

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.37:544.77

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-148-155>

Поступило в редакцию 10.03.2022

Received 10.03.2022

О. С. Кулакович¹, Л. И. Гуринович¹, Л. Л. Троцюк¹, А. А. Романенко¹, Хонгбо Ли²,
Н. А. Матвеевская³, академик С. В. Гапоненко¹

¹Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Пекинский технологический институт, Пекин, Китай

³Институт монокристаллов Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

Аннотация. Установлено влияние наночастиц золота различной формы (наносферы и наностержни) на фотостабильность квантовых точек InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS и CdSe/ZnCdS/ZnS со структурой типа «ядро/оболочка». Наносферы золота повышают фотостабильность квантовых точек InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS при возбуждении излучением синего диапазона за счет уменьшения среднего времени жизни возбужденного состояния квантовых точек и, соответственно, снижения вероятности Оже-процессов. Увеличение среднего времени жизни возбужденного состояния квантовых точек CdSe/ZnCdS/ZnS в комплексах с наностержнями золота приводит к снижению фотостабильности при возбуждении на 449 и 532 нм.

Ключевые слова: фотостабильность, квантовые точки, наночастицы золота, фотолюминесценция

Для цитирования. Управление фотостабильностью полупроводниковых квантовых точек с помощью наночастиц золота / О. С. Кулакович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 148–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-148-155>

Olga S. Kulakovich¹, Leonid I. Gurinovich¹, Liudmila L. Trotsiuk¹, Andrey A. Ramanenka¹, Hongbo Li²,
Neonilla A. Matveevskaya³, Academician Sergey V. Gaponenko¹

¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Beijing Institute of Technology, Beijing, China

³Institute for Single Crystals of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

MANIPULATION OF THE QUANTUM DOT PHOTOSTABILITY USING GOLD NANOPARTICLES

Abstract. The effect of plasmonic films containing gold nanoparticles of different shape (nanospheres and nanorods) on the photostability of InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS and CdSe/ZnCdS/ZnS quantum dots with core/shell structure has been determined. Gold nanospheres increase the photostability of InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS quantum dots when excited by blue LED radiation when reducing the average lifetime of the excited state of quantum dots and, accordingly, when reducing the probability of Auger processes. An increase in the average lifetime of the excited state of CdSe/ZnCdS/ZnS quantum dots in complexes with gold nanorods leads to a decrease in the photostability upon excitation at 449 and 532 nm.

Keywords: photostability, quantum dots, gold nanoparticles, photoluminescence

For citation. Kulakovich O. S., Gurinovich L. I., Trotsiuk L. L., Ramanenka A. A., Hongbo Li, Matveevskaya N. A., Gaponenko S. V. Manipulation of the quantum dots photostability using gold nanoparticles. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 148–155 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-148-155>

Введение. Люминесцирующие полупроводниковые нанокристаллы, или так называемые квантовые точки (КТ), широко используются сегодня в опто-электронных приборах в качестве высокоэффективных люминофоров [1]. Мировые лидеры IT-рынка, освоившие производство жидко-кристаллических дисплеев по технологии QLED (Quantum-dot Light-Emitting Diodes), используют для подсветки квантовые точки селенида кадмия [2], фосфида индия [3; 4]. Однако эффективность люминесценции всех КТ, как правило, падает вследствие их агрегации на этапе изготовления люминесцентных пленок. Этим вопросам приходится уделять существенное внимание, чтобы найти пути преодоления всех перечисленных негативных факторов при использовании КТ в оптоэлектронных устройствах.

В одной из наших предыдущих работ [5] изучалась фотостабильность водорастворимых КТ CdSe в зависимости от длины цепочек пассивирующих молекул во внешней солубилизирующей оболочке. Экспериментально было установлено, что фотостабильность КТ выше для длинноцепочечных лигандов вследствие снижения проницаемости внешнего потенциального барьера при переносе свободных электронов. Как известно, фотолюминесцентные свойства КТ существенно зависят от свойств окружающей их среды, поскольку большая доля атомов находится на поверхности КТ [6]. Кроме того, фотостабильность КТ может либо увеличиваться, либо уменьшаться в зависимости от взаимодействия КТ с полимерами за счет изменения соотношения скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации (затухания фотолюминесценции).

