

02

Структура центров излучательной туннельной рекомбинации в эмульсионных микрокристаллах AgBr(I)

© А.В. Тюрин, С.А. Жуков[¶]

Научно-исследовательский институт физики
Одесского национального университета им. И.И. Мечникова,
65082 Одесса, Украина

[¶] e-mail: zhukov@onu.edu.ua

Поступила в редакцию 15.08.2017 г.

Для установления структуры центров излучательной туннельной рекомбинации в эмульсионных микрокристаллах бромида серебра с примесью иода AgBr(I) и роли эмульсионной среды в их формировании исследованы зависимости спектров люминесценции от температуры в интервале от 77 до 120 К и кинетики нарастания максимального значения ее интенсивности на $\lambda \approx 560$ nm, а также спектр „вспышки“ люминесценции, стимулируемой инфракрасным светом. Для исследований использовались два типа микрокристаллов $\text{AgBr}_{1-x}(\text{I}_x)$ ($x = 0.03$): полученные в водном растворе и на желатиновой основе. Установлено, что центрами излучательной туннельной рекомбинации в $\text{AgBr}_{1-x}(\text{I}_x)$ ($x = 0.03$) с максимумом свечения на $\lambda \approx 560$ nm являются донорно-акцепторные комплексы $\{(\text{I}_a^- \text{I}_a^-) \text{Ag}_i^+\}$ — ионы иода I_a^- , расположенные в соседних анионных узлах кристаллической решетки AgBr(I), рядом с которыми находится межузельный ион серебра Ag_i^+ . С повышением температуры центры $\{(\text{I}_a^- \text{I}_a^-) \text{Ag}_i^+\}$ подвергаются структурному преобразованию в центры $\{(\text{I}_a^- \text{I}_a^-) \text{Ag}_{in}^+\}$, где $n = 2, 3 \dots$. При этом центры $\{(\text{I}_a^- \text{I}_a^-) \text{Ag}_{in}^+\}$, $n = 2$, после захвата ими электрона и дырки также обеспечивают туннельную рекомбинацию с максимумом свечения на $\lambda \approx 720$ nm. Влияние эмульсионной среды сводится к тому, что желатина, взаимодействуя с поверхностными центрами локализации электронов — межузельными ионами серебра Ag_{in}^+ , $n = 1, 2$, образует с ними комплексы $\{\text{Ag}_{in}^0 \text{G}^+\}$, $n = 1, 2$. Последние являются более глубокими ловушками для электронов с малым сечением захвата по сравнению с центрами Ag_{in}^+ , $n = 1, 2$, и проявляются в том, что кинетика нарастания люминесценции в AgBr(I) до стационарного уровня на $\lambda \approx 560$ nm характеризуется наличием „вспышечного разгорания“. При этом „вспышка“ люминесценции, стимулируемая ИК светом, за которую ответственны центры локализации электронов Ag_{in}^+ , $n = 1, 2$, отсутствует. Предполагается, что электроны, локализованные на комплексах $\{\text{Ag}_{in}^0 \text{G}^+\}$, $n = 2$, сохраняют способность к излучательной туннельной рекомбинации с дырками, локализованными на парных иодных центрах, с максимумом свечения на $\lambda \approx 750$ nm.

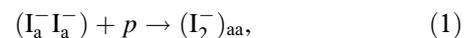
DOI: 10.21883/OS.2018.02.45520.182-17

Введение

В эмульсионных микрокристаллах бромида серебра с примесью иода (ЭМК AgBr(I)), содержащих на поверхности желатину и другие поверхностно-активные вещества [1,2], свечение может возникать при излучательной туннельной рекомбинации локализованных электрона и дырки по механизму, аналогичному модели Вильямса–Пренера [3]. Данная схема реализуется следующим образом: в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны располагается уровень локализации дырок A , а ниже дна зоны проводимости располагается уровень локализации электронов D . После того, как произошли оба захвата, дырки на центр A и электрона на центр D , происходит переход электрона с уровня D на уровень A , который сопровождается испусканием кванта света.

