

ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ФРАКТАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Б.Л.Оксенгендлер, Б.Р.Кутлимуротов, С.Е.Максимов, Х.Б.Ашууров

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент; oksengendlerbl@yandex.ru

1. Введение.

В начале XXI века в физике конденсированного состояния произошли существенные изменения: интерес исследователей сместился к изучению объектов, для которых роль структуры оказалась более важной, чем природа их физико-химической связи. С большой степенью общности как для живой, так и для неживой природы выявилось пять типов таких характеристических структурных свойств характеристик: «нано», «фрактальность», «малая размерность», «хиральность», «иерархичность». При этом в науках, связанных с радиационным воздействием, универсальная значимость указанных характеристик проявилась наиболее ярко, чему способствовали характерные для радиации условия сильной неравновесности и нелинейности [1]. Более того, обнаруженная возможность трактовки радиационных процессов (включая, в том числе, ионное распыление) в рамках синергетики [2] на современном этапе позволила как более ранние, так и современные результаты собрать под концепцию complexity [3], что позволило сформулировать 3 парадигмы методологии радиационных эффектов (Рис.1).

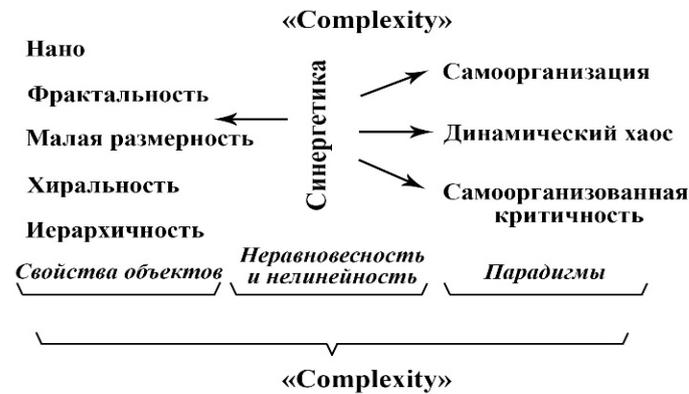


Рис.1. Схема расширенной концепции «Complexity» применительно к радиационным эффектам в сложных средах.

В настоящей работе проявления конкретного эффекта локальной деструкции поверхности и приповерхностных областей неметаллических твёрдых тел при воздействии медленных многозарядных ионов по механизму оже-деструкции («кулоновский взрыв» [4]) рассматриваются с акцентом на комбинацию локальных (структурных) и нелокальных (физико-химических) особенностей облучаемой среды, что наиболее ярко проявляется у пористых объектов.

2. Современные аспекты механизма оже-деструкции твёрдых тел.

Классическая схема реализации кулоновского взрыва через оже-деструкцию при ионном облучении состоит в следующем. Многозарядный ион, оказавшись на малом расстоянии от поверхности, в результате квантового процесса перехватывает электроны из i -оболочки атома облучаемого вещества, образуя i -дырку (сечение σ_i). Последняя распадается, и путём оже-каскада, размножаясь, «всплывает» в валентную оболочку, образованную облучаемым атомом и его окружением (вероятность этого процесса $\alpha_A(Z)$, где Z – заряд). Это крайне нестабильное состояние в твёрдом теле, образованное за краткое время ($\tau_A \approx 10^{-15}$ с) в дальнейшем распадается за время порядка $\tau_r \approx 10^{-14}$ – 10^{-13} с путём разлёта положительных осколков молекулярной системы. Однако, этому разлёту противодействует другой канал дезактивации неустойчивого возбуждённого состояния, а именно – электронное «заливание». В такой конкуренции деструкция локальной области образуется с вероятностью $\chi = \exp(-\tau_+/ \tau_e)$, и именно эта величина регулирует вероятность (сечение) всего процесса кулоновского взрыва. Таким образом, сечение деструкции окончательно определяется в виде

$$\sigma_d = \int_{(Z)} \left\{ \sum_i \sigma_i \tilde{\alpha}_i(Z) \exp(-\tau_+ / \tau_e(Z)) \right\} dZ \approx \sigma_k \cdot \alpha_A \exp(-\tau_+ / \tau_e) \quad (1)$$

Важно, что формула (1) сочетает локальность процесса через σ_i и $\alpha(Z)$ и нелокальность объекта через τ_e . Именно τ_e , отражающее свойства материала, фактически регулирует величину эффекта оже-деструкции.

3. Роль неупорядоченности (фрактальности) структуры объекта в оже-деструкции.

