

УДК 538.958

**Верхотурова Ирина Владимировна**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

*E-mail:* [rusia@mail.ru](mailto:rusia@mail.ru)

**Нещименко Виталий Владимирович**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

*E-mail:* [vltaly@mail.ru](mailto:vltaly@mail.ru)

**Verkhoturova Irina Vladimirovna**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

*E-mail:* [rusia@mail.ru](mailto:rusia@mail.ru)

**Neshchimenko Vitaliy Vladimirovich**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

*E-mail:* [vltaly@mail.ru](mailto:vltaly@mail.ru)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАВЕДЕННЫХ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ОКСИДА ЦИНКА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ, ЭЛЕКТРОНАМИ И КВАНТАМИ СВЕТА

## COMPARATIVE ANALYSIS OF INDUCED ABSORPTION SPECTRA OF ZINC OXIDE UNDER IRRADIATION WITH PROTONS, ELECTRONS, AND LIGHT QUANTA

*Аннотация.* В настоящей работе приведены результаты исследования спектров диффузного отражения микропорошков ZnO до и после облучения электромагнитным излучением Солнца, при различном времени воздействия. Проведено сравнение полученных спектров со спектрами ZnO, облученного протонами и электронами энергией 100 кэВ.

*Abstract.* This paper presents the results of studying the diffuse reflection spectra of ZnO micropowders before and after irradiation with solar electromagnetic radiation at different exposure times. The obtained spectra are compared with the spectra of ZnO irradiated with protons and electrons with an energy of 100 keV.

*Ключевые слова:* оксид цинка, облучение, электромагнитное излучение Солнца, протоны, электроны, центры поглощения.

*Key words:* zinc oxide, irradiation, solar electromagnetic radiation, protons, electrons, absorption centers.

DOI: 10.22250/20730268\_2023\_101\_70

Для области космического материаловедения актуальны исследования изменения свойств материалов, находящихся на внешней поверхности космических аппаратов, под действием факторов космического пространства. В частности, важными являются исследования изменения оптических свойств белых оксидных пигментов терморегулирующих покрытий, происходящие под действием

облучения протонов, электронов и электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца. Порошки оксида цинка, обладающие высокой фото- и радиационной стойкостью, имеют широкое применение среди белых оксидных пигментов. Однако и у них при длительных сроках воздействия излучений КП происходит значительное изменение оптических свойств, вызванное образованием достаточно большого количества центров поглощения [1 – 3].

В ранних работах [4, 5] проведено изучение как отдельного, так и комплексного воздействия протонов и электронов энергией 100 кэВ на микропорошки ZnO. По результатам [2, 4, 5] установлено, что при отдельном облучении ионизирующими частицами одинаковой энергией наибольшее изменение величины  $\Delta\alpha_s$  микропорошков ZnO наблюдается при облучении только протонами. В работе [4] также было установлено, что присутствие потока электронов при комбинированном режиме облучения протонами и электронами вызывает снижение величины  $\Delta\alpha_s$  по сравнению с полученной при облучении только протонами.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца на микропорошки ZnO. Облучение микропорошков ZnO осуществлялось в имитаторе факторов космического пространства «Спектр-1» с оптической системой измерения спектров диффузного отражения в вакууме (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники). В качестве источника электромагнитного излучения, имитирующего солнечное излучение в диапазоне от 0,2 до 2,1 мкм, использовалась ксеноновая дуговая лампа ДКСР-3000. Облучение микропорошков проводилось при 1 эс в течение 2, 5, 10 и 15 часов. Регистрация спектров диффузного отражения  $\rho_\lambda$  микропорошков ZnO до и после действия ЭМИ проводилась абсолютным методом (*in situ*) также в камере «Спектр-1».

Представление спектров диффузного отражения оксида цинка в виде функции  $\rho_\lambda(\%) = f(\lambda)$ , их дальнейшая обработка, получение разностных спектров в виде  $\Delta\rho_E(\%) = f(E, \text{эВ})$  осуществлялось в программном пакете OriginLab. Коррекция базовой линии исследуемых спектров проведена степенной зависимостью, которую вычитали из экспериментальных спектров исследуемых образцов. Цель коррекции – устранение полос поглощения свободных электронов в ближней ИК области.