В рассматриваемом случае в качестве A выступает парный иодный центр $(\text{I}_a^- \text{I}_a^-)$ — ионы иода I_a^- , расположенные в соседних анионных узлах кристаллической решетки ЭМК AgBr(I). Предполагается также, что при локализации дырки парным иодным центром воз-

никает молекулярное образование $(\text{I}_2^-)_{aa}$, аналогичное V_k -центру в ЩГК [4]:



где p — дырка, мигрирующая в валентной зоне.

Что касается центра D , то относительно его природы нет достоверных данных, которые однозначно бы устанавливали природу этого центра. На сегодняшний день наиболее убедительным считается предположение, что данным центром локализации электронов является поверхность ЭМК AgBr(I), находящаяся в контакте с желатиной [5]. При взаимодействии желатины с поверхностью ЭМК AgBr(I) происходит хемосорбция желатины [6,7]. Макромолекулы желатины связываются поверхностными ионами серебра с образованием серебряно-желатиновых комплексов [8]. Возникновение серебряно-желатиновых комплексов сопровождается вытягиванием электронов из объема ЭМК AgBr(I) к поверхности и локализацией их на дефектах приповерхностного слоя [2,8]. Поэтому, по мнению авторов работы [8], возникновение зеленого свечения парных иодных центров у распределенных в желатине

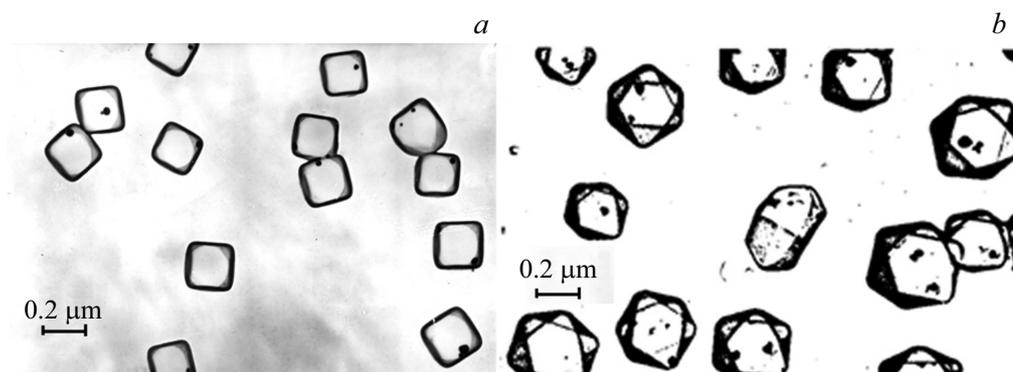
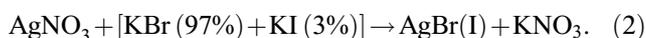


Рис. 1. Электронно-микроскопические фотографии угольно-платиновых реплик кубических (а) и октаэдрических (б) ЭМК AgBr_{1-x}(I_x) ($x = 0.03$).

ЭМК AgBr(I), является рекомбинация дырок, локализованных на парных иодных центрах, с электронами, локализованными на поверхности ЭМК AgBr(I). Данное предположение, на наш взгляд, не получило достаточного теоретического и экспериментального обоснования, а многие имеющиеся экспериментальные результаты, например по температурному тушению зеленого свечения ЭМК AgBr(I) и влиянию эмульсионной среды на ее кинетику, не находят своего объяснения в рамках данной модели [8]. Это и послужило мотивом для нашей работы, которая посвящена выяснению указанных особенностей структуры наноразмерных центров, ответственных за излучательный туннельный механизм зеленой люминесценции ЭМК AgBr(I), и роли эмульсионной среды в их формировании.