Из формулы (1) видно, что фрактальность среды важна именно для множителя $\exp(-\tau_+ / \tau_e)$, т.е. для τ_e . Для изучения этого аспекта может быть построена модель квазиодномерной цепи (потенциальных ящиков), на которую наложен кулоновский потенциал оже-заряда Z . Схемы этих двух случаев представлены на Рис.2.

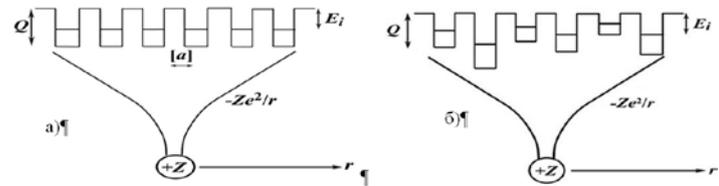


Рис. 2. Схема кулоновского эффекта оже-заряда на электронном потенциальном рельефе строго периодической (а) и в аперодической цепи Андерсона (б).

А) Упорядоченная цепочка. Видно, что потенциал $-Ze^2/r$ снимает все барьеры в области

$$R_{\text{безбар}} \leq \delta \sqrt{Ze^2 / \delta \xi |\epsilon_e|}, \quad (2)$$

где δ – половина ширины барьера, $|\epsilon_e|$ – модуль глубины энергии локализованных электронов в каждой из потенциальных ям, ξ – диэлектрическая проницаемость. В этом случае заливание дырки идёт по типу металла, т.е. $\tau_e \approx 1 / \omega_{pl}$, где ω_{pl} – плазменная частота, и мы имеем $\exp(-\tau_+ / \tau_e) \rightarrow \exp(-\tau_+ \omega_{pl})$.

Б) Неупорядоченная цепочка. Выберем тип неупорядоченности по модели Андерсона [5] (Рис.2б). Очевидно, что $R_{\text{безбар}}$ будет в области, когда снимается максимум барьера, что соответствует максимальной глубине электронных состояний в ямах Андерсона

$$R_{\text{безбар}} \leq Ze^2 / \xi |\epsilon_e^{\text{max}}| \quad (3)$$

причём $R_{\text{безбар}}^{\text{неуп}} < R_{\text{безбар}}^{\text{уп}}$ если $|\epsilon_e^{\text{max}}| > |\epsilon_e|$, и наоборот, $R_{\text{безбар}}^{\text{неуп}} > R_{\text{безбар}}^{\text{уп}}$

если $|\epsilon_e^{\text{max}}| < |\epsilon_e|$. Говоря о физике явления, можно сказать, что если ямы были одинаковы, то движение электрона ускорялось в поле металлизации без потерь когерентности, тогда как в случае неодинаковых ям (например, фрактального типа, что имеет место при взаимодействии ионов с пористыми структурами) теряется когерентность состояния электрона в области металлизации, и его движение замедляется, что немедленно увеличивает χ .

4. Заключение.

Модели (а) и (б) (Рис.2) позволяют оценить величину сечения σ_d для следующих вариантов: 1) квазиодномерный случай $\sigma_d(D_i) < \sigma_d(D_f)$; 2) двумерный случай (поверхность) $\sigma_d(D_i) < \sigma_d(D_f)$; 3) комбинированная поверхность; существенно, что непосредственное применение подобного типа моделирования особенно реально проявляется в пористых средах при ионном облучении. Построенная модель «кулоновского взрыва» по механизму оже-деструкции хорошо иллюстрирует модификацию характерного радиационного процесса дефектообразования для широкого класса сред, являющихся актуальными объектами на сегодняшний день.

[1] B.L.Oksengendler, S.E.Maksimov, N.N.Turaeva, F.G.Djurabekova. //NIMB. 2014. V.326. P.45.

[2] S.E.Maksimov, B.L.Oksengendler, N.Yu.Turaev. //J.Sur.Investig. 2013. V.7, №2. P.333–338.

[3] B.L.Oksengendler, A.F.Zatsepin et al. //J.Sur.Investig. 2022. V.16. No 3.P.364–373.

[4] E.S.Parilis, L.M.Kishinevsky, N.Y.Turaev, B.E.Baklitzky, F.F.Umarov, V.Kh.Verleger, S.L.Nizhnaya, I.S.Bitensky. Atomic collisions on solid surfaces, North-Holland, Amsterdam, 1993, 664 p.

[5] P.W. Anderson. //Phys. Rev. 1958. V.109. P.1492–1505.