

УДК 538.95-405:539.12.04

©1994

## НОВЫЙ ТИП ТРЕКОВ ТЯЖЕЛЫХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ОСТРОВКОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

*И.В.Воробьева*

Исследовано формирование треков тяжелых многозарядных ионов в островковых металлических пленках, закрепленных на поверхности диэлектрика тонким слоем углерода. Треки представляют собой вытянутые вдоль траектории иона участки островковой пленки, на которых произошло перемещение островков из центра трека на его края в направлении, перпендикулярном траектории иона. Перемещение островков происходит в пределах внутренней полости, раскрываемой по плоскости островковой пленки над траекторией иона, движущегося в приповерхностном слое диэлектрика. Обсуждаются возможные механизмы образования полости и перемещения островков.

Анализ процессов, происходящих при формировании треков тяжелых многозарядных ионов в диэлектриках, свидетельствует о том, что вдоль траектории тяжелых многозарядных ионов реализуется скачок температуры [1,2]. Однако имеется ограниченное количество исследований, в которых такой скачок температуры был бы зафиксирован экспериментально. Как правило, о температуре в треке судят либо по анализу энергетического спектра распыленного вещества, либо по произошедшим в результате облучения высокотемпературным фазовым превращениям, получая, таким образом, усредненную информацию по большому числу треков [3,4]. Для регистрации скачка температуры в треке отдельного иона исследована структура треков тяжелых многозарядных ионов в островковой металлической пленке, закрепленной на поверхности диэлектрика тонким слоем углерода. Идея эксперимента заключалась в следующем.

Известно, что в островковой пленке, полученной напылением в вакууме на поверхность диэлектрика и состоящей из изолированных островков радиусом  $R \lesssim 10^{-8}$  м, после облучения возникают области, свободные от островков, — треки. Впервые такие треки наблюдались еще в начале 60-х годов, и их формирование связывалось с испарением островков на участке траектории иона, пересекающем островковую пленку [5]. Выполненные в последние годы эксперименты обнаружили ряд принципиально новых особенностей формирования таких треков. Отметим лишь некоторые из них.

1. При малых углах влета ионов ( $\varphi \simeq 1^\circ$ ) формирование трека происходит как при пересечении ионом слоя островков (I участок), так и при движении в подложке под островками (II участок). Протяженность этих участков зависит от угла  $\varphi$  и размера островков [6].

2. Лишь незначительная часть островков удаляется из области трека вследствие испарения, а остальные ( $\approx 70\%$  при  $\varphi \approx 1^\circ$ ) сбрасываются с поверхности как целое [6]. Установлено, что отрыв целых островков происходит в основном на II участке трека, когда ион движется в приповерхностном слое подложки вблизи островковой пленки. Таким образом, часть выделенной ионом энергии преобразуется в кинетическую энергию удаляемых из области трека островков.

Основываясь на этих результатах, мы провели эксперименты, в которых островковая пленка, состоящая из островков неправильной формы, закреплялась на поверхности напылением на нее слоя углерода. Так как в этом случае отрыв островков как целого запрещен, вся энергия, локализованная в островках, будет преобразована в тепло, что позволит судить о температурной ситуации в области трека.

## 1. Эксперимент

Образцы для исследований готовились следующим образом. На свежий скол монокристалла KCl в вакууме  $\approx 5 \cdot 10^{-5}$  торр напылялся металл в таком режиме, чтобы получить островковую пленку со средним размером островков  $\approx 10$  нм. После этого часть образца закрывалась шторкой, а на остальную часть напылялся второй слой углерода толщиной  $h$ . Изменяя  $h$ , можно было получать образцы, у которых островковая пленка располагалась под слоем углерода различной толщины. Таким образом, на одном и том же образце можно было сопоставлять структуру треков в островковых пленках на свободной поверхности и в пленках, закрепленных слоем углерода. Исследованы образцы с тремя видами островковых пленок: Au, Ag, Bi. Величина  $h$  изменялась от 10 до 100 нм. Образцы облучались ионами  $^{132}_{54}\text{Xe}$  с энергией 1 МэВ/нукл. под углом  $\varphi \approx 1.5^\circ$ . После облучения структура сформировавшихся треков исследовалась электронно-микроскопически с помощью реплик. На рис. 1, а представлены фотографии треков, полученных в островковых пленках золота, находящихся под слоем углерода толщиной  $\approx 20$  нм. Отметим основные особенности их структуры: 1) треки представляют собой участки пленки шириной  $\approx 60$  нм,

