

УДК 548.4 : 621.315.592

© 1991

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ВИНТОВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В ЗАКАЛЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ АНТИМОНИДА ИНДИЯ

В. И. Алексеенко, В. М. Мостовой

Экспериментально обнаружены аномалии подвижности винтовых дислокаций в закаленных после отжига монокристаллах антимионид индия. В связи со спецификой термообработки повышенное внимание уделено методике эксперимента. Показано, что наблюдаемые особенности на зависимостях средних скоростей движения дислокаций от напряжения и температуры можно объяснить с помощью модели термоактивированного преодоления перегибами стопоров на дислокационной линии. Из предположения о природе стопоров для движения перегибов (комплекс точечных дефектов: атом теллура—вакансия индия) на основании указанной модели сделаны оценки величины энергетического барьера стопора, преодолеваемого перегибом.

Известно, что полупроводниковые монокристаллы являются объектами, в которых, как традиционно считается, движение дислокаций определяется пайерлсовским механизмом. Тем не менее существуют многочисленные экспериментальные факты, свидетельствующие о влиянии подсистемы точечных дефектов на подвижность дислокаций в этих материалах, например существование стартовых напряжений в германии и кремнии, изменение энергии активации движения дислокаций и возможность изменять эти величины, варьируя концентрацию примеси [1-3]. Эффект влияния степени легирования на скорость одиночных дислокаций был обнаружен в одном из первых исследований подвижности дислокаций в антимиониде индия [4].

Очевидно, что не только легирование, но и различные способы термообработки могут служить эффективным инструментом воздействия на физико-механические свойства материалов. Влияние отжига на подвижность дислокаций изучалось в [5], где показано, что высокотемпературный отжиг кристаллов InSb с винтовыми дислокациями при $T=523$ К приводит к появлению нелинейных зависимостей пробегов дислокаций от времени, т. е. к возникновению кинетики подвижности дислокаций. Кроме того, оказалось, что более жесткая термообработка (отжиг при $T=573$ К) приводит к появлению достаточно высоких стартовых напряжений $\sigma_{ст}$ для движения винтовых дислокаций, хотя в неотожженных образцах их величина была по крайней мере на порядок меньше. Вопрос об энергии активации движения дислокаций в образцах, подвергнутых термообработке, насколько нам известно, на сегодняшний день остается неизученным. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния предварительной закалки образца на процессы зарождения и движения одиночных дислокаций в антимиониде индия.

1. Эксперимент

1. Образцы для исследований представляли собой прямоугольные параллелепипеды с ориентацией ребер $[1\bar{1}0]$, $[11\bar{2}]$, $[111]$ и размерами $22 \times 2 \times 0.9$ мм соответственно, вырезанные электроэрозионным способом из бездислокационного антимионид индия, легированного теллуrom до

концентрации $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. После механической обработки и химической полировки в полирователе СР-4А образцы отжигались при температуре 623 К в течение 1 ч на воздухе, после чего со скоростью $\sim 500 \text{ К/с}$ закаливались приведением в контакт с охлажденной до 0°C массивной медной пластиной.¹ После этого в образец вводились одиночные дислокации. Для этого грань образца (112) скрайбировалась вдоль направления $[1\bar{1}0]$, а затем кристалл деформировался изгибом вокруг оси $[111]$ [6(§2)]. Как показано в [6(§4)], в результате такого способа нагружения в течение 20–25 мин при $\sigma = 5 \text{ МПа}$ и $T = 423 \text{ К}$ в кристалле возникает дислокационная структура, состоящая из полупетель с векторами Бюргера, лежащими в направлениях $[011]$ для плоскости $(\bar{1}11)$ и $[101]$ для $(1\bar{1}1)$.

