

ПОДВИЖНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ В КРИСТАЛЛАХ LiF, ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

А.К. Малик, И.М. Неклюдов
ИНЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина

После облучения кристаллов LiF электронами с энергиями 35 и 100 МэВ в интервале доз $10^9 \dots 10^{14}$ эл/см² обнаружена немонотонная зависимость подвижности дислокаций от дозы, связанная, по-видимому, как с концентрацией и мощностью радиационных дефектов, так и с особенностями процессов двойного поперечного скольжения.

Известно, что облучение щелочно-галогидных кристаллов различными видами частиц, как правило, вызывает упрочнение. Однако в ряде работ [1-4] наблюдалось разупрочнение кристаллов при малых дозах облучения некоторыми частицами и γ -квантами. Уменьшение механических характеристик невелико и восстанавливается в процессе отдыха при комнатной температуре. Снижение величины микротвердости после облучения высокоэнергетическими электронами до небольших доз обнаружено в кристаллах фтористого лития с примесью магния [3]. Разупрочнение этих образцов (как и упрочнение при больших дозах) зависит от концентрации магния и сохраняется в течение длительного времени при комнатной температуре. Радиационное разупрочнение наблюдалось также в предварительно деформированных при низких температурах монокристаллах железа и ниобия [4].

В работе [5] приведена схема дозовой зависимости механических характеристик кристаллических материалов, облученных различными видами частиц и излучений. На начальном этапе облучения после инкубационного периода отмечается разупрочнение, сменяющееся упрочнением. Разупрочнение, как правило, связывают с процессами диссоциации имеющихся в материале вакансий, что обеспечивает разбиение скоплений, влияющих на подвижность дислокаций [1], либо с рассасыванием преципитатов в примесных кристаллах при генерации вакансий в процессе облучения [3].

Можно ожидать, что концентрация радиационных дефектов, возрастающая по мере облучения, может не только уменьшить подвижность дислокаций, повышая тем самым механические характеристики кристаллов, но в некоторых случаях и способствовать их перемещению. В настоящей работе исследовано влияние малых доз при облучении высокоэнергетическими электронами на величину пробега лидирующих дислокаций в кристаллах фтористого лития. Эта величина, а следовательно, упрочнение или разупрочнение кристалла, определялись по длине лучей звезды фигур травления, полученной после воздействия сосредоточенной нагрузки и последующего химического травления.

Эксперименты проводились на образцах, выколотых из монокристалла, выращенного в вакууме по методу Киропулоса. Кристаллы размером 3x4x5 мм

отжигались при 750^oC в течение 20 ч и охлаждались в печи со скоростью 20^o/ч. Плотность дислокаций после такой обработки составляла $\approx 10^4$ см⁻².

Облучение проводилось пучками электронов с примесью γ -квантов с током от 0,1 до 1 мкА и с энергией 35 и 100 МэВ. Интегральная доза изменялась от 10^9 до 10^{14} эл/см². Температура при облучении не превышала 30^o.

Сосредоточенная нагрузка создавалась вдавливанием на грань (001) корундового индентора с углом при вершине 90^o на приборе ПМТ-3 при нагрузке 10г. Выдержка под нагрузкой 10 с. Предел текучести и критические скалывающие напряжения определялись по методике, предложенной в работе [6].

На рис. 1 приведены зависимости длин «краевых» лучей розетки от дозы облучения электронами при энергиях 35 и 100 МэВ.

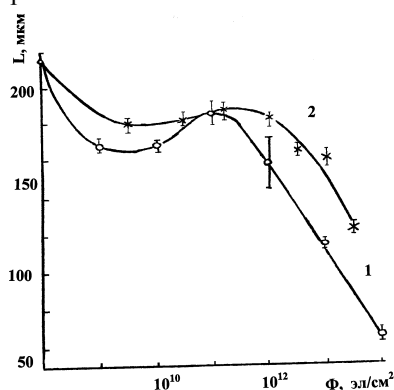


Рис. 1. Зависимость длины краевых лучей дислокационных розеток от дозы облучения электронами с энергиями 100 (1) и 35 (2) МэВ

Видно, что до дозы 10^{10} эл/см² наблюдается незначительное сокращение лучей. Их длина немного увеличивается с повышением дозы, и при 10^{11} эл/см² достигает определенной максимальной величины, не превосходящей исходного значения. Дальнейшее облучение приводит к интенсивному сокращению лучей, причем в большей степени в кристаллах, облученных электронами с энергией 100 МэВ.

Аналогичным образом изменяется длина и «винтовых» лучей. В исследованном интервале доз и энергий плотность дислокаций после облучения практически не изменилась.

На рис. 2 показаны розетки на поверхности кристаллов, облученных электронами с энергией 100 МэВ. Розетки после доз $10^9 \dots 10^{11}$ эл/см² мало отличаются по внешнему виду от розеток на необлученном кристалле. Уже начиная от доз 10^{12} эл/см² длина лучей не только сокращается, но и отличается более четким распределением дислокаций в лучах и большим сокращением винтовых лучей, чем крайних. При дозе 10^{15} эл/см² и выше винтовые лучи не наблюдаются.