Одним из возможных способов улучшения свойств флуоресцирующих центров является расположение их вблизи плазмонных наночастиц. Как было показано, плазмонные наночастицы влияют не только на интенсивность фотолюминесценции (ФЛ) [7; 8], но также и на фотостабильность КТ [9; 10]. Например, покрытые оболочкой золота КТ демонстрируют существенно лучшую фотостабильность, чем водо- и органорастворимые КТ [9; 10]. Возрастающая фотостабильность этих структур объясняется наличием тонкой наноболочки из химически инертного золота, которая действует как барьер на пути фотоокисления [10]. Относительно недавно было получено усиление металлом флуоресценции КТ InP в полимерных комбинированных пленках со стержнями Au@Ag@SiO₂ [11]. Также была повышена фотостабильность нанокристаллов InZnP, используя их пассивацию тремя типами неорганических оболочек: градиентной оболочкой из ZnSe_xS_{1-x}, дополнительной оболочкой ZnS и оксидом алюминия с последующим внедрением наночастиц в матрицу из полиметилметакрилата [12]. В результате квантовый выход структуры был увеличен более чем на 50 %, а среднее время затухания фотолюминесценции оказалось в диапазоне 64–67 нс. В данной работе представлены результаты изучения вклада наночастиц золота в фотостабильность КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS и CdSe/ZnCdS/ZnS со структурой типа ядро/оболочка. Это важно для улучшения характеристик светоизлучающих приборов, создаваемых на основе КТ, в том числе для минимизации содержания тяжелых металлов.

Материалы и методы исследования. *Получение плазмонных пленок с квантовыми точками.* В работе исследованы КТ InP/ZnSe/ZnSe_{0,5}S_{0,5}/ZnS и CdSe/ZnCdS/ZnS, предварительно солубилизированные с использованием тиогликолевой кислоты, которая обеспечивает отрицательный поверхностный заряд квантовых точек. По данным электронной микроскопии средний диаметр КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS составил 7,8 нм, а максимум полосы ФЛ – 627 нм. Квантовый выход люминесценции КТ был в пределах 20–40 %. Для CdSe/ZnCdS/ZnS со средним размером 6,7 нм квантовый выход составил 57 %, максимум полосы ФЛ – 656 нм. Наночастицы Au сферической формы были синтезированы методом цитратного восстановления HAuCl₄ в водном растворе [13]. Для получения пленок металлических наночастиц (Au «тип 1») стеклянные подложки покрывались поликатионным слоем полидиаллилдиметиламмоний хлорида в течение 20 мин, что позволило сформировать первичный положительный заряд на поверхности стекла [14]. Повтором процедуры были осаждены два последующих противоположно заряженных слоя полиэлектролита (ПЭ) – полистиролсульфоната натрия и полидиаллилдиметиламмоний хлорида. Наночастицы Au в воде имеют отрицательный заряд вследствие стабилизации цитратионами и могут осаждаться на положительно заряженные подложки простым погружением последних в золь золота (коллоидный раствор Au).

Второй тип плазмонных пленок золота был приготовлен непосредственно на стеклянной поверхности (Au «тип 2»). Стеклянные подложки предварительно модифицировались (3-аминопропил)триэтоксисиланом при обработке в 5 %-ном этанольном растворе при кипении. Подложки после ультразвуковой очистки в спирте погружались в 0,01 %-ный водный раствор HAuCl₄, доведенный до кипения, а затем при постоянном помешивании добавлялось 0,4 мл 0,1 %-ного водного раствора цитрата натрия при температуре 80,0 °С. Реагирующая смесь выдерживалась 30 мин. После полного отмытия в воде и высушивания металлических пленок 1 и 2 типа, 3 мкл 5 · 10⁻⁶ М раствора КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS наносили поверх подложек и высушивали. В нескольких случаях осаждали дополнительные слои полиэлектролита между

металлическими пленками и слоем КТ (от 1 до 21 отдельного слоя), чтобы иметь возможность контролировать дистанцию «золото–InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS».

Третий тип плазмонных пленок представлял собой электростатические комплексы наностержней (НС) золота и КТ CdSe/ZnCdS/ZnS, помещенные в пленку поливинилового спирта (ПВС) [15]. Синтез НС осуществляли по методике, описанной ранее [16]. Комплексы формировали сначала в водных растворах с помощью электростатического взаимодействия положительно заряженных НС золота, покрытых бислоем цетилтриметиламмоний бромида, с отрицательно заряженными КТ, покрытыми тиогликолевой кислотой. Расчетное соотношение концентраций, исходя из оптической плотности растворов КТ и НС золота $n(\text{КТ}) : n(\text{AuНС})$ составило 3 : 1. Затем коллоидные растворы, содержащие комплексы, помещали в 5 %-ный раствор ПВС и формировали полимерную пленку, итоговая толщина которой составила 27 мкм.

Оборудование и оптические измерения. Спектры оптической плотности металлических пленок и коллоидных растворов были измерены на спектрофотометре Cary 500 (Varian, США). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) металлических пленок была проведена на установке Nova NanoSEM 450 (США), морфологию наночастиц золота изучали методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе S-806TEM/SEM (Hitachi, Япония).

