

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.14
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-689-694>

Поступило в редакцию 06.09.2019
Received 06.09.2019

Д. В. Гузатов¹, академик С. В. Гапоненко²

¹Гродненский государственный университет имени Я. Купалы, Гродно, Республика Беларусь

²Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОЛЕКУЛ ВБЛИЗИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Аннотация. Обсуждаются вопросы модификации интенсивности фотолюминесценции квантовых дипольных излучателей (молекул, квантовых точек (нанокристаллов)), расположенных вблизи металлических сферических наночастиц с диэлектрической оболочкой. Показано, что заданием оптимальных конфигурации наночастицы с оболочкой и положения излучателя можно создать условия, при которых увеличение интенсивности фотолюминесценции может быть больше, чем в случае такой же наночастицы без оболочки.

Ключевые слова: фотолюминесценция, плазмоника, квантовый дипольный излучатель, металлическая наночастица с диэлектрической оболочкой

Для цитирования: Гузатов, Д. В. Фотолюминесценция молекул вблизи металлических наночастиц с диэлектрической оболочкой / Д. В. Гузатов, С. В. Гапоненко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 689–694. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-689-694>

Dmitry V. Guzатов¹, Academician Sergey V. Gaponenko²

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus

²B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PHOTOLUMINESCENCE OF MOLECULES NEAR METAL NANOPARTICLES WITH A DIELECTRIC SHELL

Abstract. The article discusses the issues of modifying the photoluminescence intensity of quantum dipole emitters (molecules, quantum dots (nanocrystals)) located near metal spherical nanoparticles with a dielectric shell. It is shown that by specifying the optimal configuration of a nanoparticle with a shell and the position of the emitter, it is possible to create the conditions, under which an increase in the photoluminescence intensity can be greater than in the case of the same nanoparticle without a shell.

Keywords: photoluminescence, plasmonics, quantum dipole emitter, metal nanoparticle with dielectric shell

For citation: Guzатов D. V., Gaponenko S. V. Photoluminescence of molecules near metal nanoparticles with a dielectric shell. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 6, pp. 689–694 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-689-694>

Введение. Эффект плазмонного усиления фотолюминесценции молекул и квантовых точек (нанокристаллов), расположенных вблизи металлических наночастиц, может иметь применение, например, для улучшения характеристик светодиодных систем (светодиодов) [1–7]. Однако нахождение оптимальных условий, при которых интенсивность фотолюминесценции возрастает, – сложная, многопараметрическая задача, зависящая от длин волн возбуждения и испускания, размера, формы и материального состава наночастицы (ее плазмонных свойств), расстояния от молекулы до частицы, ориентации дипольного момента перехода в излучателе, других факторов. Частично эта задача может быть решена для наносфер [6–8], когда удастся найти такое сочетание параметров, при котором возникает результирующее усиление интенсивности фотолюминесценции. Следует заметить, что с позиции массовых применений особенно важным является поиск достаточно дешевых в производстве наночастиц и наноструктур, которые сильно влияют на фотолюминесценцию. Поэтому исследования наночастиц такой простой геометрии, как сферическая – являются весьма актуальными.

Цель работы – показать неоднозначную роль диэлектрической оболочки, традиционно рассматриваемой лишь как способ создания оптимального расстояния от излучателя до металла. Мы показываем, что оболочка существенно влияет как на оптические свойства металлических наночастиц, так и на скорости переходов в излучателях, что позволяет использовать наночастицы со структурой ядро–оболочка для создания оптимальных условий усиления люминесценции без прямой привязки к нахождению оптимального расстояния излучатель–металл.

