

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.14

DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-164-169

Поступило в редакцию 19.03.2018

Received 19.03.2018

Д. В. Гузатов¹, академик С. В. Гапоненко²¹*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Республика Беларусь*²*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***НАНОСЕНСОР ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПЛАЗМОННОГО УСИЛЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

Аннотация. Предложена концепция наносенсора показателя преломления на основе эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции квантовой точки (нанокристалла) вблизи металлической наночастицы. Вычисления, проведенные для серебряной наночастицы в форме вытянутого наноэллипсоида вращения, расположенной в жидкости, показывают, что с помощью такого наносенсора может быть зарегистрирован показатель преломления жидкости с точностью порядка 10^{-4} при точности детектирования интенсивности фотолюминесценции порядка 1 %.

Ключевые слова: наноплазмоника, наносенсор, фотолюминесценция, металлические наночастицы

Для цитирования: Гузатов, Д. В. Наносенсор показателя преломления на основе плазмонного усиления фотолюминесценции / Д. В. Гузатов, С. В. Гапоненко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 164–169. DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-164-169

Dmitry V. Guzatov¹, Academician Sergey V. Gaponenko²¹*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus*²*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***REFRACTIVE INDEX NANOSENSOR USING PLASMONIC ENHANCEMENT OF PHOTOLUMINESCENCE**

Abstract. A refractive index nanosensor is proposed on the basis of plasmonic enhancement of quantum dot (nanocrystal) photoluminescence in the presence of a metal nanoparticle. Calculations of a silver elongated spheroid in the liquid show that the changes in the sensitivity of such a nanosensor to a refractive index can be of the order of 10^{-4} provided that the photoluminescence intensity detection is of the order of 1 %.

Keywords: nanoplasmonics, nanosensor, photoluminescence, metal nanoparticles

For citation: Guzatov D. V., Gaponenko S. V. Refractive index nanosensor using plasmonic enhancement of photoluminescence. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 164–169 (in Russian). DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-164-169

Введение. Известно, что при помещении металлической наночастицы в диэлектрическую среду с показателем преломления большим единицы, плазмонные свойства наночастицы меняются. В частности, происходит спектральный сдвиг частоты возбуждаемого плазмонного колебания по сравнению со случаем наночастицы, расположенной в среде с единичным значением показателя преломления (в воздухе) [1]. В настоящее время эффект модификации плазмонных свойств наночастиц в диэлектрике используется для разработки наносенсоров показателя преломления [2–5]. При этом наиболее важным для биомедицинских применений является создание таких наносенсоров, которые могут регистрировать относительно небольшие изменения показателя преломления. Это достигается в том случае, если спектральный пик, соответствующий плазмонному резонансу, достаточно сильно смещается при изменении показателя преломления. Например, в [4] при исследовании сферических наночастиц из диоксида кремния, покрытых золотой наноболочкой, экспериментально зарегистрировано смещение 555 нм на единицу показателя преломления (ЕПП), а в случае наноэллипсоидов вращения из гематита, покрытых золотой наноболочкой, было зарегистрировано смещение 801 нм/ЕПП [5]. Величины смещений для некоторых синтезированных в настоящее время наночастиц и наноструктур приведены в [2]. Заметим, что, по-видимому, предельно высокая чувствительность к изменению показателя преломления (ниже 10^{-7}) была получена в [6], где использовался метод фурье-анализа при дифракции света на регулярной структуре.

© Гузатов Д. В., Гапоненко С. В., 2018

Цель работы – установление возможности повышения чувствительности детектирования изменения показателя преломления среды с помощью металлических наночастиц на основе влияния показателя преломления окружающей диэлектрической среды на фактор изменения интенсивности фотолюминесценции квантового дипольного излучателя (квантовой точки (нанокристалла)), расположенного вблизи металлических наночастиц вытянутой формы, например наностержней, синтез которых можно осуществить методами коллоидной химии [7]. Выполнены расчеты для модели серебряного вытянутого наноэллипсоида вращения и определены максимальные уровни чувствительности к изменению показателя преломления при оптимальном взаимном расположении и ориентации излучателя и эллипсоида.