Фотостабильность КТ оценивалась по анализу изменения интенсивности ФЛ при непрерывном облучении светодиодом с длиной волны излучения 460 нм (металлические пленки на стекле), либо лазерами с длиной волны излучения 449 и 532 нм (в растянутых пленках). Спектры регистрировались с использованием спектрометра S-3801 (Solar ТП, Беларусь) и охлаждаемого жидким азотом ПЗС-детектора LN-CCD-1152-E (Princeton Instruments, США). Измерения проводились в одинаковых условиях: размер светового пятна на образцах составлял 2×4 мм, оптическая мощность падающего излучения светодиода была 2,0 мВт, что соответствует плотности оптической мощности 0,3 мВт/мм². В течение 10 ч облучения светодиодом накопленная образцами доза достигала 11,0 Дж в расчете на 1 мм² площади образца. Для измерений фотостабильности КТ в растянутых пленках размер светового пятна составлял $0,1 \times 0,1$ мм, оптическая мощность – 0,4 мВт (плотность мощности – 40 мВт/мм²), накопленная доза за 2 ч – 288 Дж в расчете на 1 мм² площади.

Кинетики затухания фотолюминесценции образцов регистрировались методом время-коррелированного счета одиночных фотонов (TCSPC) с помощью спектрофлуориметра Fluorolog-3 (HORIBA Scientific, США). В качестве источников возбуждения выступали импульсный светодиод DeltaDiode DD-310 (HORIBA Scientific) с длиной волны излучения 314 нм (образцы с металлическими пленками на стекле) либо импульсный светодиод PLS-400 (PicoQuant, Германия) с длиной волны излучения 405 нм (образцы с комплексами «Au НС-КТ» в ПВС). Инструментальный отклик системы (IRF) регистрировался для сильно разбавленного раствора Ludox. Анализ кинетик затухания фотолюминесценции выполнялся с помощью программного пакета DAS6 (HORIBA Scientific) по 3-экспоненциальной модели аппроксимации кривых затухания: $I(t) = A + B_1 e^{-t/\tau_1} + B_2 e^{-t/\tau_2} + B_3 e^{-t/\tau_3}$. Среднее время жизни рассчитывалось как $\langle \tau \rangle = \frac{B_1 \tau_1^2 + B_2 \tau_2^2 + B_3 \tau_3^2}{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2 + B_3 \tau_3}$.

Результаты и их обсуждение. Средний размер наночастиц золота, приготовленных как в растворе, так и на стеклянной подложке методом цитратного восстановления, составил 20 нм в диаметре (рис. 1, *a* и *b*).

Максимум оптической плотности для пленки с Au «типа 2» приходится на 550 нм (рис. 1, *c*, розовая кривая), в то время как пленка с Au «типа 1», состоящая из наночастиц того же размера, что Au «типа 2», имеет широкий максимум поглощения около 590 нм (рис. 1, *c*, черная кривая). Это указывает на присутствие значительно агрегировавших частиц Au в пленке «типа 1». В дальнейшем эти золотые пленки будем называть Au₅₉₀ и Au₅₅₀, в соответствии с их максимумами оптической плотности. Таким образом, процедура синтеза прямо на стеклянной поверхности, используемая для приготовления Au₅₅₀, позволяет избежать процесса агрегации по сравнению с осаждением коллоидных наночастиц из раствора. Спектры оптической плотности раствора НС золота, из которых формировались комплексы с КТ CdSe/ZnCdS/ZnS в полимерной пленке, представлены на рис. 1, *d*, морфология НС приведена на вставке к рисунку.