Материалы и методы исследования. Фактор изменения интенсивности фотолюминесценции F_{PL} излучателя вблизи наночастицы может быть посчитан с помощью следующего выражения [6]:

$$F_{PL} = \frac{|\mathbf{E}|^2}{|\mathbf{E}_0|^2} Q = \frac{|\mathbf{E}|^2}{|\mathbf{E}_0|^2} \frac{\gamma_{\text{rad}}}{\gamma_{\text{rad}} + \gamma_{\text{nonrad}}}, \quad (1)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{E}_0 – напряженности локального (вблизи наночастицы) и возбуждающего (плоской волны) электрических полей соответственно; Q – квантовый выход излучателя (далее – молекулы) вблизи наночастицы; γ_{rad} и γ_{nonrad} – соответственно скорости излучательных и безызлучательных переходов в молекуле. Поля в (1) вычисляются на частоте возбуждения, а скорости переходов – на частоте испускания. Все величины в (1) вычисляются в точке положения молекулы. При расчетах в (1) должна учитываться поляризация падающей волны: следует использовать выражения для случая дипольного момента перехода, ориентированного вдоль вектора напряженности электрического поля.

Для чисто металлических наносфер поля и скорости распадов могут быть найдены с помощью выражений, приведенных в [6]. Данные выражения достаточно общие, учитывают эффекты запаздывания (теория Ми). Для расчетов в случае частиц с оболочкой эти выражения преобразовываются с помощью способа, описанного в [9].

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим металлические сферы, изготовленные из серебра и золота, на которые нанесены концентрические оболочки из диоксида кремния (SiO_2) или диоксида титана (TiO_2). В расчетах далее используются экспериментальные данные по зависимости диэлектрической проницаемости металлов от длины волны из [10], которые интерполируются, чтобы обеспечить гладкость зависимостей. Данные для диэлектрических проницаемостей SiO_2 и TiO_2 взяты из [11] и тоже интерполированы как функция длины волны. Данные для SiO_2 соответствуют его изотропной модификации (стекло). В то же время TiO_2 является анизотропным веществом, что необходимо учесть в расчетах. При этом надо иметь в виду, что ось анизотропии TiO_2 может быть произвольным образом ориентирована в пространстве, что заведомо реализуется в экспериментах, где исследуется сразу большое число наночастиц. Поэтому в расчетах далее используются усредненные значения диэлектрической проницаемости. Молекула пусть расположена в области максимума локального поля и имеет дипольный момент перехода, ориентированный перпендикулярно к поверхности наночастицы. Молекула и частица находятся в воздушной среде.

На рис. 1 показан фактор изменения интенсивности фотолюминесценции F_{PL} для случая молекулы вблизи наночастицы с серебряным ядром и оболочкой из диоксида кремний (Ag/SiO_2 частица) как функция длины волны возбуждения λ_{exc} при фиксированной длине волны испускания $\lambda_{\text{em}} = 530$ нм. При этом на рис. 1, а расстояние от молекулы до поверхности наночастицы (Δr) выбрано таким, чтобы наибольшие значения фактора F_{PL} соответствовали его максимальным значениям для заданного диаметра ядра (50 нм) и толщины оболочки (h). На рисунке случай $\Delta r = 0$ нм соответствует положению молекулы непосредственно вблизи поверхности наночастицы. Случай $h = 0$ нм соответствует металлической наночастице без оболочки.

Как следует из рис. 1, а, в случае серебряной наночастицы с оболочкой наибольшее значение фактора F_{PL} может достигать величины ~ 110 , что в ~ 2 раза больше, чем для наночастицы без оболочки. Из расчетов можно найти, что это максимальное значение возникает в случае оболочки толщиной ~ 10 нм (рис. 1, а, кривая 3). Интересно отметить, что это согласуется с результатами экспериментов в [5], где для оболочки с толщиной 10 нм было зарегистрировано наибольшее усиление интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов вблизи Ag/SiO_2 наночастиц со

