

# ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ АЗИД СЕРЕБРА – МЕДЬ

С.М. Сирик, Л.И. Шурыгина, Т.Ю. Кожухова

*Создание систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu, предварительная обработка их светом  $\lambda = 365$  нм и различной интенсивности ( $2,8 \cdot 10^{14} - 3,17 \cdot 10^{15}$  квант·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) наряду с увеличением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения  $AgN_3(A_1)$  приводит к расширению области спектральной чувствительности азид серебра. Показано, что диффузия подвижного иона серебра к нейтральному центру лимитирует процесс фотолиза систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu.*

*Ключевые слова: азид серебра, медь, фотолиз*

## ВВЕДЕНИЕ

Решение задач направленного регулирования фотохимической и фотоэлектрической чувствительности неорганических солей представляет для физики и химии твердого тела многосторонний интерес [1 - 6]. Среди разнообразных светочувствительных соединений особое место занимают азиды тяжелых металлов (АТМ) [7]. Относительно несложный состав и структура, высокая фотоувствительность, значительный внутренний фотоэффект, простой состав конечных продуктов фотолиза делают АТМ удобными модельными объектами исследований [8,9]. Созданием контактов азид серебра с полупроводниками, наряду с увеличением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения азид серебра, приводит к расширению области спектральной чувствительности [10].

В настоящем сообщении приведены результаты цикла работ, направленных на исследование кинетических и спектральных закономерностей фотолиза систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu до, в процессе и после предварительного разложения и выяснение причин, вызывающих наблюдаемые изменения медью фотохимической и фотоэлектрической чувствительности азид серебра.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Азид серебра марки  $A_1$  ( $AgN_3(A_1)$ ) синтезировали методом двухструйной кристаллизации, одновременно сливая водные 0,2 н. растворы дважды перекристаллизованного технического азид натрия и нитрата серебра (марки ХЧ) при рН 3,  $T = 293$  К.  $AgN_3(A_1)$  прессовали в таблетки массой 150 мг при давлении  $4 \cdot 10^3$  кг·см<sup>-2</sup>. Системы готовили: 1) перемешиванием дозированных количеств азид серебра и меди (Cu) в сухом состоянии и в этиловом спирте, с последующей сушкой

и прессованием таблеток при давлении  $4 \cdot 10^3$  кг·см<sup>-2</sup>, 2) нанесением меди на таблетки азид серебра методом термического испарения в вакууме ( $1 \cdot 10^{-4}$  Па) используя вакуумный универсальный пост (ВУП-5М). Толщина слоев меди варьировалась в пределах 500 – 1500 Å. При сопоставлении результатов и построении кривых спектрального распределения скорости фотолиза ( $V_\phi$ ) и фототока ( $i_\phi$ ) пропускание света через медь учитывалось.

Измерения скорости фотолиза ( $V_\phi$ ) и фототока ( $i_\phi$ ) образцов проводили в вакууме ( $P = 1 \cdot 10^{-5}$  Па). В качестве датчика при измерении  $V_\phi$  использовали лампу РМО-4С омега-тронного масс-спектрометра ИПДО-1, настроенного на частоту регистрации азота. Измерения  $i_\phi$  проводили на установке, включающей электрометрический вольтметр В7-30 либо электрометр ТР-1501 [11]. Спектры диффузного отражения (ДО) до и после облучения образцов измеряли в вакууме ( $P = 1 \cdot 10^{-4}$  Па) [10], используя специально сконструированное устройство [12], на спектрофотометре СФ-4А с приставкой ПДО-1, и при давлении 101,3 кПа на спектрофотометрах СФ-10 и SPECORD-M40 с приставкой на отражение 8°d. В качестве источника света применяли ртутную (ДРТ-250) и ксеноновую (ДКсШ-1000) лампы. Для выделения требуемого спектрального диапазона излучения использовали монохроматор SPM-2 и набор светофильтров. Актинометрию источников света проводили, используя радиационный термоэлемент РТ-0589. Контактную разность потенциалов (КРП) между азидом серебра, Cu и относительным платиновым электродом измеряли, используя модифицированный метод Кельвина [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании кинетических закономерностей фотолиза и фототока  $AgN_3(A_1)$  и

систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  в зависимости от интенсивности ( $2,8 \cdot 10^{14} - 3,17 \cdot 10^{15}$  квант·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) и спектрального состава падающего света ( $\lambda = 300 - 1500$  нм) было установлено, что кинетические кривые  $V_\phi$  и  $i_\phi$  коррелируют (рисунок 1).

