

Я. Е. ГЕГУЗИН, И. В. ВОРОБЬЕВА

ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕКОВ, СОЗДАННЫХ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЯЩИХСЯ ЯДЕР, НА ПОВЕРХНОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

(Представлено академиком И. М. Лифшицем 3 I 1972)

1. Известно (^{1, 2}), что многозарядные ионы — осколки делящихся ядер, пересекая поверхность кристалла, создают на ней микроскопические неоднородности рельефа, которые следует называть поверхностными треками (*s*-треками). Из общих соображений вытекает, что механизм возникновения *s*-треков существенно различен при двух предельных значениях угла φ между направлением скорости осколка и проекцией его траектории на поверхность кристалла, т. е. когда $\varphi \simeq 1/2\pi$ и $\varphi \simeq 0$. В первом случае *s*-треки возникают, в частности, вследствие кристаллизации расплавленного участка приповерхностного слоя, а во втором вследствие перераспределения вещества вдоль траектории летящего осколка.

Нами были выполнены опыты по изучению термической устойчивости *s*-треков с монокристаллами мусковита (слюды), фтористого лития и гипса. Описанию этих опытов и посвящена статья.

2. Термическая устойчивость *s*-треков изучалась в следующих опытах. Поверхность естественных сколов кристаллов облучалась осколками ядер Cf^{252} , нанесенного тонким слоем на гладкую поверхность. После облучения образцы подвергались изотермическому отжигу, который эпизодически прерывался, для того чтобы электронномикроскопически исследовать формы сохранившихся в процессе отжига *s*-треков. Так как применялась техника реплик, после каждого очередного этапа отжига исследовался иной участок поверхности образца и, следовательно, получаемые результаты могли обсуждаться лишь в плане статистическом. Обсудим порознь результаты, относящиеся к трекам первого и второго типов.

А. $\varphi \simeq 1/2\pi$. Типичные последовательности электронномикроскопических снимков, соответствующих различным этапам изотермического отжига, изображены на рис. 1а—е. Из-за неполной монохроматичности пучка осколков и разброса по углам влета осколков в кристалл не все поверхностные треки были идентичны. Поэтому на последующих этапах отжига мы следим за изменением функции распределения треков по характерным размерам для почти изомерных треков, которые образовались механизмом плавления. Кривая типа гауссовской смещалась со временем к началу координат. Значения характерного времени τ , после которого треки исчезают, установленные в наших опытах, приводятся в табл. 1.

Обратим внимание на следующие особенности изменения формы *s*-треков. На поверхности монокристаллов LiF в процессе залечивания уменьшается и высота и диаметр поверхностного трека, о чем свидетельствуют уменьшение основания и длины конической тени за *s*-треком. Изменение геометрии *s*-трека на слюде оказывается более сложным и неточно повторяющимся при различных температурах. Оказывается, что, как правило, центральный «грибок» понижается, а периферийный холм несколько расширяется и становится менее выраженным.

Представляет интерес выяснение вопроса о механизме процесса массы, обуславливающим сглаживание *s*-трека. Для определения важно знание энергии активации соответствующего процесса. Строго говоря, эта величина ясного физического смысла не имеет в связи с тем, что область вокруг трека заведомо неравновесна. Можно, однако, подчинив температурную

зависимость скорости исчезновения трека экспоненциальному закону ($\tau \sim e^{-\theta/(kT)}$), получить оценки величины θ , имеющей смысл эффективной величины энергии активации. Соответствующие значения оказались весьма малыми: для фтористого лития $\theta \simeq (0,16-0,2)$ эв, для мусковита $\theta \simeq 0,2$ эв, для гипса $\theta \simeq 0,34$ эв.

Т а б л и ц а 1

Фтористый литий		Слюда		Гипс	
T, °C	τ , сек.	T, °C	$\tau \cdot 10^{-3}$, сек.	T, °C	$\tau \cdot 10^{-3}$, сек.
45	$1,8 \cdot 10$	160	12	50	28,8
60	$1,3 \cdot 10^4$	230	7,2	70	10,8
80	$9 \cdot 10^3$	290	5,4	85	5,4
100	$4,8 \cdot 10^3$	360	2,1		

Залечивание s-трека, вообще говоря, может определяться тремя различными механизмами переноса массы: потоком испаряющихся атомов в газовую фазу, диффузионным потоком вдоль поверхности кристалла и диффузионным потоком в дефектную область объемного трека. Газовый механизм следует исключить и в связи с малостью экспериментально обнаруженных значений энергий активации, которые значительно меньше соответствующих теплот испарения, и в связи с заведомо малыми значениями упругости пара в области температур, в которой происходит залечивание. Механизм диффузионного расползания поверхностных треков вряд ли определяет их исчезновение. Это утверждение поддерживается следующим наблюдением. Диффузионное расползание поверхностного трека должно было бы сопровождаться расширением основания тени и ее укорочением. Между тем, укорачиваясь, тень сужается. Сделанное замечание во всяком случае справедливо применительно к s-трекам на LiF, гипсе и центральной части трека на слюде. Периферийная часть трека на слюде, частично расширившаяся в процессе отжига, возможно, сглаживается механизмом поверхностной диффузии.

