

# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

Б.Л.Оксенгендлер<sup>1\*)</sup>, Н.Н.Тураева<sup>1)</sup>, С.Е.Максимов<sup>2)</sup>, С.Х.Сулейманов<sup>1)</sup>, М.Х.Ашуров<sup>3)</sup>, И.Нуриддинов<sup>3)</sup>,  
Н.Н.Никифорова<sup>1)</sup>, Ф.А.Искандарова<sup>4)</sup>, Г.С.Нуждов<sup>2)</sup>, З.И.Каримов<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Институт материаловедения Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан; [oksengendlerbl@vandex.ru](mailto:oksengendlerbl@vandex.ru)

<sup>2)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.У.А.Арифова АН Республики Узбекистан, Ташкент

<sup>3)</sup>Институт Ядерной Физики Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

<sup>4)</sup>Центр развития нанотехнологий при Национальном Университете Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.

Радиационная физика конденсированного состояния (РФКС), имеющая длительную историю [1], выделяет три типа причин, приводящих к радикальным изменениям в этой области [2-5]:

1. Появление новых типов материалов и структур из них.
2. Появление новых типов облучающей радиации.
3. Появление новых концепций (Рис.1), касающихся и физики конденсированного состояния, распространение которой в область радиационной физики представляется крайне актуальным.

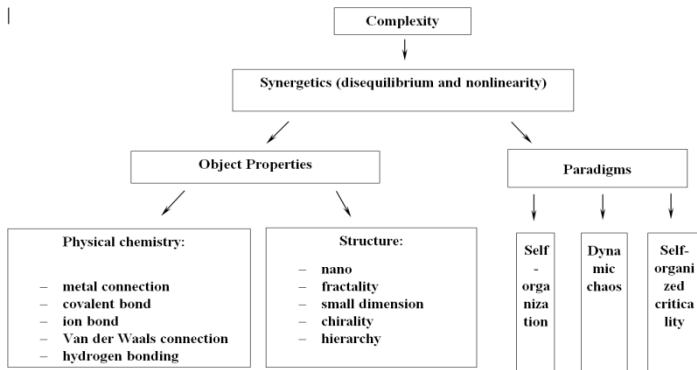


Рис.1. Схема расширенной концепции «Complexity» [5].

Целый ряд особенностей топологических изоляторов (ТИ) весьма новы с точки зрения РФКС: во-первых, все макроэффекты происходят между размерностями 2D<sub>T</sub> и 3D<sub>T</sub> [6]; во-вторых, все положения РФКС, обусловленные безызлучательными переходами [7], совершенно неявным образом протекают в областях майорановой проводимости [8]. Далее, по пп.2,3, основную роль играет радиация, где доминируют электронные потери. При обсуждении механизмов (элементарные акты дефектообразования, радиационно-стимулированная диффузия и квазихимические реакции) интересные результаты даёт спиновая химия [9], базовая позиция которой о сохранении спина оказывается чрезвычайно полезной. Что касается феноменологии, то тут полезной оказывается не стационарная теория Дина, а техника мастер-уравнения, позволяющая охватить и случай облучения особо интенсивной радиацией.

В качестве характерного примера рассмотрим оже-дефектообразование (механизм «кулоновского взрыва» [7,10]), который происходит по схеме: К-ионизация многоэлектронного атома, и образование многозарядного иона Z<sub>A</sub>>>1 через оже-каскад. В дальнейшем этот оже-заряд приводит к деструкции локальной области кристалла за время τ<sub>c</sub> в конкуренции с процессом электронного «заливания» заряженной области за время τ<sub>e</sub>. Теория даёт для сечения оже-деструкции [7]

$$\sigma_d = \sigma_k \alpha_A(Z_A) \exp[-\tau_+/\tau_e] \quad (1)$$

Т.о., процесс регулируется соотношением τ<sub>+</sub>/τ<sub>e</sub>, причём τ<sub>+</sub> ≈ 5\*10<sup>-14</sup> с, а τ<sub>e</sub>, очень сильно зависит от типа облучаемого материала. Значение η = exp[-τ<sub>+</sub>/τ<sub>e</sub>] меняется от близкой к единице до η < 10<sup>-4</sup> для полупроводников и η << 10<sup>-4</sup> для обычных металлов.

Рассмотрим модификацию τ<sub>e</sub>, в случае майрановой плёнки. Ответ оказался нетривиальным: от сложного в случае майрановских фермионов до упрощённого, учитывающего лишь сильное спин-орбитальное взаимодействие, понижающего эффективную долю «заливающих» электронов. Таким образом было показано, что τ<sub>e</sub> = const/n<sub>eff</sub><sup>β</sup>, где β – целое число, а n<sub>eff</sub> – эффективная концентрация майрановских электронов, соответственно, зависящая от свойств инвертированных зон.