На рис. 1 приведены полученные разностные спектры диффузного отражения (наведенные спектры поглощения) микропорошков оксида цинка после облучения ЭМИ при разном времени воздействия.

В наведенных ЭМИ Солнца спектрах микропорошков ZnO наблюдается возрастание интенсивности полосы поглощения, схожей с поглощением, наблюдаемым в спектрах после облучения протонами и электронами энергией 100 кэВ [4, 5] (рис. 2).

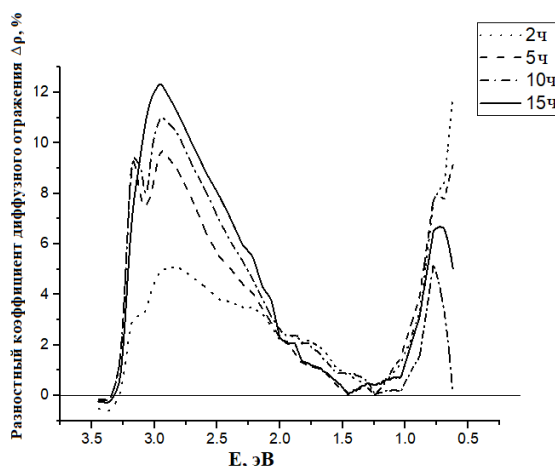


Рис. 1. Спектры поглощения микропорошков ZnO, наведенные ЭМИ при разном времени воздействия.

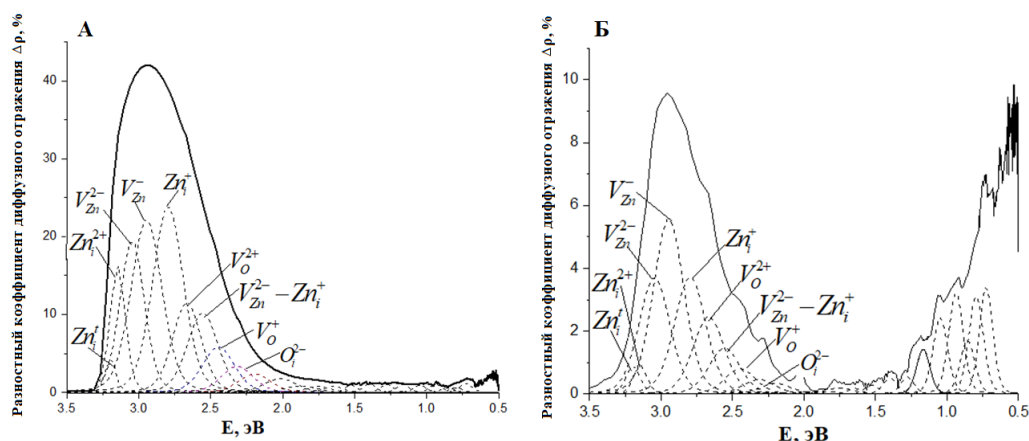


Рис. 2. Наведенные спектры оксида цинка, облученного протонами (А) и электронами (Б), разложенные на индивидуальные полосы.

Но в отличие от спектров микропорошков ZnO после облучения протонами и электронами, помимо основного максимума на 2.95 эВ интегральной полосы поглощения, в спектрах после облучения ЭМИ наблюдается еще один максимум на 3.15 эВ. При минимальном времени облучения данный пик проявляется нечетко, при увеличении времени воздействия до 10 часов он становится более выраженным, а при 15 часах облучения исчезает, остается только пик с максимумом на 2.9 эВ. Также в спектрах образцов ZnO после облучения ЭМИ Солнца отмечается поглощение в ближней ИК-области спектра, схожее с поглощением, наблюдаемым после облучения электронами. Поглощение в данной области спектра, согласно данным работы [2], может быть обусловлено поглощением различных мод ОН-групп, молекулами кислорода и водорода, адсорбировавшимися на поверхности, или катионными вакансиями, захватившими водород.

Для объяснения полученных наведенных ЭМИ Солнца спектров поглощения оксида цинка проведено их разложение на индивидуальные полосы. Разложение спектров проводилось в программе XPSPeak. При разложении использовали известные значения положений основных максимумов полос поглощения наведенных дефектов в оксиде цинка, представленных в работе [2]. Соблюдались также следующие условия: функция, описывающая индивидуальную полосу поглощения, – комбинационная, состоящая из 80% зависимости Гаусса и 20% зависимости Лоренца; полосы поглощения не должны быть вложенными друг в друга; должен быть минимум дисперсии между полученным интегральным спектром элементарных полос и разлагаемым спектром наведенного поглощения.

