

# ТЕРМОАКТИВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ Pb – WO<sub>3</sub>

Э.П. Суровой, С.В. Бин

*Методами оптической спектроскопии, микроскопии, гравиметрии, исследованы превращения в наноразмерных системах Pb-WO<sub>3</sub> в зависимости от толщины пленок Pb и WO<sub>3</sub>, температуры и времени термообработки. Измерена контактная разность потенциалов для пленок Pb, WO<sub>3</sub> и фото-ЭДС систем Pb-WO<sub>3</sub>. Построена диаграмма энергетических зон систем Pb-WO<sub>3</sub>. Предложена модель термического превращения пленок WO<sub>3</sub> в системах Pb-WO<sub>3</sub>, включающая перераспределение на контакте равновесных носителей заряда, формирование в процессе приготовления пленки WO<sub>3</sub> центра  $([V_a]^{++} e)$ , преобразование его при создании систем Pb-WO<sub>3</sub> в центр  $([e (V_a)^{++} e])$ , термическую ионизацию центра  $([e (V_a)^{++} e])$ .*

*Ключевые слова: оптические свойства, термопревращения, наноразмерные пленки, системы, свинец, оксид вольфрама (VI).*

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей процессов, протекающих в гетерогенных системах под действием различных энергетических факторов, представляют для физики и химии твердого тела многосторонний интерес [1-3]. Постановка подобных исследований с гетерогенными наноразмерными системами, наряду с их технической актуальностью [1, 2, 4], может быть полезным инструментом для выяснения механизма процессов превращений в твердых телах [3]. Оксид вольфрама (VI) используют как исходный материал для получения вольфрама, его сплавов и других соединений. Его применяют в качестве катализатора при переработке нефти (крекинг, гидрогенизация), как составную часть керамических глин, глазурей, эмалей, красителей. Устройства на основе оксида вольфрама (VI) могут быть рекомендованы к использованию в качестве электрохромных и фотохромных дисплеев, светоперераспределяющих фильтров или электрохромных зеркал [6-9, 11, 12], сенсоров для контроля содержания газов в атмосфере [10, 15]. Свинец в качестве конструкционного материала применяется в целях радиационной защиты, для изготовления обечаек и плакирующих покрытий химических аппаратов, защитных покрытий кабелей и электродов аккумуляторов [16]. Однако свинец в атмосферных условиях термодинамически неустойчив [17]. Упругость диссоциации оксида свинца (II) при  $T \geq 423$  К достаточно низка ( $\sim 3,1 \cdot 10^{-36}$  кПа) и поэтому при контакте с окружающей средой свинец подвергается атмосферной коррозии [17, 19]. Оксид свинца применяют в производстве стекол с высоким показателем преломления, а тонкие свинцовые слои, «просветленные»

оксидом, могут применяться для изготовления теплоотражающих покрытий [18].

Отмеченная практическая ценность, а также отсутствие к настоящему времени информации о систематических исследованиях влияния размерных эффектов на термостимулированные процессы в гетерогенных системах Pb-WO<sub>3</sub> ставят правомерной и своевременной задачу комплексного исследования свойств индивидуальных и двухслойных наноразмерных слоев оксида вольфрама (VI) и свинца.

В настоящей работе представлены результаты цикла исследований, направленного на выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих в условиях атмосферы в индивидуальных и двухслойных наноразмерных слоях оксида вольфрама (VI) и свинца различной толщины в зависимости от температуры и времени термообработки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы для исследований готовили методом термического испарения в вакууме ( $2 \cdot 10^{-3}$  Па) путем нанесения тонких слоев Pb (5-135 нм) и WO<sub>3</sub> (2-160 нм) на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост «ВУП-5М». Двухслойные системы Pb-WO<sub>3</sub> готовили путем последовательного нанесения слоев WO<sub>3</sub> на слои Pb (предварительно нанесенные на очищенные подложки [3, 14]). Толщину пленок WO<sub>3</sub> и Pb определяли спектрофотометрическим, эллипсометрическим (лазерный эллипсометр «ЛЭФ-3М»), микроскопическим (интерференционный микроскоп «МИИ-4») и гравиметрическим (кварцевый резонатор) методами [3, 14]. Образцы подвергали термической обработке в сушильном шкафу «Memmert BE 300» в интервале температур 423-573 К. При этом образ-