1. Постановка задачи и методы экспериментального исследования

Для установления структуры центров излучательной туннельной рекомбинации в ЭМК AgBr(I) и роли эмульсионной среды в их формировании в работе исследованы спектры люминесценции в зависимости от температуры в интервале от 77 до 120 К и кинетики изменения максимального значения ее интенсивности на $\lambda \approx 560$ nm, а также спектр „вспышки“ люминесценции, стимулируемой ИК светом. Для исследований использовались два типа ЭМК AgBr(I): полученные в водном растворе и на желатиновой основе методом контролируемой двухструйной эмульсификации [3] по реакции двойного обмена:



Контроль огранки и размеров синтезированных ЭМК AgBr(I) осуществлялся с помощью электронного микроскопа типа УМВ-100К при наблюдении

их угольных реплик, оттененных платиной. Типичные электронно-микроскопические фотографии получаемых ЭМК AgBr_{1-x}(I_x) ($x = 0.03$) в желатине показаны на рис. 1. В последующем изложении ЭМК AgBr_{1-x}(I_x) ($x = 0.03$) будут обозначаться ЭМК AgBr(I) без указания концентрации введенного йода. По электронно-микроскопическим исследованиям средний размер ЭМК AgBr(I) в эмульсиях составлял $0.24 \mu\text{m}$ (рис. 1).

Исследования спектров люминесценции ЭМК AgBr(I) и кинетики изменения максимального значения ее интенсивности на $\lambda \approx 560$ nm, а также спектра „вспышки“ люминесценции, стимулируемой ИК светом в температурном интервале от 77 до 120 К, проводились нами на переменном токе при возбуждении П-импульсами с частотой следования импульсов 800 Hz светом с $\lambda \approx 460$ nm по методике и на установке, описанных в [9]. При этом регистрируется лишь фосфоресценция центров свечения с временами релаксации $\tau > 2.0$ ms, именно эти релаксационные процессы фотовозбуждения в данном случае нас и интересуют.

Измерение спектра „вспышки“ свечения ЭМК AgBr(I) осуществлялось следующим образом: образец возбуждался светом ртутной лампы $\lambda = 365$ nm в течение 1 min. Затем через темновой интервал 30 s, в течение которого послесвечение практически отсутствовало, включалось неразложенное ИК излучение с длинами волн $\lambda \geq 1000$ nm (фильтр ИКС-3 или германиевый светофильтр толщиной 1.5 mm). Регистрация „вспышки“ свечения на заданной длине волны при этом осуществлялась катодным осциллографом С1-19. Влияние ИК подсветки на заданной длине волны оценивалось максимальным изменением интенсивности люминесценции во „вспышке“ I_{flash} при заданном темновом интервале: $I_{\text{flash}} = I_{\text{max}} - I_0$, где I_{max} — максимальное значение интенсивности свечения во „вспышке“, I_0 — интенсивность послесвечения на данной длине волны в заданном темновом интервале. В основном воздействие ИК подсветки осуществлялось при условии, когда $I_0 \approx 0$.

