

Л. С. МИЛЕВСКИЙ, И. Л. СМОЛЬСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ
ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПЕТЕЛЬ В КРИСТАЛЛАХ С ВЫСОКИМИ
БАРЬЕРАМИ ПАЙЕРЛСА

(Представлено академиком Н. В. Агеевым 10 I 1973)

Изучение подвижности дислокаций в германии и кремнии (¹⁻¹⁰), начатое методом повторного травления (¹) с определения скорости лидирующей дислокации ряда скольжения, постепенно уточнялось (^{2, 3}) и доведено до измерения скорости одиночных дислокационных полупетель. Зависимость скорости дислокаций от напряжения и температуры $v(\tau, T)$, согласно (¹), имеет вид

$$v = v_0 \tau^m \exp(-U/kT), \quad (1)$$

где $m = 1,3 - 1,9$ — показатель, не зависящий от T , U — энергия активации процесса, около $1,5 - 2$ эв.

Дальнейшие уточнения (²⁻¹⁰) дали поправки зависимостей $v(\tau)$, $U(\tau, N)$, N — концентрация атомов примеси, и т. д. Было установлено (^{2, 9, 10}), что скорость винтовых ветвей дислокационных полупетель больше, чем шестидесятиградусных при $\tau \leq 5$ кг/мм² и $T \leq 500^\circ$.

Теоретическое обоснование результатов опирается на механизм образования в результате термической флуктуации двойного перегиба и дорастания его до критических размеров (¹¹⁻¹⁵). Скорость дислокации, согласно (¹¹⁻¹³), должна определяться вероятностью образования двойного перегиба на единице длины дислокации, энергия которого $U_{д.п} = 2(U_0 - \gamma\sqrt{\tau})$ (⁸) входит в уравнение типа (1) и определяется энергией одиночного перегиба U_0 , активационным объемом $\gamma \sim b^3$ и зависит от τ . Предсказанная теорией (¹¹⁻¹³) зависимость v от длины дислокации L не обнаруживается экспериментально при $L = 20 - 2000 \mu$ (^{8, 10}). Не удается согласовать эксперимент с моделью, в которой дислокация рассматривается в виде натянутой струны (^{12, 14-16}). Теоретические модели движения дислокаций, предложенные в (¹¹⁻¹⁶), не учитывают граничные условия на внешней поверхности и роли изломов на полугексагональных петлях, не дают количественного согласия с опытом (⁸).

Нами исследовались особенности скольжения отдельных ветвей гексагональных и полугексагональных петель на образцах германия n - и p -типа с концентрацией носителей $10^{14} - 10^{15}$ см⁻³. Полугексагональные петли вводились царапиной, гексагональные создавались на частицах второй фазы путем осаждения атомов меди, введенных диффузией. Образцы деформировались сжатием вдоль направления $[1\ 2\ 3]$ при $380 - 500^\circ$. Специальные опыты (¹⁷) показали, что атомы меди при $N = 10^{15}$ см⁻³ не влияют на подвижность дислокаций, но приводят к появлению стартовых напряжений и снижают напряжение, при котором начинается размножение дислокаций на введенных полупетлях. Дислокации выявлялись методом рентгеновской дифракционной топографии в излучении MoK_{α} .

На рис. 1 показан образец, вырезанный по плоскости (111) из кристалла, насыщенного медью и деформированного при $T = 440^\circ$. Образование дислокационных петель происходит на крупных частицах осажденной меди. Характерна вытянутая вдоль вектора Бюргерса $b = a/2$ $[10\bar{1}]$ форма

петель (вектор Бюргерса во всех случаях определялся по погасанию винтовых ветвей петель при условии $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$). Соотношение скоростей движения различных ветвей в гексагональной петле постоянно при данной температуре (изменяя T , можно изменять соотношение скоростей), причем наименьшей скоростью обладают винтовые ветви. Шестидесятиградусные ветви также имеют различные скорости. При введении из царапины полупетли в плоскости $(11\bar{1})$ имеют вектор Бюргерса $\mathbf{b} = a/2 [10\bar{1}]$ и шестидесятиградусные ветви, выходящие на поверхность (рис. 1). В плоскости $(11\bar{1})$ образуются полупетли с правовинтовой ветвью, выходящей на поверхность $(11\bar{1})$ (рис. 2, верхний), и левовинтовой ветвью, выходящей на поверхность $(\bar{1}\bar{1}1)$ (рис. 2, нижний).

