



УДК 535.3

РЕЗОНАНСНОЕ И НЕРЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ПЛАЗМАМИ

Н.А. Торопов, А.Н. Камалиева, Р.Д. Набиуллина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: aisylu.kamaliewa@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.12.18, принята к печати 23.01.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-189-195

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Торопов Н.А., Камалиева А.Н., Набиуллина Р.Д. Резонансное и нерезонансное взаимодействие полупроводниковых нанокристаллов с локализованными плазмонами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 189–195. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-189-195

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано усиление флуоресценции полупроводниковых нанокристаллов и органических красителей с помощью плазмонных резонансов. В продолжение работ, посвященных флуоресценции при нерезонансном взаимодействии молекул и металлических наночастиц, выполнено экспериментальное исследование усиления флуоресценции при нерезонансном взаимодействии металлических наночастиц и квантовых точек. **Метод.** Образцы металлических наночастиц, имеющих плазмонные резонансы в видимой области спектра, изготовлены методом осаждения паров серебра в высоковакуумной камере. Эквивалентная толщина слоя 5 нм, латеральный размер островков 30–50 нм. Полупроводниковые нанокристаллы CdSe/ZnS с максимумом люминесценции на длине волны 630 нм и нанокристаллы CdSe/ZnS с градиентным составом оболочки ZnS и максимумом люминесценции на длине волны 520 нм создавались методом «горячей инъекции». Растворы квантовых точек наносились на островковые пленки методом spin-coating. Поглощение образцов измерено на спектрофотометре СФ-56. Флуоресценция определялась с помощью спектрофлуориметра RF-5301PC. Исследована кинетика затухания люминесценции образцов. **Основные результаты.** Показано усиление люминесценции при резонансном взаимодействии квантовых точек и тушение люминесценции при нерезонансном взаимодействии, в обоих случаях наблюдалось сокращение времени жизни люминесценции, характерное для эффекта Парселла. **Практическая значимость.** Металлические наночастицы в качестве резонатора позволят увеличить квантовый выход флуоресценции различных квантовых излучателей.

Ключевые слова

полупроводниковые нанокристаллы, плазмонные наночастицы, флуоресценция, время жизни флуоресценции, эффект Парселла, скорость спонтанной эмиссии

Благодарности

Работа поддержана грантом Университета ИТМО № 418227. Авторы выражают благодарность обучающимся и сотрудникам центра «Физика наноструктур» Университета ИТМО за оказанную помощь.

RESONANT AND NON-RESONANT INTERACTION OF SEMICONDUCTOR NANOCRYSTALS WITH LOCALIZED PLASMONS

N.A. Toropov, A.N. Kamaliewa, R.D. Nabiullina

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: aisylu.kamaliewa@yandex.ru

Article info

Received 22.12.18, accepted 23.01.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-189-195

Article in Russian

For citation: Toropov N.A., Kamaliewa A.N., Nabiullina R.D. Resonant and non-resonant interaction of semiconductor nanocrystals with localized plasmons. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 189–195 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-189-195

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of fluorescence enhancement of semiconductor nanocrystals and organic dyes using plasmon resonances. The study is interesting from both basic and applied science point of view. Among recent

articles devoted to this topic, the one by Egorushina, et al. was high-profile, and described the case of fluorescence enhancement during nonresonant interaction of molecules and metallic nanoparticles, which is an unusual and poorly studied phenomenon. We made an attempt to perform a similar experimental study for quantum dots. **Method.** Samples of metallic nanoparticles with plasmon resonances in the visible spectrum region were fabricated using deposition of silver vapor in a high-vacuum chamber. The equivalent layer thickness was 5 nm, the lateral size of the islands was 30–50 nm. CdSe/ZnS semiconductor nanocrystals with a luminescence maximum at a wavelength of 630 nm and CdSe/ZnS nanocrystals with a gradient composition of the ZnS shell and a luminescence maximum at a wavelength of 520 nm were synthesized through the “hot injection” protocol. Solutions of quantum dots were deposited on island films by a spin-coating method. The absorption of the samples was measured on SF-56 spectrophotometer. Fluorescence was measured using RF-5301PC spectrofluorimeter. The luminescence decay kinetics of the samples was also studied. **Main Results.** As a result, luminescence enhancement during resonant interaction of quantum dots and quenching of luminescence during nonresonant interaction were obtained. The luminescence lifetime decrease characteristic of the Purcell effect was observed in both cases. **Practical Relevance.** Metal nanoparticles as the resonator will increase the fluorescence quantum yield of various quantum emitters by the Purcell effect.