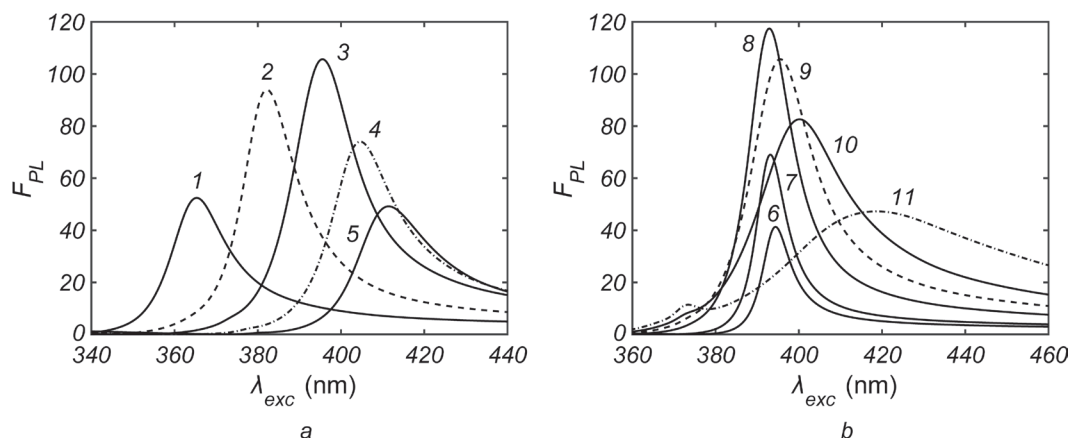


Рис. 1. Фактор F_{PL} , рассчитанный для молекулы вблизи Ag/SiO₂ наночастицы, как функция длины волны возбуждения λ_{exc} при длине волны испускания 530 нм; *a* – диаметр ядра наночастицы 50 нм, толщина оболочки и расстояние от молекулы до поверхности наночастицы соответственно: $h = 0$ нм и $\Delta r = 6,3$ нм (1), $h = 5$ нм и $\Delta r = 1,8$ нм (2), $h = 10$ нм и $\Delta r = 0$ нм (3), $h = 15$ нм и $\Delta r = 0$ нм (4), $h = 20$ нм и $\Delta r = 0$ нм (5); *b* – $h = 10$ нм, $\Delta r = 0$ нм, диаметр ядра: 20 нм (6), 25 нм (7), 40 нм (8), 50 нм (9), 60 нм (10), 80 нм (11)

Fig. 1. Factor F_{PL} for a molecule placed near a Ag/SiO₂ nanoparticle versus excitation wavelength λ_{exc} at the emission wavelength 530 nm; *a* – diameter of the nanoparticle core is 50 nm, thickness of the shell and distance to the surface of a nanoparticle correspondingly are: $h = 0$ nm and $\Delta r = 6.3$ nm (1), $h = 5$ nm and $\Delta r = 1.8$ nm (2), $h = 10$ nm and $\Delta r = 0$ nm (3), $h = 15$ nm and $\Delta r = 0$ nm (4), $h = 20$ nm and $\Delta r = 0$ nm (5); *b* – $h = 10$ nm, $\Delta r = 0$ nm, diameter of the core is: 20 nm (6), 25 nm (7), 40 nm (8), 50 nm (9), 60 nm (10), 80 nm (11)

средним диаметром ядра ~ 35 нм. Данное согласие результатов подтверждает корректность проведенных в настоящей работе расчетов.

На рис. 1 видно, что увеличение h при фиксированном диаметре ядра приводит к смещению максимума спектра $F_{PL}(\lambda_{exc})$ в более длинноволновую область. При этом с ростом толщины, абсолютная величина фактора изменения интенсивности фотolumинесценции возрастает в области малых толщин, а в области достаточно больших h – она уменьшается. С одной стороны, это обусловлено тем, что тонкая оболочка вносит такой вклад, который увеличивает F_{PL} . В частности, изменение толщины тонкой оболочки заметно влияет на спектр усиления локальной интенсивности. Кроме того, квантовый выход тоже меняется. С другой стороны, толстая оболочка удаляет молекулу от металла, что в целом уменьшает влияние плазмонных эффектов, и в результате приводит к уменьшению фактора. Наиболее важно то, что существует такая конфигурация наночастицы и положения молекулы, при которой образуется максимум фактора F_{PL} на той либо иной длине волны. Важным на рис. 1, *a* является также то, что при увеличении толщины оболочки уменьшается оптимальное расстояние от молекулы до поверхности частицы, при котором реализуется максимум F_{PL} . Это необходимо учитывать при проведении экспериментов: в случаях наночастиц с толстой оболочкой для получения наибольшего усиления интенсивности фотolumинесценции молекула (нанокристалл) должна располагаться близко к поверхности частицы.

