

01;05;08;10

ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ И ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

© Ю.В.Мартыненко, П.Г.Московкин

Предложен новый механизм дальнего действия ионной бомбардировки — перенос энергии в виде потенциальной энергии дефектов. Энергия, переданная таким образом на большие расстояния, может либо трансформироваться в энергию упругой волны, которая генерирует вторичные дефекты, либо увеличивать скорость образования дефектов, создавая статические напряжения на границах зерен.

Изменения, происходящие в твердых телах при ионной бомбардировке, наблюдаются на глубинах, превосходящих глубину проникновения ионов часто на несколько порядков. Такие явления, получившие названия эффекта дальнего действия, описаны в обзоре [1]. Наибольших глубин, вплоть до ~ 100 мкм, достигает дислокационная структура, образующаяся при ионном облучении. Распределение плотности возникающих дислокаций имеет два типа, по-видимому, в зависимости от условий облучения и структуры материала. В работах [2,3] наблюдалось распределение плотности дислокаций с максимумом при нескольких мкм, монотонно убывающее при больших глубинах вплоть до глубин ~ 100 мкм, где плотность дислокаций сравнивается с плотностью необлученного образца. В работах [4,5] наблюдалось, помимо общего увеличения числа дислокаций по толщине облученной фольги, скопление дислокаций у поверхностей образца, в том числе и возле необлученной поверхности. В случае облучения стопки из двух фольг дислокации образуются в обеих фольгах также у поверхностей, в том числе у поверхности соприкосновения фольг, если, однако, толщина фольги не превышает 20 мкм.

По-существу, имеется два объяснения образованию дислокаций на больших глубинах. Это — либо перенос дефектов в глубь образца [6,7], либо перенос энергии в виде упругих волн на большие расстояния и последующее образование дислокаций или других дефектов за счет перенесенной туда энергии [8,9].

В работе [7] предложена схема переноса петель дислокаций на большие глубины и образования сетки дислокаций в результате объединения петель. Возможны и другие схемы переноса дефектов, например диффузия междоузельных

атомов и образование из них дислокаций на больших глубинах. Трудностью этого механизма до сих пор считалась невозможность преодоления каким-либо видом дефектов границ зерен. Кроме того, с позиций этого механизма не понятно существование порога энергии бомбардирующей частицы (~ 30 кэВ) и независимость от вида облучения (разные виды ионов и электроны) для глубокого образования дислокаций, что наблюдалось в [10].

Механизм переноса энергии упругими волнами, имея ряд преимуществ, не может объяснить, как расходящаяся волна может сохранить плотность энергии, необходимую для генерации дефектов, на расстояниях 10–100 мкм от источника размером ~ 10 нм. Авторы [10] предполагают, что источниками упругих волн являются некоторые малые локальные области, расположенные вдали от места попадания иона в мишень. Однако остается по-прежнему не понятно, как энергия иона перенесена в такой локальный удаленный источник упругих волн.

Здесь предложен новый механизм образования дефектов на больших глубинах, и в том числе в зернах, граничащих с облучаемыми. Механизм является некоторой комбинацией механизмов, описанных выше. Заметим прежде всего, что дефекты кристалла, как точечные, так и более сложные, например дислокации, имеют значительную потенциальную энергию. Так, типичная энергия междоузельного атома составляет $U_i \approx 5$ эВ, а энергия дислокационной петли радиусом $R = 5$ нм составляет $U_l \approx \mu b^2 R \approx 1$ кэВ (μ — модуль сдвига, b — вектор Бюргерса). Так что перенос дефектов является также и переносом энергии. Кроме того, известно, что при выходе точечного дефекта или петли дислокации на свободную поверхность выделяется энергия, равная энергии аннигиляции дефекта и его изображения [11]. Таким образом, естественно предположить, что энергия, перенесенная на значительные глубины в виде потенциальной энергии дефекта, может трансформироваться у противоположной поверхности образца или у границы зерен в энергию упругой волны, которая способна вызвать образование дефектов у поверхности за счет нетермического процесса. Если поверхность является границей зерен или поверхностью соприкосновения фольг (как в [5]), то образование точечных дефектов в результате их “стряхивания” с поверхности возможно с обеих сторон от поверхности. Это объясняет образование дефектов в зернах, соседних с облучаемыми, а возможно, и в более удаленных зернах, если размеры зерен не велики. Сечение надтермического образования точечного дефекта на поверхности можно оценить как площадь поверхности, где плотность энергии возникающей

волны превышает энергию образования дефекта, деленную на объем дефекта. Такая оценка показывает, что коэффициент воспроизводства дефектов на поверхности близок к единице.

Возможен и другой сценарий образования дефектов, если поверхность не является свободной. В этом случае дефект, прибывающий на поверхность, не исчезает (не аннигилирует со своим изображением), но увеличивает напряжение у границы. Если на поверхности существует напряжение σ , то энергия образования точечного дефекта будет равна

$$U = U_0 \pm \sigma \Omega, \quad (1)$$

где U_0 — энергия образования этого дефекта в ненапряженном кристалле, Ω — объем дефекта. Знак в (1) выбирается в зависимости от знака напряжения и вида дефекта: энергия образования междоузельного атома уменьшается при напряжении сжатия и увеличивается при растягивающем напряжении. Энергия образования вакансии ведет себя противоположным образом.

