

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ В ФОЛЬГАХ $Sb_2Te_3$ и $Bi_2Te_3$

**Н.М. АБДУЛЛАЕВ, И.Т. МАММАДОВА, К.Г. ХАЛИЛОВА, Н.Н. МУРСАКУЛОВ,  
И.А. НАСИБОВ, К.Ш. КАХРАМАНОВ**

*Институт Физики им Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана, Баку*

[nadirabdulla@mail.ru](mailto:nadirabdulla@mail.ru)

В докладе рассмотрены дислокационные образования в фольгах на плоскости скола, отражающие процессы скольжения. Дислокации, которые перемещаются через кристалл, создают макроскопические деформации, что характерно для слоистых кристаллов типа  $A_2^V B_3^{VI}$ .

Рассмотрим дислокационные образования в кристаллах  $A_2^V B_3^{VI}$  на плоскости скола, а также приведем некоторые результаты из работ [1-5] отражающие физико-механические процессы скольжения.

В [6] методом электронной сканирующей микроскопии впервые обнаружены микротрубки прямоугольного сечения, формирующиеся в объеме слоистых кристаллов  $CdI_2$ , легированных трехвалентными примесными ионами  $Bi^{3+}$ . Они вырастают преимущественно в порах, которые возникают в объеме кристаллов  $CdI_2$ -  $BiI_3$  вследствие различия валентности ионов  $Cd^{2+}$  и замещающих их ионов  $Bi^{3+}$  в регулярных узлах кристаллической решетки.

Микротрубки выявлены только в  $CdI_2$ -  $BiI_3$  и не наблюдаются в кристаллах  $CdI_2$ , легированных иными одним или двухвалентными примесями (например,  $PbI_2$ ,  $SnI_2$  и др.). Это, вероятно, обусловлено тем, что в объеме кристаллов  $CdI_2$  -  $BiI_3$  в процессе роста формируются поры, существование которых подтверждено электронно-микроскопическими и атомно-силовыми исследованиями морфологии свежесколотых поверхностей  $CdI_2$ -  $BiI_3$ . [6]

Эти нанопоры легли в основу зарождения различных линейных дефектов; при этом были сформированы разветвления дислокаций.

Расщепление дислокаций в системе кристаллов  $A_2^V B_3^{VI}$  почти не изучено, однако слоистость этих кристаллов и наибольшее расстояние между слоями  $Te^{(1)}$ - $Te^{(1)}$  позволяет предположить о существовании легкого скольжения и ее проявления в плоскости (0001) [4].

Анализ показал, что дислокационная картина в объеме кристалла  $Bi_2Te_3$  намного сложнее, чем это можно было заключить из изучения одних лишь ямок травления.

Целью работы явились выявление полос сброса и разветвленных линий скольжения в тонких фольгах  $A_2^V B_3^{VI}$  с помощью электронной микроскопии.

Разветвление дислокации вблизи плоскости скольжения дает пример изгиба и разветвления дислокации вблизи плоскости скольжения. Если в кристалле  $Bi_2Te_3$  сдвиг происходит лишь по одной

плоскости скольжения, то дислокации будут располагаться в виде параллельных линий.

Дислокации из  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  легко передвигаются в плоскости скольжения (0001) так как в этом случае имеет место только сдвиг атомных скольжения вдоль поверхности (0001).

**Тонкие фольги** из  $A_2^V B_3^{VI}$  для электронной микроскопии изготавливали путем последовательного расщепления объемного монокристалла липкой лентой. Эксперименты проведены на основе микроскопов высокой чувствительности, с помощью атомно-силовой микроскопа *ACM-BRUKER Nano N8 Neos* и сканирующего электронного микроскопа марки *NC-AFM*. Далее пленки  $A_2^V B_3^{VI}$  получали методом термического испарения в вакууме. В качестве подложек были использованы фольги из  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ , толщиной 100-200 нм, поверхности которых были ориентированы в плоскости (0001).

Дислокации из  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  легко могут двигаться в плоскости скольжения (0001) так как в этом случае имеет место только сдвиг атомных рядов. Наблюдаемые на фольгах из  $A_2^V B_3^{VI}$  полосы сброса образуются лишь при наличии скольжения вдоль поверхности (0001). Плоскости скольжения не имеют при этом искривления, что представлено на рис.1 Обычные полосы сброса в таких кристаллах не образуются, поскольку имеется лишь одна система скольжения.

**Сдвиг, или скольжение**, в кристаллах  $Bi_2Te_3$  (рис.2) является наиболее важным типом деформации твердых тел. Скольжение в  $A_2^V B_3^{VI}$  это сдвиговое перемещение двух частей кристалла на поверхности (0001) под действием деформирующих напряжений в процессе роста. В результате такой деформации на поверхности кристалла появляются искривленные линии в виде дуги, которые представлены на рис.2 а). Отдельные кристаллические пластины сдвигаются друг относительно друга по этим плоскостям, образуя в результате скольжения растянутый кристалл.