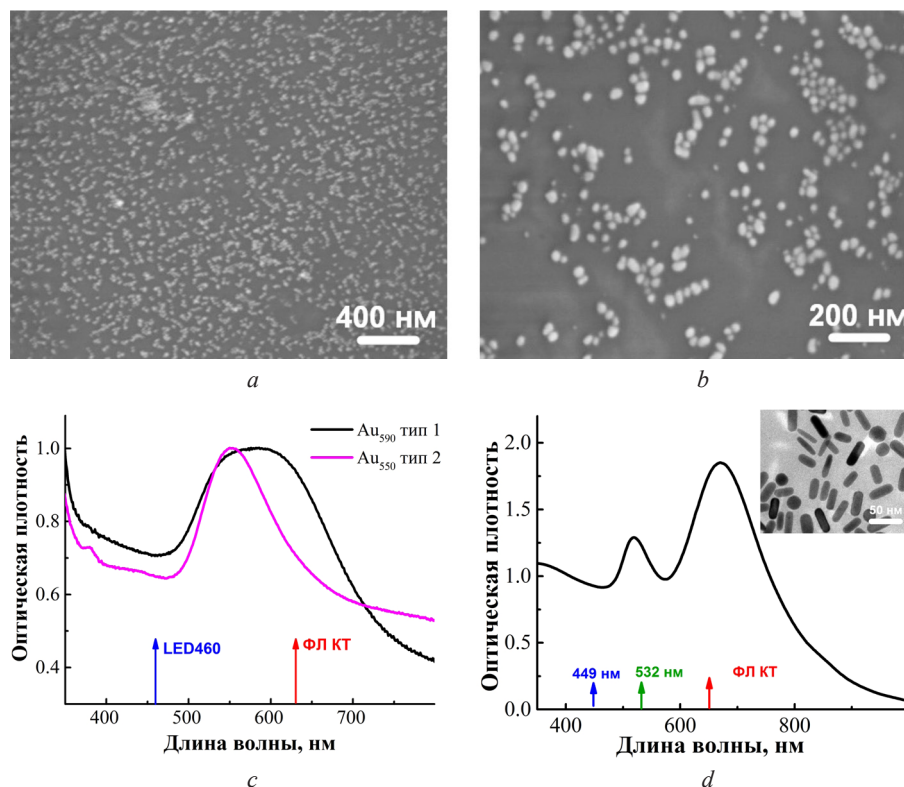


Рис. 1. СЭМ-изображение плазмонных пленок золота Au_{590} «тип 1», Au_{550} «тип 2» (a, b); нормированные спектры оптической плотности Au_{590} «тип 1», Au_{550} «тип 2» (c); спектр оптической плотности НС золота, вставка – изображение электронной микроскопии НС золота (d)

Fig. 1. SEM-image of the plasmonic films of gold Au_{590} of “type 1”, Au_{550} of “type 2” (a, b); normalized spectra of the optical density of Au_{590} of “type 1”, Au_{550} of “type 2” (c); optical density spectrum of the gold nanorods, insert – image of electron microscopy of the gold nanorods (d)

Каждый из двух типов пленок наносфер золота с различным положением плазмонной полосы был использован для изучения фотостабильности осажденных на них КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS. Чтобы уменьшить роль безызлучательных процессов, плазмонные пленки предварительно были покрыты девятью слоями ПЭ, как и в нашей предыдущей работе [7]. В качестве образцов сравнения были приготовлены образцы с КТ на стекле, не содержащем металлических наночастиц.

Было обнаружено, что фотолюминесценция КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS на подложках с наночастицами золота более стабильна в сравнении со стеклянной подложкой (рис. 2, a). Это может быть обусловлено плазмонным взаимодействием КТ и наночастиц золота.

Для того чтобы установить точную причину такого различия в фотостабильности, были проведены измерения скорости и характера затухания ФЛ во времени для водорастворимых КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS в плазмонных наноструктурах и контрольного образца с девятью ПЭ-слоями (рис. 3, a).

Среднее время жизни для КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS на стекле составило 45,8 нс, а среднее время жизни фотолюминесценции для КТ на подложке с золотыми наночастицами снизилось на 17 % относительно значения контрольного образца на стекле и составило 37,7 нс для Au_{550} и 38,7 нс для Au_{590} . Полученные экспериментальные данные на золотых наноструктурах показывают сокращение среднего времени жизни, что вероятно указывает на плазмонное действие золотых наночастиц на скорость излучательной рекомбинации в КТ InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS. Это стало возможным благодаря перекрытию спектра испускания КТ с плазмонной полосой золотых пленок (рис. 1, c) [1].

КТ до полного фотовыгорания или фотохимического разрушения (окисления) могут подвергаться конечному числу циклов «возбуждения–испускания». Основными двумя причинами,