Keywords

semiconductor nanocrystals, plasmonic nanoparticles, fluorescence, fluorescence lifetime, Purcell effect, spontaneous emission rate

Acknowledgements

The work was supported by ITMO University grant No. 418227. The authors are grateful to the students and staff of ITMO University Center for Physics of Nanostructures of for their assistance.

Введение

Одной из важнейших задач нанопотоники является создание многофункциональных компонентов, позволяющих усиливать взаимодействие света с веществом. Наиболее продуктивным подходом к решению этой задачи является создание гибридных материалов, сочетающих свойства разных систем. Примером таких систем являются металлические наноструктуры, имеющие плазмонные резонансы в видимой области спектра, и молекулы красителей или полупроводниковые нанокристаллы – квантовые точки [1–4].

Плазмонные наноструктуры обладают уникальным свойством: подобно антенне в нанометровом масштабе, они обеспечивают сильную локализацию света, которая превосходит дифракционный предел. При этом вследствие возникновения плазмонных резонансов в окрестности таких структур электрическое поле усиливается на несколько порядков по сравнению с полем падающей волны. Этот эффект достаточно подробно изучен и успешно применяется, например, при исследовании спектров комбинационного рассеяния различных молекул, адсорбированных на шероховатых поверхностях металлов, при усилении люминесценции молекул красителей, модификации их поглощения, фотохимических конформационных изменений, а также расщепления в спектрах люминесценции сильно связанных систем, таких как плазмонные наностержни и *J*-агрегаты органических молекул [5–7]. Это может служить основой при разработке химических сенсоров, излучателей, а также сенсоров изменения состояния биологических молекул.

Уникальные оптические свойства полупроводниковых квантовых точек обусловлены эффектом размерного квантования, позволяющим настраивать частоту их излучения, изменяя размер. По сравнению с органическими молекулами квантовые точки более фотостойки, они могут использоваться для создания излучателей инфракрасного диапазона. Излучательные экситонные переходы возможны не только при их резонансном возбуждении.

В настоящее время синтезирован ряд красителей и полупроводниковых нанокристаллов, имеющих высокий квантовый выход. Однако помещение на различных подложках приводит к снижению флуоресценции по сравнению с этим явлением в растворах, что делает их менее пригодными для ряда прикладных задач. Преодолеть эту проблему позволяет плазмонное усиление флуоресценции. Так, например, можно добиться усиления флуоресценции как молекул красителя, так и квантовых точек, например селенида кадмия, если поместить их вблизи наночастиц серебра или золота [3, 8, 9].

Эффект Парселла

Считается, что в основном усиление флуоресценции определяется эффектом Парселла [1, 10–13]. Описанный впервые при исследовании ядерного магнитного резонанса этот эффект заключается в модификации скорости спонтанной эмиссии фотонов, испускаемых системой (квантовой точкой, молекулой) при взаимодействии с резонатором. Иными словами, используя металлические наночастицы в качестве резонатора, за счет эффекта Парселла можно повысить квантовый выход флуоресценции различных квантовых излучателей.

Наибольший интерес представляют работы, посвященные эффекту Парселла, в которых увеличение флуоресценции наблюдается даже в случае отстройки частот плазмонных резонансов и излучательных переходов красителей [1].

В настоящей работе исследована флуоресценция квантовых точек на поверхности диэлектрика с помещенными на них наночастицами серебра. Изготовленные в виде островковых пленок наночастицы серебра имеют достаточно узкую полосу плазмонного поглощения. Квантовыми точками служат нанокристаллы селенида кадмия в оболочке из сульфида цинка, демонстрирующие люминесценцию на длинах волн 520 (КТ520) и 630 нм (КТ630).