Теория. Фактор изменения интенсивности фотолюминесценции дипольного квантового излучателя, расположенного вблизи металлической наночастицы в точке с радиус-вектором \mathbf{r} , можно определить как произведение двух факторов [8]: изменения локальной интенсивности электрического поля G , вычисляемого на частоте возбуждения ω , и квантового выхода Q , вычисляемого на частоте испускания ω' , в следующем виде:

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

где \mathbf{E} (\mathbf{E}_0) – напряженность электрического поля при наличии (отсутствии) наночастицы; γ_{rad} (γ_{nonrad}) – скорость излучательного (безызлучательного) перехода из возбужденного в основное состояние квантовой системы. Квантовый выход излучателя (нанокристалла) полагается равным единице.

Для вычисления изменения локальной интенсивности и скоростей излучательных и безызлучательных переходов далее в работе используется квазистатическое приближение, т. е. рассматривается случай, когда размер наночастицы много меньше длины волны. При этом мы ограничимся исследованием наночастицы в форме вытянутого сфероида (т. е. вытянутого двухосного наноэллипсоида), а также случаем положения дипольного квантового излучателя вблизи острого конца наноэллипсоида на линии оси вращения, параллельно которой поляризовано возбуждающее излучение и ориентирован дипольный момент перехода в излучателе. Как известно [1], в этом случае локальные электрические поля максимальны и следует ожидать максимальное усиление эффектов взаимодействия излучателя с наночастицей. Другие случаи положения излучателя, ориентации дипольного момента перехода, поляризации излучения могут быть исследованы аналогично.

Фактор G в рамках квазистатического приближения для вытянутого двухосного наноэллипсоида может быть посчитан с помощью имеющихся в [9] выражений. В исследуемом случае можно записать

$$G(\mathbf{r}, \omega) = \left| 1 - C_1(\omega) \frac{dQ_1(\xi)}{d\xi} \right|^2,$$

где $C_1(\omega)$ – коэффициент (см. далее); $Q_1(\xi)$ – функция Лежандра второго рода [10]; $\xi = (b + \Delta r) / (b^2 - a^2)^{1/2}$ – радиальная координата в вытянутой сфероидальной системе; a и b – малая и большая полуоси наночастицы соответственно; Δr – расстояние от точки положения излучателя до поверхности наночастицы.

Скорости излучательных и безызлучательных переходов в излучателе, расположенном в воздухе вблизи вытянутого двухосного наноэллипсоида, в квазистатическом приближении получены в [11]. В случае наноэллипсоида в диэлектрической среде выражения для скоростей перехода должны быть соответствующим образом обобщены [1]. В явном виде окончательные выражения можно записать следующим образом:

$$\frac{\gamma_{\text{rad}}(\mathbf{r}, \omega')}{\gamma_0(\omega')} = \left| 1 - C_1(\omega') \frac{dQ_1(\xi)}{d\xi} \right|^2, \quad (2)$$

$$\frac{\gamma_{\text{nonrad}}(\mathbf{r}, \omega')}{\gamma_0(\omega')} = \frac{3}{2(k_0 n \sqrt{b^2 - a^2})^3} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) \left(\frac{dQ_m(\xi)}{d\xi} \right)^2 \text{Im} C_m(\omega'),$$

где

$$C_m(\omega') = (\varepsilon(\omega') - n^2) P_m(\xi_0) \frac{dP_m(\xi_0)}{d\xi_0} \times \left(\varepsilon(\omega') Q_m(\xi_0) \frac{dP_m(\xi_0)}{d\xi_0} - n^2 \frac{dQ_m(\xi_0)}{d\xi_0} P_m(\xi_0) \right)^{-1}. \quad (3)$$

В (2), (3) обозначено: γ_0 – скорость излучательного перехода при отсутствии наночастицы; k_0 – волновое число в вакууме, вычисляемое на частоте ω' ; n – показатель преломления окружающей диэлектрической среды; ε – диэлектрическая проницаемость материала наночастицы; $P_m(\xi_0)$ – функции Лежандра первого рода [9]; $\xi_0 = b / (b^2 - a^2)^{1/2}$ – радиальная координата, задающая поверхность наночастицы. С помощью предельного перехода $b \rightarrow a$ из (2) можно получить выражения для скоростей переходов в случае наносферы [1], что подтверждает корректность (2).