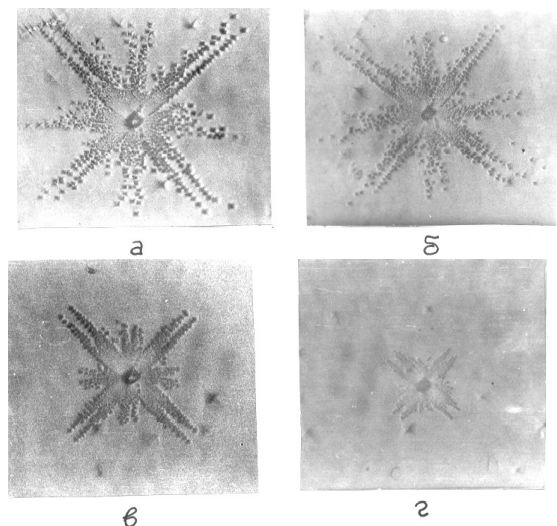


Рис. 2. Дислокационные розетки вокруг отпечатка индентора на контрольном образце (а) и после облучения электронами с энергией 100 МэВ до доз: 10^{11} (б); 10^{13} (в); 10^{14} эл/см² (г)

При формировании дислокационной структуры розетки, возникающей под воздействием сосредоточенной нагрузки, наблюдаются все элементарные процессы, происходящие при пластической деформации: зарождение дислокаций, их движение, размножение и взаимодействие. Каждый из этих процессов, зависящий от наличия и плотности различных структурных нарушений, влияет на размеры и форму розетки. Известно, что движение дислокаций в кристаллах определяется способностью к преодолению барьеров различной природы, к которым относятся и барьер Пайерлса, и различной мощности дефекты: точечные и их комплексы, примеси, дислокации и др.

Влияние точечных препятствий на подвижность дислокаций определяется не только концентрацией, но и их пространственным расположением. В работе [7] было показано, что продавливание дислокаций через квадратную сетку точечных дефектов требует большей величины продавливающего напряжения, чем сетка случайно расположенных. Исходя из этого можно предположить, что на начальном этапе облучения ($10^8 \dots 10^{10}$ эл/см²) некоторое сокращение лучей розетки, т.е. незначительное упрочнение кристалла, обусловлено регулярностью в расположении радиационных дефектов в решетке, что характерно при облучении высокоэнергетическими электронами [8].

Пластическая деформация определяется не только подвижностью дислокаций, но и их количеством

[9]. Процессы движения и размножения дислокаций взаимосвязаны. Размножение дислокаций может происходить лишь в процессе их движения и во многом зависит от внутренней структуры кристалла, т.е. от наличия различных дефектов.

В ЦГК размножение дислокаций происходит с помощью механизма двойного поперечного скольжения винтовых компонентов дислокаций. На параметры этого процесса оказывают влияние плотность и мощность имеющихся в кристалле дефектов, а также неоднородность полей внутренних напряжений. Под действием внешнего напряжения источник будет генерировать дислокационные петли, если выполнены следующие условия [10]:

$$\ell \hbar \ell_{кр} = \frac{Gb}{\tau}; \quad (1)$$

$$h \hbar h_{кр} = \frac{Gb}{8\pi(1-\nu)\tau}, \quad (2)$$

где ℓ – длина дислокационного сегмента; h – расстояние между плоскостями скольжения; G – модуль сдвига; τ – критическое скалывающее напряжение; b – величина вектора Бюргерса; ν – коэффициент Пуассона.

В облученных кристаллах величина ℓ зависит от концентрации вводимых радиацией дефектов N . Согласно оценкам, выполненным по результатам работ [11,12], каждый высокоэнергетический электрон создает $100 \dots 1000$ точечных дефектов в зависимости от энергии. Исходя из предположения, что дефекты размещены в объеме кристалла равномерно, можно определить длину дислокационного сегмента как $N^{-1/3}$.

На рис. 3 приведена зависимость этой величины от дозы электронов с энергией 100 МэВ (кривая 1). Из рисунка видно, что довольно быстрое сокращение расстояния между дефектами наблюдается до доз 10^{11} эл/см², дальнейшее увеличение дозы сказывается в меньшей степени. Характер изменения $\ell_{кр}$ с дозой носит иной характер: вначале незначительный рост, затем спад, причем при дозе 10^{14} эл/см² значения ℓ и $\ell_{кр}$ практически совпадают. Аналогичным образом изменяется и $h_{кр}$, но величина его на порядок меньше $\ell_{кр}$. До дозы 10^{11} эл/см² соотношения [1] и [2] выполняются, но, по-видимому, наиболее благоприятные условия для двойного поперечного скольжения создаются при дозе $\approx 10^{11}$ эл/см², что и приводит к некоторому разупорядочению.

Увеличивающаяся плотность дефектов с ростом дозы от 10^{12} эл/см² и выше приводит к уменьшению ℓ и h . Как видно из рис.3, условия (1) и (2) не выполняются в этом интервале доз. В зависимости от величин ℓ и h в результате двойного поперечного скольжения винтовых дислокаций, согласно работе [13], возможно образование точечных дефектов, ди-

полей винтовых дислокаций, лежащих в плоскости поперечного скольжения, а также краевых диполей. Взаимодействие этих дефектов между собой, а также с радиационными нарушениями приводит к торможению дислокаций и, как следствие, к сокращению лучей розетки фигур травления.