цы помещали на разогретую до соответствующей температуры фарфоровую пластину и подвергали термической обработке в течение 1-90 мин. в атмосферных условиях. Регистрацию эффектов до и после термической обработки исследуемых образцов осуществляли гравиметрическим, микроскопическим и спектрофотометрическим (в диапазоне длин волн 190-1100 нм, используя спектрофотометр «Shimadzu UV-1700») методами. Измерения фото-ЭДС ( $U_{\phi}$ ) проводили на высоковакуумном экспериментальном комплексе, включающем электрометрический вольтметр В7-30 [20]. В качестве источников излучения применяли ртутную (ДРТ-250) и ксеноновую (ДКсШ-1000) лампы. Для выделения требуемого участка спектра использовали монохроматоры МДР-2 и SPM-2, светофильтры. Контактную разность потенциалов (КРП) между пленками свинца, оксида вольфрама (VI) и электродом сравнения из платины измеряли, используя модифицированный метод Кельвина [21].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате систематических исследований оптических свойств наноразмерных пленок WO<sub>3</sub>, Pb и двухслойных систем Pb-WO<sub>3</sub> проведенных в настоящей работе и ранее [14, 19] было установлено, что спектры поглощения образцов до термической обработки в значительной степени зависят от толщины каждого из слоев WO<sub>3</sub> и Pb. При этом на спектрах поглощения систем Pb-WO<sub>3</sub> проявляются полосы поглощения индивидуальных пленок WO<sub>3</sub> и Pb. В длинноволновой области спектра  $\lambda = 500-1100$  нм в большей степени проявляются полосы поглощения пленок свинца. Спектры поглощения систем Pb-WO<sub>3</sub> в коротковолновой области спектра ( $\lambda = 300-500$  нм) по мере уменьшения толщины пленок свинца в значительной степени определяются поглощением пленок WO<sub>3</sub>. По мере увеличения толщины пленок свинца, при постоянной толщине пленок WO<sub>3</sub>, наблюдается увеличение оптической плотности систем Pb-WO<sub>3</sub> в диапазоне  $\lambda = 300-1100$  нм. При увеличении толщины пленок WO<sub>3</sub>, при постоянной толщине пленок свинца, оптическая плотность систем Pb-WO<sub>3</sub> также возрастает, однако, при этом в большей степени проявляется полоса поглощения в коротковолновой области спектра ( $\lambda = 300-400$  нм).

При анализе спектров зеркального отражения было установлено, что отражательная способность систем Pb-WO<sub>3</sub> также зависит от толщины пленок свинца и оксида вольфрама

(VI). По мере увеличения толщины пленок WO<sub>3</sub> (при постоянной толщине пленок свинца) отражательная способность системы Pb-WO<sub>3</sub> в диапазоне  $\lambda = 260-400$  нм возрастает, а в диапазоне  $\lambda = 400-1100$  нм уменьшается. По мере увеличения толщины пленок свинца (при постоянной толщине пленок WO<sub>3</sub>) наблюдается увеличение отражательной способности системы Pb-WO<sub>3</sub> во всем исследованном диапазоне длин волн ( $\lambda = 190-1100$  нм). При последовательном уменьшении толщины пленок WO<sub>3</sub> (в диапазоне  $d=140-10$  нм) и постоянной толщине пленок Pb (в диапазоне  $d=20-30$  нм) обнаруживается «эффект просветления» - отражательная способность стеклянной подложки уменьшается практически до нулевого значения при определенных длинах волн в диапазоне  $\lambda = 700-300$  нм.

Для выяснения возможного взаимодействия между пленками свинца и оксида вольфрама (VI) в процессе приготовления систем Pb-WO<sub>3</sub> были сопоставлены экспериментальные спектры поглощения систем с рассчитанными спектрами поглощения, полученными суммированием при каждой длине волны значений оптической плотности индивидуальных пленок WO<sub>3</sub> и Pb аналогичной толщины. Рассчитанные и экспериментальные спектры поглощения всех исследованных систем Pb-WO<sub>3</sub> не совпадают. На рис. 1 в качестве примера приведены экспериментальные спектры поглощения пленок WO<sub>3</sub>, Pb, системы Pb-WO<sub>3</sub> и рассчитанный спектр поглощения системы Pb-WO<sub>3</sub>. На экспериментальных кривых в длинноволновой области спектра в диапазоне  $\lambda = 420-1100$  нм проявляется широкая полоса поглощения с максимумом при  $\lambda \approx 850$  нм, а в коротковолновой области спектра в диапазоне  $\lambda = 300-420$  нм с минимумом при  $\lambda = 350$  нм наблюдается уменьшение оптической плотности.