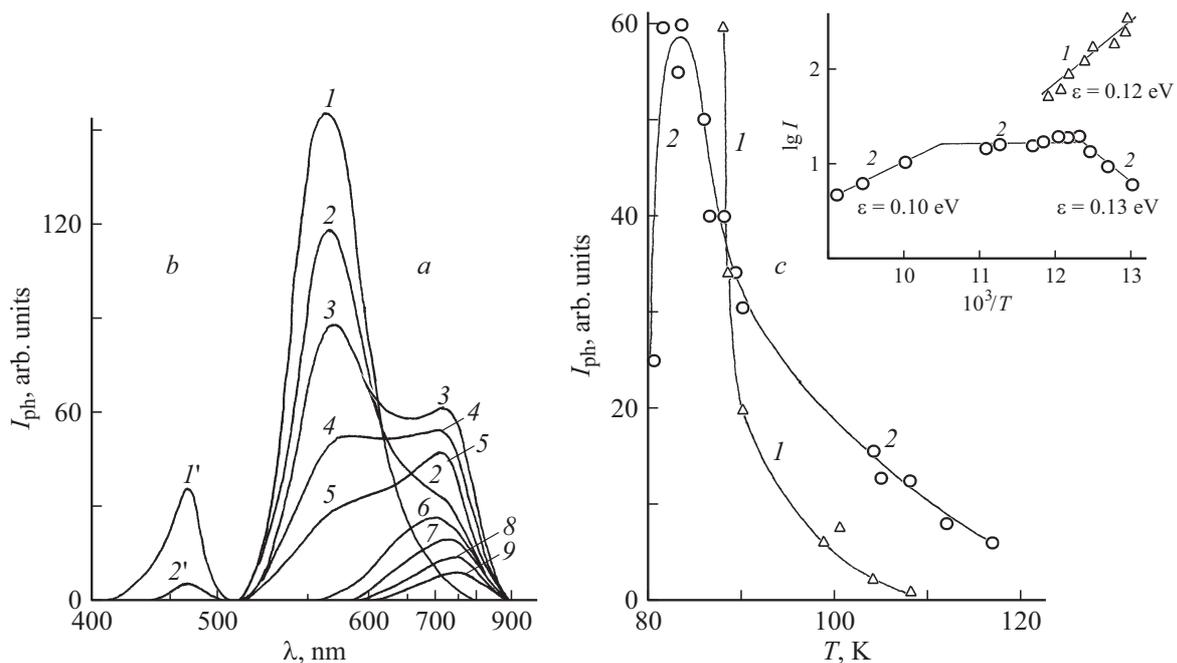


Рис. 2. (а) Спектры свечения ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе при возбуждении светом с $\lambda \approx 460$ nm при температурах 81 (1), 86 (2), 88 (3), 88.5 (4), 90 (5), 104 (6), 108 (7), 112 (8), 117 K (9). (б) Спектры возбуждения свечения ЭМК AgBr(I) на $\lambda \approx 570$ (2') и 720 nm (1') при разных температурах 96 (1'), 104 K (2'). (с) Зависимость интенсивности свечения ЭМК AgBr(I) от температуры на $\lambda_{max} = 560$ (1), 720 nm (2) при возбуждении светом с $\lambda \approx 460$ nm; на вставке — логарифмическая зависимость интенсивности свечения на этих же длинах волн от обратной температуры.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены результаты измерения спектров люминесценции ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе при различных температурах в интервале от 77 до 120 K.

Как показали исследования, спектры люминесценции ЭМК AgBr(I) в температурном интервале $77 \text{ K} < T < 88 \text{ K}$ характеризуются широкой полосой зеленого свечения с максимумом на $\lambda_{max} \approx 560$ nm (рис. 2, а, кривые 1–3). В области температур $T > 88 \text{ K}$ люминесценция ЭМК AgBr(I) с $\lambda_{max} \approx 560$ nm испытывает резкий спад интенсивности (рис. 2, с, кривая 1), т.е. температурное „тушение“ зеленого свечения. Температурное „тушение“ зеленого свечения происходит с энергией активации $\varepsilon \approx 0.12$ eV (рис. 2, с, вставка, кривая 1), совпадающей с энергией перемещения межузельного иона Ag_i^+ серебра (здесь индекс i указывает на межузельное расположение иона в кристаллической решетке) в ЭМК AgBr(I), равной 0.10–0.16 eV [10].

В процессе температурного „тушения“ зеленого свечения наблюдается возникновение свечения с максимумом на $\lambda_{max} \approx 720$ nm (рис. 2, а, кривые 3–9), который с повышением температуры имеет тенденцию смещаться в длинноволновую часть спектра.

Исследования показали также, что возрастание интенсивности длинноволнового свечения с $\lambda_{max} \approx 720$ nm в области температур $80 \text{ K} < T < 90 \text{ K}$ и температур-

ное „тушение“ этого свечения в области температур $T > 95 \text{ K}$ (рис. 2, с, вставка, кривая 2) происходит с термическими энергиями активации такими же, как и для температурного „тушения“ зеленой полосы свечения (рис. 2, с, вставка, кривая 1), и укладывающимися в интервал энергии перемещения межузельного иона серебра Ag_i^+ в ЭМК AgBr(I) $\varepsilon = 0.10$ –0.16 eV.

Результаты измерения спектров люминесценции ЭМК AgBr(I), полученных на желатиновой основе, отличаются лишь тем, что для ЭМК AgBr(I), распределенных в желатине, возникающее длинноволновое свечение при температурном „тушении“ зеленого свечения выражено не так ярко, и максимум свечения наблюдается на $\lambda_{max} \approx 750$ nm, а не 720 nm, как для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе. Для сравнения на рис. 3 представлены результаты измерения спектров люминесценции и возбуждения при температурах в области температурного „тушения“ зеленой полосы свечения для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе и на желатиновой основе.