Для использования эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции при разработке наносенсора показателя преломления окружающей диэлектрической среды необходимо создать условия, при которых интенсивность фотолюминесценции достигает высокого уровня для заданного значения n и при этом максимально зависит от n . Для этого исследуется количественная мера чувствительности FOM (**Figure of Merit**), которую в рассматриваемом случае можно определить как относительное изменение $\Delta F_{PL} / F_{PL}$, возникающее при небольшом изменении показателя преломления Δn , нормированное на Δn , т. е. в виде

$$\text{FOM} = \frac{\Delta F_{PL} / F_{PL}}{\Delta n} 100 \%. \quad (4)$$

Величина FOM показывает насколько сильно влияет изменение показателя преломления на фактор F_{PL} . Следовательно, задача повышения чувствительности наносенсора на основе эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции может быть сведена к нахождению условий, при которых FOM принимает наибольшие по модулю значения.

Результаты и их обсуждение. Для численного анализа далее в работе исследуется случай наноэллипсоида из серебра. Длина волны возбуждения в вакууме положена равной 450 нм, а длина волны испускания – 500 нм. Зависимость диэлектрической проницаемости серебра от длины волны задается интерполяцией экспериментальных данных из [12].

Проведенные расчеты коэффициента экстинкции как функции соотношения полуосей a / b и показателя преломления среды n показывают, что в диапазоне $n = 1,3–1,5$, который соответствует типичным жидкостям, наибольшие значения коэффициента экстинкции (плазмонный резонанс), вычисляемого на длине волны возбуждения, соответствуют $a / b = 0,55–0,7$. Для этих соотношений полуосей максимум будет реализовываться также и для фактора F_{PL} , поскольку, как следует из (1), главный вклад в F_{PL} дает фактор G , возрастающий при увеличении коэффициента экстинкции.

На рис. 1 показаны зависимости фактора F_{PL} от показателя преломления среды n , в которой расположены наночастица и излучатель, а также от расстояния от излучателя до поверхности наночастицы Δr . Как следует из рис. 1, a , при заданном соотношении полуосей a / b зависимость F_{PL} от n имеет максимум, который возникает для некоторого $n = n_{\max}$. Видно, что увеличение a / b приводит к увеличению n_{\max} . Это позволяет выбрать оптимальное соотношение полуосей наноэллипсоида, при котором максимум фактора F_{PL} реализуется для заданного показателя преломления среды, что обеспечивает наилучшее плазмонное усиление фотолюминесценции.

Как следует из рис. 1, b , величина максимума F_{PL} зависит от расстояния до поверхности эллипсоидальной наночастицы Δr и от размера наночастицы. Видно, что в исследованных случаях максимуму соответствует положение излучателя на расстоянии 1–2 нм от острия наноэллипсоида. При увеличении размера наноэллипсоида положение максимума смещается в сторону больших Δr .