При термической обработке пленок Pb (толщиной  $d=5-135$  нм) в длинноволновой области спектра ( $\lambda=400-1100$  нм) имеет место уменьшение, а в коротковолновой ( $\lambda = 300-400$  нм) увеличение оптической плотности [19].

В процессе термической обработки оптическая плотность предварительно активированных наноразмерных пленок WO<sub>3</sub> (толщиной  $d=2-160$  нм) в коротковолновой области спектра ( $\lambda = 300-400$  нм с максимумом  $\lambda = 350$  нм) возрастает и, как следствие, наблюдается смещение края полосы собственного поглощения в длинноволновую область спектра, а в длинноволновой облас-

ти спектра ( $\lambda = 400-1100$  нм с максимумом  $\lambda = 850$  нм) уменьшается [22]. В результате термической обработки систем Pb-WO<sub>3</sub> (приготовленных из пленок свинца и оксида вольфрама (VI) разной толщины) в интервале температур  $T = 423-573$  К в атмосферных условиях спектры поглощения и отражения образцов претерпевают существенные изменения. Причем, наблюдаемые изменения спектров поглощения и отражения, а также предельные значения оптической плотности после термической обработки образцов зависят от первоначальной толщины пленок Pb и WO<sub>3</sub>, температуры и времени термообработки. По мере увеличения температуры, уменьшения толщины пленок оксида вольфрама (VI) и свинца при термообработке систем Pb-WO<sub>3</sub> в диапазоне  $T = 423-573$  К наблюдается увеличение эффектов изменения оптической плотности и уменьшение времени достижения ее предельного значения.

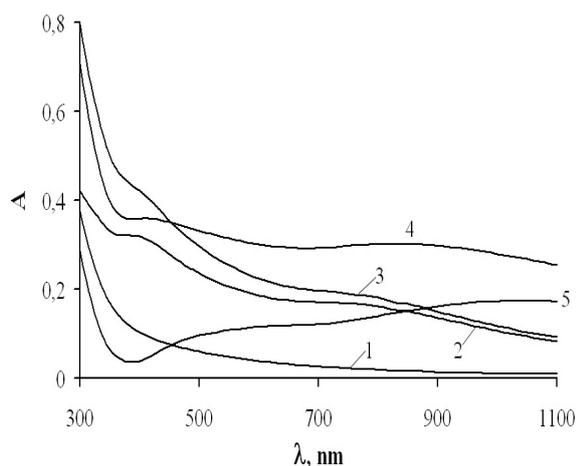


Рисунок 1. Экспериментальные (1, 2, 4) и рассчитанные (3, 5) спектры поглощения: 1) WO<sub>3</sub>, 2) Pb, 3) Pb-WO<sub>3</sub> 4) Pb-WO<sub>3</sub> 5) WO<sub>3</sub> ( $d(\text{Pb}) = 10$  нм,  $d(\text{WO}_3) = 33$  нм).

Для выяснения характера влияния пленок свинца на термические превращения в пленках оксида вольфрама (VI) в процессе термической обработки систем Pb-WO<sub>3</sub> были рассчитаны, построены и сопоставлены кинетические зависимости степени превращения  $\alpha = f(\tau)$  (где  $\tau$  – время термической обработки) пленок WO<sub>3</sub> (разной толщины), нанесенных на стеклянные подложки и пленки свинца, при различных температурах термообработки. Для расчета значений оптической плотности пленок WO<sub>3</sub> из экспериментальных спектров поглощения систем Pb - WO<sub>3</sub> вычитали спектры поглощения индивидуальных пленок свинца до и в процессе термообработки систем Pb-WO<sub>3</sub> при разных температу-

рах.

