

Л. С. МИЛЁВСКИЙ, И. Л. СМОЛЬСКИЙ

**ПРОЯВЛЕНИЕ ДИФФУЗИОННО-ДИСЛОКАЦИОННОГО  
МЕХАНИЗМА СКОЛЬЖЕНИЯ НА НЕПРЕРЫВНО ДЕЙСТВУЮЩИХ  
ИСТОЧНИКАХ ДИСЛОКАЦИЙ В КРЕМНИИ**

(Представлено академиком Н. В. Агеевым 22 VII 1974)

В исследованиях последних лет накапливается все больше экспериментальных данных, которые невозможно объяснить с точки зрения механизма образования двойных перегибов, получившего признание в последнее время, т. е. в рамках модели чистого скольжения. На основе этой модели, чтобы получить соответствие между теоретическими расчетами и экспериментальными данными, были сделаны попытки<sup>(1-4)</sup> учесть все возможные факторы, способные влиять на вероятность образования перегибов и скорость их перемещения вдоль дислокаций.

Однако, как показано в работах<sup>(5-7)</sup>, подвижность дислокаций определяется в значительной степени диффузионными процессами, влияние которых мало исследовано, но особенно ярко проявляется при скольжении замкнутой дислокационной петли, содержащей винтовые и 60-градусные сегменты.

В настоящей работе методом рентгеновской дифракционной топографии проводилось изучение движения гексагональных дислокационных петель, образованных от непрерывно действующих источников в кремнии в процессе пластической деформации сжатием.

Для сопоставления результатов с данными других работ эксперименты проводились на образцах, вырезанных вдоль направления  $[1\bar{2}3]$  (ось нагружения), из бездислокационных монокристаллов кремния, выращенных методом вертикальной зонной плавки с концентрацией электрически активных примесей  $n \leq 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Пластинки для рентгеновской топографии вырезались по плоскости (111) (плоскость с максимальными эффективными напряжениями). Рентгенотопографическая съемка производилась по методу Ланга в излучении Mo K<sub>α</sub>.

При эффективных сдвиговых напряжениях в плоскости скольжения  $\tau_{эф} = 1,5 - 2,5$  кг/мм<sup>2</sup> можно получить образцы с малой плотностью отдельно расположенных источников, непрерывно образующих дислокационные петли. Один из таких источников приведен на рис. 1а. Форма петель, образованных от такого источника, несколько отличается от формы одиночных петель, полученных при тех же условиях (рис. 1б). Обычно лишь несколько лидирующих петель имеют неискаженные прямолинейные сегменты, тогда как все последующие несут на себе множество макроскопических изломов. Наибольшим искажениям подвержены 60-градусные сегменты, параллельные направлению  $[110]$  ([110]-сегменты). В узкой области, окружающей источник, искажаются только [110]-сегменты. Искаженные сегменты замедляются, причем чем ближе петля к центру источника, т. е., чем больше дислокаций прошло перед ней, тем сильнее торможение.

Экспериментальные данные, полученные на полупетлях, введенных с поверхности образцов<sup>(8, 9)</sup>, показывают, что искажения, как правило, возникают на одном 60-градусном сегменте полупетли, тогда как другой остается прямолинейным. Авторы<sup>(8, 9)</sup> связывают причину возникновения

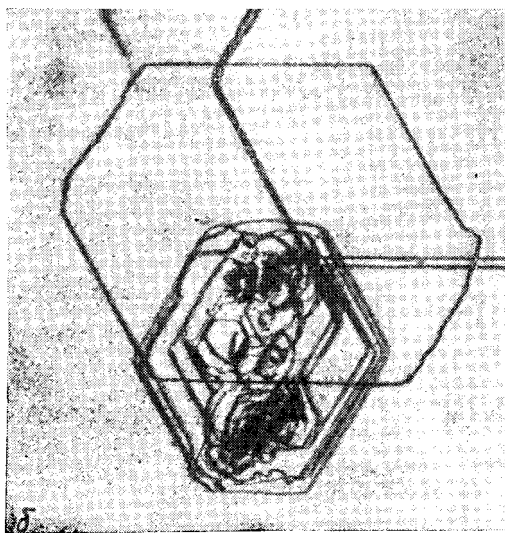
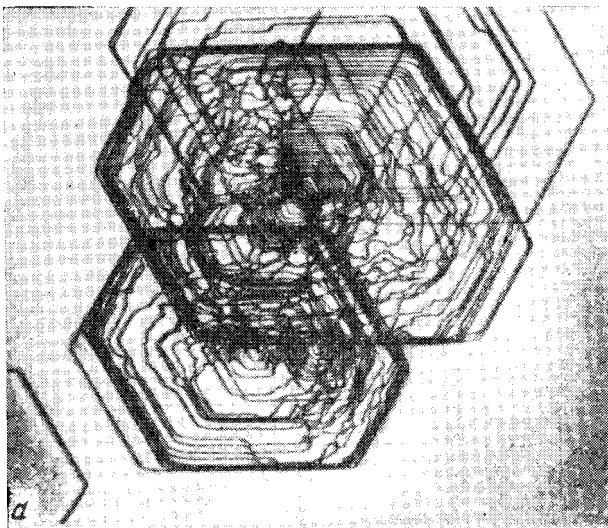


