

Я. Е. ГЕГУЗИН, И. В. ВОРОБЬЕВА

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТРЕКИ (*S*-ТРЕКИ) ОТ ВНЕШНЕГО
ИСТОЧНИКА ДЕЛЯЩИХСЯ ЯДЕР НА КРИСТАЛЛАХ
МУСКОВИТА, ФТОРИСТОГО ЛИТИЯ И ГИПСА**

(Представлено академиком И. М. Лифшицем 13 IV 1972)

1. Проблеме взаимодействия осколков делящихся ядер с кристаллами посвящено большое количество исследований, в которых, однако, по преимуществу изучались последствия этого взаимодействия, возникающие в объеме кристалла. Было выяснено, что в объеме некоторых кристаллов возникает протяженная дефектная область — объемный трек, который расположен вдоль пути движущегося осколка. Между тем, как это следует из общих соображений и некоторых экспериментальных исследований (¹⁻³), пересечение осколком поверхности кристалла может приводить к появлению поверхностного дефекта, который далее мы будем именовать поверхностным треком (*S*-треком). Условия возникновения *S*-трека, очевидно, различны в случаях, когда осколок вылетает из кристалла, т. е. рождается в его объеме, или внедряется в кристалл, двигаясь от внешнего источника. Во многих практически важных ситуациях именно второй случай имеет особый интерес. Его исследованию и посвящена наша работа.

2. Выбирая объект исследования, мы испытали следующие кристаллы: KCl, NaCl, KBr, CaCO₃, LiF, топаз [Al₂(SO₄)(F, OH)₂], слюды, гипс. При принятой технике облучения кристаллов и обнаружения *S*-треков они наблюдались лишь на поверхности монокристаллов LiF, слюды-мусковита и гипса.

Опыты заключались в следующем. Поверхность естественного скола изучаемого кристалла облучалась осколками ядер Cf²⁵², нанесенного тонким слоем на гладкую поверхность. Использувавшийся нами источник генерировал поток осколков $\sim 5 \cdot 10^3$ сек⁻¹. При принятом способе облучения внедрение осколка в кристалл не сопровождается мощным потоком нейтронов, который сопутствует осколкам, рождающимся в реакторе и способным исказить формирующийся *S*-трек.

Образовавшиеся *S*-треки наблюдались в электронном микроскопе с помощью техники оттененных реплик. Зная угол напыления золота ($\sim 8^\circ$), можно по геометрии светлых и темных полей однозначно восстановить профиль поверхности в области *S*-трека. Заметим, что наблюдаемые в электронном микроскопе черные точки вокруг области *S*-трека соответствуют крупинкам золота, декорирующим электрически заряженные центры на всей поверхности кристалла.

3. Изменение рельефа поверхности, воспринимаемое как *S*-трек, может быть следствием двух существенно различных механизмов, каждый из которых в чистом виде может проявиться при двух предельных значениях угла φ между направлением импульса осколка и проекцией его траектории на поверхность кристалла, т. е., когда осколок летит почти нормально к поверхности кристалла ($\varphi \simeq 1/2\pi$) и когда осколок летит под малым углом к поверхности ($\varphi \gg 0$).

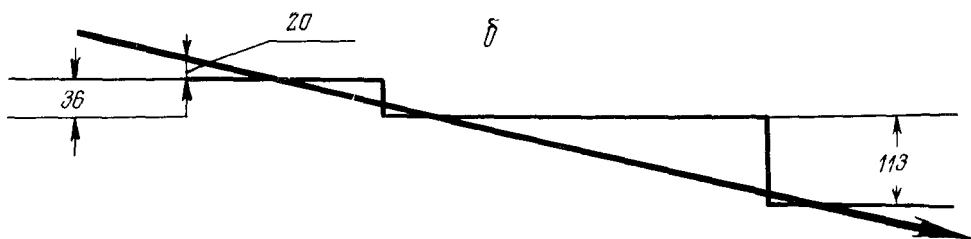
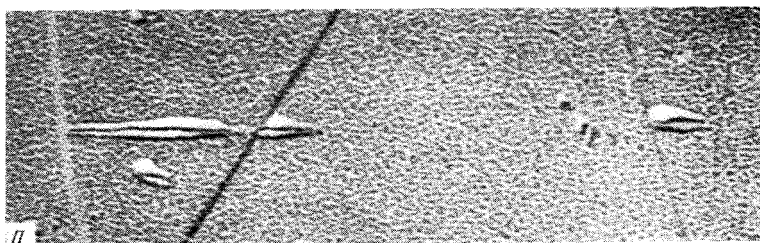


Рис. 2. *а* — *S*-трек в монокристалле гипса, пересекающий ламели на поверхности кристалла, $100\,000\times$; *б* — схема расчета; цифрами указаны размеры в $\text{\AA}$