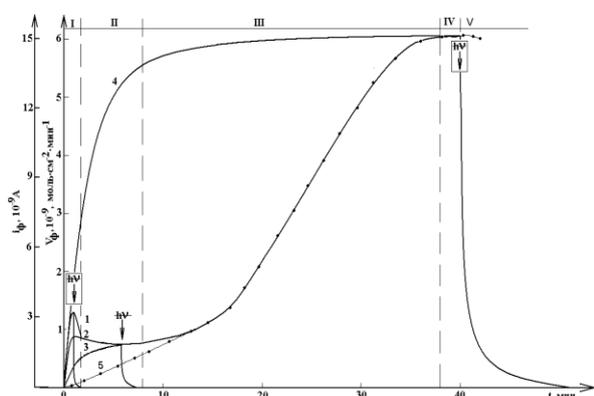


Рисунок 1. Кинетические кривые скорости фотолиза и фототока систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  до (1) и после прерывания света на I (2), II (3), IV (4) участках, рассчитанная кривая  $V_\phi$  (5) при  $\lambda = 365$  нм,  $I = 3,17 \cdot 10^{15}$  квант см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Создание контактов  $\text{AgN}_3(\text{A}_1)$  с  $\text{Cu}$  приводит к увеличению  $V_\phi$  и  $i_\phi$  азидов серебра. При экспонировании образцов светом  $\lambda = 365$  нм в интервале интенсивностей от  $2,8 \cdot 10^{14}$  до  $3,17 \cdot 10^{15}$  квант с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> реализуются кривые, состоящие из пяти участков: I – начального (с максимумом), II – стационарного, III – ускорения, IV – насыщения, V - темнового постгазо-выделения. Предварительный прогрев систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  в вакууме ( $P = 1 \cdot 10^{-5}$  Па), продолжительное хранение образцов в атмосферных условиях, засветка рассеянным белым светом приводят к уменьшению максимума на кинетических кривых  $V_\phi$  и  $i_\phi$ . Повторное (после прерывания света на I и II участках) освещение образцов не приводит к заметному изменению  $V_\phi$  и  $i_\phi$  на II, III, IV участках кинетических кривых  $V_\phi$  и  $i_\phi$  (рисунок 1), при этом значения  $V_\phi$  и  $i_\phi$  на участке I уменьшаются (рисунок 1, кривая 3). Предварительное экспонирование образцов в течение времени достижения участка IV приводит к монотонному увеличению  $V_\phi$  и  $i_\phi$  до постоянных значений (рис. 1, кривая 4). Хранение в течение 12 ч и более в вакууме ( $P = 1 \cdot 10^{-1}$  Па) предварительно экспонированных образцов приводит к частичному восстановлению формы кривой (максимум на участке I не восстанавливается). Кривые темнового постгазо-выделения спрямляются в координатах  $\ln C_{\text{N}_2} = f(t)$ . По тангенсу угла наклона зависимости  $\ln C_{\text{N}_2} = f(t)$  оценили значения констант скорости

( $k$ ) после прерывания освещения на разных участках кинетических кривых  $V_\phi$  (таблица 1).

Таблица 1

Константы скорости постгазо-выделения

| Константа $k$ , с <sup>-1</sup> | Образец                                |                                 |
|---------------------------------|--|---------------------------------|
|                                 | $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$ | $\text{AgN}_3(\text{A}_1)$      |
| Участок I                       | $(1,30 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$        | $(1,20 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$ |
| Участок II                      | $(1,42 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$        | $(1,28 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$ |
| Участок III                     | $(1,19 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$        | $(1,30 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ |

Закономерности формирования твердо-фазного продукта фотолиза систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  изучали путем измерений ДО образцов в процессе обработки их светом из области собственного поглощения азидов серебра в интервале интенсивностей падающего света ( $2,8 \cdot 10^{14} - 3,17 \cdot 10^{15}$  квант·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>). Было установлено, что формирование систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  приводит к уменьшению ДО по сравнению с индивидуальным азидом серебра в области  $\lambda = 400 - 900$  нм. Длинноволновый край ДО систем азидов серебра - медь совпадает с измеренным для индивидуального азидов ( $\lambda = 365$  нм).