Эффект Парселла определяется как модификация скорости спонтанной эмиссии квантового эмиттера при его взаимодействии с резонатором. В настоящее время эффект широко применяется в нанофотонике, в частности, при описании взаимодействия квантовых эмиттеров с плазмонными наноплазменными, формируемыми из благородных металлов. Эффективность работы антенны определяется фактором Парселла [12, 14]:

$$F_{\text{Pur}} = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{P}{P_0}, \quad (1)$$

где γ , P и γ_0 , P_0 – скорость и мощность спонтанной эмиссии фотонов квантовыми точками в среде и в вакууме соответственно. Таким образом, определяющий количество актов возбуждения и снятия возбуждения фактор Парселла связан с мощностью излучения, распространяющегося в свободном пространстве и в некоторой среде.

Взаимодействие квантового излучателя со средой может быть представлено выражением:

$$\gamma = \frac{2\omega_0}{3\hbar\epsilon_0} |\mathbf{d}|^2 \rho(r_o, \omega_0), \quad (2)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, \hbar – постоянная Планка, \mathbf{d} – матричный элемент дипольного момента излучательного перехода, ω_0 – угловая частота излучения квантового эмиттера; $\rho(r_o, \omega_0)$ – плотность состояний:

$$\rho(r_o, \omega_0) = \frac{6\omega_0}{\pi c^2} \{n \text{Im}[G(r_o, \omega_0)] \mathbf{n}\}, \quad (3)$$

G – функция Грина системы в точке нахождения эмиттера, \mathbf{n} – единичный вектор в направлении \mathbf{d} ; c – скорость света. Классическое представление эквивалентно описанию электрического поля, создаваемого системой и возвращающегося к ней.

Скорость спонтанной релаксации квантового эмиттера в вакууме (1) можно описать как [14]:

$$\gamma_0 = \frac{\omega_0^3}{3\pi\hbar\epsilon_0 c^3} |\mathbf{d}|^2. \quad (4)$$

Таким образом, разница между γ и γ_0 довольно очевидно зависит от наличия металлической наночастицы. Поскольку скорости релаксации связаны со временем жизни τ квантового эмиттера – квантовой точки – соотношением

$$\gamma \sim \frac{1}{\tau}, \quad (5)$$

в экспериментальной части предлагается исследовать кинетику затухания флуоресценции в присутствии наночастиц металла и без них. Отметим, что формула (5) отражает качественную взаимосвязь вероятностей переходов и времени затухания, для более точное описания необходимо учитывать процессы релаксации квантовых точек.

Материалы и методы

В качестве плазмонных наноплазмен использованы наночастицы серебра, напыляемые на кварцевые подложки в вакуумной камере (PVD 75, Kurt J. Lesker). Вакуум порядка 10^{-7} мм рт.ст. в течение всего процесса создания частиц поддерживался с помощью криогенного насоса. Давление остаточных газов контролировалось с помощью ионизационного манометра.

Частицы осаждались в виде ансамблей наноструктур, эквивалентная толщина слоя (5 нм) контролировалась кварцевым датчиком. Изготовленная таким образом пленка характеризуется неоднородно уширенной полосой плазмонного поглощения во всем видимом диапазоне спектра [15]. Для формирования более однородного ансамбля подложки с напыленными частицами отжигались при температуре 200 °С.

Полупроводниковые наночастицы создавались методом «горячей инъекции» [16, 17]. Состав оболочек гидрофобных КТ520 с размером ядра 2,4 нм плавно изменялся (так называемые аллоидные квантовые точки) $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}_y\text{S}_{1-y}/\text{ZnS}$. Диаметр таких квантовых точек составлял около 7 нм. КТ630 CdSe имели размер ядра 3 нм и более тонкую оболочку ZnS. Поскольку усиление и тушение люминесценции сильно зависит от расстояния между плазмонной частицей и квантовой точкой [8, 11], то CdSe/ZnS КТ630 также исследовались при отделении их от поверхности серебряных частиц слоем диоксида кремния толщиной 3 и 10 нм.

Готовые растворы КТ520 в хлороформе и КТ630 в гексане в количестве 50 и 200 мкл выливались на вращающиеся подложки для создания равномерного слоя. Растворы наносились на кварцевую подложку и на подложку с частицами серебра, покрытыми диоксидом кремния.