Расчеты, проведенные для Ag/TiO₂ наночастиц с диаметром ядра 50 нм и при $\lambda_{em} = 530$ нм, показывают, что увеличение толщины оболочки из диоксида титана тоже может приводить к росту абсолютных значений F_{PL} и смещению максимума спектра в длинноволновую область. Можно отметить, что оболочка из диоксида титана оказывает сравнительно более сильное влияние на фактор F_{PL} , так как TiO₂ имеет большую диэлектрическую проницаемость, чем SiO₂. В частности, из проведенных расчетов следует, что увеличение толщины h от 2 до 10 нм приводит к смещению максимума $F_{PL}(\lambda_{exc})$ с положения ~ 400 нм к положению ~ 500 нм, т. е. почти на 100 нм. При этом наибольшее значение фактора (~ 115) возникает для $h = 10$ нм и $\Delta r = 0$ нм.

Из рис. 1, *b* следует, что если молекула расположена вблизи поверхности наночастицы с фиксированной толщиной SiO₂ оболочки, то увеличение диаметра ядра оказывает влияние на положение максимума, величину и форму спектра F_{PL} . Наибольшее значение фактора изменения интенсивности фотolumинесценции (~ 120) среди представленных зависимостей возникает для

наночастиц с диаметром металла 40 нм. На рис. 1, *b* видно, что при увеличении диаметра спектр перестраивается: сначала величина пика растет, затем она уменьшается, а пик смещается в более длинноволновую область и уширяется. Подобный результат был получен в [6] при расчетах фактора F_{PL} в случае молекулы вблизи серебряной наносферы. Важно отметить, что это коррелирует с поведением спектра экстинкции [7; 12], где при увеличении диаметра наночастицы аналогичное изменение спектра обусловлено увеличением вклада от рассеяния. По-видимому, данный вклад играет большую роль и в факторе изменения интенсивности фотолюминесценции в случае достаточно больших наночастиц. Поэтому при расчетах важно корректно учитывать этот вклад, что может быть осуществлено при использовании полной теории, учитывающей эффекты запаздывания (теории Ми).

На рис. 2 показан фактор F_{PL} в случае молекулы, расположенной вблизи наночастицы с ядром из золота (диаметром 80 нм) и оболочкой из TiO_2 , как функция λ_{exc} при $\lambda_{em} = 650$ нм. На рис. 2, *a* расстояние Δr задано таким, чтобы наибольшие значения фактора соответствовали его максимальным значениям для данного диаметра ядра и выбранной толщины оболочки.