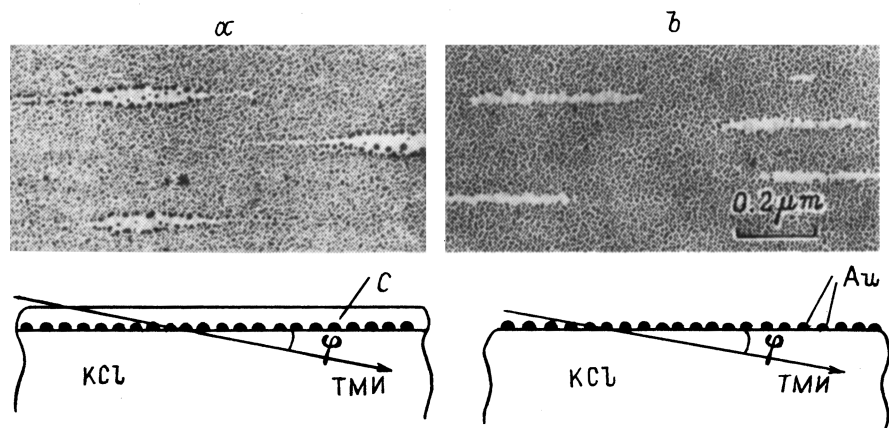
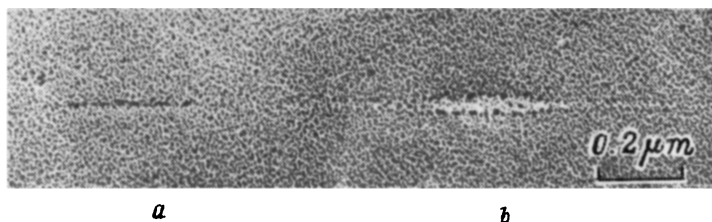


Рис. 1. Треки в островковой пленке золота, находящейся под слоем углерода (а) и на свободной поверхности (б) монокристалла KCl.

Под снимками треков показана схема облучения образцов.



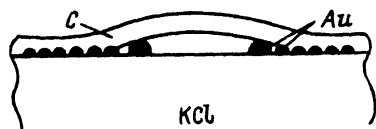
**Рис. 2.** Поверхностный трек в углеродной пленке (а) и холм над треком в островковой пленке под слоем углерода (b) после оттенения поверхности. Оттенение направлено сверху вниз.

на которых произошло перемещение островков от центра трека к его краям. Длина треков зависит от угла  $\varphi$ ; 2) островки золота, образующие края трека, имеют сферическую форму; 3) островки на краях трека имеют больший размер, чем исходные, т.е. процесс перемещения островков сопровождался их коалесценцией. На рис. 1, b представлены треки, полученные при тех же условиях без углеродного покрытия. Они представляют собой дорожки, свободные от островков, и их ширина меньше, чем у треков, сформировавшихся в пленке под слоем углерода толщиной  $\approx 20$  нм.

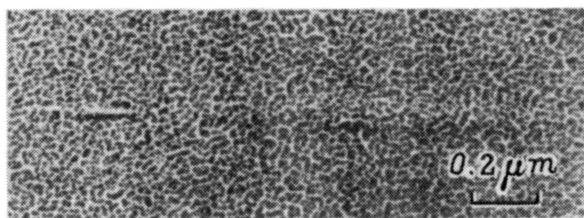
Исследуя структуру треков при различных  $h$ , мы установили, что с увеличением  $h$  ширина треков уменьшается и при  $h > 60$  нм треки не регистрируются. Аналогичные результаты были получены при исследовании треков в островковых пленках висмута и серебра.

При малых  $h$  ( $\approx 20$  нм) треки имеют гораздо большую ширину, чем толщина слоя углерода, отделяющего островковую пленку от поверхности (рис. 1, a). Поэтому мы предположили, что формирование трека происходит в результате перемещения островков внутри узкой внутренней полости, которая раскрывается по плоскости островковой пленки. Для экспериментального обнаружения такой полости мы оттеняли верхний слой углерода золотом под углом  $\psi = 8^\circ$  в направлении, перпендикулярном траектории ионов. Фотография трека после оттенения представлена на рис. 2. На этом рисунке видны поверхностный трек *a* (искажение поверхности в виде вытянутого узкого холма, возникающего при пересечении ионом слоя углерода) и широкий ( $\approx 10^{-7}$  м) холм *b* над треком в островковой пленке. Холм *b* свидетельствует о том, что тонкий слой углерода, отделяющий островковую пленку от свободной поверхности, над треком приподнят, образуя внутреннюю полость.

На рис. 3 схематически показана структура полости в сечении, перпендикулярном траектории движения иона, и расположенные на ее краях укрупненные островки золота. Контрольные эксперименты показали, что такие же треки формируются и на поверхности других диэлектриков — фтористого лития, стекла, углерода.