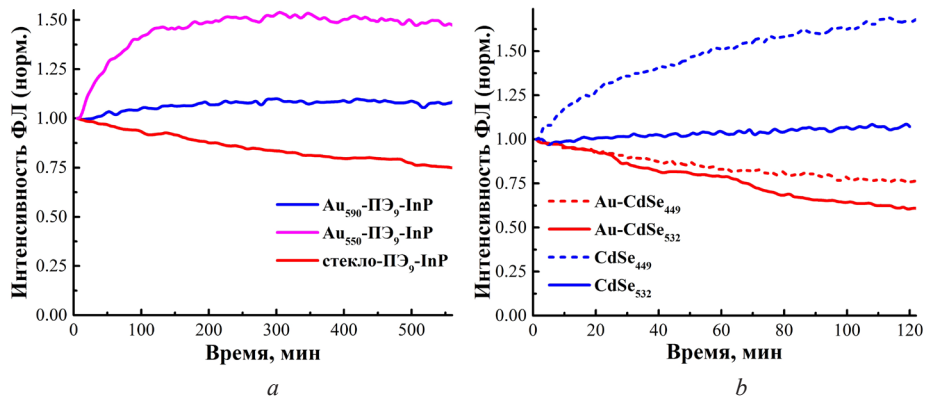


Рис. 2. Зависимости нормированной интенсивности фотолюминесценции: *a* – InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS, осажденные на плазмонные пленки золота с предварительно нанесенными в качестве разделителя (спейсера) девятью слоями полиэлектролитов, от времени облучения. Длина волны регистрации фотолюминесценции – 630 нм. Источник облучения – синий светодиод с длиной волны $\lambda_{\text{cm}} = 460$ нм; *b* – CdSe/ZnCdS/ZnS в растянутых пленках ПВС от времени облучения. Длина волны регистрации ФЛ – 650 нм. Источник облучения – лазеры с длиной волны генерации $\lambda_{\text{cm}} = 449$ и 532 нм

Fig. 2. Dependences of the normalized photoluminescence intensity on the irradiation time: *a* – InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS deposited on the plasmonic films of gold with nine polyelectrolyte layers preliminarily applied as a spacer. The photoluminescence wavelength is 630 nm. The irradiation source is a blue LED with the wavelength $\lambda_{\text{cm}} = 460$ nm; *b* – CdSe/ZnCdS/ZnS in the stretched PVA films, the photoluminescence wavelength is 650 nm. The irradiation source is the lasers with the wavelength $\lambda_{\text{cm}} = 449$ and 532 nm

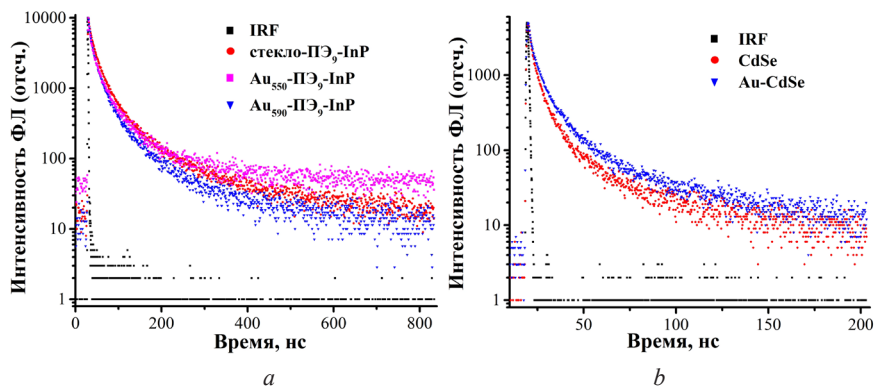


Рис. 3. Кинетики затухания фотолюминесценции: *a* – квантовых точек InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS, осажденных на плазмонные пленки золота с девятью слоями полиэлектролитов, с возбуждением на 314 нм и регистрацией на 635 нм; *b* – квантовых точек CdSe/ZnCdS/ZnS в пленках ПВС с возбуждением на 405 нм и регистрацией на 650 нм

Fig. 3. Photoluminescence decay kinetics: *a* – quantum dots of InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS deposited on the plasmonic films of gold with nine polyelectrolyte layers, upon excitation at 314 nm and upon registration at 635 nm; *b* – CdSe/ZnCdS/ZnS quantum dots in the PVA films upon excitation at 405 nm and upon registration at 650 nm

которые отвечают за падение интенсивности фотолюминесценции со временем, являются фоторазрушение излучательных центров и появление в КТ непарного заряда вследствие Оже-рекомбинации или вследствие туннелирования возбужденных электронов (или дырок) в окружающую среду. Фоторазрушение (или выгорание) является необратимым процессом, в то время как фотоионизация по своей сути является обратимой.

При анализе фотостабильности излучающих центров вблизи металла необходимо рассматривать три эффекта: усиление возбуждающего поля, рост скорости безызлучательных переходов и увеличение скорости излучательной рекомбинации [17]. Обусловленная возбуждением плазмонов локализация поля приводит к усилению темпов возбуждения, нарастанию Оже-процесса и снижению фотостабильности КТ. Эти процессы могут отвечать за снижение фотостабильности КТ в пленках, если длина волны возбуждения совпадает с плазмонной полосой