Места выхода винтовых сегментов, входящих в эти полупетли, на ра-

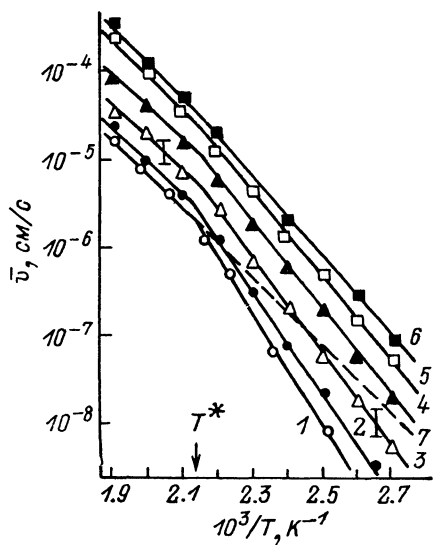


Рис. 1. Зависимости средних скоростей движения дислокаций от температуры для закаленных монокристаллов антимолибдита индия.

Внешние механические напряжения σ (МПа): 1 — $\sigma = 6.5$, 2 — 10, 3 — 18, 4 — 2.6, 5 — 35, 6 — 40; 7 — незакаленный образец, $\sigma = 6.5$ МПа.

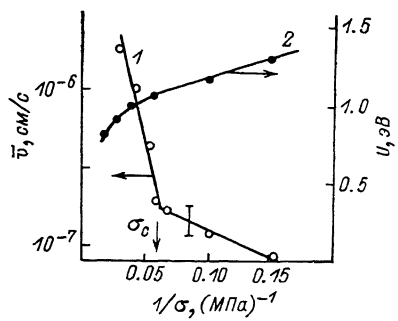


Рис. 2. Зависимость средней скорости (1) и энергии активации (2) движения винтовых дислокаций в предварительно закаленном образце от обратного напряжения при $T = 423 \text{ К}$.

бочую грань образца (111) после селективного химического травления представляли собой «двойную цепочку» ямок травления, расположенную вдоль направления $[1\bar{1}0]$. Дальнейшие нагружения образцов для изучения подвижности этих дислокаций осуществлялись по схеме четырехопорного изгиба вокруг оси $[11\bar{2}]$, причем рабочая поверхность образца (111) подвергалась сжатию.

2. Отметим, что все дальнейшие результаты получены не только для винтовых сегментов полупетель, индуцированных описанным способом, но и для винтовых сегментов полупетель, полученных при изгибе образцов от внутренних дислокационных источников. Изучалась подвижность обоих концов полупетель, т. е. «левовинтовых» (двигающихся от грани (112)) и «правовинтовых» сегментов. Поскольку результаты измерений отличаются лишь количественно, в дальнейшем будут для определенности приведены данные по левовинтовым дислокациям.

3. Для того чтобы убедиться в том, что в измерения подвижности дислокаций не дают вклада кинетические эффекты, проводились контрольные измерения средних пробегов дислокаций от времени нагружения при фиксированных температуре и напряжении. Наблюдался линейный характер зависимости $l(t)$.

¹ Необходимо отметить, что, поскольку результаты количественно зависели от скорости закалки, этот параметр на опыте строго выдерживался.

На опыте изучались зависимости средней скорости винтовых дислокаций в закаленном антимониде индия от температуры. Подобные измерения незакаленных образцов антимонида индия [4] показали, что зависимости представляют собой прямые линии в широком интервале температур, что свидетельствовало о независимости энергии активации движения дислокаций от температуры (рис. 1, кривая 7). Как видно из рис. 1, результаты для закаленных образцов принципиально отличаются тем, что на зависимостях v ($1/T$) наблюдается резкий излом при $T=468$ К. Это говорит об изменении энергии активации движения винтовых дислокаций. Положение точки излома слабо зависит от приложенного внешнего напряжения. Видно, что при $T > 468$ К прямые зависимостей скоростей от температуры в пределах ошибки эксперимента параллельны друг другу, а их наклон совпадает с соответствующим наклоном для винтовых дислокаций в незакаленных образцах $U=0.89 \pm 0.05$ эВ [4, 6 (§3)]. При температурах $T < 468$ К наблюдается сильная зависимость наклона v ($1/T$) от внешних напряжений; с их ростом энергия активации движения дислокаций падает. При увеличении напряжений от 6.5 до 40 МПа она изменяется от 1.3 до 0.91 эВ соответственно, практически достигая значения для винтовых дислокаций в незакаленном образце. Результаты измерений зависимости средних скоростей от напряжения, перестроенные в координатах $\lg v$ ($1/\sigma$) (рис. 2), представляются двумя линейными участками, сопряженными в точке с $\sigma \approx 15$ МПа.