**Рис. 3.** Схематическое изображение внутренней полости в сечении, перпендикулярном траектории иона.



$\alpha$   $\beta$

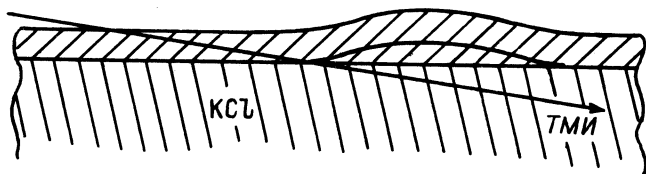
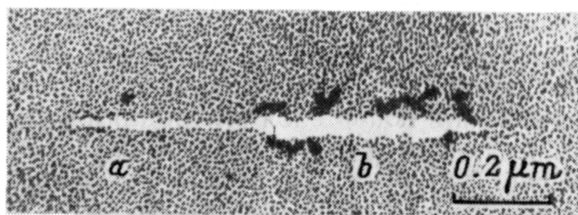


Рис. 4. Оттененный рельеф поверхности тонкой углеродной пленки ( $h \approx 20$  нм), находящейся на поверхности монокристалла КСл.

$\alpha$  — поверхностный трек;  $\beta$  — участок пленки, отделившийся от поверхности кристалла над траекторией иона. Оттенение направлено снизу вверх. Под снимком показана схема формирования поверхностного рельефа.

Для того чтобы установить роль островковой пленки в раскрытии полости, мы провели дополнительный эксперимент. На скол монокристалла КСл напылением в вакууме наносилась только пленка углерода толщиной  $\approx 20$  нм. После облучения поверхность углеродной пленки оттенялась золотом под углом  $\psi \approx 8^\circ$  в направлении, перпендикулярном направлению облучения. Затем пленка углерода вместе с отменившимся поверхностный рельеф золотом отделялась от кристалла и просматривалась в электронном микроскопе.

На рис. 4 приведены снимок типичного трека и схема сечения образца в области трека. Видно, что сначала формируется поверхностный трек. Затем, когда ион движется в приповерхностном слое кристалла,



$\alpha$   $\beta$

$\gamma$



01 ▲ 2

Рис. 5. Трек в островковой пленке золота на свободной поверхности тонкой пленки углерода ( $\alpha$ ). Оторванные кусочки углеродной пленки с участка поверхности над траекторией иона ( $\beta$ ).

Схема формирования треков ( $\gamma$ ): 1 — островки, удаленные из области трека; 2 — оставшиеся островки.

происходит отслаивание углеродной пленки с большого участка поверхности кристалла над траекторией иона. Ширина области отслаивания достигает тех же значений ( $\approx 10^{-7}$  м), что и на рис. 3. Таким образом, полость между углеродной пленкой и поверхностью кристалла может образовываться и без наличия островковой металлической пленки. Отметим, что если толщина углеродной пленки мала ( $< 20$  нм), то часто наблюдается разрыв отслоившейся пленки (рис. 5). Для визуализации оторванных кусочков на поверхность углеродной пленки перед облучением напылена островковая пленка золота.

## 2. Обсуждение результатов

Обсудим возможные механизмы раскрытия полости и перемещения металлических островков на ее края. Все оценки выполнены для островковых пленок золота. Как видно из рис. 4, отслаивание углеродной пленки происходит с участка поверхности кристалла, который значительно больше, чем размер поверхностного трека. В конце области отслаивания глубина, на которой траектория иона находится под поверхностью кристалла, достигает 30 нм. Поэтому возможная причина отслаивания углеродной пленки может заключаться в возбуждении на поверхности кристалла над траекторией иона поверхностной упругой волны. Такая волна может создаваться объемной ударной волной, распространяющейся от траектории иона к поверхности [7]. Возможность возбуждения на поверхности упругой волны уже обсуждалась ранее для сбрасывания с поверхности металлических островков при формировании треков в островковых металлических пленках на поверхности диэлектрика [8]. Такая волна может приводить к отрыву от поверхности не только изолированных островков, но и тонкой пленки.