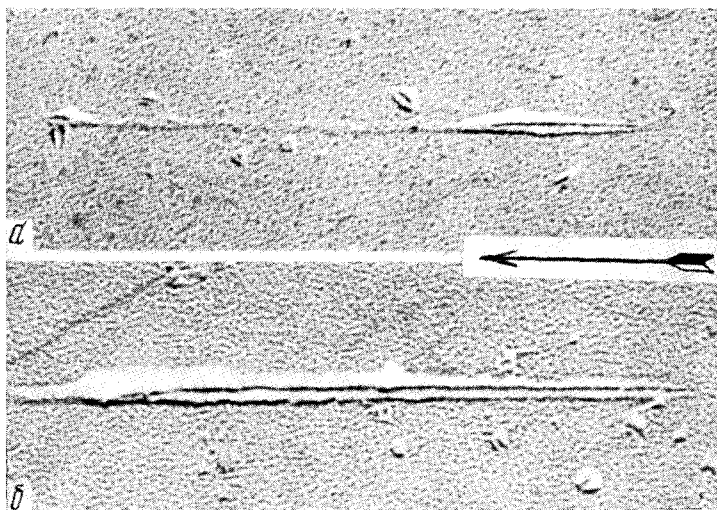


Рис. 3. Типичные поверхностные треки в монокристалле гипса. *а* — *S*-трек с тремя участками; *б* — *S*-трек, созданный осколком, практически вся энергия которого потеряна на первом участке. $100\,000\times$. Стрелка указывает направление движения осколка

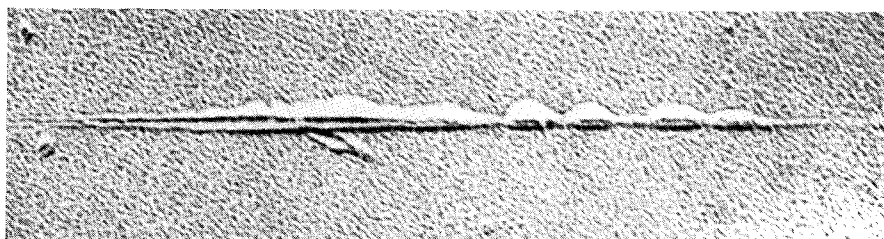


Рис. 4. Прерывистый *S*-трек на поверхности монокристалла гипса, $100\,000\times$.

А) $\varphi \simeq 1/2\pi$. В этом случае формирование трека является следствием локального расплавления кристалла в приповерхностной области, где плавление облегчено в связи с тем, что сопутствующий плавлению скачок объема может происходить свободно.

Свидетельством в пользу реальности механизма плавления является специфическая форма рельефа S -треков, отчетливо наблюдавшаяся на слюде (рис. 1). Такой рельеф формируется вследствие того, что в области S -трека возникло импульсное повышение температуры, сопровож-

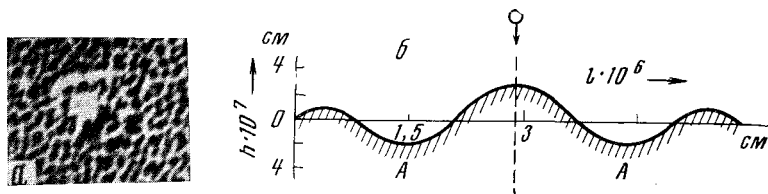


Рис. 1. а — типичная форма поверхностного трека, наблюдаемая в слюде-мусковите, $400\,000\times$; б — профиль поверхностного трека, рассчитанный по геометрии оттенения. Положение точек А на профиле определено из условия сохранения объема вещества

дающееся расплавлением вещества кристалла в некоторой зоне, расположенной симметрично относительно оси трека. Наблюдаемый волнообразный рельеф формируется при кристаллизации возмущенной жидкости. На кристаллах гипса и LiF возникали треки, волнообразный профиль которых наблюдать не удалось. Это, по-видимому, обусловлено тем, что S -треки на поверхности этих кристаллов имеют линейный размер, существенно (в 5—7 раз) меньший, чем на слюде.

Обсуждаемый механизм, как и вообще плавление, является процессом кооперативным. Это означает, что характерная продолжительность формирования трека τ_m должна существенно превосходить период собственных колебаний атомов $\tau_0 \simeq 10^{-13}$ сек.

Б) $\varphi > 0$. Треки этого типа нами наблюдались главным образом в опытах с монокристаллами гипса. Благодаря тому, что многие осколки на своем пути пересекают ламели, высота которых легко определяется по протяженности создаваемой ими тени в пучке декорирующего золота, можно было найти угол φ , определяющий геометрию взаимодействия осколка с поверхностью. В качестве примера расчета угла φ приводим фотографию рис. 2а и схему расчета, соответствующую данной фотографии. Оказалось, что $\varphi = 2 \cdot 10^{-2} \simeq 1^\circ 8'$.