Из рис. 1, b следует также, что увеличение размера наночастицы приводит к увеличению фактора F_{PL} . Такое утверждение корректно лишь в рамках использованного в работе квазистатического приближения. При учете эффектов запаздывания (теория Ми) можно показать, что уве-

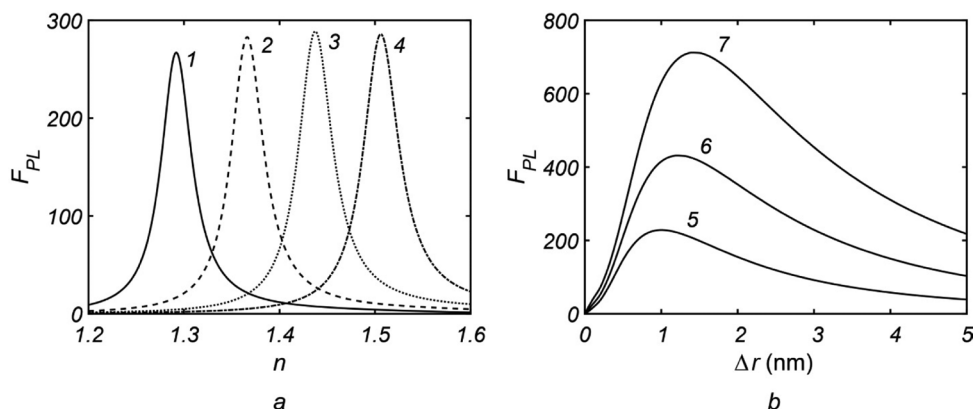


Рис. 1. Фактор F_{PL} , рассчитанный для квантового излучателя в диэлектрической среде вблизи серебряного вытянутого двухосного наноэллипсоида: a – как функция показателя преломления среды n ; расстояние до поверхности наноэллипсоида $\Delta r = 1$ нм, длина наноэллипсоида $2b = 20$ нм, соотношение полуосей $a / b = 0,55$ (1), $a / b = 0,60$ (2), $a / b = 0,65$ (3) и $a / b = 0,70$ (4); b – как функция расстояния до поверхности Δr ; показатель преломления $n = 1,3$, соотношение полуосей $a / b = 0,55$, длина $2b = 20$ нм (5), $2b = 25$ нм (6) и $2b = 30$ нм (7)

Fig. 1. Factor F_{PL} for a quantum emitter placed in dielectric medium near a silver prolate biaxial nanoellipsoid: a – versus refraction index of the medium n ; distance from the emitter to nanoellipsoid surface $\Delta r = 1$ nm, nanoellipsoid length $2b = 20$ nm, ratio of semiaxes $a / b = 0,55$ (1), $a / b = 0,60$ (2), $a / b = 0,65$ (3) and $a / b = 0,70$ (4); b – versus distance to the surface Δr ; refraction index $n = 1,3$, ratio of semiaxes, length $2b = 20$ nm (5), $2b = 25$ nm (6) and $2b = 30$ nm (7)

личение размера металлической наночастицы приводит к перестройке спектра коэффициента экстинкции [13]. В частности, меняется значение частоты, соответствующей плазмонному резонансу, и возрастает вклад рассеяния. В результате, увеличение размера может приводить к уменьшению фактора F_{PL} [8].

На рис. 2 показана зависимость FOM от показателя преломления n , построенная по данным рис. 1, a . Из рис. 2 следует, что значения FOM могут достигать величины $\sim 5 \cdot 10^3$ %/ЕПП. Это означает, что наибольшая чувствительность предлагаемого наносенсора соответствует $\Delta n \approx 2 \cdot 10^{-4}$ ЕПП, если принять что относительная точность измерения интенсивности составляет порядка 1 %.

Отметим, что исследованная в настоящей работе система из излучателя и серебряного вытянутого наноэллипсоида вращения является лишь одной из возможных систем для реализации наносенсора показателя преломления. Концепция, изложенная в работе, может быть использована для металлических наночастиц других форм (например, трехосного наноэллипсоида, наносферы), а также для металлических наноструктур. Для повышения чувствительности разрабатываемого наносенсора следует использовать такие системы, для которых зависимость фактора изменения интенсивности фотолюминесценции от показателя преломления имеет вид достаточно узкого пика.

Для практической реализации наносенсора молекулярный флюорофор может оказаться не лучшим излучателем, поскольку из-за изменения химического состава показатель преломления жидкости может меняться. Кроме того, интенсивность фотолюминесценции может подавляться в случае большой концентрации флюорофоров. Поэтому коллоидные квантовые точки являются наиболее подходящими кандидатами для наносенсоров такого типа.