В [8] показано, что после пролета иона под малым углом  $\varphi$  поверхность над траекторией иона испытывает три толчка: один, более сильный, в сторону вакуума и два в глубину кристалла, т.е. на поверхности возбуждается поверхностная (релеевская) волна, распространяющаяся вдоль поверхности. При этом на расстояниях  $y \lesssim r_0/\varphi$ , где  $r_0 \approx 5 \cdot 10^{-9}$  м — радиус ядра трека, релеевский импульс распространяется без затухания. Таким образом, распространяющийся вдоль поверхности над траекторией иона упругий импульс может приводить в движение в перпендикулярном направлению расположенную на ней углеродную пленку. Отрыв пленки от подложки произойдет, если возникающая при таком движении сила инерции превысит силу связи пленки с подложкой. Так как в нашем эксперименте  $\varphi \approx 3 \cdot 10^{-2}$  рад, то  $y \lesssim 2 \cdot 10^{-7}$  м, что хорошо согласуется с шириной области отслаивания. На больших расстояниях поверхностные волны приобретают двумерный характер и их амплитуда убывает с увеличением  $y$ .

Появление островков золота на краях полости может происходить двумя механизмами. Первый связан с испарением вещества островков и последующей его конденсацией на холодных краях полости; второй предполагает движение островков в поле температурного градиента  $\nabla T$ , реализуемого на поверхности кристалла по ширине полости. Элементарные оценки показывают, что первый механизм вряд ли работает, так как всей энергии, выделенной ионом на длине трека, не хватает

для испарения того количества металла, которое находится на краях полости. Более вероятным является второй механизм. Направленное перемещение расплавленных островков от центра полости к ее краям может происходить вследствие градиента поверхностного натяжения  $\sigma$ . Островки будут двигаться в сторону увеличения  $\sigma$ , т.е. в сторону более низкой температуры.

Выполним оценку градиента температуры, реализуемого в области полости. Сила  $F_1$ , действующая на островок и приводящая к его перемещению, может быть записана в виде

$$F_1 = \pi R^2 \nabla T (d\sigma_R/dT), \quad (1)$$

где  $\sigma_R$  — поверхностное натяжение островка на границе с вакуумом. Движению островка как целого будут препятствовать сила адгезионного сцепления с подложкой  $F_2$  и сила вязкого трения  $F_3$  между движущимися слоями вещества в объеме островка. В установившемся режиме

$$F_1 - F_2 - F_3 = 0. \quad (2)$$

Оценку  $F_2$  и  $F_3$  можно провести с помощью следующих соотношений:

$$F_2 = 2R\Delta\sigma, \quad (3)$$

$\Delta\sigma = \sigma_s - \sigma_R - \sigma_{sR}$ ,  $\sigma_s$  — поверхностное натяжение подложки,  $\sigma_{sR}$  — поверхностное натяжение межфазной границы островок-подложка,

$$F_3 = 6\pi\eta Rv, \quad (4)$$

$\eta$  — вязкость золота;  $v$  — скорость, с которой движется островок. Из (2) получаем

$$\nabla T = \frac{2\Delta\sigma + 6\pi\eta v}{\pi R d\sigma_R/dT}. \quad (5)$$

Оценим скорость, с которой островки должны двигаться на края полости. Время, в течение которого сохраняется скачок температуры, оценивается из очевидного соотношения

$$t = y^2/4k,$$

где  $k$  — коэффициент температуропроводности. При  $k \approx 4 \cdot 10^{-6}$  м/с,  $y \approx 5 \cdot 10^{-8}$  м получаем  $t \approx 6 \cdot 10^{-10}$  с. Поэтому скорость, с которой должны двигаться островки, равна  $v \approx y/t \approx 10^2$  м/с. Полагая в (5)  $d\sigma_R/dT = 4.6 \cdot 10^{-4}$  Н/град·м [9],  $\eta \approx 3 \cdot 10^{-3}$  кТ/м·с,  $\Delta\sigma \approx 1$  Н/м, получим  $\nabla T \approx 10^{11}$  К/м.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что на поверхности диэлектрика над траекторией иона, движущегося в приповерхностном слое, реализуется скачок температуры, а островковая металлическая пленка является удобным индикатором процессов, происходящих вблизи траектории тяжелых многозарядных ионов.

В результате проведенных экспериментов обнаружен новый тип треков тяжелых многозарядных ионов, которые формируются в