В результате скорость образования дефектов растет с ростом σ

$$\sim \exp\left(-\frac{U_0 - \sigma \Omega}{T}\right). \quad (2)$$

Очевидно, что при наличии постоянного потока дефектов на поверхность напряжение на ней растет до тех пор, пока скорость испускания дефектов не сравняется с притоком дефектов.

Отметим также, что напряжение экспоненциально спадает при удалении от поверхности. Действительно, границу зерна можно рассматривать как стенку дислокаций [11], а напряжение, создаваемое стенкой дислокаций, убывает при удалении от нее $\sim \exp(-x/d)$, где d — расстояние между дислокациями в стенке [11]. По мере увеличения плотности дефектов на поверхности d стремится к атомному размеру. Следовательно, отталкивающее напряжение не препятствует потоку дефектов на поверхность, вплоть до расстояний порядка атомных, а на таких расстояниях возможна коллективная перестройка атомов у поверхности (типа краудионов), т. е. эффективный захват дефектов поверхностью.

Таким образом, поверхность является источником точечных дефектов, по-видимому преимущественно междоузельных атомов. Это приводит к образованию комплексов дефектов — дислокационных петель, а затем к их росту, объединению и образованию развитой дислокационной структуры вблизи поверхностей, как это наблюдалось в [4,5].

Проблема переноса энергии, сведенная к переносу дефектов, не вызывает трудностей. В работе [7] показано, что дислокационные петли размером ~ 50 нм перемещаются за счет создаваемого ими же поле напряжения на расстояния вплоть до сотен мкм. Возможна также диффузия междоузельных атомов — наиболее подвижных дефектов [6]. Энергия активации миграции междоузельных атомов в металлах составляет ~ 0.1 эВ, а в полупроводниках несколько больше. При комнатной температуре коэффициент диффузии междоузельных атомов $D_i \approx 10^{-4}$ см²/с, т.е. уже через $t = 100$ с междоузельные атомы проникают на глубину $\sim \sqrt{Dt} = 0.1$ см.

Существование энергетического порога эффекта дальнего действия, а также эффект, создаваемый электронным облучением, возможно, действительно объясняются возникновением надравновесных фононов [10], на которые расходуется практически вся энергия бомбардирующей частицы. Однако поскольку длина пробега фононов 10–100 нм, то следует ожидать, что они воздействуют только на облучаемую поверхность и инициируют генерацию точечных дефектов, которые затем мигрируют (возможно, и в виде комплексов — петель дислокаций) к противоположной поверхности и создают там дефектную структуру по описанной выше схеме.

Следует отметить, что число точечных дефектов, необходимых для образования наблюдаемой дислокационной структуры, невелико. Полагая, что дислокации — это встроенные атомные плоскости, созданные из междоузельных атомов, можно оценить концентрацию таких междоузельных атомов: $C_i \approx \rho/a$, где ρ — плотность дислокаций, а a — атомный размер. При $\rho = 10^{10}$ см⁻² и $a = 3 \cdot 10^{-8}$ см $C_i = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Если глубина слоя у поверхности, где образуются дислокации, составляет, как в экспериментах [10], ~ 1 мкм, то число междоузельных атомов на единицу поверхности составляет всего $\sim 3 \cdot 10^{13}$ см⁻², что значительно меньше числа бомбардирующих ионов.

Таким образом, основная идея предлагаемого механизма дальнего действия ионной бомбардировки — это перенос энергии в виде потенциальной энергии дефектов. Энергия, переданная таким образом на большие расстояния, может либо трансформироваться в энергию упругой волны, либо способствовать образованию вторичных дефектов, создавая статические напряжения. Предложенный механизм свободен от внутренних противоречий, характерных для существовавших ранее объяснений эффектов дальнего действия, и способен объяснить все имеющиеся эксперименты по дальнему действию ионной бомбардировки.

Список литературы

- [1] *Мартыненко Ю.В.* // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. Изд. ВИНТИ. 1993. Т. 7. С. 82-112.
- [2] *Шаркеев Ю.П., Пушкарева Г.В., Пауль А.В.* и др. Физика прочности и пластичности металлов и сплавов. Тез. докл. XI Всесоюз. конф. Куйбышев, 1966. С. 325.
- [3] *Диденко А.Н., Козлов Е.В., Шаркеев Ю.П.* и др. Поверхность. Физика, химия, механика. 1989. № 3. С. 132.
- [4] *Павлов П.В., Тетельбаум Д.И.* и др. // Металлы. 1993. № 3. С. 78.
- [5] *Павлов П.В., Тетельбаум Д.И., Курильчик Е.В.* и др. // Высокочистые вещества. 1993. № 4. С. 26.
- [6] *Морозов Н.П., Тетельбаум Д.И.* // ФТП. 1983. Т. 17. № 6. С. 636.
- [7] *Martynenko Yu., Moscovkin P.* // Rad. Eff. & Defects in Solids. 1994. V. 129. P. 193.
- [8] *Zhukov V.P., Ryalenko A.V.* // Rad. Eff. 1984. N 1-2. P. 85.
- [9] *Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И.* // ФТП. 1986. Т. 20. С. 503.
- [10] *Тетельбаум Д.И., Сорвина В.П., Курильчик Е.В., Щербакова И.А., Семин Ю.А.* Материалы XII Междунар. конф. Взаимодействие ионов с поверхностью. М., 1995. Т. 2. С. 164.
- [11] *Косевич А.М.* Дислокации в теории упругости. Киев: Наук. думка, 1978.

Поступило в Редакцию
31 мая 1996 г.