Обработка образцов  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  светом из области собственного поглощения азидов серебра приводит к существенным изменениям спектральных кривых ДО. При временах облучения образцов, соответствующих временам реализации нестационарного (I) и стационарного (II) участков кинетических кривых  $V_\phi$  и  $i_\phi$ , наряду с уменьшением ДО в диапазоне 400 - 900 нм на спектральных кривых ДО систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1) - \text{Cu}$  (также как и для азидов серебра [15]) появляются максимумы при  $\lambda = 440$  нм и  $\lambda = 600$  нм. Дальнейшее увеличение времени световой обработки до участка возрастания  $V_\phi$  и  $i_\phi$  (III) приводит к уширению полос и смещению максимумов в длинноволновую область спектра. При временах освещения, соответствующих достижению участка (IV) на кривых  $V_\phi$  и  $i_\phi$ , заметных изменений в спектрах диффузного отражения не наблюдается. Хранение облученных образцов в течение 24 часов при  $T = 293$  К и  $P = 101,3$  кПа приводит к частичному восстановлению ДО образцов в длинноволновой области спектра. Было установлено [14], что изменения в спектрах ДО  $\text{AgN}_3(\text{A}_1)$  связаны с образованием фотолитического серебра, а широкие полосы с максимумами при  $\lambda = 420$  нм и 600 нм – с образованием частиц серебра со средним размером  $d = 40$  и 100 Å. На рис. 2 представлены результаты сопоставления кинетических зависимостей изменения концентрации фотолитического металла ( $C_{\text{ме}}$ ), рассчитанные по результатам

измерений кинетических кривых  $V_{\phi}$  при различных интенсивностях падающего света, со значениями площадей (S), соответствующих изменению диффузного отражения систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu в процессе облучения. Совпадения зависимостей, а также результаты работ [9,14] свидетельствуют о том, что наблюдаемые в результате облучения образцов изменения на спектральных кривых диффузного отражения систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu обусловлены образованием серебра – продукта фотолиза  $AgN_3(A_1)$ , а максимумы – формированием частиц серебра соответствующих размеров. Твердофазный (серебро) и газообразный (азот) продукты фотолиза систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu образуются в стехиометрическом соотношении, в основном, на поверхности образцов.

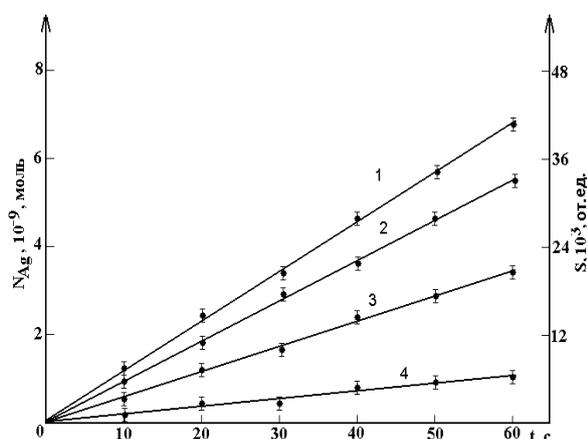


Рисунок 2. Зависимость количества фотолизического серебра ( $N_{Ag}$ ) и площадей (S), соответствующих изменению диффузного отражения образцов  $AgN_3(A_1)$  – Cu, от интенсивности падающего света  $I$ ,  $квант \cdot см^{-2} \cdot с^{-1}$ : 1 –  $3,7 \cdot 10^{15}$ , 2 –  $2,6 \cdot 10^{15}$ , 3 –  $1,6 \cdot 10^{15}$ , 4 –  $2,8 \cdot 10^{14}$ , при  $\lambda = 365$  нм

В таблице 2 приведены константы  $V_{\phi}$   $AgN_3(A_1)$  и систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu, оцененные по тангенсу угла наклона зависимостей  $\ln S = f(t)$ ,  $\ln C_{me} = f(t)$ .

Таблица 2

Константы скорости фотолиза систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu, рассчитанные по кинетическим кривым скорости фотолиза ( $k_{\phi}$ ) и спектрам диффузного отражения ( $k_{до}$ ), при  $I = 3,17 \cdot 10^{15}$   $квант \cdot см^{-2} \cdot с^{-1}$

| Образец          | $k_{\phi}, с^{-1}$              | $k_{до}, с^{-1}$                |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $AgN_3(A_1)$ -Cu | $(2,20 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$ | $(2,40 \pm 0,18) \cdot 10^{-2}$ |
| $AgN_3(A_1)$     | $(4,50 \pm 0,35) \cdot 10^{-2}$ | $(4,8 \pm 0,50) \cdot 10^{-2}$  |

