

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.533.35:548.316.2

Ф. Терра (Египет)
 Г. В. Бушуева
 А. А. Предводителев

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ
 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ
 СТРУКТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ MgO

Электронно-микроскопические исследования дислокационных структур в кристаллах MgO проводились в ряде работ [1—7]. Однако необходимы дальнейшие исследования в этом направлении, поскольку дислокационные структуры в кристаллах MgO обнаруживают ряд важных особенностей, тщательный анализ которых необходим для понимания процессов пластической деформации.

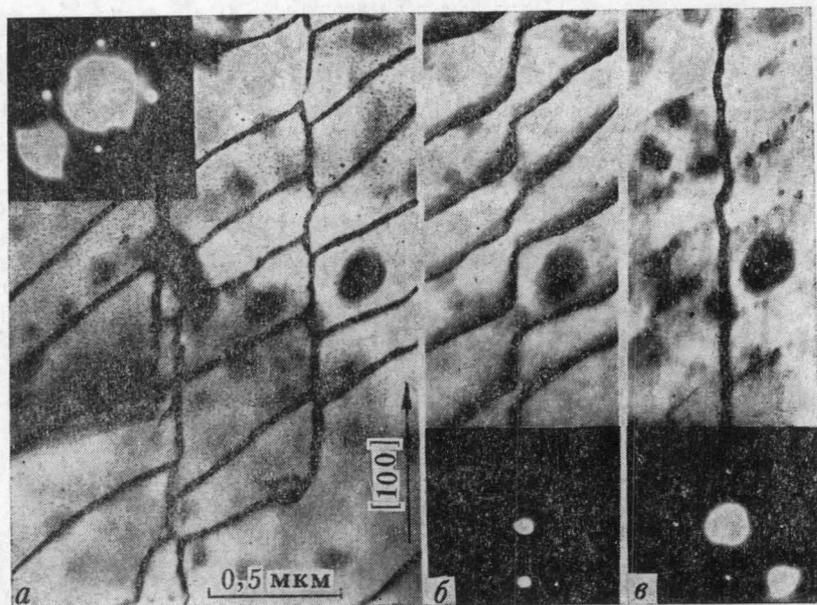


Рис. 1. Дислокационная сетка в кристаллах MgO в плоскости (001).
 Изображения в рефлексах $2\bar{2}0$ (а), $0\bar{2}0$ (б) и $2\bar{2}0$ (в)

На рис. 1 приведен пример дислокационных сеток, наблюдаемых в деформированных кристаллах MgO. Специальные стереоскопические исследования позволили установить, что в целом подобные сетки являются плоскими, хотя возможно некоторое пространственное размещение дислокаций, что не является принципиальным. На рис. 1 представлены результаты дифракционного анализа этой структуры, которые показывают, что она является результатом взаимодействия дислокаций с векторами Бюргерса $\frac{1}{2} [\bar{1}\bar{1}0]$ и $\frac{1}{2} [01\bar{1}]$ в двух системах скольжения $(\bar{1}10)$ и (011) .

Обращают на себя внимание две особенности конструкции этих сеток.

1. Можно видеть, что при реализации дислокационной реакции

$$\frac{1}{2} [\bar{1}\bar{1}0] + \frac{1}{2} [01\bar{1}] = \frac{1}{2} [\bar{1}0\bar{1}]$$

зона рекомбинации реагирующих дислокаций оказывается 45°-ной дислокацией, ориентированной вдоль [100], а не лежит вдоль линии пересечения [111] плоскостей скольжения двух взаимодействующих дислокаций, как это обычно принимается [8].

2. Реализация указанной дислокационной реакции протекает только при консервативном движении дислокаций, однако при активном их скольжении в плоскости куба (001). Виртуальной плоскостью скольжения отрезка дислокации, соответствующего зоне рекомбинации, является не $(\bar{1}\bar{2}\bar{1})$, а (010), т. е. плоскость, в которой скольжение зоны рекомбинации возможно. Поэтому прочность соединения дислокаций в данном случае будет определяться не тем, что дислокация зоны рекомбинации сидячая, а пространственной конструкцией дислокационной структуры.

В свете вышесказанного большой интерес приобретают данные относительно сопротивления движению дислокаций — среднего стартового напряжения или силы статического трения $\tau_{(001)}^0$ в плоскостях куба, которое до настоящего времени оставалось неизвестным. Знание этой характеристики представляется также важным с точки зрения оценки эффективности поперечного скольжения при развитии полос скольжения в кристаллах MgO

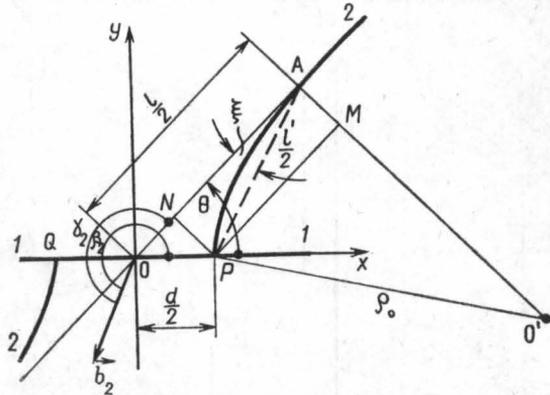


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая формирование зоны рекомбинации и плоской сетки в плоскостях {001} в кристаллах MgO

элемент двойного поперечного скольжения. Обычно подобные оценки при использовании электронно-микроскопических данных делаются на основе степени искривленности дислокаций. Однако использование этой методики сопряжено с большими ошибками.