Спектры поглощения образцов измерялись на спектрофотометре СФ-56. Флуоресценция измерялась с помощью спектрофлуориметра RF-5301РС. Кинетика затухания образцов исследовалась на лазерном микроскопе MicroTime 100, оснащенный лазером с длиной волны 409 нм, частота следования импульсов 10 МГц.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры экстинкции островковой пленки, состоящей из наночастиц серебра, а также спектры флуоресценции растворов квантовых точек КТ520 и КТ630. Спектры островковых пленок демонстрируют неоднородное уширение плазмонной полосы поглощения. Параметры отжига островковой пленки подобраны так, что плазмонные резонансы возбуждаются на длине волны, соответствующей излучательным переходам в КТ520 (длинноволновый край спектра), и не возбуждаются на длине волны флуоресценции КТ630 (незначительная величина экстинкции на этом участке обусловлена отражением кварцевой подложки, на которую нанесены частицы).

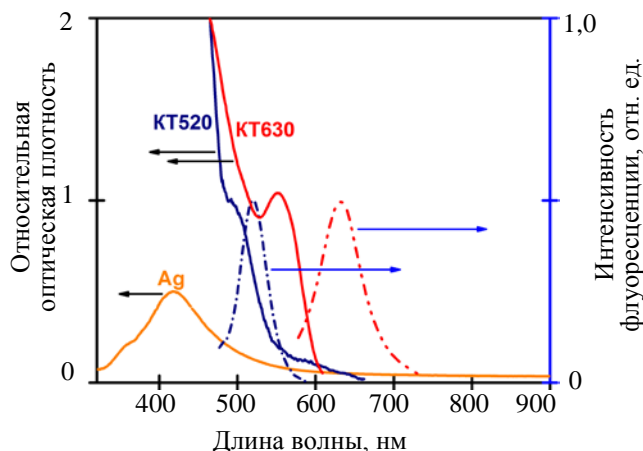


Рис. 1. Спектры экстинкции островковой пленки серебра, растворов квантовых точек КТ520 и КТ630 (левая шкала) и спектры флуоресценции КТ520 и КТ630 (правая шкала)

Для покрытых КТ520 пленок с использованием лазерного микроскопа измерена кинетика затухания флуоресценции (рис. 2). Интенсивность флуоресценции квантовых точек на подложке без островковой пленки (1) почти в два раза меньше, чем у квантовых точек на островковой пленке. Это говорит об увеличении скорости радиационных переходов, вызванных плазмонными резонансами наночастиц серебра. Действительно, аппроксимация кинетики затухания двумя экспоненциальными кривыми позволяет получить время жизни флуоресценции, которое для случая КТ520 на подложке без наночастиц составляет 17,8 нс, а в случае с наночастицами – 15,2 нс.

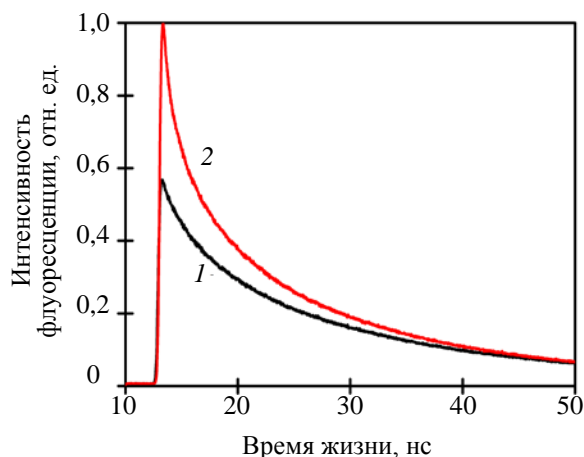


Рис. 2. Кинетика затухания люминесценции пленки из КТ520 на кварцевой подложке (1), а также на подложке с островковой пленкой серебра (2)

На рис. 3 приведены результаты исследования флуоресценции КТ630. Отметим, что поскольку данные квантовые точки отличаются от КТ520 толщиной оболочки ZnS, то были выполнены измерения образцов КТ630, отделяемых от островковой пленки слоем диоксида кремния 3 и 10 нм. Из рисунка видно, что при нанесении КТ630 на островковые пленки интенсивность флуоресценции снижается в три раза. При нанесении КТ630 на островковую пленку, изолированную от серебряных частиц слоем диоксида кремния 3 нм, существенного изменения сигнала не наблюдалось. Это говорит или об отсутствии резонансного взаимодействия между плазмонами, локализованными в серебряных наночастицах, и квантовыми точками или о тушении люминесценции металлом, которое обычно наблюдается вне зависимости от того, обладает частица плазмонными резонансами в данной области или нет (кривая 4 на рис. 3 служит подтверждением тому). Поскольку толщина диэлектрика (кривая 4) достаточно велика, воздействия металлических частиц не наблюдается, сигнал люминесценции возрос практически до значения, характерного для КТ630 на подложке без металлических частиц (кривая 1).