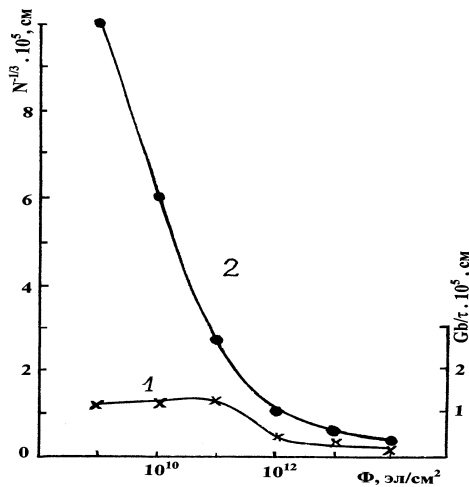


Рис. 3. Зависимость расстояния между точечными препятствиями (1) и критической длиной дислокационных сегментов (2) от дозы облучения электронами с энергией 100 МэВ

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что подвижность дислокаций в облученных кристаллах LiF зависит как от концентрации напряжений, создаваемых облучением, так и от характера взаимодействия дислокаций с радиационными дефектами. Наблюдаемое разупрочнение при дозе $\sim 10^{11}$ эл/см² обусловлено, по-видимому, большей мобильностью винтовых компонент дислокаций, связанной с активизацией процессов двойного поперечного скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Макара, М.М. Новиков. Об эффектах упрочнения и разупрочнения кристаллов при γ - и рентгеновском облучении // *Физика и химия обработки металлов*. 1973, № 6, с. 137–141.

2. Ю.С. Боярская. *Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость*. Кишинев: «Штиинца», 1972, с. 202.

3. И.М. Неклюдов, А.К. Малик, Л.М. Перунина. Влияние облучения высокоэнергетичными электронами (250 МэВ) на микротвердость и плотность кристаллов LiF и LiF:Mg // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1989, вып. 3(50), с. 66–68.

4. A. Sato, T. Mifun, M. Meshii. Irradiation Softening in Pure Iron Single Crystals // *Phys.stat.sol. (a)*. 1973, 18, p. 699–709.

5. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов. Радиационные повреждения в металлах и сплавах при облучении нейтронами, ионами и электронами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1984, вып. 1 (29), 2(30), с. 46–73.

6. Л.М. Соيفер, М.Г. Буравлева, З.А. Щеголева. Исследование жесткости щелочно-галогидных кристаллов с помощью дислокационных розеток // *УФЖ*. 1971, № 16, с. 1107–1113.

7. А. Формен, М. Мэйкин. Движение дислокаций сквозь хаотические сетки препятствий // *Актуальные вопросы теории дислокаций*. М.: «Мир», 1968, с. 200–215.

8. Ван Бюрен. *Дефекты в кристаллах*. М.: «ИЛ», 1962, 226 с.

9. В.З. Бенгус. Скорость размножения и источники подвижных дислокаций // *Динамика дислокаций*. Киев: «Наукова думка», 1975, с. 315–333.

10. А.А. Предводителев, Н.А. Тяпунина, Г.М. Зиненкова, Г.В. Бушуева. *Физика кристаллов с дефектами*. М.: Изд-во МГУ, 1986, 207 с.

11. Р.И. Гарбер, А.К. Малик, Л.М. Перунина, В.А. Ткаченко, В.А. Стратенко. Влияние облучения электронами с энергией 250 МэВ на плотность и твердость кристаллов фтористого лития // *ФТТ*. 1975, № 17, с. 596–598.

12. Р.И. Гарбер, А.К. Малик. Механические характеристики фтористого лития, облученного высокоэнергетическими электронами // *ФТТ*. 1977, № 19, с. 643–649.

13. Б.И. Смирнов. *Дислокационная структура и упрочнение кристаллов*. Л., 1981, 80 с.

РУХЛИВІСТЬ ДИСЛОКАЦІЙ В КРИСТАЛАХ LiF, ОПРОМІНЕНИХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

А.К. Малик, І.М. Неклюдов

Після опромінення кристалів LiF електронами з енергією 35 та 100 MeV у інтервалі доз $10^9 \dots 10^{14}$ ел/см² виявлена немонотонна залежність рухомості дислокації від дози, яка зв'язана, мабуть, як з концентрацією та потужністю радіаційних дефектів, так і з особливостями процесів подвійного поперечного ковзання.

DISLOCATION MOBILITY IN LiF CRISTALS IRRADIATED BY HIGH-ENERGY ELECTRONS

A.K. Malyk, I.M. Neklyudov

A nonmonotonic dependence of the dislocation mobility on fluence was revealed in LiF crystals irradiated by the electrons with energy 35 and 100 MeV at fluences in interval $10^9 \dots 10^{14}$ el/cm² which, to all appearance, is connected to a concentration and capacity of radiation defects and peculiarities of the doublecross sliding.