Следует отметить, что спектры возбуждения полос люминесценции с $\lambda_{max} \approx 560, 720$ nm (рис. 2, б, кривые 1' и 2') и $\lambda_{max} \approx 750$ nm (рис. 3, б, кривая 3') одинаковы независимо от температуры измерения.

Существенные различия для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе и на желатиновой основе, наблюдаются в поведении кинетики нарастания люминесценции на $\lambda \approx 560$ nm до стационарного уровня и в

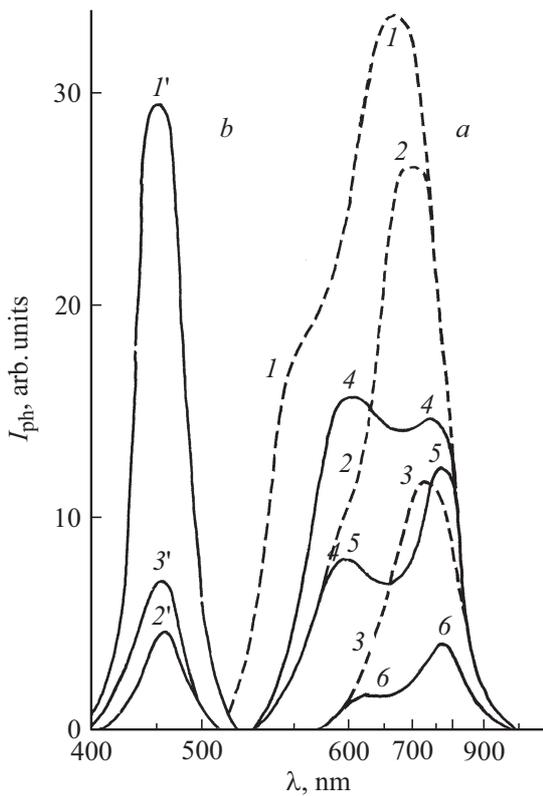


Рис. 3. (а) Спектры свечения ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе (1–3) и на желатиновой основе (4–6) при возбуждении светом с $\lambda \approx 460$ nm при температурах — 97 (1, 4), 104 (2, 5), 112 К (3, 6). (б) Спектры возбуждения свечения ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе (1', 2') и на желатиновой основе (3') на $\lambda \approx 560$ nm при 96 К (2'), $\lambda \approx 720$ nm при 104 К (1'), $\lambda \approx 750$ nm при 110 К (3').

спектре „вспышки“ люминесценции, стимулируемой ИК светом. Если для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе, нарастание люминесценции до стационарного уровня происходит монотонно (рис. 4, а, кривая 1) и наблюдается „вспышка“ люминесценции, стимулируемая ИК светом, с максимумами на $\lambda_{max} \approx 560$ и 720 nm (рис. 4, б, кривая 1), то в желатиновой среде нарастание люминесценции до стационарного уровня характеризуется наличием „вспышечного разгорания“ (рис. 4, а, кривая 3), а „вспышка“ люминесценции, стимулируемая ИК светом, во всем измеряемом спектральном диапазоне отсутствует (рис. 4, б, кривая 2).

Обсуждение результатов

Тот факт, что температурное „тушение“ зеленого свечения в ЭМК AgBr(I) сопровождается появлением новой полосы люминесценции с максимумом свечения на $\lambda_{max} \approx 720$ nm для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе, и $\lambda_{max} \approx 750$ nm для ЭМК AgBr(I), полученных на желатиновой основе, свидетельствует, на наш взгляд, о том, что центры, ответственные за зеленое свечение в ЭМК AgBr(I), в процессе температурного „тушения“ претерпевают структурное преобразование, не зависящее от связующей среды, и при этом вновь образующиеся центры сохраняют способность к туннельной рекомбинации между возбужденными состояниями с испусканием кванта с $\lambda = 720–750$ nm. Ответственными за данное преобразование являются подвижные межузельные ионы серебра Ag_i^+ .

