалла, под которым проходит трек. Этот угол может быть вычислен по координатам начала и конца трека, однако величина смещения должна быть вычислена путём сравнения изображений следов трека, полученных на двух стадиях. К сожалению, как уже говорилось, у этих двух изображений нет единой системы координат. Отсутствует и возможность совместить их, используя характерные особенности на поверхности (пятна, царапины и т. п.), по которым можно было бы связать изображения, т. к. они исчезают после среза. Однако поскольку протравленные каналы имеют относительно большую длину по сравнению с шириной, их ось, т. е. направление

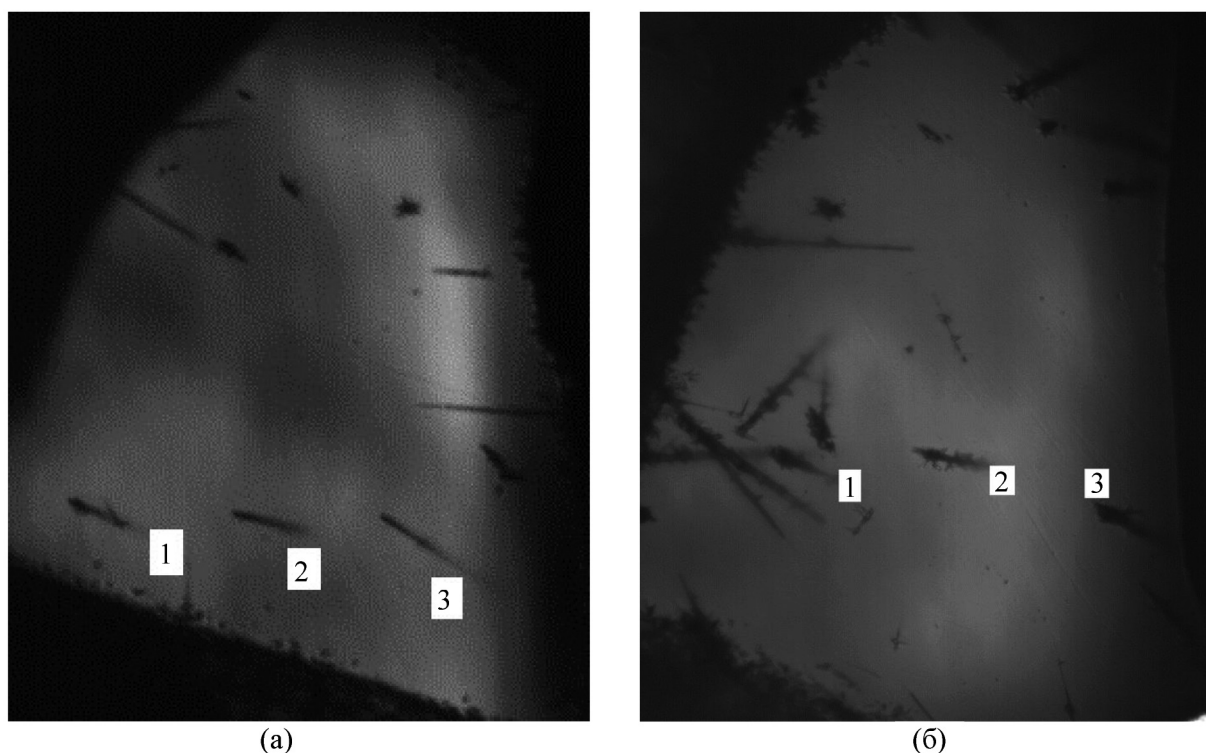


Рис. 3: Изображения одного и того же кристалла после первой (а) и второй (б) стадий травления. Цифрами обозначены треки, имеющие продолжение на второй стадии.

трека, может быть хорошо определена. Траектория частицы одна и та же на первой и второй стадиях. Поэтому можно совместить проекции направлений треков, однако абсолютная привязка проекций каналов друг к другу вдоль трека даже в этом случае не может быть произведена, поскольку нет совмещения системы координат кристалла на его изображениях на разных стадиях. Требуются какие-то другие элементы, которые могли бы привести к такому совмещению.

В качестве таких элементов можно использовать неподвижные точки на поверхности кристалла, которые в системе координат кристалла не меняют своих координат X и Y даже после среза слоёв в 50 и более мкм. Такими неподвижными точками, например, являются точки пересечения проекций траекторий ядер на поверхности кристалла, поскольку эти поверхности на разных стадиях параллельны. Таким образом, найдя точку пересечения двух траекторий, появляющихся на разных стадиях, можно получить вектор смещения между координатными системами (X, Y) кристалла на разных стадиях. В этом случае сравнение координат (X, Y) точек входа ядра в кристалл на разных стадиях даёт точную величину смещения трека. Поскольку величина угла, под которым ядро

входит в кристалл, известна из геометрических параметров трека, можно рассчитать толщину срезанного слоя, приведшую к такому смещению.