металла. Однако в наших экспериментальных условиях для композитных структур «наносферы золота–КТ» было использовано возбуждение на 460 нм вне плазмонной полосы золота, поэтому данный фактор, вероятно, не оказывает существенного влияния на фотостабильность InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS. Для полимерных пленок с комплексами «наностержни золота–CdSe/ZnCdS/ZnS» мы исследовали фотостабильность КТ при возбуждении на 449 нм вне плазмонного резонанса и на 532 нм в области поперечного плазмонного резонанса НС золота (рис. 2, *b*). Увеличение излучательной и безызлучательной скоростей переходов в КТ может приводить к улучшению их фотостабильности, так как излучатель меньше времени находится в возбужденном состоянии и, таким образом, имеет меньшую вероятность участия в конкурирующих с фотолюминесценцией фотофизических и фотохимических процессах. Эти выводы подтверждаются корреляцией изменения фотостабильности комплексов КТ, содержащих наностержни золота, с изменением времени жизни возбужденного состояния по сравнению с КТ в отсутствие НС золота. Так, для комплексов «Au НС-КТ» в ПВС (рис. 3, *b*) среднее время жизни возбужденного состояния растет до 14,3 нс по сравнению с образцами КТ в ПВС (9,2 нс), также как растет и время каждой из трех компонент кинетики затухания фотолюминесценции, что сопровождается снижением фотостабильности КТ в присутствии наностержней золота при возбуждении как на 449 нм, так и на 532 нм (рис. 2, *b*).

Таким образом, в присутствии наночастиц золота можно наблюдать как повышение фотостабильности флуорофора, так и понижение, в зависимости от доминирующих процессов.

Усиление фотолюминесценции КТ наблюдалось только для структуры Au₅₅₀-ПЭ-КТ и достигало 1,8 крат. Другие плазмонные наноструктуры (1 и 3-го типа), представленные в работе, показали тушение фотолюминесценции. Это связано с преобладанием безызлучательных механизмов, обусловленных топологией композитных наноструктур: наличие большого числа агрегатов наночастиц золота в случае пленки Au₅₉₀ (рис. 1, *b*) и электростатическая адсорбция КТ преимущественно на боковых поверхностях наностержней золота в случае комплексов «Au НС-КТ» [16].

Заключение. В гибридных наноструктурах, содержащих квантовые точки и наночастицы золота, наблюдается рост фотостабильности квантовых точек в случае сокращения времени жизни возбужденного состояния под влиянием наночастиц золота. Напротив, в случае увеличения среднего времени возбужденного состояния в присутствии наностержней золота, фотостабильность квантовых точек падает как при возбуждении в поперечном плазмонном резонансе (532 нм), так и при возбуждении вне плазмонного резонанса (449 нм). Такая корреляция свидетельствует о доминирующем влиянии плазмонных эффектов на вероятность Оже-процессов, и как следствие, на фотостабильность квантовых точек InP/ZnSe/ZnSeS/ZnS и квантовых точек CdSe/ZnS/ZnS. Полученные результаты могут быть пригодны при разработке новых методик повышения надежности и стабильности оптических характеристик светоизлучающих приборов.

Благодарности. Работа поддержана проектом БРФФИ (грант № Ф20-ПТИ-004). Авторы выражают благодарность А. В. Прудникову за синтез квантовых точек CdSe/ZnS/ZnS.

Acknowledgments. The research is supported by the BRFFR Project (grant No. Ф20-ПТИ-004). The authors are grateful to A. V. Prudnikov for synthesis of CdSe/ZnS/ZnS quantum dots.

Список использованных источников

1. Gaponenko, S. V. Applied Nanophotonics / S. V. Gaponenko, H. V. Demir. – Cambridge, 2018. <https://doi.org/10.1017/9781316535868>
2. Han, C.-Y. Development of Colloidal Quantum Dots for Electrically Driven Light-Emitting Devices / C.-Y. Han, H. J. Yang // Korean Ceramic Society. – 2017. – Vol. 54, N 6. – P. 449–469. <https://doi.org/10.4191/kcers.2017.54.6.03>
3. Full visible range covering InP/ZnS nanocrystals with high photometric performance and their application to white quantum dot light-emitting diodes / X. Yang [et al.] // Adv. Mater. – 2012. – Vol. 24, N 30. – P. 4180–4185. <https://doi.org/10.1002/adma.201104990>
4. Highly luminescent Zn-Cu-In-S/ZnS core/gradient shell quantum dots prepared from indium sulfide by cation exchange for cell labeling and polymer composites / L. Yang [et al.] // Nanotechnology. – 2019. – Vol. 30, N 39. – Art. 395603. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab2aa2>
5. Photostability of luminescent water-soluble cadmium selenide nanocrystals with chemical surface modification / L. I. Gurinovich [et al.] // J. Appl. Spectrosc. – 2006. – Vol. 73, N 4. – P. 572–575. <https://doi.org/10.1007/s10812-006-0120-2>