Все эти факторы позволяют высказать следующее предположение относительно особенностей структуры

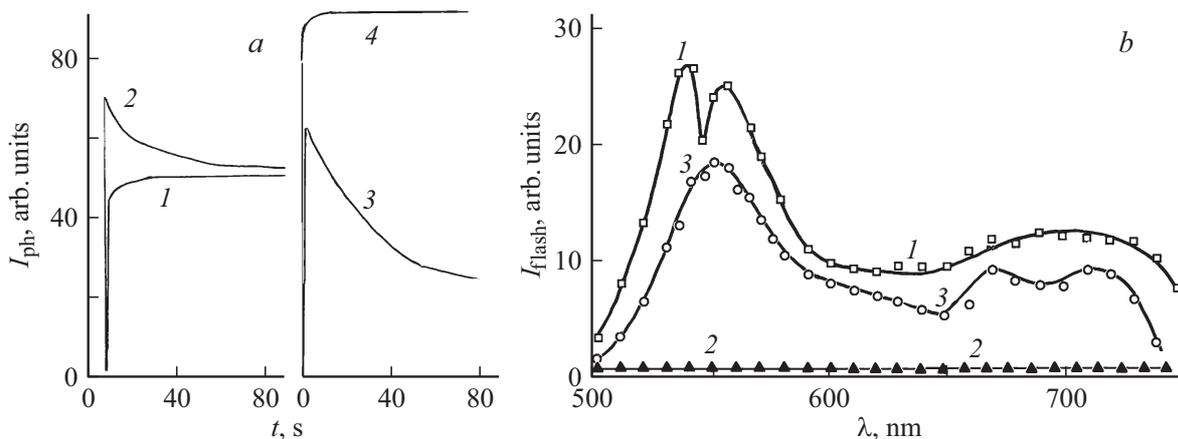
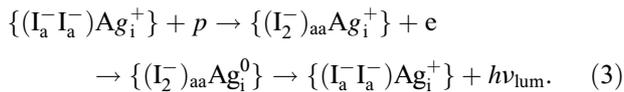


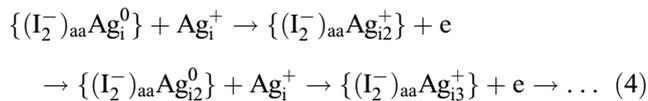
Рис. 4. (а) Кинетики нарастания интенсивности люминесценции ЭМК AgBr(I) на $\lambda \approx 560$ nm при 77 К под действием возбуждающего света с $\lambda = 460$ nm для полученных в водном растворе (1), в водном растворе с дополнительно введенной желатиной (5 мол.%) (2), в желатине (3), в желатине при введении фенилмеркаптотетразола (10^{-3} mol/mol AgBr) (4). (б) Спектр „вспышки“ $I_{flash} = I_{max} - I_0$ люминесценции, стимулируемой ИК светом при 77 К для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе (1), в водном растворе с дополнительно введенной желатиной (5 мол.%) (2), в желатине при введении фенилмеркаптотетразола (10^{-3} mol/mol AgBr) (3).

центров, ответственных за зеленое свечение в ЭМК AgBr(I) с $\lambda_{\max} \approx 560$ nm по туннельному механизму, и их преобразования с изменением температуры. Центры зеленого свечения по туннельному механизму в ЭМК AgBr(I) состоят из парного иодного центра $(I_a^- I_a^-)$ и расположенного рядом с ним межузельного иона серебра Ag_i^+ , образуя единый донорно-акцепторный комплекс $\{(I_a^- I_a^-)Ag_i^+\}$.