Из табл. 2 видно, что константы скорости фотолиза  $AgN_3(A_1)$  и систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu

удовлетворительно совпадают. На рис. 3 приведены кривые спектрального распределения  $V_{\phi}$  и  $i_{\phi}$ , построенные по стационарным значениям  $V_{\phi}$  и  $i_{\phi}$  (участок II кинетических кривых  $V_{\phi}$  и  $i_{\phi}$ ). Видно, что создание систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu наряду с увеличением  $V_{\phi}$  и  $i_{\phi}$  в собственной области поглощения  $AgN_3(A_1)$  приводит к расширению области спектральной чувствительности  $AgN_3(A_1)$ . Для выяснения энергетического строения контактов  $AgN_3(A_1)$  с Cu и причин, вызывающих наблюдаемые изменения медью  $V_{\phi}$  и  $i_{\phi}$  азида серебра в разных спектральных областях, были выполнены измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) и КРП между  $AgN_3(A_1)$ , Cu и относительным платиновым электродом.

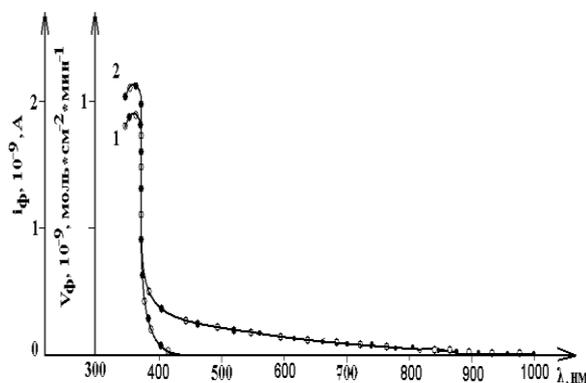


Рисунок 3. Спектральные распределения скорости фотолиза и фототока  $AgN_3(A_1)$  (1) и систем  $AgN_3(A_1)$  - Cu (2),  $I = 3,17 \cdot 10^{15}$   $квант \cdot см^{-2} \cdot с^{-1}$

Из анализа ВАХ и результатов измерений контактной разности потенциалов (табл. 3) было установлено, что в области контакта  $AgN_3(A_1)$  - Cu возникает потенциальный барьер. Контакт  $AgN_3(A_1)$  - Cu проявляет выпрямляющие свойства (прямому направлению соответствует внешнее напряжение, приложенное в направлении противоположном контактной разности потенциалов - плюс источника подан со стороны  $AgN_3(A_1)$ ).

Таблица 3

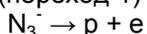
Контактная разность потенциалов между  $AgN_3(A_1)$ , Cu и платиновым электродом

| Образец      | КРП, В (T=293 К)      |                          |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
|              | $P = 1 \cdot 10^5$ Па | $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па |
| $AgN_3(A_1)$ | +0,54                 | +0,52                    |
| Cu           | +0,07                 | +0,08                    |

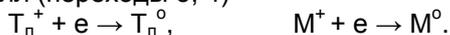
Полученные в настоящей работе и ранее [8-10, 14] результаты исследований свидетельствуют о том, что фотохимические проявления фотоэлектрических процессов в системах  $AgN_3(A_1)$  - Cu могут быть вызваны:

фотоэмиссией электронов (дырок) из металла в азид серебра, перераспределением под действием контактного поля генерированных в  $AgN_3(A_1)$  светом неравновесных электрон-дырочных пар, компенсирующими потоками равновесных носителей заряда.

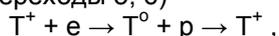
Диаграмма энергетических зон систем  $AgN_3(A_1) - Cu$ , при построении которой использовали результаты исследований спектрального распределения  $V_\phi$  и  $i_\phi$  (рис. 3), контактной разности потенциалов [13] (табл. 3), внешней фотоэмиссии из азид серебра [15], спектров диффузного отражения  $AgN_3(A_1)$  [14] и  $AgN_3(A_1) - Cu$ , приведена на рис.4. При воздействии на системы  $AgN_3(A_1) - Cu$  света из области собственного поглощения азид серебра имеет место интенсивная генерация неравновесных носителей заряда в азиде серебра (переход 1)