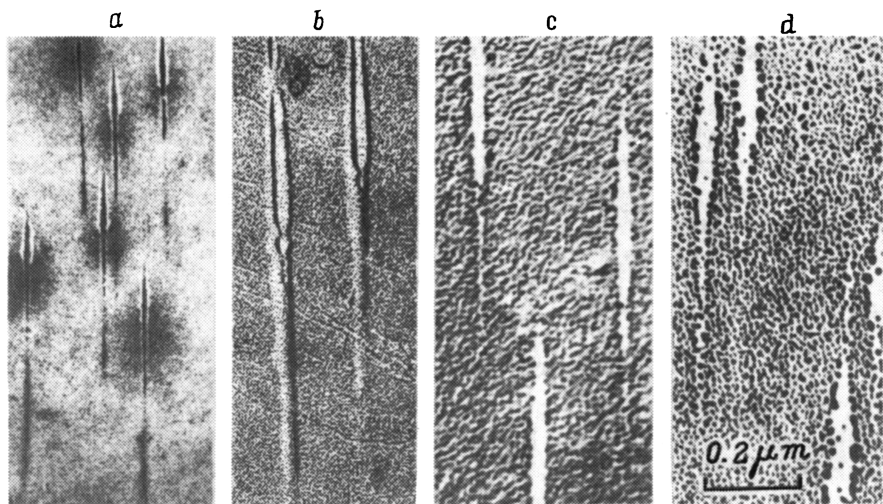


Рис. 6. Различные типы треков, наблюдаемых электронно-микроскопически в диэлектриках.

*a* — треки в объеме тонкой пленки коллодия (указаны стрелками), более широкие начальные участки соответствуют поверхностным трекам; *b* — поверхностные треки в коллодии; *c* — треки в островковых пленках золота на поверхности коллодия; *d'* — треки в закрепленных островковых пленках золота на поверхности углерода. На всех снимках ионы двигались сверху вниз.

островковых металлических пленках, закрепленных на поверхности диэлектрика тонкой углеродной пленкой. Возможный механизм формирования таких треков связан с движением островков в поле температурного градиента в пределах внутренней полости, раскрываемой по плоскости островковой пленки.

Таким образом, в настоящее время можно указать четыре типа треков тяжелых многозарядных ионов, формируемых в диэлектриках и наблюдаемых электронно-микроскопически.

1. Объемные треки. Они представляют собой прямолинейные дефектные области, возникающие вдоль всей длины пробега тяжелых многозарядных ионов в объеме твердого тела. Для их наблюдения необходимо приготовление тонких пластинок, прозрачных для электронного пучка, что связано с определенными экспериментальными трудностями. Ширина таких треков  $\approx 10^{-8}$  м (рис. 6, *a*).

2. Поверхностные треки. Они представляют собой искажение профиля поверхности, возникающее при пересечении ионом поверхности диэлектрика и движении в приповерхностном слое вблизи свободной поверхности (рис. 6, *b*). Такие треки формируются на поверхности ограниченного круга диэлектриков и наблюдаются после отщепления облученной поверхности. Их размеры максимальны при малых ( $\approx 1^\circ$ ) углах влета ионов, а ширина изменяется от  $10^{-8}$  до  $(5 \div 6) \cdot 10^{-8}$  м в зависимости от физических свойств исследуемых диэлектриков.

3. Треки в островковых металлических пленках с радиусом островков  $\approx 5 \cdot 10^{-9}$  м, расположенных на свободной поверхности твердого тела. Такие треки представляют собой участки поверхности, свободные от островков. Они формируются на поверхности любых твердых тел, в том числе и металлов. Их ширина при малых углах влета ионов

изменяется от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $8 \cdot 10^{-8}$  м в зависимости от свойств твердого тела, на поверхности которого островковая пленка расположена.

4. Треки в островковых металлических пленках, закрепленных на поверхности диэлектрика тонкой пленкой углерода. Такие треки представляют собой участки пленки, на которых произошло перемещение островков из центра трека на его края. При малой толщине углеродной пленки и малых углах облучения ширина треков достигает  $10^{-7}$  м. Исследование таких треков представляет интерес и для разработки новых типов твердотельных детекторов, и для исследования физики процессов, происходящих в твердом теле в области траектории тяжелых многозарядных ионов.

#### Список литературы

- [1] Izui K. // J. Phys. Soc. Japan. 1965. V. 20. N 6. P. 915-932.
- [2] Chadderton L.T. // Nucl. Tracks. Radiat. Meas. 1988. V. 15. N 1-4. P. 11-29.
- [3] Meins C.K., Griffith J.E., Qiu Y. et al. // Radiat. Effects. 1983. V. 71. P. 13-33.
- [4] Qiu Y., Griffith J.E., Tombrello T.A. // Radiat. Effects. 1982. V. 64. P. 111-116.
- [5] Goland A., Paskin A. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 7. P. 2188-2194.
- [6] Воробьева И.В., Тер-Ованесьян Е.А. // ФТТ. 1992. Т. 34, № 2. С. 414-422.
- [7] Ronchi C. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 8. P. 3575-3584.
- [8] Нацик В.Д., Бормашенко Э.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1987. В. 3 (41). С. 31-36.
- [9] Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1005 с.

Харьковский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
17 августа 1993 г.