Теоретический анализ механизма образования полос обоих типов основывается на нелинейных уравнениях эволюции локальной плотности дислокаций. Примеры решения этих уравнений в виде стационарно движущихся фронтов имеются в работе [3]

На рис. 2b более наглядно представлена поверхность, отражающая искривленные линии скольжения в 3D - масштабе

Обозначения: главная дуга, отражающая линию скольжения (1-1) на поверхности, выявленная методом атомно-силовой микроскопии (*АСМ*)

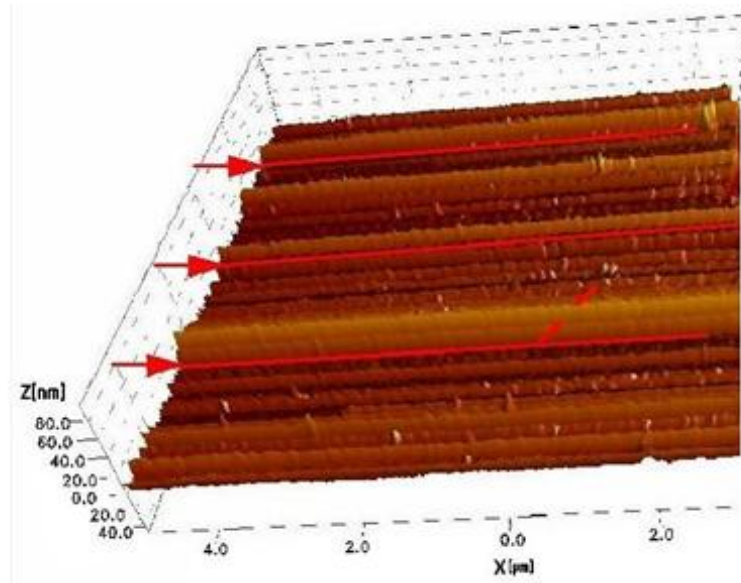


Рис. 1. Параллельные линии неискаженных областей на поверхности (0001)  $Sb_2Te_3$ .

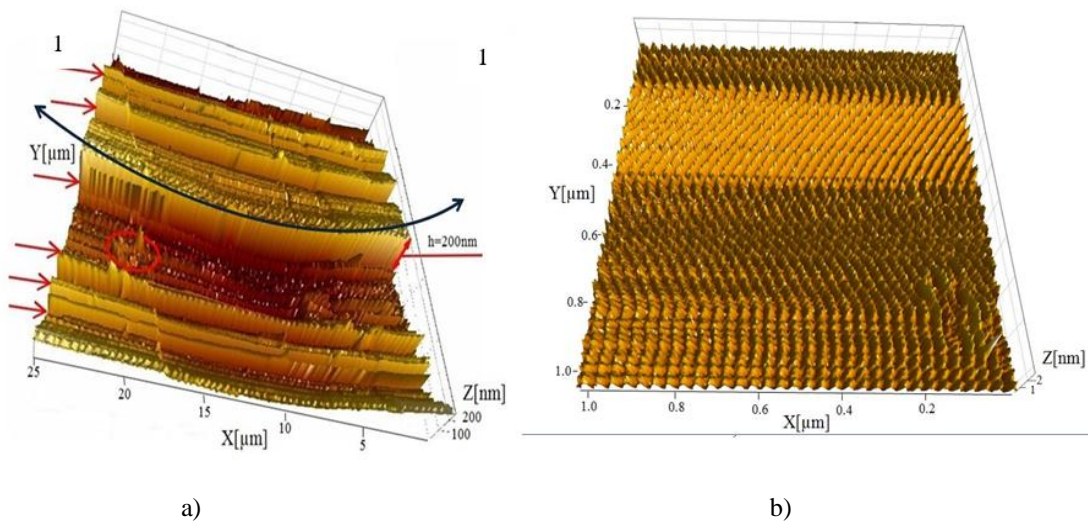


Рис.2. Фрагмент искривления линии скольжения в фольгах  $Bi_2Te_3$  дана на рис. 2а.