В проведенных опытах наблюдались следующие особенности взаимодействия осколка с поверхностью кристалла. Летящий осколок начинает оставлять след на поверхности кристалла, когда он находится над поверхностью на расстоянии ~ 20 Å. Этой величине можно придать смысл эффективного радиуса многозарядного осколка в механизме его взаимодействия с поверхностью кристалла.

В геометрии S -трека отчетливо можно наблюдать три участка (см. рис. 3а), соответствующие различному характеру взаимодействия осколка с приповерхностным слоем кристалла. На первом участке S -трек имеет вид канавки между двумя берегами в форме почти симметрично расположенных бугров. На этом участке, как правило, канавка вначале расширяется, а затем сужается. Это обстоятельство, по-видимому, является следствием того, что в наиболее широкой части канавки осколок начинает внедряться в кристалл. Обсуждаемый участок формируется вследствие электростатического разбрасывания полем осколка атомов кристалла. При этом, однако, не исключено, что за наиболее широкой частью первого участка собственно масса осколка уже движется под геометрической поверхностью кристалла. В пользу такого предположе-

ния говорит, в частности, существование третьего участка S -трека (см. далее). Второй участок имеет вид линейной выпуклости, ориентированной вдоль направления движения осколка в объеме кристалла. На этом участке выпуклость возникает лишь при условии, если осколок находится на глубине, не превосходящей $30\text{\AA}$. Третий участок, подобно первому, имеет вид канавки с двумя берегами. Его возникновение, естественно, объясняется тем обстоятельством, что, как известно, в конце пути осколка (⁴), вследствие изменения механизма его взаимодействия с решеткой, величина удельных потерь резко возрастает и соответственно возрастает степень дефектности трека в объеме. Отчетливо это наблюдается в опытах по послойному травлению объемных треков в монокристаллах LiF (⁵). Таким образом, третий участок S -трека можно рассматривать как следствие локализованного взрыва, происходящего под поверхностью кристалла. Легко понять, что третий участок может и не наблюдаться, если угол влета осколка превосходил некоторый предельный. Заметим, что от угла влета зависят и соотношения между длинами первых двух участков. При очень малых углах ϕ первый участок S -трека может оказаться практически единственным, на котором будет израсходована вся энергия осколка (рис. 3 б).

Некоторые S -треки на поверхности гипса в начале второго участка обнаруживают прерывистость (рис. 4). Эта прерывистость, по-видимому, есть следствие слоистости структуры гипса. Если предположить, что каждый очередной всплеск на S -треке возникает при пересечении осколком очередного слоя в решетке, то, воспользовавшись данными о соответствующем периоде идентичности, можно оценить угол влета осколка в кристалл, который для осколка, создавшего трек на рис. 4, оказывается $\phi \approx 20^\circ$.

Восстановив по электронномикроскопическому снимку рельеф поверхности в области S -трека, в частности в тех случаях, когда практически вся энергия осколка была потеряна на первом участке, можно оценить количества вещества, которое приняло участие в формировании берегов. Соответствующий расчет, проведенный применительно к рис. 3 б, приводит к тому, что в перераспределении между канавкой и берегами приняло участие $\sim 10^6$ атомов. По порядку такое же количество атомов удаляется из ядра трека в объеме.

Описанные представления о структуре S -треков в случае, когда $\phi \approx 0$ и $\phi \approx 1/2\pi$, подтверждаются опытами по их термической устойчивости (⁶).

В заключение отметим, что, как правило, S -треки наблюдаются лишь на тех кристаллах, в которых наблюдаются объемные треки. Специфика возможных критериев формирования S -трека заключается в наличии теплоотвода от поверхности кристалла в окружающую среду и облегчения процесса плавления на поверхности по сравнению с объемом. Указанные обстоятельства должны быть учтены при строгих формулировках критериев возникновения S -треков.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
13 IV 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Т. Г. Кнорр, J. Appl. Phys., 34, 9, 2767 (1963). ² Т. Г. Кнорр, J. Appl. Phys., 35, 9 (1964). ³ Т. Kikuchi, K. Shiozawa, J. Phys. Soc. Japan, 17, 3, 586 (1962). ⁴ J. Brinkman, J. Appl. Phys., 25, 961 (1954). ⁵ Я. Е. Гегузин, И. В. Воробьева и др., ДАН, 182, № 3 (1968). ⁶ Я. Е. Гегузин, И. В. Воробьева, ДАН, 205, № 2 (1972).