Оценки дают, что τ<sub>+/τ<sub>e</sub> > τ<sub>+/τ<sub>e</sub><sup>i</sup>, где i – обычный полупроводник, т.к. exp[-τ<sub>+/τ<sub>e</sub>] > exp[-τ<sub>+/τ<sub>e</sub><sup>i</sup>], т.е. σ<sub>d</sub><sup>TI</sup> < σ<sub>d</sub><sup>i</sup> (Рис.2). Интересно, что и</sub></sub></sub></sub>

для других типов подпороговых эффектов наблюдается подобная зависимость; так, вероятность электронно-стимулированных атомных перестроек (ЭСАП) в случае ТИ также меньше (Рис.2).

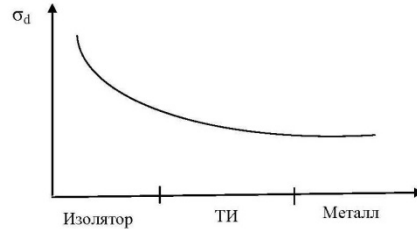


Рис.2. Обобщённая зависимость вероятности ЭСАП в различных материалах.

Рассмотренная в работе проблема имеет целый ряд и других важных аспектов. В частности, анализ показал, что регулирующий экспонента весьма зависима от размерности (Рис.3) [11], а также от локальной и нелокальной неупорядоченности (Рис.4) [4,11].

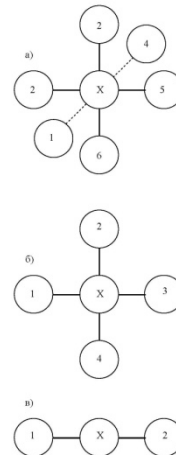


Рис.3. Атомные структуры с различной топологической размерностью:

- а) трехмерная структура;
- б) двумерная;
- в) одномерная.

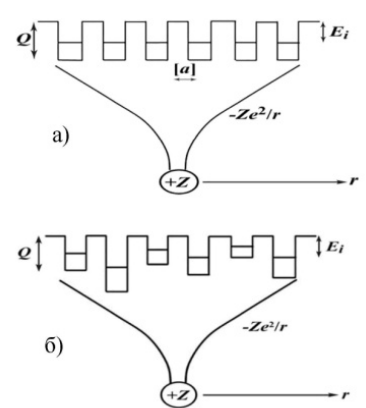


Рис.4. Схема наложения кулоновского поля Оже-заряда на потенциальный рельеф электронов в случае строго периодического рельефа электронного потенциала (а), и в случае аперодической цепи Андерсона (б).

[1] Grove W.R. //Trans. Roy. Soc. London. 1852. V.142. P.87.  
 [2] S.E.Maksimov, B.L.Oksengendler, N.Yu.Turaev. //J.Sur. Invest. 2013. V.7. №2. P.333–338.  
 [3] B.L.Oksengendler, N.N.Turaeva, et al. Nanofractals, Their Properties and Applications. /in: «Horizons in World Physics». Edit by Albert Reimer. New York: Nova Science Publishers Inc. 2019. Vol.292. P.1-35.  
 [4] B.L.Oksengendler, A.Kh.Ashirmetov et al. // NIMB. 2022. V.512. P.66–75.  
 [5] B.L.Oksengendler, A.F.Zatsepin et al. //J.Sur. Invest. 2022. V.16. No3. P.364–373  
 [6] X.Б.Ашуров, В.Н.Арустамов, М.В.Кремюв, С.Е.Максимов, Б.Л.Оксенгендлер. //ДАН РУз 2021. №4. С.13-20.  
 [7] Б.Л.Оксенгендлер, Н.Н.Тураева. Радиационная физика конденсированных сред. Концепции, Т. 1, Ташкент «Фан», 2006. 136 с..  
 [8] Xiao-Liang Qi, Shjn-Cheng Zhang. //Rev.Mod.Phys. 2011. V.83. P.1058-1110.  
 [9] Салихов. К.М. 10 лекций по спиновой химии. Казань: УНИПРЕСС. 2000. 152 с.  
 [10] E.S.Parilis, L.M.Kishinevsky, N.Y.Turaev, B.E.Baklitzy, F.F.Umarov, V.Kh.Verleger, S.L.Nizhnaya, I.S.Bitensky. Atomic collisions on solid surfaces, North-Holland, Amsterdam, 1993, 664 p.  
 [11] Н.Н.Никифорова, Б.Л.Оксенгендлер, и др. //В кн.: «Труды XXVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2023, Ярославль, Россия, 21-25 августа 2023 г.» - Т.1. - С. 76-79.