При изучении эффекта Парселла в случае квантовых точек на поверхности диэлектрика усредненное время жизни флуоресценции составило 7,2 нс. Вместе с тем наблюдается парадоксальный результат: время жизни 3,4 нс для КТ630 на поверхности наночастиц серебра, 3,0 нс при незначительном удалении от поверхности (3 нм диоксида кремния), 5,7 нс при использовании 10 нм разделяющего слоя.

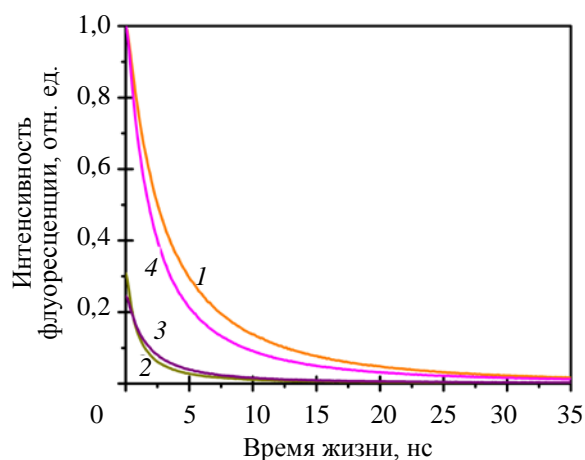


Рис. 3. Кинетика затухания люминесценции пленки из КТ630 на кварцевой подложке (1), а также подложке с островковой пленкой серебра (2), с пленкой серебра, покрытой 3 (3) и 10 нм (4) слоем диоксида кремния

Согласно полученным значениям времени жизни, при контакте КТ630 с поверхностью металлических частиц образуются каналы снятия возбуждения, не позволяющие усиливать флуоресценцию. В то же время при отдалении квантовых точек время жизни флуоресценции незначительно сокращается. И наконец, при наличии даже достаточно большого разделяющего металлические частицы и КТ630 слоя время жизни флуоресценции меньше времени жизни КТ630 на подложке без наночастиц.

Заключение

В работе исследованы спектры флуоресценции двух видов коллоидных квантовых точек: с центром полосы флуоресценции на 520 и 630 нм. Аналогичные спектры исследованы при помещении квантовых точек на серебряные островковые пленки, обладающие свойством плазмонного резонанса. Полученные результаты находятся в видимом противоречии. С одной стороны, при отстройке частот плазмонных резонансов и излучательных переходов квантовых точек за счет прямого контакта наблюдается уменьшение интенсивности флуоресценции квантовых точек по сравнению с квантовыми точками на подложке без наночастиц. Данный эффект объясняется металлическим тушением флуоресценции. С другой стороны, затухание зависит от расстояния между частицами металла и квантовыми точками, что объясняется эффектом Парселла, наблюдавшимся при нерезонансном взаимодействии. Очевидно, что для объяснения изменения интенсивности и времени жизни необходимы дополнительные исследования.

Литература

1. Егорушина Е.А., Жданкина А.А., Клиных А.Ф., Латышев А.Н., Овчинников О.В. Проявление эффекта Пёрселла в стационарной люминесценции молекул вблизи металлических наночастиц // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 17. № 3. С. 307–318. doi: 10.17308/kcmf.2015.17/73
2. Werschler F., Lindner B., Hinz C., Conradt F., Gumbsheimer P. et

References

1. Egorushina E.A., Zhdankina A.A., Klinskikh A.F., Latyshev A.N., Ovchinnikov O.V. Purcell effect of stationary luminescence of molecules near to metal nanoparticles. *Kondensirovannye Sredy i Mezhfaznye Granitsy*, 2017, vol.17, no.3, pp.307–318. (in Russian) doi: 10.17308/kcmf.2015.17/73
2. Werschler F., Lindner B., Hinz C., Conradt F., Gumbsheimer P. et al. Efficient emission enhancement of single CdSe/CdS/PMMA