При построении кинетических кривых степени превращения воспользовались подходом предложенным в [3, 14, 22]. Спектры поглощения пленок WO<sub>3</sub> пересекаются в одной (изобестической) точке, в которой оптическая плотность не зависит от времени термической обработки. Слева и справа от изобестической точки поглощение ( $A_{\text{обр}}$ ) зависит от времени термической обработки, а наблюдаемая оптическая плотность при определенном времени термической обработки будет складываться из поглощения, связанного с наличием центра  $T_1$  ( $A_{\text{Ц1}}$ ) и центра  $T_2$  ( $A_{\text{Ц2}}$ ):

$$A_{\text{обр}} = A_{\text{Ц1}} + A_{\text{Ц2}}$$

Итоговое выражение для определения степени термического превращения центра  $T_2$  в центр  $T_1$  [14]:

$$\alpha = (A_{\text{Ц2}}^1 - A_{\text{обр}}) / (A_{\text{Ц2}}^1 - A_{\text{Ц1}}^1),$$

где  $A_{\text{Ц2}}^1$ ,  $A_{\text{Ц1}}^1$  – предельные оптические плотности при максимальной и минимальной концентрации центров  $T_2$  при  $\lambda = 850$  нм.

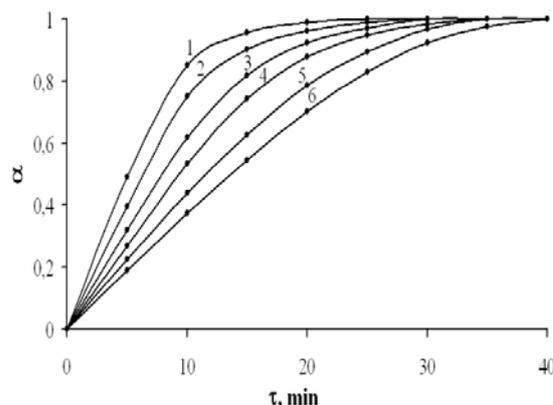


Рисунок 2. Зависимость степени превращения центра  $T_2$  пленки WO<sub>3</sub> в системах Pb - WO<sub>3</sub> (кривые 1, 3, 5) и в пленках WO<sub>3</sub> (кривые 2, 4, 6) ( $d(\text{Pb}) = 70$  нм,  $d(\text{WO}_3) = 50$  нм) при разных температурах: 1,2) 573 К, 3,4) 523 К, 5,6) 473 К.

Было установлено, что степень превращения центра  $T_2$  пленок WO<sub>3</sub> в системах Pb-WO<sub>3</sub> зависит от первоначальной толщины пленок WO<sub>3</sub> и Pb, температуры и времени термической обработки. По мере увеличения времени термообработки степень превращения центра  $T_2$  пленок WO<sub>3</sub> в системах Pb-WO<sub>3</sub> возрастает (рис. 2). Увеличение температуры термообработки (при постоянной толщине пленок WO<sub>3</sub> и Pb) приводит к возрастанию скорости термического превращения центра  $T_2$  пленок WO<sub>3</sub> (рис. 2). При увеличении толщины пленок WO<sub>3</sub> в системах Pb-WO<sub>3</sub> при постоянной температуре термообработки степень превращения во всем исследованном интервале температур уменьшается.

Видно (рис. 2), что скорость превращения центра T<sub>2</sub> пленок WO<sub>3</sub> в системах Pb-WO<sub>3</sub> больше, чем в индивидуальных пленках WO<sub>3</sub>.

Полученные в настоящей работе и ранее [3–5, 7, 14, 19-22] результаты исследований свидетельствуют: во-первых, о контактной природе эффектов изменения свинцом скорости термического превращения пленок WO<sub>3</sub>. Для выяснения причин, вызывающих наблюдаемые изменения металлом оптических свойств WO<sub>3</sub> в разных спектральных областях были измерены величина и знак U<sub>ф</sub> для систем Pb-WO<sub>3</sub>, КРП между WO<sub>3</sub>, Pb и электродом сравнения из платины в условиях атмосферы (P = 1·10<sup>5</sup> Па) и высокого вакуума (P = 1·10<sup>-5</sup> Па). Видно (табл.), что значения КРП между оксидом вольфрама (VI) и электродом сравнения из платины при понижении давления в измерительной ячейке возрастают. Наблюдаемое отличие в значениях работ выхода WO<sub>3</sub> и Pb (табл.) свидетельствует о возможности при формировании плотного контакта и установлении в системе Pb-WO<sub>3</sub> состояния термодинамического равновесия результирующего потока электронов из свинца в оксид вольфрама (VI). В результате измерений U<sub>ф</sub> для систем Pb-WO<sub>3</sub> в диапазоне λ = 300-1100 нм было установлено, что в процессе облучения светом формируется U<sub>ф</sub> положительного потенциала со стороны слоя WO<sub>3</sub>.