Обсудим возможную роль диффузии вдоль объемного трека. При этом механизме вещество бугорка s-трека должно как бы диффузионно всасываться в дефектную область объемного трека. Такой механизм представляется реальным, так как он согласуется с характером изменения формы s-трека.

Имея в виду элементарную модель, согласно которой полусферический бугорок начального радиуса R_0 диффузионно всасывается в дефектную область трека в меру коэффициента диффузии D_T , можно записать уравнение, описывающее кинетику уменьшения радиуса полусферы.

$$\dot{R} = -\frac{D_T}{kT} \nabla \mu, \quad (1)$$

где $\nabla \mu$ — градиент химического потенциала, обуславливающий перенос массы из области s-трека в дефектную область объемного трека. Применительно к интересующей нас задаче величина $\nabla \mu$ может определяться либо фактом искривленности поверхности, ограничивающей s-трек, либо тем, что в дефектной области объемного трека концентрация вакансий ξ_i существенно превосходит равновесную ξ_0 . В первом случае $\nabla \mu \simeq \alpha \omega / R^2$, где α — поверхностная энергия, ω — атомный объем. Во втором $\nabla \mu \simeq kT(\xi_i - \xi_0) / l$, где l — характерный диффузионный линейный размер $\sim (D_T t)^{1/2}$. Учтя сделанные замечания, легко, решая уравнение (1), получить оценки τ_1 и τ_2 соответствующего характерного времени залечивания s-треков:

$$\tau_1 \simeq \frac{kT}{D_T \alpha \omega} R_0^3, \quad \tau_2 \simeq \frac{R_0^2}{D_T \xi_i}. \quad (2)$$