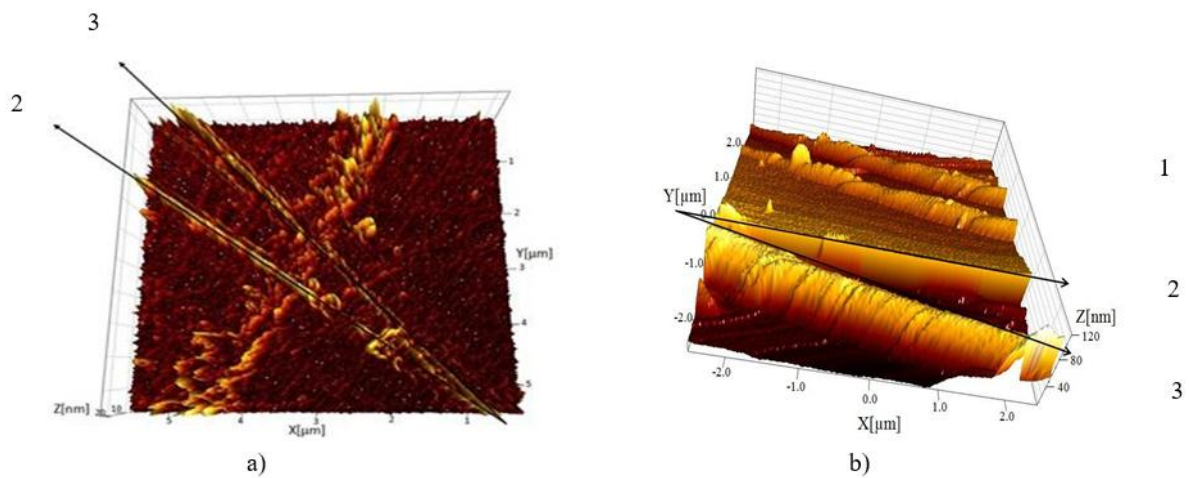


Рис. 3. Разветвленные линии скольжения в тонких фольгах  $Sb_2Te_3 - ACM$  изображение пересеченных разветвлений – а) разветвления (2 и 3) - б). Обозначения: 1, 2, 3 - разветвленные линии скольжения.

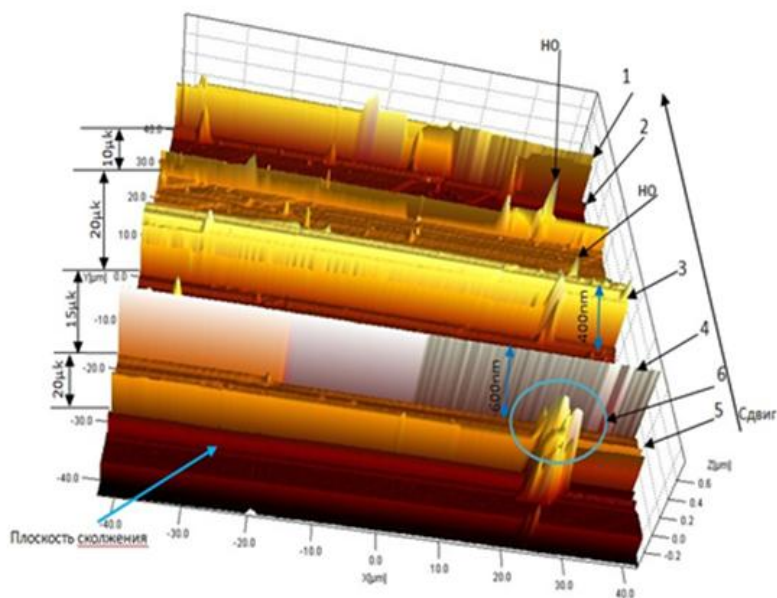


Рис. 4. Пример топографии неискаженных на поверхности (0001)  $Bi_2Te_3$ .

На поверхности (0001)  $Sb_2Te_3$  выявлены различные разветвления линий скольжения (2) и (3) причисляемые к поперечным скольжениям. Здесь представлена морфология поверхности (0001) наностроек куполообразной формы. На этом рисунке даны топография поверхности полос вторичного скольжения. Эти фрагменты являются характерным элементом для начальной стадии деформации кристаллов. Высота разветвленных линий скольжения достигает 50-60 нм (см. рис. 4) Особым случаем локализации деформации на начальном ее этапе являются полосы сброса вызывающие разориентацию решетки между соседними объемами кристалла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены линии скольжения внутри полос сброса искривленные в виде вытянутой дуги. Резюме: В тонких фольгах из  $A^V_2B^{VI}_3$  толщиной 50-100 нм выявлены линии скольжения; в  $A^V_2B^{VI}_3$  обнаружены искривленные линии скольжения. Своим происхождением полосы сброса в  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$  можно приписать наличию барьеров лежащие между параллельными плоскостями скольжения (0001).

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики - Грант № EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/16/1

- [1] Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А.Макагонов, С.Ю.Панков, А.В.Ситников Физика твердого тела, 2017, том 59, вып.1, с. 23-29
- [2] Ван Бюрен Дефекты в кристаллах Москва 1962 с. 584
- [3] Г.А. Малыгин. ж. Физика твердого тела, 1999, том 41, вып. 2, с. 252-258
- [4] Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $Bi_2Te_3$
- [5] Ю.А. Бойков, В.А. Данилов, В.М. Гольцман, В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, Термоэлектрики и их применения, XII Меж. Гос. Семинар, Санкт-Петербург 2010, с.332-337
- [6] И.М. Болеста, И.Н. Ровецкий, И.Д. Карбовник, М.В. Партыка, Формирование микротрубок в кристаллах  $CdI_2$ , легированных примесью  $BiI_3$ , Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып.10, с. 29-35