На рис. 3 представлен результат разложения на индивидуальные полосы наведенных спектров ZnO после различного по времени воздействия ЭМИ. Результат разложения показал, что после облучения оксида цинка ЭМИ, как и после облучения протонами и электронами, основной вклад в образование интегральной полосы поглощения в УФ-, видимой и ближней ИК-области спектра, вносят центры поглощения, образующиеся в катионной подрешетке оксида цинка (вакансии цинка  $V_{Zn}^{2-}$  и  $V_{Zn}^-$ , междоузельные ионы цинка  $Zn_i^{2+}$  и  $Zn_i^+$ ). Полосы поглощения в диапазоне от 2.25 до 1.25 эВ, характерные для дефектов анионной подрешетки ( $O_i^{2-}$ ,  $O_i^-$ ,  $V_O^{2+}$ ,  $V_O^+$ ) и акцепторно-донорных пар ( $V_{Zn}^{2-} - Zn_i^+$ ,  $O_i^{2-} - V_O^{2+}$ ), имеют интенсивность свыше 1 %, в отличие от полос поглощения в этом же диапазоне в спектрах оксида цинка, облученного протонами и электронами (рис. 2).

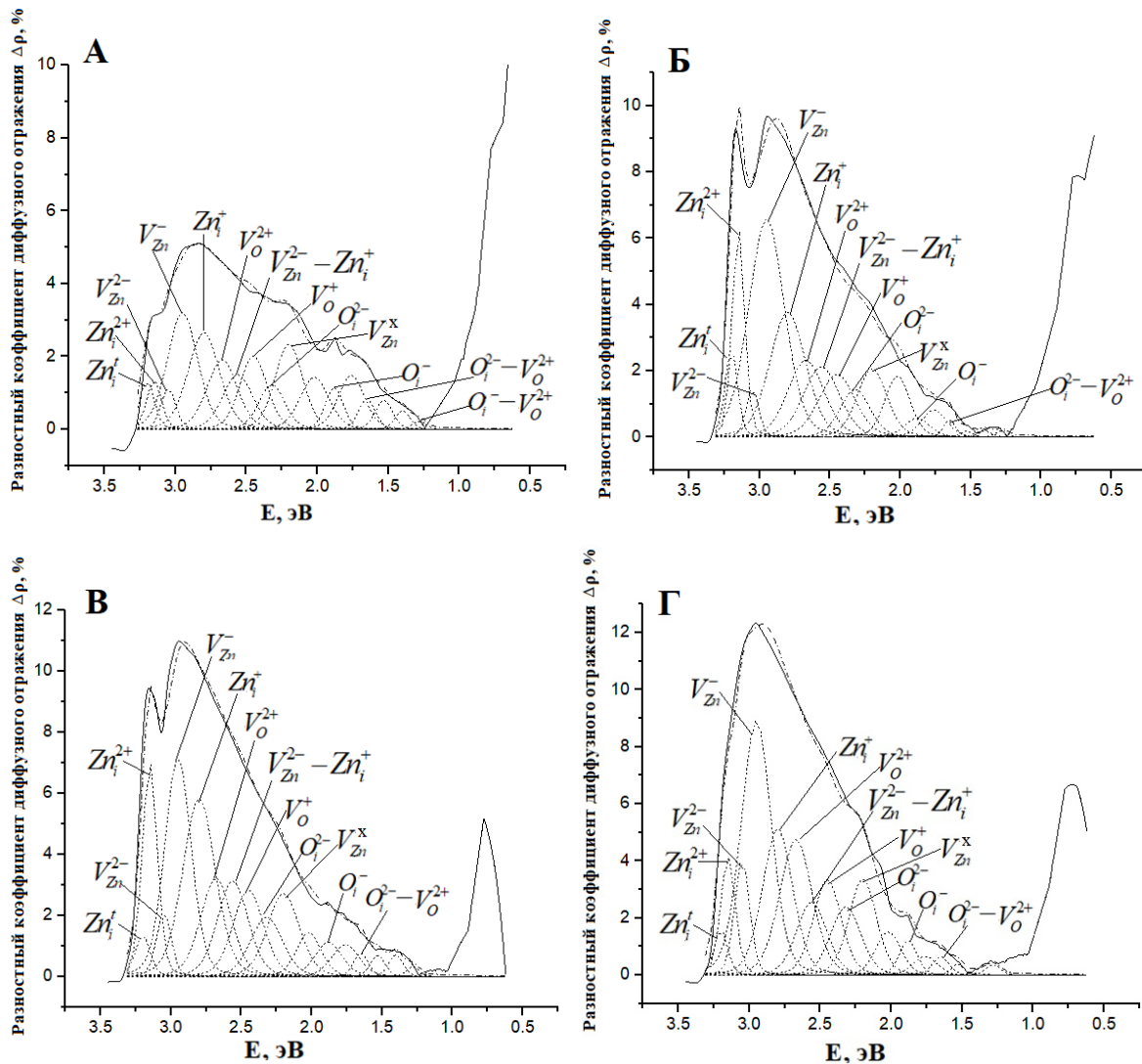


Рис. 3. Разложенные на индивидуальные полосы наведенные спектры ZnO после различного по времени воздействия ЭМИ: А – 2 часа, Б – 5 часов, В – 10 часов, Г – 15 часов.

По полученному разложению видно, что при двухчасовом воздействии ЭМИ на оксид цинка вклад полос поглощения дефектов катионной и анионной подрешеток в формирование интегральной полосы поглощения примерно одинаков. Незначительно при этом преобладают полосы дефектов катионной подрешетки. При увеличении времени воздействия ЭМИ до пяти и десяти часов по спектрам можно наблюдать значительное возрастание вклада полос дефектов  $V_{Zn}^-$ ,  $Zn_i^+$  и  $Zn_i^{2+}$  в интегральную полосу поглощения. Причем интенсивность полосы поглощения последнего возрастает настолько, что приводит к формированию второго максимума на 3.15 эВ в интегральной полосе поглощения. Однако уже при времени воздействия ЭМИ 15 часов интенсивность полосы поглощения данного дефекта уменьшается настолько, что второй максимум исчезает.