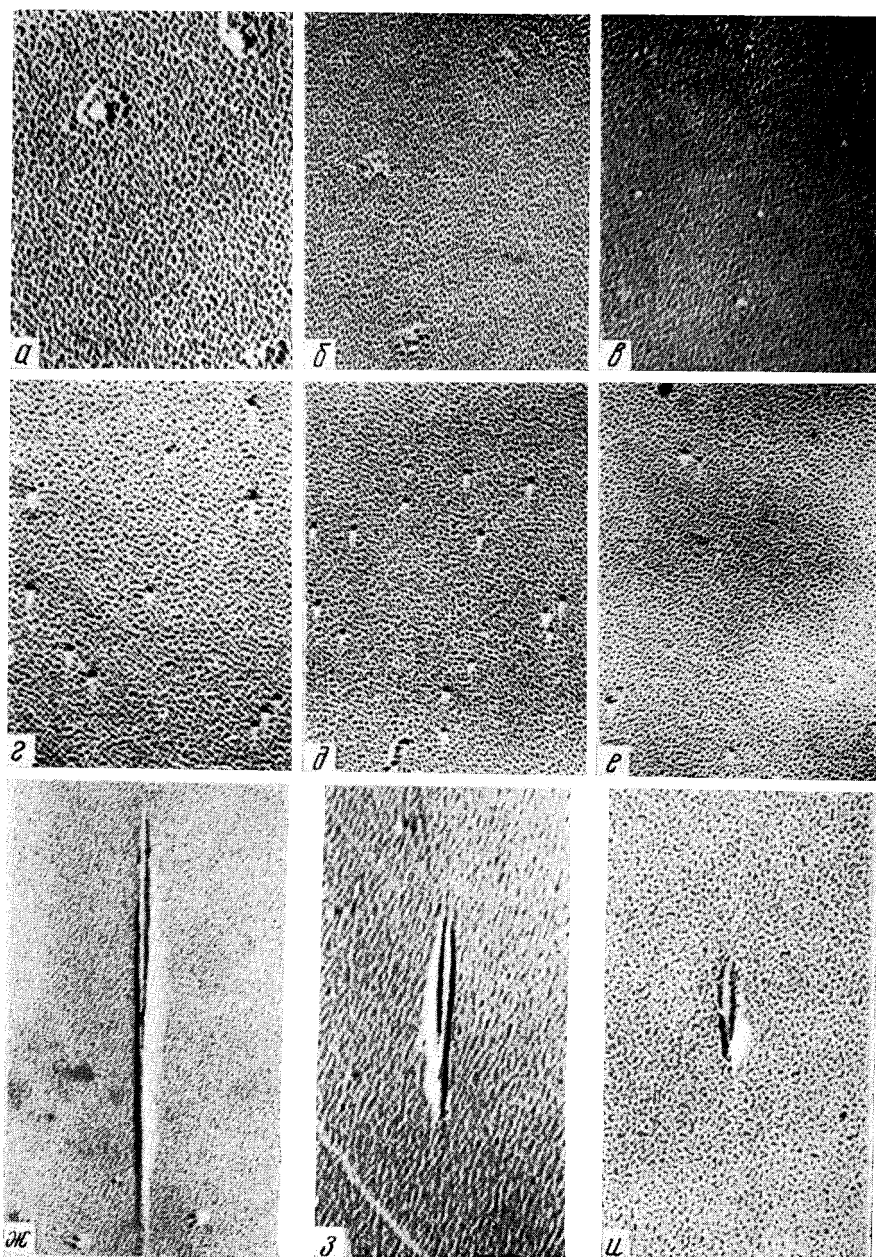


Рис. 1. Поверхностные трещины на различных этапах их залечивания. Слюда, $T = 160^\circ \text{C}$ (а — е), LiF , $T = 80^\circ \text{C}$ (ж — л), $15\,000\times$; гипс, $T = 70^\circ \text{C}$ (ж — л), $10\,000\times$; а, г, ж — исходное состояние; $\tau = 7,2 \cdot 10^3$ сек (б), $10,8 \cdot 10^3$ (в); $5,4 \cdot 10^3$ (д); $8 \cdot 10^3$ (е); $3,6 \cdot 10^3$ (з); $6 \cdot 10^3$ сек (и)

Сравнивая полученные оценки τ , можно убедиться в том, что кинетика заживления s -трека будет определяться тем, что $\xi_i \gg \xi_0$ лишь при условии, что $\xi_i > a\omega / (R_0 kT)$. При разумных значениях соответствующих констант ($a \simeq 5 \cdot 10^2$ эрг/см³, $\omega \simeq 3 \cdot 10^{-23}$ см³, $kT \simeq 5 \cdot 10^{-14}$ эрг, $R_0 \simeq 5 \cdot 10^{-7}$ см) оказывается, что ξ_i должно превосходить 0,6. При такой концентрации вакансий, разумеется, регулярная решетка не существует, однако истинная степень дефектности в области объемного трека может быть огромной, при которой локальная пикнометрическая плотность существенно понижена. Нет оснований априори предпочесть один из обсуждаемых типов $\nabla\mu$. Оценки D_T , выполненные с помощью соотношения, определяющего τ_1 , где все константы известны, приводит к значению $\sim (10^{-16} - 10^{-15})$ см²/сек. Эта величина значительно превосходит коэффициент диффузии, определяющий кинетику заживления объемного трека⁽³⁾, где потоки осуществляются в направлении, перпендикулярном его оси.

Таким образом, в изучаемых нами кристаллах заживление s -треков, по-видимому, происходит главным образом вследствие диффузионного всасывания вещества бугорка в дефектную область объемного трека.

Подчеркнем (на наш взгляд, это принципиально важно), что энергия активации процесса диффузии вдоль трека оказывается меньше энергии активации любого из известных диффузионных процессов, изучавшихся до настоящего времени. Это необходимо учитывать при построении модели трека в объеме и описании кинетики его заживления.

В. $\varphi \simeq 0$. На треках этого типа следует различать две существенно различные структуры, наблюдаемые в начале и в конце трека⁽³⁾: в начале s -трек представляет область, в которой вещество кристалла перераспределено так, что канавка оказывается обрамленной двумя буграми; в конце s -трек представляет бугор, под которым должна находиться разрыхленная область, лишившаяся части тех атомов, которые ушли на формирование бугра. Отличие структур начала и конца s -трека должно обусловить отличие механизмов их заживления: первый участок может сглаживаться механизмом поверхностной диффузии, а второй диффузионно всасываться в находящуюся под ним дефектную область. Как показывают электронномикроскопические снимки, второй механизм оказывается более быстродействующим (рис. 1 ж — з), так как на образцах, подвергнутых отжигу большинство s -треков не имеет второго участка.

Сопоставляя результаты двух серий описанных опытов, можно получить дополнительное подтверждение того, что механизм диффузионного всасывания s -трека в находящуюся под ним дефектную область, является реальным. На электронномикроскопических снимках поверхности гипса с треками и первого и второго типов видно, что начальная часть треков второго типа ($\varphi \simeq 0$) сохраняется при отжигах, полностью уничтоживших s -треки первого типа ($\varphi \simeq 1/2\pi$).

Следует также подчеркнуть, что поверхностные треки оказываются термически менее устойчивыми, чем объемные треки в тех же кристаллах. Так, например, в монокристаллах LiF поверхностные треки полностью исчезают при отжиге $T = 100^\circ \text{C}$, $t = 1,2$ час, в то время как объемные исчезают при отжиге $T = 250^\circ \text{C}$, $t = 1$ час. В этом, по-видимому, состоит одна из причин того, что s -треки не обнаруживаются на многих кристаллах, в которых объемные треки, полученные облучением от внешнего источника, отчетливо видны.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
27 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Т. Е. Knorr, J. Appl. Phys., **34**, 9, 2767 (1963); **35**, 9, 2753 (1964). ² Т. Kikuchi, Appl. Phys., **4**, 386 (1965). ³ Я. Е. Гегузин, И. В. Воробьева, Укр. физ. журн., **14**, 9 (1969).