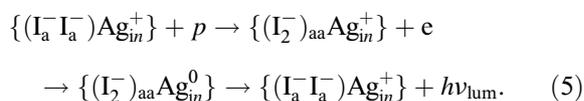
Появление зеленого свечения в данном случае с учетом реакции (1) можно описать следующей схемой:



Таким образом, интенсивность зеленой люминесценции ЭМК AgBr(I) определяется туннельными переходами в центрах $\{(I_2^-)_{aa}Ag_i^0\}$, а ее „тушение“ — межузельными ионами серебра Ag_i^+ и позволяет описать ее следующей последовательностью реакций:



Образование в процессе температурного „тушения“ центров молекулярно-кластерной дисперсности $\{(I_2^-)_{aa}Ag_{in}^+\}$, $n = 2$, также сопровождается появлением туннельной люминесценции с максимумом свечения на $\lambda_{\max} \approx 720$ nm по схеме



Дополнительным экспериментальным подтверждением нашего предположения о том, что ответственными за полосу свечения с $\lambda_{\max} \approx 720$ nm в ЭМК AgBr(I) являются центры $\{(I_2^-)_{aa}Ag_{in}^0\}$, $n = 2$, может служить также следующий факт. При увеличении концентрации ионов серебра в ЭМК AgBr(I) путем снижения pAg при их синтезе, в спектре люминесценции таких ЭМК уже при $T \approx 77$ K без предварительного цикла температурного „тушения“ регистрировалась полоса люминесценции с $\lambda_{\max} \approx 720$ nm, в которой действием ИК света стимулируется „вспышка“.

Специфичность адсорбции молекул желатины на поверхности ЭМК AgBr(I), по нашему мнению, сводится к восстановлению поверхностных центров локализации электронов, межузельных ионов серебра Ag_i^+ (либо межузельных молекул серебра Ag_{i2}^+), до атома Ag_i^0 (либо до молекулы Ag_{i2}^0). Проявляются данные центры в отсутствии желатины при ИК подсветке, обеспечивая „вспышку“ люминесценции (рис. 4, *b*, кривая 1) с максимумами на $\lambda_{\max} \approx 560$ и 720 nm. Образующиеся центры $\{Ag_{in}^0 G^+\}$, где $n = 1, 2$, а G^+ — молекула желатины, являются более глубокими ловушками для электронов с малым сечением захвата по сравнению с поверхностными центрами локализации электронов $\{Ag_{in}^+\}$, $n = 1, 2$,

и проявляются в том, что кинетика нарастания люминесценции на $\lambda \approx 560$ nm до стационарного уровня характеризуется наличием „вспышечного разгорания“ (рис. 4, *a*, кривая 3), а „вспышка“ люминесценции, стимулируемая ИК светом, отсутствует (рис. 4, *b*, кривая 2). Спадание интенсивности люминесценции ЭМК AgBr(I) на $\lambda \approx 560$ nm при взаимодействии их с желатиной („усталость“ люминесценции) наблюдалось и в [11–13]. В пользу данного предположения свидетельствуют также появление „вспышечного разгорания“ для ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе с дополнительно введенной желатиной (рис. 4, *a*, кривая 2), а также отсутствие „вспышечного разгорания“ (рис. 4, *a*, кривая 4) и появление „вспышки“ люминесценции, стимулируемой ИК светом, для желатиновой эмульсии при введении в нее фенилмеркаптотетразола (рис. 4, *b*, кривая 3). Известно [14], что при введении в эмульсию фенилмеркаптотетразола желатина с поверхностными межузельными ионами серебра не взаимодействует, и соответственно центры $\{Ag_{in}^0 G^+\}$ не образуются.

Наконец, поскольку для ЭМК AgBr(I), распределенных в желатине, возникающее длинноволновое свечение при температурном „тушении“ зеленого свечения наблюдается на $\lambda_{\max} \approx 750$ nm, а не на 720 nm, как в ЭМК AgBr(I), полученных в водном растворе, естественно предположить, что молекулы желатины взаимодействуют и с расположенными на поверхности ЭМК AgBr(I) центрами туннельной люминесценции $\{(I_a^- I_a^-)Ag_{in}^+\}$, $n = 2$, с максимумом свечения на $\lambda_{\max} \approx 720$ nm, формируя при этом донорно-акцепторные комплексы $\{(I_a^- I_a^-)Ag_{in}^+ G^0\}$, $n = 2$. При этом локализованные электроны и дырки на комплексе $\{(I_a^- I_a^-)Ag_{in}^+ G_0\}$, $n = 2$, сохраняют способность к туннельной рекомбинации с максимумом свечения на $\lambda_{\max} \approx 750$ nm.