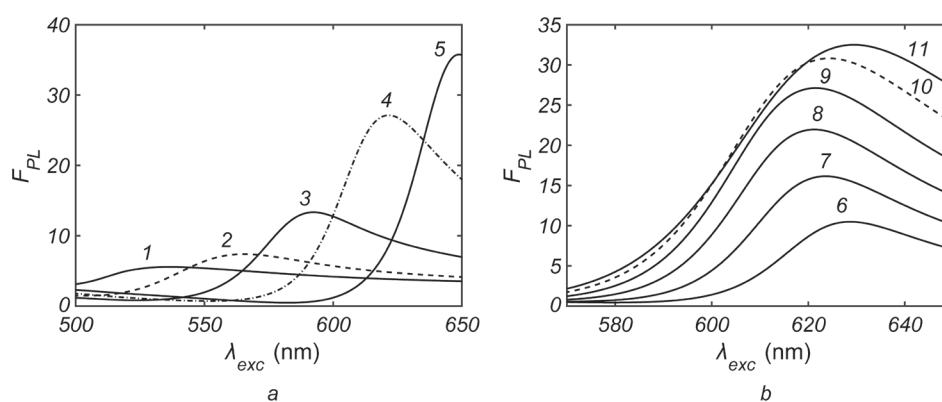


Рис. 2. Фактор F_{PL} , рассчитанный для молекулы вблизи Au/TiO_2 наночастицы, как функция длины волны возбуждения λ_{exc} при длине волны испускания 650 нм; *a* – диаметр ядра наночастицы 80 нм, толщина оболочки и расстояние от молекулы до поверхности наночастицы соответственно: $h = 0$ нм и $\Delta r = 11,6$ нм (1), $h = 5$ нм и $\Delta r = 10,9$ нм (2), $h = 10$ нм и $\Delta r = 4,3$ нм (3), $h = 15$ нм и $\Delta r = 0$ нм (4), $h = 20$ нм и $\Delta r = 0$ нм (5); *b* – $h = 15$ нм, $\Delta r = 0$ нм, диаметр ядра: 50 нм (6), 60 нм (7), 70 нм (8), 80 нм (9), 90 нм (10), 100 нм (11)

Fig. 2. Factor F_{PL} for a molecule placed near a Au/TiO_2 nanoparticle versus excitation wavelength λ_{exc} at the emission wavelength 650 nm; *a* – diameter of the nanoparticle core is 80 nm, thickness of the shell and distance to the surface of a nanoparticle correspondingly are: $h = 0$ nm and $\Delta r = 11.6$ nm (1), $h = 5$ nm and $\Delta r = 10.9$ nm (2), $h = 10$ nm and $\Delta r = 4.3$ nm (3), $h = 15$ nm and $\Delta r = 0$ nm (4), $h = 20$ nm and $\Delta r = 0$ nm (5); *b* – $h = 15$ nm, $\Delta r = 0$ nm, diameter of the core is: 50 nm (6), 60 nm (7), 70 nm (8), 80 nm (9), 90 nm (10), 100 nm (11)

Как следует из рис. 2, *a*, максимальные значения F_{PL} при увеличении толщины TiO_2 оболочки возрастают от ~ 5 (для $h = 0$ нм) до ~ 35 (для $h = 20$ нм). При этом длины волн, соответствующие максимумам пиков, смещаются в широком диапазоне ~ 530 – 650 нм. Аналогичные расчеты, проведенные для Au/SiO_2 наночастиц, показывают, что смещение положений максимумов происходит в диапазоне ~ 530 – 560 нм, а наибольшее значение F_{PL} в расчетах ~ 13 . Следовательно, и в случае наночастиц с золотым ядром можно сделать вывод о том, что оболочка из TiO_2 оказывает более значительное воздействие на модификацию F_{PL} , чем оболочка из SiO_2 .

Важно отметить, что максимальное значение $F_{PL} \sim 5$ для случая $h = 0$ нм согласуется с расчетами усиления интенсивности флуоресценции (в ~ 6 – 7 раз) из [13], где на длине волны 650 нм исследовалась флуоресценция молекулы, помещенной в диэлектрический слой, который расположен вблизи золотой наносферы диаметром 80 нм. Это снова подтверждает корректность выполненных в настоящей работе расчетов.

Из рис. 2, *b* следует, что если толщина оболочки из диоксида титана зафиксирована и достаточно велика, а молекула расположена вблизи поверхности частицы, то смещение положения максимумов зависимостей происходит в относительно небольшом диапазоне длин волн, а рост

максимальных значений фактора F_{PL} может происходить за счет увеличения объема металла. Тем не менее, более полные расчеты показывают, что при дальнейшем увеличении диаметра ядра величина F_{PL} начинает уменьшаться. При этом интенсивность локального электрического поля тоже уменьшается.