3. Обсуждение результатов

1. Наличие линейного участка на зависимости $\lg v$ ($1/\sigma$) при $\sigma < 15$ МПа, существование аномалии на зависимости $\lg v$ ($1/T$) и резкое увеличение энергии активации движения дислокации при $\sigma < 15$ МПа позволяют интерпретировать эти эксперименты в рамках модели термоактивированного преодоления перегибами на дислокационной линии точечных дефектов как стопоров для их движения [7]. Будем считать, что обнаруженное в эксперименте характерное значение $\sigma \approx 15$ МПа соответствует критической величине напряжения $\sigma_c = E/abl$, содержащейся в теории [7] (здесь E — энергия преодоления стопора перегибом, a — параметр решетки, b — вектор Бюргерса, l — среднее расстояние между стопорами). При напряжениях $\sigma > \sigma_c$ перегибы безактивационно преодолевают связанные со стопорами барьеры, а при $\sigma < \sigma_c$ преодоление стопора уже требует термической активации и зависимость скорости дислокации от напряжения в этой области отлична от $v(\sigma)$ при $\sigma > \sigma_c$, где точечные дефекты не оказывают определяющего влияния на движение перегибов. Расчет скорости дислокации в рамках используемой модели [7] дает для области малых напряжений ($\sigma_c \geq \sigma \geq 3\sigma_{cr}$, где $\sigma_{cr} < 1$ МПа) выражение

$$v = v_0 \left(1 + \frac{E}{\sigma abl} + \frac{l_c}{l} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{U_{np} + U_m + E}{2kT} - \frac{E}{2\sigma abl} - \frac{l_c}{2l} \right), \quad (1)$$

где E — энергия преодоления перегибом стопора; l_c — критическая длина парного перегиба; U_{np} — энергия зарождения парного перегиба; U_m — энергия миграции кинка; v_0 — коэффициент, связанный с частотным фактором. Сравнивая экспериментальную зависимость $\lg v$ ($1/\sigma$) при $\sigma < 15$ МПа с приведенным выражением для скорости, определим величину отношения E/l (здесь использованы известные из литературы значения параметров для антимонида индия): $E/l \approx 4 \cdot 10^{-12}$ Дж/м.

Из зависимости энергии активации движения дислокаций от напряжения (рис. 3) была проведена оценка активационного объема $\gamma = \partial U / \partial \sigma$. Она показала следующее: при $\sigma > 15$ МПа активационный объем $\gamma \approx (5 \div 10)b^3$, что свидетельствует об пайерлсовском механизме движения

дислокаций, а при $\sigma < 15$ МПа, где $\gamma \approx 180b^3$, очевидно, реализуется механизм термоактивируемого преодоления точечных дефектов перегибами.