6. Photoluminescence of water-soluble CdSe/ZnS nanoparticles in complexes with cationic and anionic polyelectrolytes / N. Strekal [et al.] // *Opt. Spectrosc.* – 2008. – Vol. 104, N 1. – P. 50–56. <https://doi.org/10.1134/s0030400x08010074>
7. Enhanced Luminescence of CdSe Quantum Dots on Gold Colloids / O. Kulakovich [et al.] // *Nano Lett.* – 2002. – Vol. 2, N 12. – P. 1449–1452. <https://doi.org/10.1021/nl025819k>
8. Features of the Secondary Emission Enhancement Near Plasmonic Gold Film / N. Strekal [et al.] // *Plasmonics.* – 2009. – Vol. 4, N 1. – P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11468-008-9063-1>
9. Jin, Y. Plasmonic fluorescent quantum dots / Y. Jin, X. Gao // *Nat. Nanotechn.* – 2009. – Vol. 4, N 9. – P. 571–576. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.193>
10. Non-blinking quantum dot with a plasmonic nanoshell resonator / B. Ji [et al.] // *Nat. Nanotechn.* – 2015. – Vol. 10, N 2. – P. 170–175. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.298>
11. Metal-enhanced fluorescence in polymer composite films with Au@Ag@SiO₂ nanoparticles and InP@ZnS quantum dots / K.-S. Kim [et al.] // *RSC Adv.* – 2019. – Vol. 9, N 1. – P. 224–233. <https://doi.org/10.1039/c8ra08802k>
12. Influence of the Core/Shell Structure of Indium Phosphide Based Quantum Dots on Their Photostability and Cytotoxicity / D. Wegner [et al.] // *Frontiers Chem.* – 2019. – Vol. 7. – Art. 466. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00466>
13. Turkevich, J. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold / J. Turkevich, P. C. Stevenson, J. Hillier // *Discuss. Faraday Soc.* – 1951. – Vol. 11. – P. 55–75. <https://doi.org/10.1039/df9511100055>
14. Colloidal Silver Films on Polypropylene and Polyethylene / A. Muravitskaya [et al.] // *Physica Status Solidi (b).* – 2018. – Vol. 255, N 4. – P. 1700491–1700496. <https://doi.org/10.1002/pssb.201700491>
15. Polarization Properties of Photoluminescence of Anisotropic Polymer Films Containing Aligned Au Nanorods and Semiconductor Nanoparticles of Various Shape / L. I. Gurinovich [et al.] // *Semiconductors.* – 2018. – Vol. 52, N 16. – P. 2054–2056. <https://doi.org/10.1134/s1063782618160108>
16. Plasmon-enhanced Fluorescence in Gold Nanorod-Quantum Dot Coupled Systems / L. Trotsiuk [et al.] // *Nanotechnology.* – 2020. – Vol. 31, N 10. – P. 105201–105211. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5a0e>
17. Lakowicz, J. R. Radiative decay engineering: biophysical and biomedical applications / J. R. Lakowicz // *Anal. Biochem.* – 2001. – Vol. 298, N 1. – P. 1–24. <https://doi.org/10.1006/abio.2001.5377>