Можно предложить иной способ, дающий существенно более надежные результаты. Поскольку после формирования зоны рекомбинации вся система удерживается в равновесии силами сопротивления движению отдельных звеньев дислокационной конструкции в плоскости куба, конструкция и ее размеры должны быть функцией уровня трения дислокаций в этих плоскостях. При практической реализации нахождения связи между параметрами дислокационной конструкции и уровнем трения имеются две возможности. Одна возможность заключается в том, что, поскольку между величиной зоны рекомбинации и зоной смещения (рис. 2) должна быть связь вида [9]:

$$\frac{l}{d} = \cos \theta + \sqrt{\sin \theta \left[\frac{\rho}{d} - \sin \theta \right]},$$

где $\rho = \frac{0.5Gb}{\tau_{(001)}^0}$, G — модуль сдвига, b — вектор Бюргерса; для определения $\tau_{(001)}^0$

следует измерить две величины: величину зоны рекомбинации d и отношение длины зоны смещения к зоне рекомбинации l/d . Однако часто на электронно-микроскопических фотографиях трудно установить местоположение точки начала зоны смещения реагирующих дислокаций. Поэтому определение величины l , а потому и $\tau_{(001)}^0$ связано с заметными ошибками. Оценки сил трения этим способом показали, что уровень сопротивления движению дислокаций в плоскостях {100} в MgO находится в интервале от 9 до 20 кг/мм².

Другая методика оценки сил трения дает существенно более надежные результаты. Она основана на том, что величина зоны рекомбинации, определяемая максимальным выигрышем в энергии системы при формировании зоны рекомбинации, также определяется уровнем трения дислокаций. При этом $\tau_{(001)}^0$ можно найти из решения вариационного уравнения $\delta(E-E') = 0$,

где

$$(E - E')/D = \frac{d}{2} \nu (\cos^2 \gamma - \cos^2 \gamma_1) + \frac{1}{2} (l - l') + \frac{\nu}{2} l' (\cos^2 \gamma_2' - l \cos^2 \gamma_2),$$

$$D = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0},$$

ν — коэффициент Пуассона, R — размер кристалла, r_0 — радиус ядра дислокации, γ — углы между дислокациями и их векторами Бюргера. Нештрихованные величины относятся к ситуации до протекания реакции, а штрихованные — после реализации реакции. В этом случае для нахождения уровня трения дислокаций достаточно знать лишь величину зоны рекомбинации, которая определяется с большой степенью надежности, особенно если реализовать формирование изображения в определенных наибо-

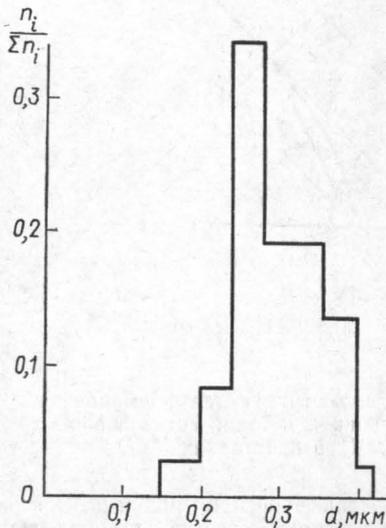


Рис. 3. Гистограмма распределения величин зон рекомбинации, ориентированных вдоль $\langle 100 \rangle$, в кристаллах MgO

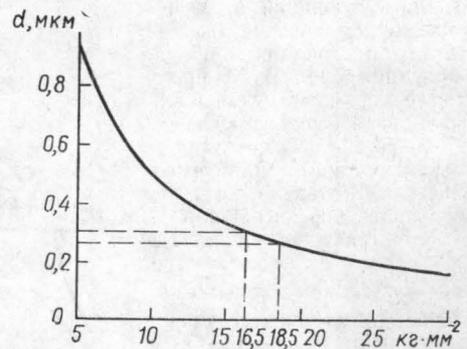


Рис. 4. Зависимость величины зоны рекомбинации, формирующейся в результате дислокационной реакции в кристаллах MgO, от уровня сопротивления движению дислокаций в плоскостях $\{100\}$

лее удобных рефлексах (рис. 1, б). На рис. 3 представлена гистограмма распределения величин зон рекомбинации d . Видно, что распределение по длинам зон достаточно острое с максимумом в районе 0,25—0,3 мкм. Зная эту величину, по зависимости величины зоны рекомбинации от уровня трения дислокаций в плоскости $\{100\}$ при максимальном выигрыше энергии из рис. 4 можно определить уровень трения дислокаций в плоскостях $\{100\}$ в кристаллах MgO.

