

ИЗМЕНЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ ИНВЕРСИИ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В.И. Никитенко, Б.Я. Фарбер, Е.Б. Якимов

Обнаружено явление асимметрии подвижности индивидуальных дислокаций в монокристаллах кремния и германия, обуславливающее значительное (до двух порядков) изменение скорости их движения при инверсии знака действующих напряжений.

Со времени опубликования [1] первой оценки сопротивления кристаллической решетки сдвиговой пластической деформации, инициировавшей возникновение дислокационной гипотезы, изучение этой проблемы остается одной из наиболее фундаментальных задач физики прочности и пластичности. К настоящему времени оказалось возможным осуществить строгий теоретический анализ [2, 3] движения нерасщепленных дислокаций в потенциальном рельефе Пайерлса. Сопоставление теоретических предсказаний с экспериментальными результатами выявило ряд коренных разногласий между ними [4]. Для их объяснения привлекались представления об изменении закономерностей образования и расширения двойных перегибов под влиянием точечных дефектов [5, 6] и существующего в ядре расщепленной дислокации дефекта упаковки [7, 8]. С целью разделения вклада указанных эффектов нами были предприняты исследования влияния инверсии направления скольжения индивидуальных дислокаций на скорость v их перемещения в монокристаллах полупроводников, приведшие к обнаружению явления асимметрии подвижности дислокаций.

Измерения скоростей дислокаций осуществляли по методике [9, 10] на образцах, вырезанных из бездислокационных слитков Ge и Si типа с удельным сопротивлением 50 – 100 Ом·см в форме четырехгранных призм с размерами ребер $1,5 \times 4 \times 35$ мм³, ориентированных вдоль $[1\bar{1}1]$; $[\bar{1}12]$ и $[110]$. Сначала в кристалл при четырехопорном изгибе вокруг оси $[\bar{1}12]$ при повышенных температурах T вводили дислокационные полупетли полугексагональной формы диаметром 600 – 800 мкм. Места выхода на поверхность $\{111\}$ 60°-ных и винтовых участков полупетель выявлялись с помощью химического травления. Специальные эксперименты показали, что признаков самопроизвольного стягивания полупетель

столь большого размера под действием сил изображения и линейного натяжения не обнаруживалось даже за времена, значительно превышавшие суммарное время последующих термообработок. Из этого положения старта дислокации перемещали в сторону расширения полупетли, после чего кристалл охлаждали, вновь протравливали и измеряли расстояние между ямками травления в исходном и конечном положениях дислокаций. Затем образец опять нагревали и подвергали действию напряжений противоположного знака, вызывавших сужение полупетли. После охлаждения и протравливания измеряли пробеги дислокаций в обратном направлении.

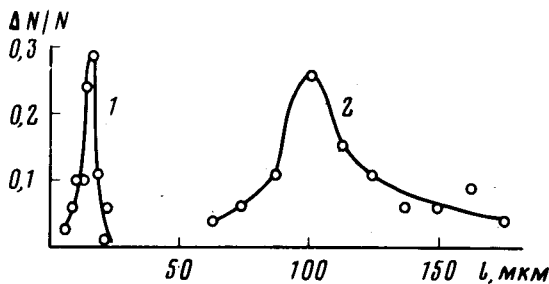


Рис. 1. Распределение 60° -ных дислокаций по длинам пробегов в Si при расширении (1) и сужении (2) полупетель. $T = 650^\circ\text{C}$; $\tau = 0,5 \text{ кг/мм}^2$

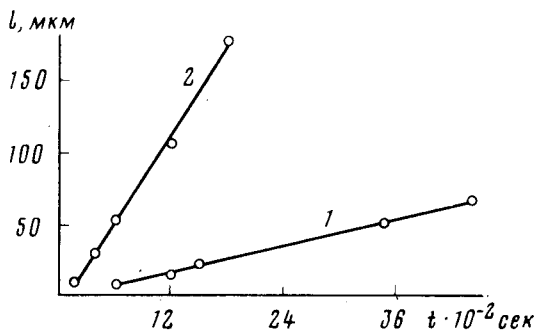


Рис. 2. Зависимость средней длины пробега 60° -ных дислокаций в Si от времени приложения нагрузки при расширении (1) и сужении (2) полупетель. $T = 650^\circ\text{C}$; $\tau = 0,5 \text{ кг/мм}^2$

На рис. 1 показаны гистограммы длин пробегов 60° -ных дислокаций в кремнии под действием касательных напряжений $\tau = 0,5 \text{ кг/мм}^2$ противоположного знака при $T = 650^\circ\text{C}$ за время нагружения $t = 20$ мин, построенные по измерениям перемещений 80 дислокаций. Видно, что при инверсии направления их движения существенно возрастает не только средняя величина пройденного ими пути, но и дисперсия распределения по длинам пробегов. Исследования зависимости среднего пробега дислокаций от времени действия на них внешних сил (рис. 2), показали, что это различие определяется резким увеличением (от $1,4 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-5} см/сек) скорости движения дислокации в направлении сужения полупетли. При повторном цикле реверсирования, т. е. при переходе от сужения к расширению полупетель, соотношение скоростей дислокаций в этих направлениях оставалось почти таким же.