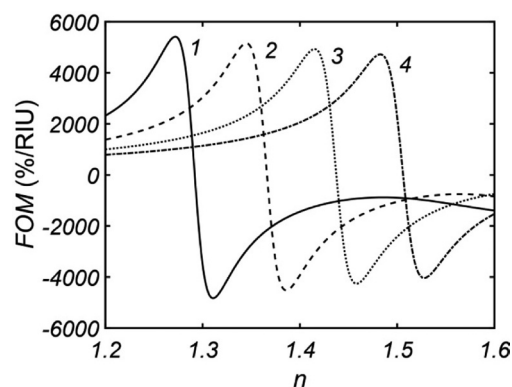


Рис. 2. Значение FOM, рассчитанное для квантового излучателя в диэлектрической среде вблизи серебряного вытянутого двухосного наноэллипсоида, как функция показателя преломления среды n ; расстояние до поверхности наноэллипсоида $\Delta r = 1$ нм, длина наноэллипсоида $2b = 20$ нм, соотношение полуосей $a / b = 0,55$ (1), $a / b = 0,60$ (2), $a / b = 0,65$ (3) и $a / b = 0,70$ (4)

Fig. 2. FOM for a quantum emitter placed in dielectric medium near a silver prolate biaxial nanoellipsoid versus refraction index of the medium n ; distance from the emitter to nanoellipsoid surface $\Delta r = 1$ nm, nanoellipsoid length $2b = 20$ nm, ratio of semiaxes $a / b = 0,55$ (1), $a / b = 0,60$ (2), $a / b = 0,65$ (3) and $a / b = 0,70$ (4)

Одним из вариантов применения эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции для разработки наносенсоров является тест-полоска для исследуемых жидкостей. Для этой цели можно использовать диэлектрическую подложку, на которую адсорбируются металлические наночастицы и квантовые точки. Другим вариантом может стать использование вместо подложки оптического волокна, на конец которого помещается коллоидная система «металлические наночастицы + квантовые точки». В этом случае можно одновременно возбуждать систему и регистрировать интенсивность фотолюминесценции. Этот способ представляется наиболее удобным для определения локальных изменений показателя преломления жидкостей.

Заключение. В настоящей работе предложен новый тип наносенсоров показателя преломления, основанный на плазмонном усилении фотолюминесценции дипольного квантового излучателя (квантовой точки (нанокристалла)) вблизи металлической наночастицы, расположенных в диэлектрике. Проведенные расчеты показывают, что в случае наночастицы в форме серебряного вытянутого наноэллипсоида вращения, расположенного в жидкости, чувствительность наносенсора по изменению показателя преломления достигает значений до $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ ЕПП, при этом точность детектирования относительного изменения интенсивности фотолюминесценции 1 %. Полученные в работе результаты могут найти практическое применение в рефрактометрии при разработке наносенсоров показателя преломления на основе эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф16Т/А-010).

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Agreement no. Ф16Т/А-010).

