

9. Набережнов, А.А. Влияние ограниченной геометрии на структуру и фазовые переходы в наночастицах нитрата калия / А.А. Набережнов, П.Ю. Ванина, А.А. Сысоева, А. Cizman, E. Rysiakiewicz-Pasek, A. Hoser // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, № 3. – С. 439.
10. Martin, Ch.R. Nanomaterials: A Membrane-Based Synthetic Approach // Science. – 1994. – V. 266. – P. 1961.
11. Steinhart, M.M. Direct Synthesis of Mesoporous Carbon Microwires and Nanowires / Steinhart, Ch. Liang, G.W. Lynn, U. Gsele, Sh. Dai // Chem. Mater. – 2007. – V. 19. – P. 2383.
12. Nimmo, J.K. The crystal structures of γ - and β -KNO₃ and the $\alpha \leftarrow \gamma \leftarrow \beta$ phase transformations / J.K. Nimmo, B. W. Lucas // Acta Cryst. B. – 1976. – V. 32, № 7. – P. 1968.
13. Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс // пер. с англ.; под ред. В.В. Леманова, Г.А. Смоленского. – М.: Мир, 1981. – 736 с.
14. Christensen, A. Phase Transition of KNO₃ Monitored by Synchrotron X-ray Powder Diffraction / A. Christensen, P. Norby, J.C. Hanson, S. Shimada // J. Appl. Cryst. – 1996. – V. 29. – P. 265.
15. Xu, K. Temperature-dependent Raman spectra of mixed crystals of evidence for limited NaNO₃-KNO₃ Solid Solutions / K. Xu, Y. Chen // J. Raman Spectrosc. – 1999. – V. 30, № 3. – P. 173.
16. Milinskiy, A.Y. Phase Transitions in Nanocomposites Obtained by Introducing KNO₃ into the Pores of Nanosized Al₂O₃ Films / A.Y. Milinskiy, S.V. Baryshnikov // Nanoscience & Nanotechnology-Asia. – 2019. – V. 9. – P. 128. – <https://doi.org/10.2174/2210681208666180403112631>

УДК 538.958

И.В. Верхотурова, В.В. Нецименко

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА МИКРОПОРОШКИ ОКСИДА ЦИНКА

В данной работе представлены результаты исследования спектров диффузного отражения оксида цинка, облученного последовательно и одновременно одинаковыми по энергии, но разными по типу заряженными частицами. Показано, что в облученных микропорошках оксида цинка с наибольшей концентрацией образуются дефекты в катионной подрешетке цинка по сравнению с дефектами анионной кислородной подрешетки.

Ключевые слова: пигменты терморегулирующих покрытий, облучение, протоны, электроны, центры поглощения.

RESEARCH OF JOINT ACTION OF CHARGED PARTICLES ON ZINC OXIDE MICROPOWDERS

This paper presents the results of a study of diffuse reflectance spectra of zinc oxide irradiated sequentially and simultaneously at the same energy but different type of charged particles. It has been shown that in irradiated zinc oxide micropowders with the highest concentration defects are formed in the cationic zinc sublattice as compared with defects in the anionic oxygen sublattice.

Key words: pigments of temperature-controlled coatings, irradiation, protons, electrons, absorption centers.

DOI: 10/22250/jasu.11

В пигментах терморегулирующих покрытий на основе оксида цинка при длительном воздействии заряженных частиц космического пространства образуются радиационные дефекты, что негативно сказывается на оптических свойствах оксида цинка – уменьшается его отражательная способ-

ность в ультрафиолетовой и видимой области спектра [1-6]. В работах [2, 4-6] при исследовании оптических свойств оксидных материалов пигментов терморегулирующих покрытий указывается на возникновение эффектов неаддитивности наблюдаемых в спектрах наведенного поглощения при совместном действии одинаковых по энергии, но разных по типу заряженных частиц. Исследование совместного действия заряженных частиц на оксидные материалы пигментов необходимо для установления причин эффекта неаддитивности и выявления оптимальных условий с целью проведения ускоренных испытаний деградации оптических свойств материалов пигментов [2, 3].

В настоящей работе приведены результаты исследования спектров диффузного отражения микророшков оксида цинка (высокой степени чистоты, со структурой вюрцита), облученного одинаковыми по энергии, но разными по типу заряженными частицами (протонами и электронами), при разных режимах.