Объяснить описанное выше поведение полос поглощения можно механизмами дефектообразования в микропорошках оксида цинка при воздействии на него ЭМИ Солнца. Предположительно, механизмы дефектообразования частично будут схожими по схемам с дефектообразованием, происходящим в оксиде цинка при облучении электронами.

Таким образом, проведенные исследования показали некоторую схожесть в изменении отражательной способности микропорошков оксида цинка при воздействии на них протонов и электронов одинаковой энергией, а также ЭМИ Солнца. Схожесть объясняется тем, что при воздействии трех разных видов излучений основной вклад в формирование интегральной полосы поглощения, ответственной за деградацию оптических свойств оксида цинка, дают дефекты катионной подрешетки  $V_{Zn}^-$ ,  $Zn_i^+$  и  $Zn_i^{2+}$ . Это может быть связано с тем, что именно эти катионные подрешетки преобладают среди собственных дефектов оксида цинка.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).*

- 
1. Семкин, Н.Д. Испытания материалов и элементов электронного оборудования космических аппаратов: учеб. Пособие./– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 320 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: 01.04.07 / В.В. Нешименко; ФГБОУ ВО ТУСУР. – Томск, 2016. – 273 с.
  3. Михайлов, М.М., , В.В. Изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий космических летательных аппаратов под действием протонов солнечного ветра // Известия Ввузов. «Физика». – 1998. – №6. – С. 83-88.
  4. Верхотурова, И.В. Влияние последовательного и одновременного облучения протонами и электронами на образование радиационных дефектов в оксиде цинка / И.В. Верхотурова, В.Ю. Юрина, В.В. Нешименко, Ли Чундун // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы XVIII региональной научной конференции, Хабаровск, 10–12 ноября 2020 г. / под ред. А. И. Мазура и К. А. Драчева. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. – С. 109-112 .
  5. Верхотурова, И.В. Исследование комплексного воздействия заряженных частиц на микропорошки оксида цинка / И.В. Верхотурова, В.В. Нешименко, В.Ю. Юрина, А.И. Бурова // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – 2022. – Вып. 97.– С. 28-34.