Рис. 1. *a* – дислокационные петли с векторами Бюргера  $\mathbf{b} = \frac{1}{2}a[101]$  (на снимках горизонтальны), образованные от непрерывно действующих источников при  $T = 700^\circ$  и  $\tau_{\text{эф}} = 1,7 \text{ кг/мм}^2$ ;  $20\times$ . *б* – одиночная петля, полученная при тех же условиях (видны петли с  $\mathbf{b} = \frac{1}{2}a[110]$  от непрерывно действующего источника);  $20\times$

этих искажений с отсутствием касательных напряжений, действующих вдоль сегментов, претерпевающих искажение. В <sup>(9)</sup> показано, что искажения дислокаций в кремнии появляются при напряжениях, превышающих  $\tau_{\text{эф}} = 1 \text{ кг/мм}^2$ , и высоких температурах (выше  $700^\circ \text{C}$ ). Высказывается мнение, что причиной образования искажений дислокационных сегментов может быть неравновесная концентрация вакансий, возникающая в процессе нагрева и охлаждения образцов при проведении экспериментов, влияние действующего в плоскости поперечного скольжения эффективного напряжения или действие сил изображения, возрастающих по мере приближения дислокации к поверхности.

При анализе характера искажений дислокационных сегментов (рис. 1) становится очевидным, что искажение сегментов петель происходит при расширении петли в процессе деформации, а не при охлаждении или на-

греве образца, так как в этом случае все петли, образованные одним источником, должны искажаться одинаково.

Под действием внешнего напряжения на 60-градусные  $[110]$ - и  $[011]$ -сегменты действует одно и то же эффективное напряжение  $\tau_{\text{эф}}$ . Напряжения переползания для них различны (коэффициенты Шмида, определяющие эти напряжения, равны 0,412 для  $[110]$ -сегментов и 0,577 для  $[011]$ -сегментов в плоскости скольжения  $(1\bar{1}1)$ ). Однако искажения максимальны на  $[110]$ -сегментах, для которых напряжение переползания меньше (рис. 1а). Поэтому напряжения переползания не могут быть главной причиной искажения формы петель.

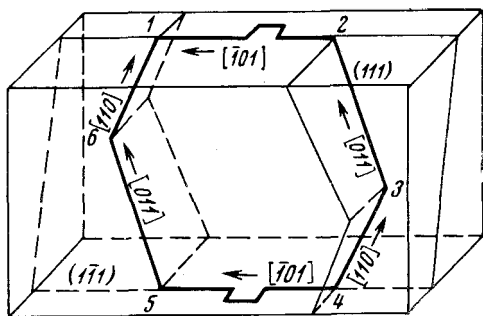


Рис. 2. Геометрия объемных дислокационных петель, полученных при сжатии монокристалла вдоль направления  $[123]$

Так как гексагональные петли целиком находятся в объеме кристалла, влияние поверхности, включая тормозящее действие на сегменты и действие сил изображения, нельзя рассматривать как причину, приводящую к искажению 60-градусных сегментов, хотя эти искажения аналогичны наблюдаемым на полупетлях.

В наших экспериментах при одноосном сжатии наибольшим искажениям подвержены 60-градусные  $[110]$ -сегменты, тогда как в <sup>(9)</sup>, где применяли одноосное растяжение, наблюдали максимальные искажения на 60-градусных  $[011]$ -сегментах при той же геометрии образцов. Геометрия дислокационных петель, которые получаются при сжатии в плоскости  $(1\bar{1}1)$ , показана на рис. 2. У петлей, полученных при растяжении, изменяются знаки 60-градусных сегментов, а право- и левовинтовые сегменты меняются местами. Процесс искажения сегментов можно понять, если учесть влияние двойного поперечного скольжения винтовых сегментов на образование ступенек на 60-градусных сегментах.