Заключение. В работе теоретически рассмотрены особенности фотолюминесценции квантовых дипольных излучателей (молекул, квантовых точек (нанокристаллов)), расположенных вблизи металлических (Ag, Au) сферических наночастиц с диэлектрической (SiO_2 , TiO_2) оболочкой. Исследованы спектральные зависимости фактора изменения интенсивности фотолюминесценции от длины волны возбуждения при различных диаметрах металлических ядер частиц, толщинах оболочек, положениях излучателя, длинах волн испускания. Показано, что в случае металлической наночастицы с диэлектрической оболочкой можно создать условия, при которых фактор изменения интенсивности фотолюминесценции может быть больше, чем в случае такой же металлической наночастицы без оболочки.

Полученные результаты могут быть использованы как при планировании экспериментальных исследований в области фотолюминесценции молекул и нанокристаллов вблизи наночастиц, так и для интерпретации результатов экспериментов в данной области, а также для разработки эффективных светодиодных систем.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф19МС-004).

Acknowledgement. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. Ф19МС-004).

Список использованных источников

1. Enhanced optical output power of green light-emitting diodes by surface plasmon of gold nanoparticles / C. Y. Cho [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 98, N 5. – P. 051106-1–051106-3. <https://doi.org/10.1063/1.3552968>
2. Surface plasmon enhanced blue organic light emitting diode with nearly 100 % fluorescence efficiency / A. Kumar [et al.] // *Org. Electron.* – 2012. – Vol. 13, N 9. – P. 1750–1755. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2012.05.018>
3. Localized surface plasmon-enhanced near-ultraviolet emission from InGaN/GaN light-emitting diodes using silver and platinum nanoparticles / S.-H. Hong [et al.] // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, N 3. – P. 3138–3144. <https://doi.org/10.1364/oe.21.003138>
4. Surface plasmon-enhanced quantum dot light-emitting diodes by incorporating gold nanoparticles / J. Pan [et al.] // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24, N 2. – P. A33–A43. <https://doi.org/10.1364/oe.24.000a33>
5. Bright white-light emission from Ag/SiO₂/CdS-ZnS core/shell/shell plasmon couplers / C. Liao [et al.] // *Nanoscale.* – 2015. – Vol. 7, N 48. – P. 20607–20613. <https://doi.org/10.1039/c5nr05526a>
6. Plasmonic enhancement of molecular fluorescence near silver nanoparticles: theory, modeling, and experiment / D. V. Guzatov [et al.] // *J. Phys. Chem. C.* – 2012. – Vol. 116, N 19. – P. 10723–10733. <https://doi.org/10.1021/jp301598w>
7. Guzatov, D. V. Possible plasmonic acceleration of LED modulation for Li-Fi applications / D. V. Guzatov, S. V. Gaponenko, H. V. Demir // *Plasmonics.* – 2018. – Vol. 13, N 6. – P. 2133–2140. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0730-6>
8. Guzatov, D. V. Colloidal photoluminescent refractive index nanosensor using plasmonic effects / D. V. Guzatov, S. V. Gaponenko, H. V. Demir // *Z. Phys. Chem.* – 2018. – Vol. 232, N 9–11. – P. 1431–1441. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1127>
9. Possible nanoantenna control of chlorophyll dynamics for bioinspired photovoltaics / S. V. Gaponenko [et al.] // *Sci. Rep.* – 2019. – Vol. 9, N 1. – P. 7138-1–7138-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43545-4>
10. Johnson, P. B. Optical constants of the noble metals / P. B. Johnson, R. W. Christy // *Phys. Rev. B.* – 1972. – Vol. 6, N 12. – P. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/physrevb.6.4370>
11. Handbook of optical constants of solids / ed. by E. D. Palik. – New York, 1998. – 805 p.
12. Gaponenko, S. V. Introduction to Nanophotonics / S. V. Gaponenko. – Cambridge, 2010. – 465 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511750502>
13. Anger, P. Enhancement and quenching of single-molecule fluorescence / P. Anger, P. Bharadwaj, L. Novotny // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96, N 11. – P. 113002-1–113002-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.113002>