Из сопоставления полупетель в различных системах скольжения (рис. 1 и 2) становится очевидным, что их форма может быть заранее предсказана по форме соответствующего сечения равновесной гексагональной петли. Форма гексагональной петли, по-видимому, определяется влиянием вершин на вероятность образования и прохождения перегибов с одной ветви на другую. В вершинах, где встречаются две шестидесятиградусные ветви, появляется краевая ориентация $[121]$, препятствующая прохождению перегибов с одной шестидесятиградусной ветви на другую.

Из рис. 1 следует, что скольжение полупетли вдоль поверхности или петли, достигшей поверхности (рис. 1, справа), происходит с большей скоростью, чем петель в объемных источниках, несмотря на ускорение лидирующих дислокаций под влиянием последующих дислокаций ряда. Меньшая скорость винтовых ветвей в гексагональных петлях по сравнению с шестидесятиградусными определяется значительной вероятностью образования перегибов в плоскости поперечного скольжения, особенно если в этой плоскости τ отлично от нуля. По-видимому, перегибы с винтовых ветвей при переходе на смежные шестидесятиградусные ветви влияют на скорости движения последних. Влияние поперечного скольжения увеличивается с повышением температуры $(^{18})$, уменьшается при увеличении τ и в некоторой степени подавляется регулярным образованием одиночных перегибов в месте выхода дислокации на поверхность, что приводит к резкому увеличению скорости дислокаций, более ярко выраженному для винтовых ветвей. Если движением дислокаций управляет процесс рождения одиночных перегибов вблизи внешней поверхности, то очевидно отсутствие зависимости скорости дислокации от ее длины L . Появление стартовых напряжений и размножения дислокаций вблизи поверхности (рис. 1) связано, по-видимому, с закреплением концов полупетли у внешней поверхности вследствие стока примесных атомов и точечных дефектов к поверхности, что приводит к потере дислокацией единой плоскости скольжения.

Энергия активации U , входящая в уравнение (1) и определенная из опытов с полупетлями, относится к энергии образования одиночных перегибов. Но это не означает, что для гексагональных петель энергия активации будет соответствовать энергии образования двойного перегиба, так как на вероятность образования перегибов должны оказывать влияние силы взаимодействия дислокаций и искажения решетки вблизи излома.

Из приведенных выше экспериментальных данных следует, что условия скольжения полупетель, опирающихся на поверхность, не соответствуют теоретическим моделям $(^{14-16})$, в которых обсуждается движение бесконечно длинной или закрепленной на концах прямолинейной дислокации путем образования на ней и движения двойных перегибов.

Авторы благодарят В. Ф. Миускова за помощь в освоении метода рентгеновской топографии, а также М. Г. Васильева и Г. У. Лубмана за помощь в подготовке прибора и проведении съемок.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
5 I 1973

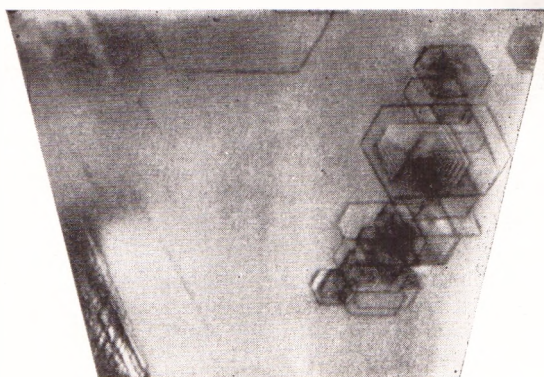


Рис. 1. Дислокационная полупетля в плоскости (111), введенная от царапины, с размножением дислокаций на ветви, параллельной направлению [110], и гексагональные петли, образованные на частицах осажденной меди. 20×