Двойное поперечное скольжение должно активизироваться при встрече дислокаций с препятствиями, создающими поля напряжений в плоскости поперечного скольжения, однако такой микроскопический процесс в чистом виде наблюдать не удается, но поперечное скольжение можно наблюдать на полупетлях <sup>(10)</sup>.

На винтовых сегментах, преодолевающих под действием внешнего деформирующего напряжения микроскопические препятствия в плоскости скольжения, образуются двойные перегибы в плоскости поперечного скольжения, причем могут возникать только такие перегибы, проекции которых на плоскость скольжения петли увеличивают ее площадь (рис. 2). Перегибы расширяются скольжением вдоль винтовых сегментов и, достигнув изломов, образуют ступеньки на 60-градусных сегментах, после чего винтовые сегменты продолжают скользить в плоскости  $(1\bar{1}1)$ . При движении таких ступенек вдоль сегментов 1-6 и 3-4 в объем кристалла должны поставиться междоузлия, а при движении ступенек вдоль сегментов 2-3 и 5-6 в объем кристалла должны поставиться вакансии. Если кристалл растягивать, то, наоборот, на сегментах 1-6 и 3-4 должны образовываться вакансии, а на сегментах 2-3 и 5-6 — междоузлия. По-видимому, процесс образования междоузлий заменяется процессом поглощения вакансий из-за высокой энергии образования междоузлий. Точечные дефекты, оставшиеся в решетке кристалла после прохождения дислокации, могут способствовать переползанию следующих за ними дислокаций, а также вызывать процессы распада твердых растворов примесей за счет конденса-

сации вакансий. Различная степень искажения смежных 60-градусных сегментов есть следствие образования избыточных вакансий на одних сегментах и поглощения их другими сегментами.

Анализируя характер искажения петель на рис. 1, можно заключить, что при скольжении дислокаций от непрерывно действующих источников двойное поперечное скольжение винтовых сегментов стимулируется полем внутренних напряжений, действующих в плоскости поперечного скольжения. В результате на 60-градусных сегментах образуются ступени макроскопических размеров. Для движения таких ступеней требуется приток не одиночных вакансий, а непрерывный макроскопический поток, обеспечивающий обмен между испускающими и поглощающими вакансии сегментами петли. Необходимо учитывать, что этот макроскопический поток ограничивается равновесной при данной температуре концентрацией точечных дефектов в кристалле.

Таким образом, скольжение гексагональных дислокационных петель осуществляется при сочетании механизмов двойного поперечного скольжения винтовых сегментов, обходящих микроскопические препятствия, и переползания 60-градусных сегментов. По-видимому, происходит обмен вакансиями (при этом часть вакансий может теряться в плоскости скольжения) между 60-градусными сегментами петель за счет канальной диффузии и диффузии через объем кристалла, без чего петля не может сохранить единую плоскость скольжения.

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

Поступило  
2 VII 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. В. Рыбин, А. Н. Орлов, ФТТ, т. 11, 3251, 3605 (1969). <sup>2</sup> А. П. Казанцев, В. Л. Покровский, ЖЭТФ, т. 58, 677 (1970). <sup>3</sup> Б. В. Петухов, ФТТ, т. 13, 1445 (1971). <sup>4</sup> Б. В. Петухов, В. Л. Покровский, ФТТ, т. 13, 3679 (1971). <sup>5</sup> Л. С. Милевский, И. Л. Смольский, ДАН, т. 242, 591 (1973). <sup>6</sup> Л. С. Милевский, И. Л. Смольский, Ю. А. Сидоров, В сб.: Дефекты структуры в полупроводниках, Новосибирск, 1973, стр. 127. <sup>7</sup> Л. С. Милевский, И. Л. Смольский, ФТТ, т. 16, 1028 (1974). <sup>8</sup> В. Н. Ерофеев, В. И. Никитенко и др., Кристаллография, т. 16, 190 (1971). <sup>9</sup> A. George, C. Escaravage et al., Cryst. Lattice Defects, v. 4, 29 (1973). <sup>10</sup> H. Schaumburg, Phys. St. Sol., v. 40, K1 (1970).