- al. Efficient emission enhancement of single CdSe/CdS/PMMA quantum dots through controlled near-field coupling to plasmonic bullseye resonators // *Nano Letters*. 2018. V. 18. N 9. P. 5396–5400. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b01533
3. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Reznik I.B., Vartanyan T.A. Plasmon-assisted aggregation and spectral modification of the layered rhodamine 6G molecules // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 562. doi: 10.1007/s11082-016-0841-2
 4. Abadeer N.S., Brennan M.R., Wilson W.L., Murphy C.J. Distance and plasmon wavelength dependent fluorescence of molecules bound to silica-coated gold nanorods // *ACS Nano*. 2014. V. 8. N 8. P. 8392–8406. doi: 10.1021/nn502887j
 5. Melnikau D., Esteban R., Savateeva D. et al. Rabi splitting in photoluminescence spectra of hybrid systems of gold nanorods and J-aggregates // *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2016. V. 7. N 2. P. 354–362. doi: 10.1021/acs.jpcllett.5b02512
 6. Торопов Н.А., Вартамян Т.А. Влияние островковых металлических пленок на агрегацию и усиление молекулярного поглощения псевдоизоцианина // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. Т. 13. № 6. С. 112–115.
 7. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Bogdanov K.V., Vartanyan T.A. Enhancement of fluorescence and Raman scattering in cyanine-dye molecules on the surface of silicon-coated silver nanoparticles // *Optics and Spectroscopy*. 2018. V. 124. N 3. P. 319–322. doi: 10.1134/S0030400X18030153
 8. 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. V. 2. N 12. P. 1449–1452. doi: 10.1021/nl025819k
 9. Pompa P.P., Martiradonna L., Torre A.D., Sala F.D., Manna L., De Vittorio M., Calabi F., Cingolani R., Rinaldi R. Metal-enhanced fluorescence of colloidal nanocrystals with nanoscale control // *Nature Nanotechnology*. 2006. V. 1. N 2. P. 126–130. doi: 10.1038/nnano.2006.93
 10. Purcell E.M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies // *Physical Review*. 1946. V. 69. P. 681.
 11. Li J., Krasavin A.V., Webster L., Segovia P., Zayats A.V., Richards D. Spectral variation of fluorescence lifetime near single metal nanoparticles // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. N 1. P. 21349. doi: 10.1038/srep21349
 12. Krasnok A.E., Slobozhanyuk A.P., Simovski C.R., Tretyakov S.A., Poddubny A.N., Miroshnichenko A.E., Kivshar Y.S., Belov P.A. An antenna model for the Purcell effect // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 12956. doi: 10.1038/srep12956
 13. Lu Y., Sokhoyan R., Cheng W., Kafaie S.G., Davoyan A.R., Pala R.A., Thyagarajan K., Atwater H.A. Dynamically controlled Purcell enhancement of visible spontaneous emission in a gated plasmonic heterostructure // *Nature Communications*. 2017. V. 8. N 1. P. 1631. doi: 10.1038/s41467-017-01870-0
 14. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М: Физматлит, 2009. 484 с.
 15. Toropov N.A., Leonov N.B., Vartanyan T.A. Influence of silver nanoparticles crystallinity on localized surface plasmons dephasing times // *Physica Status Solidi B*. 2018. V. 255. N 3. P. 1700174. doi: 10.1002/pssb.201700174
 16. Gaponik N., Talapin D.V., Rogach A.L., Hoppe K., Shevchenko E.V., Kornowski A., Eychmuller A., Weller H. Thiol-capping of CdTe nanocrystals: an alternative to organometallic synthetic routes // *Journal of Physical Chemistry B*. 2002. V. 106. N 29. P. 7177–7185. doi: 10.1021/jp025541k
 17. Bae W.K., Char K., Hur H., Lee S. Single-step synthesis of quantum dots with chemical composition gradients // *Chemistry of Materials*. 2008. V. 20. N 2. P. 531–539. doi: 10.1021/cm070754d
 - quantum dots through controlled near-field coupling to plasmonic bullseye resonators. *Nano Letters*, 2018, vol. 18, no. 9, pp. 5396–5400. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b01533
 3. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Reznik I.B., Vartanyan T.A. Plasmon-assisted aggregation and spectral modification of the layered rhodamine 6G molecules. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 562. doi: 10.1007/s11082-016-0841-2