Если использовать наиболее вероятное значение d , для $\tau_{(001)}^0$ получается значение 18,5 кг·мм⁻², а среднее — 16,5 кг·мм⁻². На рис. 3 можно заметить, что распределение по d несимметрично и несколько уширено в сторону больших d . Это уширение может быть связано с проскальзыванием реагирующих винтовых дислокаций (участка дислокаций AP на рис. 2) в плоскости (001), следствием чего должно быть дополнительное увеличение зоны рекомбинации. Поэтому предпочтение следует отдать значению $\tau_{(001)}^0 = 18,5$ кг·мм⁻², определенному по модальной величине d . Интересно сравнить полученные данные для сопротивления движению дислокаций в плоскостях куба с соответствующими величинами для плоскостей легкого скольжения. В [3] для величины сил трения, найденного по искривлению дислокаций в чистом MgO, приводится значение 6,28 кг·мм⁻². В [4] также указывается, что в MgO дислокации начинают двигаться при 7 кг·мм⁻².

Таким образом, полученные данные показывают, что напряжение трения дислокаций в плоскостях $\{100\}$ в MgO оказывается $\sim 2,5$ раза больше, чем в $\{110\}$, и в 1,5 раза больше макроскопического предела текучести, что представляется разумным физически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Washburn J., Groves G. W., Kelly A., Williamson G. K. «Phil. Mag.», 1960, 5, 991.
2. Groves G. W., Kelly A. «Proc. Roy. Soc.», 1963, A275, 233.
3. Ogawa K. «Phil. Mag.», 1966, 13, 1097.
4. Stokes R. J., Olsen K. H. «Phil. Mag.», 1963, 8, 957.
5. Ogawa K. «Phil. Mag.», 1966, 14, 619.
6. Cass T. R., Washburn J. «Proc. Brit. Ceram. Soc.», 1966, 239.
7. Reppich B., Hüther W. «Phil. Mag.», 1974, 1009.
8. Kear V. H., Taylor A., Pratt P. L. «Phil. Mag.», 1959, 4, 655.
9. Предводителев А. А. Динамика дислокаций. Харьков, 1968, с. 311.

Поступила в редакцию
14.6 1977 г.
Кафедра
молекулярной физики

УДК 550.388.2

С. Ф. Миркотан
А. Г. Вологдин
В. А. Смородинов

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КВАДРАТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА

При отражении от ионосферы квазимонохроматический радиосигнал приобретает амплитудную $R(t)$ и фазовую $\Phi(t)$ модуляции, описываемые вектором модуляции (функцией модуляции) U :

$$E(t) = U(t) e^{-i\omega_0 t} = R(t) e^{i\Phi(t) - i\omega_0 t} = [E_c(t) + iE_s(t)] e^{-i\omega_0 t}, \quad (1)$$

где $E_c(t) = R(t) \cos \Phi(t)$, $E_s(t) = R(t) \sin \Phi(t)$ — декартовы компоненты (квадратурные составляющие) на плоскости Ван дер Поля, вращающейся вокруг начала координат со скоростью ω_0 . Первопричина модуляции — флуктуационная природа ионосферной плазмы, ее изменчивость в пространстве и во времени.

Для решения обратной задачи, т. е. определения свойств самой ионосферы по поведению R и Φ , обычно используются методы наблюдения за огибающей R (амплитудный метод) либо за фазой Φ (фазовый метод). Знание же процессов E_c , E_s однозначно определяют как R , так и Φ :

$$R(t) = \sqrt{E_c(t)^2 + E_s(t)^2} \quad \text{и} \quad \Phi(t) = \arctg \frac{E_c(t)}{E_s(t)}. \quad (2)$$

В теории ионосферных исследований R и Φ определяются с помощью составляющих E_c , E_s , связанных преобразованием Гильберта [1]:

$$E_s(t) = \frac{1}{\pi} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \frac{E_c(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (3)$$

При этом E_c и E_s должны обладать следующими свойствами.

Коэффициенты корреляции $\rho_c(\tau)$ и $\rho_s(\tau)$ процессов E_c и E_s равны.

Коэффициент взаимной корреляции $\rho_{cs}(\tau)$ — нечетная функция, равная нулю при $\tau=0$.

Дисперсии σ_c^2 и σ_s^2 компонентов E_c и E_s равны.

Значения E_c и E_s не превышают огибающей R .

В настоящее время нет достаточно полных экспериментальных данных о свойствах обеих квадратурных компонентов в совокупности и о справедливости применения преобразования (3) к ионосферному случаю. Это обусловило интерес к созданию соответствующей аппаратуры и к экспериментальному изучению свойств компонент E_c , E_s .

Экспериментальное исследование было выполнено с помощью оригинальной, созданной на физическом факультете, ионосферной установки когерентного приема, регистрирующей одновременно процессы $E_c(t)$ и $E_s(t)$. На рисунке *a*, приведены образцы записей E_c , E_s . На той же записи регистрируется и огибающая $R_a(t)$, полученная