Таблица

Контактная разность потенциалов между пленками свинца, оксида вольфрама (VI) и электродом сравнения из платины при T = 293 К

Образец	КРП, В	
	P=1·10 <sup>5</sup> Па	P=1·10 <sup>-5</sup> Па
пленка Pb	+1,31	+1,30
пленка WO <sub>3</sub>	-0,46	-0,48

Формирование U<sub>ф</sub> для гетеросистем Pb-WO<sub>3</sub> прямо свидетельствует о разделении неравновесных носителей заряда на границе раздела. Из анализа результатов измерений U<sub>ф</sub> и КРП (табл.) было установлено, что при создании контакта оксида вольфрама (VI) со свинцом в результате электронных переходов (со стороны WO<sub>3</sub>) образуется обогащенный электронами антизапорный слой. Диаграмма энергетических зон систем Pb-WO<sub>3</sub>, при построении которой использованы результаты измерений спектров поглощения и отражения, спектрального распределения U<sub>ф</sub>, КРП (табл.), данные о сродстве к электрону [24] представлена на рисунке 3.

Полоса поглощения в диапазоне

λ = 300-400 нм с максимумом при λ=350 нм (центр T<sub>1</sub>) в области края собственного поглощения монокристаллов и пленок WO<sub>3</sub> связана со стехиометрическим недостатком кислорода и обусловлена вакансиями кислорода ((V<sub>a</sub>)<sup>++</sup>) с одним захваченным электроном [(V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> e] (аналог F-центра) [8, 9, 12-14]. Этот центр, видимо, формируется в процессе приготовления пленок WO<sub>3</sub> различной толщины на стеклянных подложках. Глубина залегания [(V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> e]-центра составляет E<sub>F</sub><sup>1</sup> = 3,54 эВ. Наблюдаемые изменения на экспериментальных спектрах поглощения систем Pb-WO<sub>3</sub> по сравнению с рассчитанными, видимо, связаны с формированием перехода Pb-WO<sub>3</sub>. Мы полагаем, что уменьшение оптической плотности в диапазоне λ = 300-400 нм с минимумом при λ=350 нм, а также увеличение оптической плотности в диапазоне λ=400-1100 нм с максимумом при λ=850 нм в процессе приготовления гетеросистем Pb-WO<sub>3</sub> взаимосвязанные процессы. В процессе установления термодинамического равновесия из-за несоответствия работ выхода WO<sub>3</sub> и Pb электроны из свинца переходят в оксид вольфрама (VI) на уровни [(V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> e]-центра с формированием

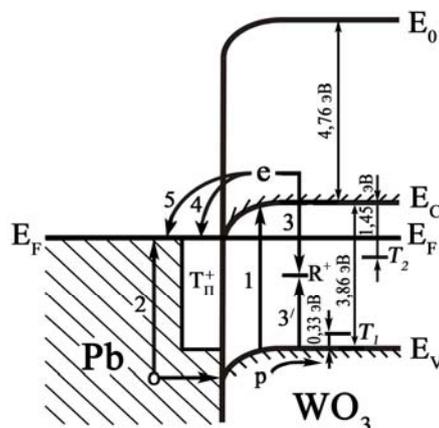
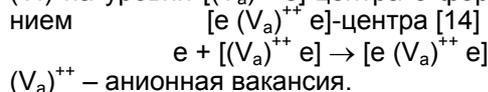
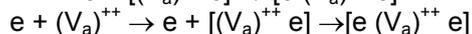
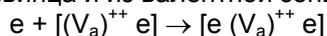


Рисунок 3. Диаграмма энергетических зон системы Pb – WO<sub>3</sub>: E<sub>V</sub> – уровень потолка валентной зоны, E<sub>C</sub> – уровень дна зоны проводимости, E<sub>F</sub> – уровень Ферми, E<sub>0</sub> – уровень вакуума, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, – центры захвата, T<sub>+</sub> – уровни ПЭСК, R<sup>+</sup> – центр рекомбинации.