Выводы

На основе экспериментальных результатов высказано предположение, что возникновение зеленого свечения ЭМК AgBr(I) с $\lambda_{\max} \approx 560$ nm по туннельному механизму вызвано рекомбинацией дырок, локализованных на парных иодных центрах $(I_a^- I_a^-)$, с электронами, локализованными не на поверхности ЭМК AgBr(I), а на межузельных ионах серебра Ag_i^+ , расположенных рядом с парным иодным центром. В процессе освещения и изменения температуры межузельные ионы серебра Ag_i^+ , расположенные рядом с парным иодным центром, способны формировать центры молекулярно-кластерной дисперсности Ag_{in}^+ , $n = 2, 3, \dots$. Электроны, локализованные на центрах Ag_{in}^+ , $n = 2$, сохраняют способность к туннельной рекомбинации с дырками, локализованными на парных иодных центрах со свечением $\lambda_{\max} \approx 720$ nm.

Адсорбция молекул желатины на поверхности ЭМК AgBr(I) приводит к восстановлению поверхностных

межузельных серебряных атомно-молекулярных центров Ag_{in}^+ , $n = 1, 2$, с образованием комплексов $(\text{Ag}_{in}^0 \text{G}^+)$, $n = 1, 2$. Центры $(\text{Ag}_{in}^0 \text{G}^+)$, $n = 1, 2$, являются более глубокими ловушками для электронов с малым сечением захвата по сравнению с центрами Ag_{in}^+ , $n = 1, 2$, и проявляются в том, что кинетика нарастания люминесценции в ЭМК AgBr(I) до стационарного уровня на $\lambda \approx 560 \text{ nm}$ характеризуется наличием „вспышечно-го разгорания“, а „вспышка“ люминесценции во всем измеряемом спектральном диапазоне, стимулируемая ИК светом, отсутствует. Электроны, локализованные на центрах $(\text{Ag}_{in}^0 \text{G}^+)$, $n = 2$, сохраняют способность к туннельной рекомбинации с дырками, локализованными на парных иодных центрах, со свечением с $\lambda_{\text{max}} \approx 750 \text{ nm}$.

Список литературы

- [1] Белоус В.М., Голуб С.И., Орловская Н.А. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1969. Т. 14. № 1. С. 39.
- [2] Белоус В.М., Мельничук Л.П., Орловская Н.А., Чибисов К.В. // ДАН СССР. 1970. Т. 193. № 5. С. 1086.
- [3] Миз К., Джеймс Т. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1973. 572 с.
- [4] Белоус В.М., Толстобров В.И., Чурашов В.П., Суворин В.В. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1977. Т. 22. № 5. С. 390.
- [5] Зимкин Е.А., Ключевич Р.Ф. // Успехи научной фотографии. 1972. Т. 16. С. 136.
- [6] Зимкин Е.А., Ключевич Р.Ф. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1965. Т. 10. № 5. С. 397.
- [7] Дьяконов А.Н., Завлин П.М. Полимеры в кинофотоматериалах. Л.: Химия, 1991. 240 с.
- [8] Белоус В.М., Жуков С.А., Орловская Н.А. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1982. Т. 27. № 3. С. 218.
- [9] Жуков С.А. Автореф. канд. дис. Одесса, 1991.
- [10] Sakuragi S., Kanzaki H. // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 38. N 22. P. 1302.
- [11] Денисова Н.В., Белоус В.М., Денисов И.Г., Деминов Р.Г. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1989. Т. 34. № 3. С. 221.
- [12] Денисова Н.В. Автореф. канд. дис. Казань, 1989.
- [13] Белоус В.М., Ахмеров А.Ю., Жуков С.А., Орловская Н.А. // Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 2001. Т. 46. № 2. С. 19.
- [14] Ляндо В.А., Ведерникова А.О., Логинова И.С., Ефимова Л.И., Мусина А.Н., Загирова Г.Г. // Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1982. Т. 27. № 5. С. 364.