References

1. Gaponenko S. V., Demir H. V. *Applied Nanophotonics*. Cambridge, 2018. <https://doi.org/10.1017/9781316535868>
2. Han C.-Y., Yang H. Development of Colloidal Quantum Dots for Electrically Driven Light-Emitting Devices. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2017, vol. 54, no. 6, pp. 449–469. <https://doi.org/10.4191/kcers.2017.54.6.03>
3. Yang X., Zhao D., Leck K. S., Tan S. T., Tang Y. X., Zhao J. L., Demir H. V., Sun X. W. Full visible range covering InP/ZnS nanocrystals with high photometric performance and their application to white quantum dot light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 2012, vol. 24, no. 30, pp. 4180–4185. <https://doi.org/10.1002/adma.201104990>
4. Yang L., Antanovich A., Prudnikau A., Taniya O. S., Grzhegorzhevskii K. V., Zelenovskiy P., Terpinskaya T., Tang J., Artemyev M. Highly luminescent Zn-Cu-In-S/ZnS core/gradient shell quantum dots prepared from indium sulfide by cation exchange for cell labeling and polymer composites. *Nanotechnology*, 2019, vol. 30, no. 39, art. 395603. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab2aa2>
5. Gurinovich L. I., Artem'ev M. V., Lyutich A. A., Gaponenko S. V. Photostability of luminescent water-soluble cadmium selenide nanocrystals with chemical surface modification. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2006, vol. 73, no. 4, pp. 572–575. <https://doi.org/10.1007/s10812-006-0120-2>
6. Strekal N., Kulakovich O., Belyaev A., Stsiapura V., Maskevich S. Photoluminescence of water-soluble CdSe/ZnS nanoparticles in complexes with cationic and anionic polyelectrolytes. *Optics and Spectroscopy*, 2008, vol. 104, no. 1, pp. 50–56. <https://doi.org/10.1134/s0030400x08010074>
7. Kulakovich O., Strekal N., Yaroshevich A., Maskevich S., Gaponenko S., Nabiev I., Woggon U., Artemyev M. Enhanced Luminescence of CdSe Quantum Dots on Gold Colloids. *Nano Letters*, 2002, vol. 2, no. 12, pp. 1449–1452. <https://doi.org/10.1021/nl025819k>
8. Strekal N., Kulakovich O., Askirka V., Sveklo I., Maskevich S. Features of the Secondary Emission Enhancement Near Plasmonic Gold Film. *Plasmonics*, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11468-008-9063-1>
9. Jin Y., Gao X. Plasmonic fluorescent quantum dots. *Nature Nanotechnology*, 2009, vol. 4, no. 9, pp. 571–576. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.193>
10. Ji B., Giovanelli E., Habert B., Spinicelli P., Nasilowski M., Xu X., Lequeux N., Hugonin J.-P., Marquier F., Grefet J.-J., Dubertret B. Non-blinking quantum dot with a plasmonic nanoshell resonator. *Nature Nanotechnology*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 170–175. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.298>
11. Kim K.-S., Zakia M., Yoon J., Yoo S. I. Metal-enhanced fluorescence in polymer composite films with Au@Ag@SiO₂ nanoparticles and InP@ZnS quantum dots. *RSC Advances*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 224–233. <https://doi.org/10.1039/c8ra08802k>
12. Wegner D., Dussert F., Truffier-Boutry D., Benayad A., Beal D., Mattera L., Ling W. L., Carrière M., Reiss P. Influence of the Core/Shell Structure of Indium Phosphide Based Quantum Dots on Their Photostability and Cytotoxicity. *Frontiers in Chemistry*, 2019, vol. 7, art. 466. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00466>
13. Turkevich J., Stevenson P. C., Hillier J. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Discussions of the Faraday Society*, 1951, vol. 11, pp. 55–75. <https://doi.org/10.1039/df9511100055>
14. Muravitskaya A., Kulakovich O., Adam P.-M., Gaponenko S. Colloidal Silver Films on Polypropylene and Polyethylene. *Physica Status Solidi (b)*, 2018, vol. 255, no. 4, pp. 1700491–1700496. <https://doi.org/10.1002/pssb.201700491>

15. Gurinovich L. I., Trotsiuk L. L., Kulakovich O. S., Sushko N. I., Demir H. V., Gaponenko S. V. Polarization Properties of Photoluminescence of Anisotropic Polymer Films Containing Aligned Au Nanorods and Semiconductor Nanoparticles of Various Shape. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, no. 16, pp. 2054–2056. <https://doi.org/10.1134/s1063782618160108>

16. Trotsiuk L., Muravitskaya A., Kulakovich O., Guzatov D., Ramanenka A., Kelestemur Y., Demir H. V., Gaponenko S. Plasmon-enhanced Fluorescence in Gold Nanorod-Quantum Dot Coupled Systems. *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, no. 10, pp. 105201–105211. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5a0e>

17. Lakowicz J. R. Radiative decay engineering: biophysical and biomedical applications. *Analytical Biochemistry*, 2001, vol. 298, no. 1, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1006/abio.2001.5377>

Информация об авторах

Кулакович Ольга Сергеевна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.kulakovich@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-8618-6771

Гуринович Леонид Иванович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leonid@dragon.bas-net.by.

Троцюк Людмила Леонидовна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: l.trotsiuk@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0003-2072-3970

Романенко Андрей Алексеевич – науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.ramanenka@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0002-6336-0578

Хонгбо Ли – профессор. Пекинский технологический институт (5, South Zhongguancun Street, Beijing 10008, China). E-mail: hongbo.li@bit.edu.cn. ORCID: 0000-0002-3378-0870

Матвеевская Неонилла Анатольевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт монокристаллов НАН Украины (пр. Ленина, 60, 61001, Харьков, Украина). E-mail: neonillamatveevskaa@gmail.com.

Гапоненко Сергей Васильевич – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0003-3774-5471

Information about the authors

Kulakovich Olga S. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.kulakovich@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-8618-6771

Gurinovich Leonid I. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leonid@dragon.bas-net.by.

Trotsiuk Liudmila L. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: l.trotsiuk@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0003-2072-3970

Ramanenka Andrey A. – Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.ramanenka@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0002-6336-0578

Hongbo Li – Professor. Beijing Institute of Technology (5, South Zhongguancun Street, Beijing 10008, China). E-mail: hongbo.li@bit.edu.cn. ORCID: 0000-0002-3378-0870

Matveevskaya Neonolla A. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. Institute for Single Crystals of the National Academy of Sciences of Ukraine (60, Lenin Ave., 61001, Kharkiv, Ukraine). E-mail: neonillamatveevskaa@gmail.com.

Gaponenko Sergey V. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by. ORCID: 0000-0003-3774-5471