Оптическая энергия ионизации [e (V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> e]-центра составляет E<sub>опт</sub> ≈ 1,45 эВ, а термическая E<sub>терм</sub> ≈ 1,2 эВ (на 0,2 - 0,3 эВ меньше чем оптическая [25]). Мы полагаем, что в процессе термообработки системы Pb – WO<sub>3</sub> возможна ионизация центра T<sub>2</sub>, которая сопровождается переходом электронов в зону проводимости, образованием центров T<sub>1</sub>, анионных вакансий



Анионные вакансии и центры  $T_1$  будут взаимодействовать с электронами переходящими из свинца и из валентной зоны  $WO_3$



и тем самым стимулировать увеличение скорости превращения центров  $T_2$  пленки  $WO_3$  в системе  $Pb-WO_3$  по сравнению с превращением центра  $T_2$  в пленке  $WO_3$  на стеклянной подложке.

Увеличение концентрации электронов со стороны  $WO_3$  в состоянии термодинамического равновесия системы  $Pb-WO_3$  во первых обеспечивает превращение центра  $T_1$  в центр  $T_2$  в пленке  $WO_3$  и во вторых должно привести к увеличению скорости процесса термической ионизации  $[e (V_a)^{++} e]$ -центра. Наблюдаемые закономерности изменения свинцом оптических свойств  $WO_3$  соответствуют изложенной модели процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П. и др. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл - полупроводник. Киев: Наукова думка, 1992. 240 с.
2. Стриха В.И., Бузанева Е.В. // Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике. М.: Радио и связь, 1987. 254 с.
3. Суровой Э.П., Борисова Н.В. // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84. № 2. С. 307 - 313.
4. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
5. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2004. Т. 78. № 4. С. 663 - 668.
6. Третьяков Ю.Д. Химия нестехиометрических окислов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. 364 с.

7. Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шаплыгин И.С. Химические и физические свойства простых оксидов металлов. М.: Наука, 1983. 239 с.

8. Гуревич Ю.Я. Твердые электролиты. М.: Наука, 1986. 176 с.

9. Фаунен Б.В., Крэнделл Р.С. Дисплеи. М.: Мир, 1982. 316 с.

10. Giulio M.D., Manno D. // J. Materials Science: Materials in Electronics. 1998. V. 9. P. 317 - 322.

11. Габрусенок, Е.В. // Электрохромизм. Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1987. 143 с.

12. Клявинь Я.К., Лагздонс Ю.Л., Лусис А.Р. // Физика и химия стеклообразующих систем. 1976. № 4. С. 141 - 149.

13. Лусис А.Р. // Оксидные электрохромные материалы. Межвуз. сб. научных трудов ЛГУ им. П. Стучки. Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1981. 13 с.

14. Суровой Э.П., Бин С.В., Борисова Н.В. // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84. № 8. С. 1539 - 1543.

15. Тутов Е.А., Рябцев С.В., Андрюков А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 3. С. 38 - 43.

16. Полянский Н.Г. Свинец. М.: Наука, 1986. 357 с.

17. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. М.: АН СССР, 1960. 592 с.

18. Спиридонов А.В. // Строительные материалы. 1998. № 7. С. 4.

19. Суровой Э.П., Бин С.В., Борисова Н.В. // Коррозия: материалы, защита. 2008. № 11. С. 4 - 10.

20. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Захаров Ю.А. и др. // Материаловедение. 2002. № 9. С. 27 - 33.

21. Суровой Э.П., Титов И.В., Бугерко Л.Н. // Материаловедение. 2005. № 7. С. 15 - 20.

22. Суровой Э.П., Бин С.В., Борисова Н.В. и др. // Ползуновский вестник. 2010. № 3. С. 188 - 192.

23. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

24. Haranahali A.R., Holloway P.H. // J. Electronic Mater. 1981. V. 10. № 1. P. 141 - 172.

25. Панков, Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. 456 с.

## ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ АЗИД СВИНЦА – ОКСИД МЕДИ (I)

С.В. Расматова, Т.М. Заиконникова, В.П. Морозов

*Установлено, что наряду с уменьшением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения азид свинца, добавка оксида меди (I) расширяет область спектральной чувствительности, а предварительная обработка систем  $PbN_6(Aб) - Si_2O$  светом ( $\lambda=365$  нм) увеличивает скорость фотолиза. Построена диаграмма энергетических зон и предложена модель фотолиза систем  $PbN_6(Aб) - Si_2O$ .*

*Ключевые слова:* фотолиз, азид свинца, оксид меди (I), микрогетерогенные системы.

#### ВВЕДЕНИЕ

Изучение темновых и фото процессов в гетеросистемах на основе азид свинца [1-

12], один из компонентов которых – азид свинца, сочетая достоинства модельных соединений (относительно простой состав и структура, достаточная фотохимическая чув-