и фотоэмиссия дырок из металла в валентную зону  $AgN_3(A_1)$  (переход 2). Генерированные в области пространственного заряда  $AgN_3(A_1)$  пары носителей перераспределяются в контактном поле, обусловленном несоответствием работ выхода электронов из контактирующих партнеров и наличием собственных поверхностных электронных состояний (СПЭС) [13], с переходом электронов на уровни СПЭС ( $T_n^+$ ) или непосредственно в металл (переходы 3, 4)

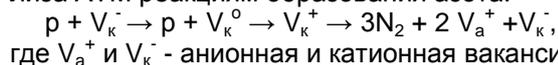


Так как квантовый выход фотолиза, оцененный по начальному участку кинетической кривой  $V_\phi$ , составляет  $\approx 0,002 - 0,01$ , то часть фотоиндуцируемых носителей заряда рекомбинирует (переходы 5, 6)



где  $T^+$  - центр рекомбинации.

Концентрация дырок в области пространственного заряда  $AgN_3(A_1)$  по сравнению с концентрацией их в индивидуальном азиде будет возрастать. Возрастание концентрации дырок в области пространственного заряда азид серебра приводит к соответствующему увеличению  $i_\phi$  и  $V_\phi$  по принимаемому для фотолиза АТМ реакциям образования азота:



При фотолизе систем  $AgN_3(A_1) - Cu$  одновременно с выделением азота образуется и фотолитическое серебро. Формирование частиц фотолитического серебра, по нашему мнению, происходит с участием СПЭС

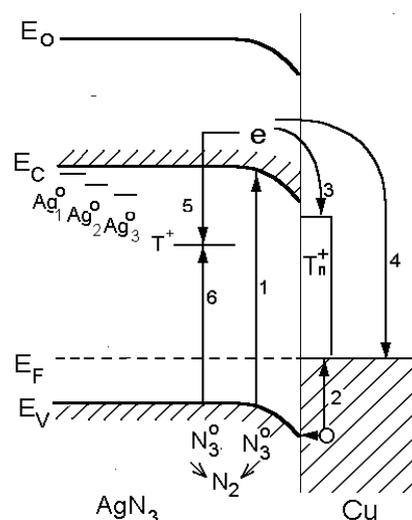
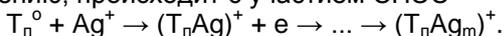
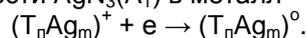
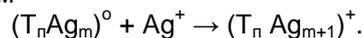


Рисунок 4. Диаграмма энергетических зон систем  $AgN_3(A_1) - Cu$ ,  $E_V$  - уровень потолка валентной зоны,  $E_C$  - уровень дна зоны проводимости,  $E_F$  - уровень Ферми,  $E_0$  - уровень вакуума,  $T$  - центр рекомбинации

Наблюдаемое уменьшение  $V_\phi$  и  $i_\phi$  на начальном участке (I) кинетических кривых в процессе и после экспонирования образцов (рис.1) подтверждает необратимый расход поверхностных центров. В процессе роста частиц серебра формируются микрогетерогенные системы азид серебра – серебро. Генерированные в области пространственного заряда азид серебра пары носителей перераспределяются в контактном поле, сформированном из-за несоответствия между работами выхода азид серебра и серебра, с переходом неравновесных электронов из зоны проводимости  $AgN_3(A_1)$  в металл



Одновременно имеет место фотоэмиссия дырок из фотолитического серебра в азид серебра (переход 2). Эти процессы, во-первых, приводят к возрастанию концентрации дырок и, как следствие, к увеличению  $V_\phi$  и  $i_\phi$  (участок III); во-вторых, могут стимулировать диффузию ионов серебра к растущим частицам



Для определения лимитирующей стадии процесса роста частиц серебра оценили время, в течение которого подвижный ион  $Ag^+$  диффундирует к нейтральному центру  $(T_n Ag_m)^0$ .

Среднее время релаксации при диффузионном протекании процесса может быть оценено [16]

$$\tau_n = e^2 / \sigma a k T,$$

где:  $e$  - заряд электрона,  $a$  - постоянная решетки  $AgN_3(A_1)$ ,  $5,6 \cdot 10^{-8}$  см,  $\sigma$  - удельная про-

водимость  $\text{AgN}_3(\text{A}_1)$  при  $T = 293 \text{ K}$ ,  $\sigma = 1 \cdot 10^{-12} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [17],  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура 293 К.