 4. Abadeer N.S., Brennan M.R., Wilson W.L., Murphy C.J. Distance and plasmon wavelength dependent fluorescence of molecules bound to silica-coated gold nanorods. *ACS Nano*, 2014, vol. 8, no. 8, pp. 8392–8406. doi: 10.1021/nn502887j
 5. Melnikau D., Esteban R., Savateeva D. et al. Rabi splitting in photoluminescence spectra of hybrid systems of gold nanorods and J-aggregates. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 354–362. doi: 10.1021/acs.jpcllett.5b02512
 6. Toropov N.A., Vartanyan T.A. Materials technology and nanotechnologies effect of metallic islet films on aggregation and molecular absorption enhancement of pseudoisocyanine. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, vol. 13, no. 6, pp. 112–115. (in Russian)
 7. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Bogdanov K.V., Vartanyan T.A. Enhancement of fluorescence and Raman scattering in cyanine-dye molecules on the surface of silicon-coated silver nanoparticles. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, no. 3, pp. 319–322. doi: 10.1134/S0030400X18030153
 8. 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. doi: 10.1021/nl025819k
 9. Pompa P.P., Martiradonna L., Torre A.D., Sala F.D., Manna L., De Vittorio M., Calabi F., Cingolani R., Rinaldi R. Metal-enhanced fluorescence of colloidal nanocrystals with nanoscale control. *Nature Nanotechnology*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 126–130. doi: 10.1038/nnano.2006.93
 10. Purcell E.M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*, 1946, vol. 69, pp. 681.
 11. Li J., Krasavin A.V., Webster L., Segovia P., Zayats A.V., Richards D. Spectral variation of fluorescence lifetime near single metal nanoparticles. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 21349. doi: 10.1038/srep21349
 12. Krasnok A.E., Slobozhanyuk A.P., Simovski C.R., Tretyakov S.A., Poddubny A.N., Miroshnichenko A.E., Kivshar Y.S., Belov P.A. An antenna model for the Purcell effect. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, pp. 12956. doi: 10.1038/srep12956
 13. Lu Y., Sokhoyan R., Cheng W., Kafaie S.G., Davoyan A.R., Pala R.A., Thyagarajan K., Atwater H.A. Dynamically controlled Purcell enhancement of visible spontaneous emission in a gated plasmonic heterostructure. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1631. doi: 10.1038/s41467-017-01870-0
 14. Novotny L., Hecht B. *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University Press, 2006, 539 p. doi: 10.1017/CBO9780511813535
 15. Toropov N.A., Leonov N.B., Vartanyan T.A. Influence of silver nanoparticles crystallinity on localized surface plasmons dephasing times. *Physica Status Solidi B*, 2018, vol. 255, no. 3, pp. 1700174. doi: 10.1002/pssb.201700174
 16. Gaponik N., Talapin D.V., Rogach A.L., Hoppe K., Shevchenko E.V., Kornowski A., Eychmuller A., Weller H. Thiol-capping of CdTe nanocrystals: an alternative to organometallic synthetic routes. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, vol. 106, no. 29, pp. 7177–7185. doi: 10.1021/jp025541k
 17. Bae W.K., Char K., Hur H., Lee S. Single-step synthesis of quantum dots with chemical composition gradients. *Chemistry of Materials*, 2008, vol. 20, no. 2, pp. 531–539. doi: 10.1021/cm070754d

Авторы

Торопов Никита Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55239980100, ORCID ID: 0000-0002-0297-3661, nikita.a.toropov@gmail.com

Камалиева Айсылу Насыховна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56896188800, ORCID ID: 0000-0001-6611-9731, aisylu.kamaliewa@yandex.ru

Набиуллина Резида Даниловна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190217593, ORCID ID: 0000-0002-1891-3057, rezida2105@mail.ru

Authors

Nikita A. Toropov – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55239980100, ORCID ID: 0000-0002-0297-3661, nikita.a.toropov@gmail.com

Aisylu N. Kamaliewa – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56896188800, ORCID ID: 0000-0001-6611-9731, aisylu.kamaliewa@yandex.ru

Rezida D. Nabiullina – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190217593, ORCID ID: 0000-0002-1891-3057, rezida2105@mail.ru