2. Обсудим далее вопрос о природе стопоров для движения перегибов в закаленных кристаллах антимонида индия. Как известно, в полупроводниковых соединениях A^3B^5 вследствие отклонения состава от стехиометрии всегда содержится достаточно высокая концентрация точечных дефектов. Согласно [8], эта величина достигает 10^{19} см $^{-3}$. В [9] методом внутреннего трения определены тип, состояние и концентрация указанных нестехиометрических дефектов, показано, что они представляют собой бивакансионные комплексы $V_{In}-V_{In}$, концентрация которых при температурах порядка комнатных достигает $\sim 10^{19}$ см $^{-3}$, а с повышением температуры уменьшается. На основании вышесказанного можно сделать предположение, что при высокотемпературном отжиге, предшествующем закалке монокристаллов антимонида индия, в указанном ранее режиме бивакансионные комплексы, распадаясь, связываются с атомами теллура,

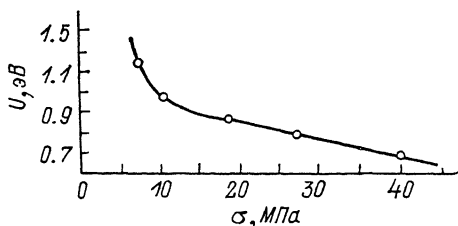


Рис. 3. Зависимость энергии активации движения винтовых дислокаций в закаленном антимониде индия от внешнего механического напряжения.

образуя комплексы типа $\text{Te}-V_{In}$ (или более сложные). Эти комплексы и представляют собой мощные стопоры для движения перегибов. Таким образом, концентрация стопоров по порядку величины равна концентрации легирующей примеси. Поскольку в исследованном нами антимониде индия концентрация теллура $2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, то, считая, что расстояние между атомами теллура, а значит, и образовавшимися при высокотемпературном отжиге комплексами порядка $l \sim 10^{-6}$ см, оценим величину потенциального барьера стопора из определенного выше значения E/l . В этом случае комплекс имеет барьер для движения перегибов $E \approx 0.25$ эВ. Необходимо отметить, что при описании экспериментальных результатов с помощью выражения (1) не учитывалось влияние точечных дефектов на кристаллический рельеф, так как в рамках приведенной качественной модели строго выполняется условие $l_c < l$, где $l_c \sim 5a$, т. е. основное количество парных перегибов зарождается на линии дислокации между точечными дефектами, а не вблизи самих стопоров.

3. Что касается поведения зависимости v ($1/T$) в области высоких температур при $T > T^*$, то наличие резкого излома при $T^* \approx 468$ К на этой кривой и слабая зависимость этой температуры от внешнего напряжения T^* (σ) (рис. 1) свидетельствуют о том, что, по-видимому, физическая причина этого эффекта состоит в изменении состояния как комплексов точечных дефектов — стопоров для движения перегибов, — так и самого дислокационного ядра [10].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Никитенко В. И. // Динамика дислокаций. Киев: Наукова думка, 1975. С. 7—26.
- [2] Бондаренко И. Е., Ерофеев В. Н., Никитенко В. И. // ЖЭТФ. 1973. Т. 64. С. 2196—2201.
- [3] Ерофеев В. Н., Никитенко В. И. // ФТТ. 1971. Т. 13. № 1. С. 146—150.
- [4] Ерофеева С. А., Осипьян Ю. А. // Динамика дислокаций. Киев: Наукова думка, 1975. С. 26—30.
- [5] Алексеенко В. И., Мостовой В. М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 24. С. 40—44.
- [6] Алексеенко В. И., Зильберман Л. А., Мостовой В. М. и др. // Препринт ДонФТИ АН УССР-88-17 (153). Донецк, 1988. 43 с.
- [7] Рыбин В. В., Орлов А. Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 11. С. 3251—3258.
- [8] Straumanis M. E., Kim F. // Acta Cryst. 1965. V. 19. P. 256.

- [9] Освенский В. Б., Холодный Л. П., Мильвидский М. Г. // Изв. АН УССР, неорг. материалы. 1972. Т. 8. № 5. С. 802—806.
- [10] Фарбер Б. Я., Бондаренко И. Е., Никитенко В. И. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 7. С. 2191—2195.

Донецкий
физико-технический институт
АН УССР

Поступило в Редакцию
4 января 1991 г.
В окончательной редакции
9 апреля 1991 г.