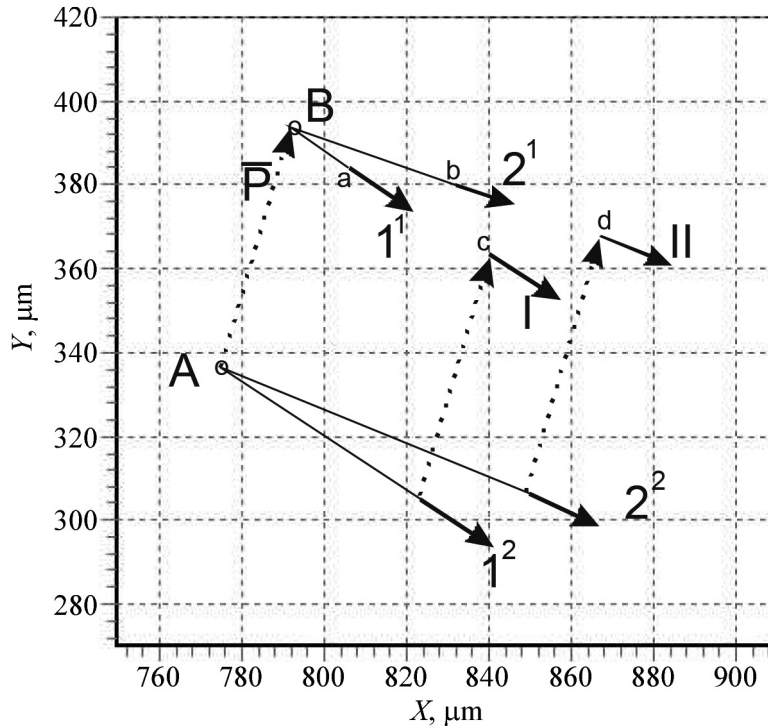


Рис. 4: Схематичное изображение положения треков 1 и 2, приведённых на рис. 3, в координатной системе микроскопа.

Для демонстрации возможностей указанной процедуры использовались треки 1 и 2, приведенные на рис. 3. На рис. 4 в системе координат микроскопа стрелками схематично изображены положения этих двух треков, которые появляются на первой (вектора 1^1 и 2^1) и второй (вектора 1^2 и 2^2) стадиях обработки, а также продолжения траекторий каждого из треков до их пересечения. Длины стрелок соответствуют длинам измеренных частей трека. Точками A и B обозначены точки пересечения траекторий. Пунктирный вектор \vec{P} , соединяющий эти точки, показывает вектор смещения координатных систем кристалла на первой и второй стадиях в координатной системе микроскопа. Используя этот вектор, можно объединить треки в единой координатной системе кристалла. Так, на рис. 4 вектора 1^1 и 2^1 перемещены в положения I и II, соответственно. Точки входа ядер в кристалл расположены на поверхности кристалла. На рис. 4 им соответствуют начала стрелок, так, что точки a и b лежат на поверхности кристалла на первой стадии, точки c и d – на второй. Рис. 4 – это проекция треков на плоскость XU . Толщина

срезанного слоя равна расстоянию между поверхностями кристалла по оси Z , т. е. в данном случае разности координат Z начала треков на первой и второй стадиях. Эта величина может быть найдена по формулам $Z_{ac} = L_{ac} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$, $Z_{bd} = L_{bd} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$, где L_{ij} – расстояние между точками i и j на рис. 4, Z_{ij} – соответствующие расстояния по Z , α – угол между треком и поверхностью кристалла.

Расчёты, проведённые для треков 1 и 2, дают для величины Z значения $Z_{ac} = 48.6$ мкм $Z_{bd} = 47.3$ мкм при номинальном значении толщины 50 мкм. Если учесть третий трек на этом кристалле, а также треки, имеющие продолжение на других кристаллах этой таблетки, получим оценку толщины среза $Z = 49.6 \pm 0.5$ мкм.

Таким образом, рассмотренный механизм работает с хорошей точностью и успешно используется для контроля операций среза при поиске следов галактических ядер в оливинах из метеоритов.

Кроме задачи уточнения толщины среза рассмотренная процедура даёт возможность предотвращения ошибок при проведении процедуры среза и шлифовки. Так проверка толщины в одной из таблеток показала результат $Z = 16$ мкм, что совершенно не соответствовало ожидаемой величине 55 мкм. Более тщательная проверка показала, что была проведена процедура шлифовки, а этап основного среза был пропущен. Таким образом удалось избежать получения завышенных значений зарядов ядер.

Одной из наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики является поиск в природе трансфермиевых ядер с зарядами $Z > 100$. Очевидно, что в сложной процедуре поиска треков ядер галактических космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов большое значение имеет каждая стадия обработки. Впервые подробно изложенный в данной статье способ контроля толщины срезаемого слоя, использованный авторами в оригинальной методике автоматизированного поиска и обработки треков [3], позволил улучшить точность определения зарядов ядер и накопить уникальную статистику о зарядовом распределении более 21000 ядер галактических космических лучей [4].

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., *Astrophys. J.* **829**(2), 120 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/829/2/120.
- [2] А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **35**(7), 19 (2008).

- [3] В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(11), 44 (2017). DOI: 10.3103/S1068335617110069.
- [4] А. Б. Александров, В. А. Алексеев, А. В. Багуля и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(12), 23 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619120042.

Поступила в редакцию 8 декабря 2020 г.

После доработки 26 марта 2021 г.

Принята к публикации 29 марта 2021 г.