Облучение и регистрация спектров диффузного отражения абсолютным методом (*in situ*) микророшков оксида цинка проводились в комплексном имитаторе факторов космического пространства (Харбинский политехнический университет, Китай) при следующих режимах: отдельно протонами; отдельно электронами; одновременно протонами и электронами; последовательно – сначала электронами, затем протонами; последовательно – сначала протонами, затем электронами. Параметры потока ионизирующего излучения следующие: протоны с энергией 100 кэВ, флюенсом $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при плотности потока $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; электроны с энергией 100 кэВ, флюенсом $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при плотности потока $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 1 приведены разностные спектры диффузного отражения оксида цинка после облучения ионизирующим излучением при различных режимах, разложенные на индивидуальные полосы.

Разложение разностных спектров осуществлялось исходя из значений энергий максимумов полос поглощения радиационных центров поглощения оксида цинка, установленных авторами работ [2, 7-9] методами химического анализа, электронного парамагнитного резонанса, оптического возбуждения, а также методом функционала плотности в локальном приближении.

При совместном облучении одинаковыми по энергии, но разными по типу заряженными частицами в спектрах диффузного отражения оксида цинка образуется интегральная полоса поглощения высокой интенсивности в видимой области спектра (рис. 1, в, г, д), аналогичная полосе, образующейся при облучении только протонами (рис. 1, а).

При облучении только электронами (рис. 1, б) регистрируемый спектр поглощения располагается в том же диапазоне, что и при других режимах облучения, но имеет меньшую интенсивность. В ближней ИК области интенсивность полос незначительна, за исключением спектра оксида цинка, облученного только электронами.

Разложение спектров на индивидуальные полосы поглощения и расчет концентрации радиационных центров поглощения показали, что с наибольшей концентрацией при облучении микророшков оксида цинка образуются следующие дефекты: вакансии цинка V_{Zn}^{2-} (полоса 3,05 эВ), $V_{Zn}^- - Zn_i^+$ (2,95 эВ); междоузельные ионы цинка Zn_i^{2+} (3,15 эВ), Zn_i^+ (2,80 эВ). С наименьшей концентрацией образуются дефекты: кислородные вакансии V_O^{2+} (2,67 эВ), V_O^+ (2,45 эВ) и акцепторно-донорная пара $V_{Zn}^{2-} - Zn_i^+$ (2,56 эВ).

Таким образом, при воздействии на оксид цинка одинаковых по энергии, но разных по типу заряженных частиц (вне зависимости от режима облучения) наибольший вклад в изменение оптических свойств порошков оксида цинка вносят именно образующиеся радиационные дефекты в катионной подрешетке цинка по сравнению с дефектами анионной кислородной подрешетки.