References

1. Cho C. Y., Lee S.-J., Song J.-H., Hong S.-H., Lee S.-M., Cho Y.-H., Park S.-J. Enhanced optical output power of green light-emitting diodes by surface plasmon of gold nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 98, no. 5, pp. 051106-1–051106-3. <https://doi.org/10.1063/1.3552968>
2. Kumar A., Srivastava R., Mehta D. S., Kamalasanan M. N. Surface plasmon enhanced blue organic light emitting diode with nearly 100 % fluorescence efficiency. *Organic Electronics*, 2012, vol. 13, no. 9, pp. 1750–1755. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2012.05.018>
3. Hong S.-H., Cho C.-Y., Lee S.-J., Yim S.-Y., Lim W., Kim S.-T., Park S.-J. Localized surface plasmon-enhanced near-ultraviolet emission from InGaN/GaN light-emitting diodes using silver and platinum nanoparticles. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 3138–3144. <https://doi.org/10.1364/oe.21.003138>

4. Pan J., Chen J., Zhao D., Huang Q., Khan Q., Liu X., Tao Z., Zhang Z., Lei W. Surface plasmon-enhanced quantum dot light-emitting diodes by incorporating gold nanoparticles. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. A33–A43. <https://doi.org/10.1364/oe.24.000a33>

5. Liao C., Tang L., Gao X., Xu R., Zhang H., Yu Y., Lu C., Cui Y., Zhang J. Bright white-light emission from Ag/SiO₂/CdS-ZnS core/shell/shell plasmon couplers. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 48, pp. 20607–20613. <https://doi.org/10.1039/c5nr05526a>

6. Guzatov D. V., Vaschenko S. V., Stankevich V. V., Lunevich A. Ya., Glukhov Y. F., Gaponenko S. V. Plasmonic enhancement of molecular fluorescence near silver nanoparticles: theory, modeling, and experiment. *Journal of Physical Chemistry C*, 2012, vol. 116, no. 19, pp. 10723–10733. <https://doi.org/10.1021/jp301598w>

7. Guzatov D. V., Gaponenko S. V., Demir H. V. Possible plasmonic acceleration of LED modulation for Li-Fi applications. *Plasmonics*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 2133–2140. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0730-6>

8. Guzatov D. V., Gaponenko S. V., Demir H. V. Colloidal photoluminescent refractive index nanosensor using plasmonic effects. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2018, vol. 232, no. 9–11, pp. 1431–1441. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1127>

9. Gaponenko S. V., Adam P.-M., Guzatov D. V., Muravitskaya A. O. Possible nanoantenna control of chlorophyll dynamics for bioinspired photovoltaics. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 7138-1–7138-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43545-4>

10. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 1972, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/physrevb.6.4370>

11. Palik E. D. (ed.). *Handbook of optical constants of solids*. New York, 1998. 805 p.

12. Gaponenko S. V. *Introduction to Nanophotonics*. Cambridge, 2010. 465 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511750502>

13. Anger P., Bharadwaj P., Novotny L. Enhancement and quenching of single-molecule fluorescence. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, no. 11, pp. 113002-1–113002-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.113002>

Информация об авторах

Гузатов Дмитрий Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент, докторант. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 220023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: guzatov@mail.ru.

Гапоненко Сергей Васильевич – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова (пр. Скорины, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.gaponenko@ifanbel.basnet.by.

Information about the authors

Guzatov Dmitry Viktorovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant professor, Doctoral student. Yanka Kupala Grodno State University (22, Ozheshko Str., 220023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: guzatov@mail.ru.

Gaponenko Sergey Vasil'evich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by.