Список использованных источников

1. Климов, В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.
2. Mayer, K. M. Localized surface plasmon resonance sensors / K. M. Mayer, J. H. Hafner // *Chem. Rev.* – 2011. – Vol. 111, N 6. – P. 3828–3857. DOI: 10.1021/cr100313v
3. Willets, K. A. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing / K. A. Willets, R. P. Van Duyne // *Annu. Rev. Phys. Chem.* – 2007. – Vol. 58, N 1. – P. 267–297. DOI: 10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607
4. Tam, F. Geometrical parameters controlling sensitivity of nanoshell plasmon resonances to changes in dielectric environment / F. Tam, C. Moran, N. Halas // *J. Phys. Chem. B.* – 2004. – Vol. 108, N 45. – P. 17290–17294. DOI: 10.1021/jp048499x
5. Nanorice: a hybrid plasmonic nanostructure / H. Wang [et al.] // *Nano Lett.* – 2006. – Vol. 6, N 4. – P. 827–832. DOI: 10.1021/nl060209w
6. Markov, D. Breaking the 10^{-7} barrier for RI measurements in nanoliter volumes / D. Markov, D. Begari, D. J. Bornhop // *Anal. Chem.* – 2002. – Vol. 74, N 20. – P. 5438–5441. DOI: 10.1021/ac020403c
7. Формирование наностержней золота и пленок на их основе для применения в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света / Л. Л. Троцюк [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 4. – С. 44–49.
8. 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. DOI: 10.1021/jp301598w
9. Стрэттон, Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 540 с.
10. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовитца, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
11. Klimov, V. V. Spontaneous emission of an atom placed near a prolate nanospheroid / V. V. Klimov, M. Ducloy, V. S. Letokhov // *Eur. Phys. J. D.* – 2002. – Vol. 20, N 1. – P. 133–148. DOI: 10.1140/epjd/e2002-00107-2
12. 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. DOI: 10.1103/physrevb.6.4370
13. Gaponenko, S. V. Introduction to Nanophotonics / S. V. Gaponenko. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 465 p. DOI: 10.1017/CBO9780511750502

References

1. Klimov V. V. *Nanoplasmonics*. Singapore, Pan Stanford Publ., 2014. 598 p. DOI: 10.1201/b15442
2. Mayer K. M., Hafner J. H. Localized surface plasmon resonance sensors. *Chemical Reviews*, 2011, vol. 111, no. 6, pp. 3828–3857. DOI: 10.1021/cr100313v
3. Willets K. A., Van Duyne R. P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2007, vol. 58, no. 1, pp. 267–297. DOI: 10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607
4. Tam F., Moran C., Halas N. Geometrical parameters controlling sensitivity of nanoshell plasmon resonances to changes in dielectric environment. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, vol. 108, no. 45, pp. 17290–17294. DOI: 10.1021/jp048499x

5. Wang H., Brandl D. W., Le F., Nordlander P., Halas N. J. Nanorice: a hybrid plasmonic nanostructure. *Nano Letters*, 2006, vol. 6, no. 4, pp. 827–832. DOI: 10.1021/nl060209w
6. Markov D., Begari D., Bornhop D. J. Breaking the 10^{-7} barrier for RI measurements in nanoliter volumes. *Analytical Chemistry*, 2002, vol. 74, no. 20, pp. 5438–5441. DOI: 10.1021/ac020403c
7. Trotsyuk L. L., Kulakovich O. S., Shabunya-Klyachkovskaya E. V., Gaponenko S. V., Vashchenko S. V. Formation of gold nanorods and gold nanorod films for surface-enhanced Raman scattering spectroscopy. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 4, pp. 44–49 (in Russian).
8. Guzatov D. V., Vaschenko S. V., Stankevich V. V., Lunevich A. Yu., Glukhov Yu. F., Gaponenko S. V. Plasmonic enhancement of molecular fluorescence near silver nanoparticles: theory, modeling, and experiment. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, vol. 116, no. 19, pp. 10723–10733. DOI: 10.1021/jp301598w
9. Stratton J. A. *Electromagnetic Theory*. New York, McGraw-Hill, 1941. 648 p.
10. Abramowitz M., Stegun I. A. (eds.) *Handbook of Mathematical Functions*. Washington (DC), National Bureau of Standards, 1964. 1046 p.
11. Klimov V. V., Ducloy M., Letokhov V. S. Spontaneous emission of an atom placed near a prolate nanospheroid. *The European Physical Journal D*, 2002, vol. 20, no. 1, pp. 133–148. DOI: 10.1140/epjd/e2002-00107-2
12. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 1972, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379. DOI: 10.1103/physrevb.6.4370
13. Gaponenko S. V. *Introduction to Nanophotonics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 465 p. DOI: 10.1017/CBO9780511750502

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, 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), 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.