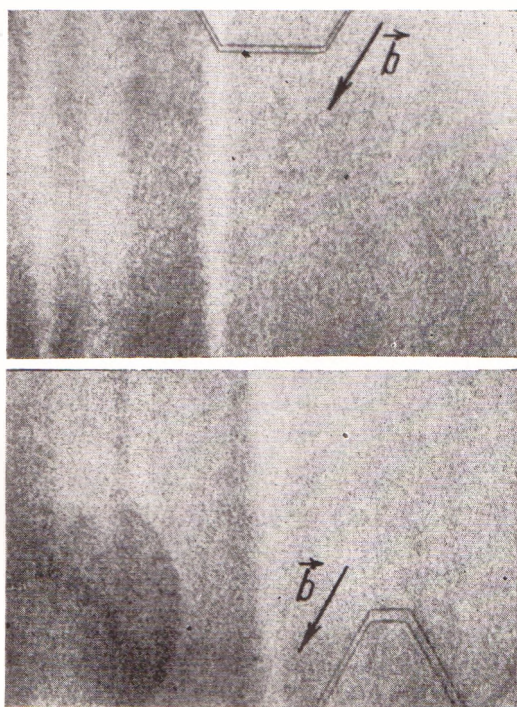


Рис. 2. Парные дислокационные полупетли в плоскости (111), введенные от царапин с поверхностей (111) (вверху) и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$). Векторы Бюргерса \vec{b} определяют направление смещения верхней части образца относительно нижней внутри полупетель. 20×

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. R. Chaudhuri, J. R. Patel, L. C. Rubin, J. Appl. Phys., **33**, 2736 (1962).
- ² M. N. Kabler, Phys. Rev., **131**, 54 (1963). ³ V. Celli, M. N. Kabler et al., J. Phys. Soc. Japan, **18**, Suppl. I, 20 (1963).
- ⁴ В. И. Никитенко, В. Н. Ерофеев, Н. М. Надгорная, Сборн. Динамика дислокаций, Харьков, 1968, стр. 84. ⁵ J. R. Patel, R. F. Trampusch, A. R. Chaudhuri, Metallurgy of Elemental and Compound Semiconductors, **12**, 45 (1961).
- ⁶ V. N. Erofeev, V. I. Nikitenko, V. B. Osvenskii, Phys. Stat. Sol., **35**, 79 (1969). В. Н. Ерофеев, В. И. Никитенко, ФТТ, **13**, 146 (1971).
- ⁷ В. Н. Ерофеев, В. И. Никитенко, ФТТ, **13**, 300 (1971).
- ⁸ В. Н. Ерофеев, В. И. Никитенко, ЖЭТФ, **60**, 1780 (1971).
- ⁹ J. R. Patel, P. E. Freeland, J. Appl. Phys., **42**, 3298 (1971).
- ¹⁰ H. Shaumburg, Phil. Mag., **25**, 1429 (1972).
- ¹¹ J. Lothe, J. P. Hirth, Phys. Rev., **115**, 543 (1959).
- ¹² J. P. Hirth, J. Lothe, Theory of Dislocations, N.Y., 1968.
- ¹³ А. П. Казанцев, В. Л. Покровский, ЖЭТФ, **58**, 677 (1970).
- ¹⁴ P. Guyot, J. E. Dorn, Canad. J. Phys., **45**, 983 (1967).
- ¹⁵ J. E. Dorn, S. Rainak, Trans. AIME, **230**, 1052 (1964).
- ¹⁶ В. Л. Инденбом, А. Н. Орлов, Сборн. Динамика дислокаций, Харьков, 1968, стр. 5.
- ¹⁷ Л. С. Милевский, И. Л. Смольский, II конфер. по физико-химическим основам легирования полупроводников, Тез. докл., М., 1972, стр. 151.
- ¹⁸ H. Schaumburg, Phys. St. Sol., **40**, K-I (1970).