Явление асимметрии подвижности дислокаций наблюдалось на 60° -ных и винтовых участках полупетель, расположенных как в первоначально растянутых, так и сжатых областях образца. Различие в скоростях движения дислокаций при инверсии направления их скольжения сильно зависело от величины действующих напряжений, температуры и условий термообработки кристалла перед реверсированием. Если оно за-

шествялось без охлаждения образца, асимметрия значительно возрас- тала. Так, в Ge при $T = 450^{\circ}\text{C}$ и $\tau = 0,5 \text{ кГ/мм}^2$ в таком случае ско- рость сужения полупетли в сто раз превышала скорость ее расширения. В охлаждавшемся перед инвертированием знака τ образце наблюдалось десятикратное изменение v .

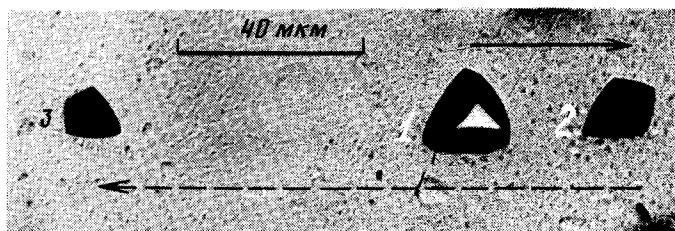


Рис. 3. Расположение ямок травления в образце Si, протравленном после инверсии направления скольжения 60° -ной дислокации. Стрел- ками показаны направления скольжения дислокации. Время движения вправо из стартового положения (1) до точки разворота (2) – 32 мин, влево до конечной позиции (3) – 20 мин

Обнаруженный эффект не определяется изменением порядка следо- вания частичных дислокаций, образующих 60° -ную полную. Он наблюдал- ся и на винтовых дислокациях, расщепленных на одинаковые 30° -ные частичные. При расширении полупетель скорости 60° -ных дислокаций с противоположным порядком следования частичных, отличались всего лишь на 20 – 30%. Решающий вклад в формирование асимметрии под- вижности вносит изменение состояния кристалла по точечным дефек- там в окрестности дислокации и в участках, прилегающих к обметенной части плоскости скольжения. В процессе движения дислокация собира- ет примеси. В исследованных нами кристаллах были получены прямые доказательства протекания таких процессов. После травления образ- цов, не охлаждавшихся и не травившихся перед реверсированием, в месте разворота дислокации выявлялась ямка травления (рис. 3). Ее возникновение, как показали рентгенотопографические исследования, обусловлено частью примесной атмосферы оторвавшейся от дислока- ции в момент увеличения v . Из нее образовалась одномерная совокуп- ность комплексов точечных дефектов, выступающая в роли линейного дефекта, который проявляется не только по травлению. Он приводит, как обнаружилось в экспериментах, выполненных по методике [11], к формированию вольт-амперной характеристики диодного типа контакта Ge с металлическим микрозондом, установленным в недислокационной ямке травления в точке разворота дислокации, обусловленной локаль- ным избытком акцепторной примеси. При высоких температурах и боль- ших напряжениях асимметрия практически исчезала. Эти факты, так- же как и увеличение дисперсии распределения пробегов (рис. 1) легко объяснимы с позиций определяющего влияния на подвижность дислока- ций состояния кристалла по точечным дефектам.

Литература

- [1] *Frenkel J.I.* Zs. f. Phys., 1926, 37, 572.
 - [2] *Хирт Дж., Лоте И.* Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972.
 - [3] *Петухов Б.В., Покровский В.Л.* ЖЭТФ, 1972, 63, 634.
 - [4] *Никитенко В.И.* Кн. Динамика дислокаций, К.: Наукова думка, 1975, 7.
 - [5] *Celly V., Kabler M., Ninomiya T., Thomson R.* Phys. Rev., 1963, 131, 58.
 - [6] *Петухов Б.В., Покровский В.Л.* ФТТ, 1971, 13, 3679.
 - [7] *Möller H.J.* Acta Met., 1978, 26, 963.
 - [8] *Wessel K., Alexander H.* Phil. Mag., 1977, 35, 1523.
 - [9] *Ерофеев В.Н., Никитенко В.И.* ЖЭТФ, 1971, 60, 1780.
 - [10] *Бондаренко И.Е., Ерофеев В.Н., Никитенко В.И.* ЖЭТФ, 1977, 64, 2196.
 - [11] *Еременко В.Г., Никитенко В.И., Якимов Е.Б.* ЖЭТФ, 1975, 69, 990.
-