При  $T = 293 \text{ K}$ ,  $\tau_n \approx 1,14 \cdot 10^2 \text{ с}$ , константа скорости диффузии  $\text{Ag}^+$  к нейтральному центру  $(\text{T}_n\text{Ag}_m)^0$   $k_1 \approx 1 / 1,14 \cdot 10^2 \approx 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Совпадение значений  $k_{\text{ф}}$ ,  $k_1$  дает основание предположить, что лимитирующей стадией фотолиза и темнового постгазовыделения для систем  $\text{AgN}_3(\text{A}_1)$  -  $\text{Cu}$  является диффузия ионов серебра к нейтральному центру  $(\text{T}_n\text{Ag}_m)^0$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robbilar J.J. // J. Photog. Science. 1971. V. 19. P. 25 – 37.
2. Levy B., Lindsey M. // Phot. Sci. and Eng. 1973. V. 17. № 2. P. 135 – 141.
3. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенситизированный фотоэффект. – М.: Наука. 1980. – 384 с.
4. Горяев М. А., Пименов Ю. Д. // Успехи научной фотографии. 1980. Т.20. С. 96 – 105.
5. Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П., Минько В.И., Михайловская Е.В., Романенко П.Ф. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл – полупроводник. – Киев: Наукова думка. 1992. – 240 с.
6. Шапиро Б.И. Теоретические начала фотографического процесса. – М.: Эдиториал УРСС. 2000. – 288 с.
7. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах. – М.: Иностранная литература. 1962. – 243 с.
8. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2004. Т. 78. № 4. С. 663–668.

9. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2005. Т. 79. № 6. С. 1124 – 1128.
10. Суrowой Э.П., Сирик С.М., Захаров Ю.А., Бугерко Л.Н. // Журн. науч. и прикл. фотографии. 2002. Т. 47. № 5. С. 19 – 27.
11. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80. № 7. С. 1308–1313.
12. А.с. 1325332 СССР. МКИ G01N 21/55. Устройство для измерения спектров отражения в вакууме / А.И. Турова, Г.П. Адушев, Э.П. Суrowой и др. Заявлено 10.11.1985; Опубл. 24.07.1987, Бюл. № 27. – 5 с.: ил.
13. Суrowой Э.П., Титов И.В., Бугерко Л.Н. // Материаловедение. 2005. № 7. С. 15 – 20.
14. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Сирик С.М. // Журн. физ. химии. 2008. Т. 82. № 2. С. 362 – 367.
15. Колесников Л.В. Спектры энергетических состояний и некоторые особенности реакций разложения азидов тяжелых металлов: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Минск: БГУ, 1978. 21 с.
16. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. – М.: Наука. 1972. – 399 с.
17. Гасьямаев В. К. Исследование механизма термического разложения азидов серебра электрофизическими методами: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 1973. – 19 с.
18. Розовский А.Я. Гетерогенные химические реакции. Кинетика и механизм. – М.: Наука. 1980. – 264 с.
19. Савельев Г.Г., Захаров Ю.А., Гаврищенко Ю.В. // Журн. науч. и прикладной фото - кинематографии. 1969. Т. 14. № 6. С. 466 – 468.
20. Дьямант Г.М. Неравновесная проводимость в процессе фотохимической реакции в азиде серебра: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Кемерово. 1986. – 22 с.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$

Н.В. Борисова, Т.М. Заиконникова

*Методами гравиметрии, оптической спектроскопии установлено, что в результате облучения светом в диапазоне  $\lambda = 300 - 750 \text{ нм}$  и интенсивности  $I = 6,9 \cdot 10^{14} - 1,1 \cdot 10^{16} \text{ квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение  $\tau = 1 - 160$  минут в атмосферных условиях спектры поглощения и отражения, масса пленок алюминия ( $d = 2 - 200 \text{ нм}$ ) значительно изменяются. Кинетические кривые степени превращения в зависимости от толщины пленок алюминия описываются в рамках обратного логарифмического и параболического законов. Предложена модель, включающая стадии генерации и перераспределения носителей заряда в контактном поле систем  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , адсорбции кислорода, диффузии  $\text{Al}^{3+}$  и формирования  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .*

Ключевые слова: гетеросистемы, наноразмерные пленки, оптические свойства

### ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и его сплавы благодаря комплексу положительных свойств нашли широкое применение в различных областях науки, техники, промышленности. В качестве конст-

рукционных материалов алюминий и его сплавы используются в ракетной технике, авиа-, авто-, судо- и приборостроении, в строительстве, в конструкциях железнодорожных и трамвайных путей [1-16]. Алюминий химически активен [1-3, 8-10]. Расширение