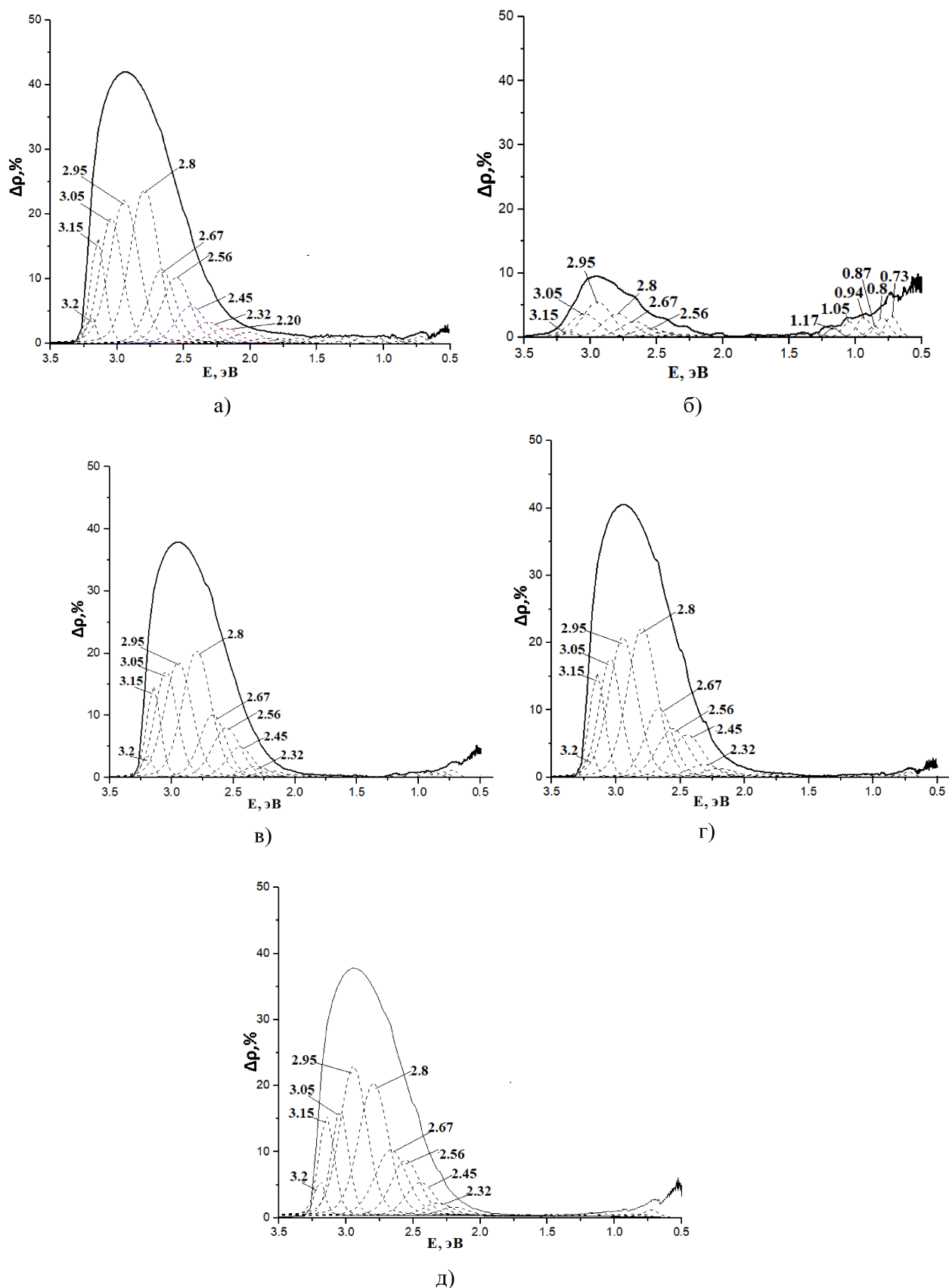


Рис. 1. Разностные спектры диффузного отражения оксида цинка, разложенные на индивидуальные полосы: а) – облучение отдельно протонами; б) – облучение отдельно электронами; в) – облучение одновременно протонами и электронами; г) – облучение последовательно – сначала электронами, затем протонами; д) – облучение последовательно – сначала протонами, затем электронами.

Из вышеперечисленных наведенных центров поглощения катионной подрешетки наименьшая концентрация центров поглощения по сравнению с другими режимами облучения наблюдается после облучения оксида цинка только электронами. Это обусловлено в основном изменением зарядового состояния вакансий цинка и междоузельных ионов цинка, являющихся основными собственными дефектами. С максимальной же концентрацией дефекты катионной подрешетки образуются при облучении оксида цинка только протонами. Совместное воздействие двух типов частиц (независимо от режима облучения) приводит к уменьшению концентрации дефектов катионной подрешетки, за исключением междоузельного цинка Zn_i^+ (полоса 2,80 эВ). Концентрация данного наведенного центра поглощения при последовательном облучении сначала протонами, затем электронами также уменьшается, но концентрация вакансии цинка V_{Zn}^- (2,95 эВ) возрастает. Для объяснения этого необходимы дальнейшие исследования совместного действия заряженных частиц на оксидные материалы пигментов.

1. Новиков, Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. – М.: Университетская книга, 2010. – 192 с.
2. Нешименко, В.В. Структура, свойства и радиационная стойкость оксидных микро- и нанопорошков и отражающих покрытий, изготовленных на их основе: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2016. – 273 с.
3. Семкин, Н.Д. Испытания материалов и элементов электронного оборудования космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самарского гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 320 с.
4. Владимиров, В.М. Влияние электромагнитного излучения и потоков электронов на оптические свойства порошков белых пигментов, люминофоров и силикатных материалов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2003.
5. Михайлов, М.М., Шарафутдинова, В.В. Изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий космических летательных аппаратов под действием протонов солнечного ветра // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 6. – С. 83-88.
6. Лапин, А.Н. Влияние модифицирования наночастицами на оптические свойства и радиационную стойкость отражающих микропорошков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010.
7. Kohan, A.F., Morgan, D., Van de Walle, C.G. First-principles study of native point defects in ZnO // Phys. Rev. B. – 2000. – V. 61, № 22 – P. 15019-15027.
8. Van de Walle, C.G. Defect analysis and engineering in ZnO // Physica B. – 2001. – V. 308-310. – P. 899-903.
9. Врубель, И.И. Моделирование электронной структуры ZnO из первых принципов с использованием модифицированных функционалов/ И.И. Врубель, Н.Ю. Сенкевич, О.Б. Прищепёнок и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 458-464.