

**ФИЗИКА****PHYSICS**

УДК 535

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-288-295>

Поступило в редакцию 22.07.2024

Received 22.07.2024

**Академик С. В. Гапоненко, Т. А. Ефимова***Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь***ОПТИЧЕСКИЕ НАНОТРАНСИВЕРЫ В ФОТОНИКЕ**

**Аннотация.** Используемая в нанопотонике аналогия с радиофизикой, на основе которой введено и плодотворно используется понятие оптической наноантенны, обобщается на случай двухступенчатых процессов с оптическим возбуждением квантового излучателя (рассеивателя) и последующим испусканием вторичных фотонов: вводится понятие «оптический нанотрансивер» (приемопередатчик), т. е. устройство, принимающее первичные и генерирующее вторичные фотоны. Введен параметр эффективности нанотрансивера, задаваемый произведением коэффициента усиления интенсивности первичного излучения на локальную плотность фотонных состояний на частоте вторичного излучения. Данный параметр нанотрансивера задает повышение интенсивности рассеянного излучения и максимально возможное значение повышения интенсивности фотолюминесценции. Последнее достигается для излучателей с низким собственным квантовым выходом.

**Ключевые слова:** наноантенна, нанотрансивер, спонтанное испускание и рассеяние фотонов

**Для цитирования.** Гапоненко, С. В. Оптические нанотрансиверы в фотонике / С. В. Гапоненко, Т. А. Ефимова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 288–295. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-288-295>

**Academician Sergey V. Gaponenko, Taisia A. Efimova***B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***OPTICAL NANOTRANSCEIVERS IN PHOTONICS**

**Abstract.** The analogy used in nanophotonics with radiophysics, on the basis of which the notion of an optical nanoantenna was introduced and fruitfully used, is extended to the case of two-step processes with optical excitation of a quantum emitter (scatterer) and subsequent emission of secondary photons and the concept of an “optical nanotransceiver” (transceiver), i. e. a device receiving primary and generating secondary photons is introduced. The nanotransceiver efficiency parameter is introduced, which is defined by the product of the primary radiation intensity factor and the local density of photonic states at the secondary radiation frequency. This nanotransceiver parameter determines scattered radiation intensity enhancement and a maximum possible value of photoluminescence enhancement. The latter is achieved for emitters with low intrinsic quantum yield.

**Keywords:** nanoantenna, nanotransceiver, spontaneous emission and scattering of photons

**For citation.** Gaponenko S. V., Efimova T. A. Optical nanotransceivers in photonics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 4, pp. 288–295 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-288-295>

**Введение.** В последние десятилетия активно развиваются исследования, направленные на усиление взаимодействия оптического излучения с веществом с помощью металлических наночастиц [1–3]. В этих экспериментах при наличии плазмонных резонансов в спектре экстинкции наночастиц размером порядка 10–100 нм происходит локальное усиление (концентрирование) электромагнитного излучения на частоте возбуждения и (или) плотности фотонных состояний на частоте испущенного или рассеянного излучения. Для повышения эффективности спектральной

ного преобразования излучения с использованием фотолюминесценции или повышения чувствительности детектирования молекул, нано- и микрокристаллов с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния («рамановская спектроскопия») оптимальной является конфигурация источника вторичного свечения и металлической наночастицы, при которой максимальна эффективность преобразования первичного излучения во вторичное. В этом случае понятие *наноантенны* [4–6], основанное на переносе представлений из радиофизики в оптику, эволюционирует в концепцию *нанотрансивера* по аналогии с трансивером (приемопередатчиком) в радиофизике. В настоящей работе рассматривается принцип действия простейших оптических нанотрансиверов типа «проводящая сфера – дипольный излучатель» в виде пар «плазмонная частица–квантовая точка», «плазмонная частица–молекула» для построения люминесцентных фотопреобразователей в светодиодах, люминесцентных и рамановских меток, устройств ультрачувствительного детектирования органических и неорганических молекул, нано- и микрокристаллов, а также визуализаторов инфракрасного излучения на основе двухфотонного поглощения и люминесценции. Предполагается, что развитие концепции оптических нанотрансиверов как наноструктур, в которых одновременно реализуется локальное повышение напряженности электрического поля световой волны на частоте первичного (возбуждающего) излучения и плотности фотонных состояний на частоте вторичного (испущенного или рассеянного) излучения, приведет к дальнейшему плодотворному применению принципов и методов радиофизики в нанофотонике.

Как известно, в наноструктурах с пространственными неоднородностями диэлектрической проницаемости происходит изменение пространственно-временной структуры электромагнитного излучения, сопровождающееся изменением локальной напряженности электрического поля электромагнитного излучения, скорости его распространения, переходом от нормального распространения к туннелированию при образовании запрещенных зон в диэлектрических структурах или возникновению областей с отрицательной проницаемостью в металлодиэлектрических структурах. Пространственное изменение структуры электромагнитного поля на частоте вторичного (спонтанно испущенного или спонтанно рассеянного) излучения описывается как изменение плотности фотонных состояний, задающей скорости спонтанных переходов и вероятности комбинационного рассеяния света [7]. Для описания этих процессов и построения общей картины радиофизических и оптических явлений на основе классической и квантовой электродинамики (в рамках теории возмущений) плодотворным оказалось использование понятия «оптическая антенна» («наноантенна»). В процессах поглощения используется понятие принимающей наноантенны, а в процессах испускания и рассеяния – передающей наноантенны. В связи с тем, что для эффективного преобразования первичного излучения во вторичное при спонтанных процессах испускания и рассеяния излучения необходимо одновременно обеспечить локальное повышение интенсивности излучения на частоте первичного излучения и увеличение локальной плотности фотонных состояний на частоте вторичного излучения, целесообразно ввести понятие оптического трансивера, или, с учетом длины световой волны оптического диапазона, нанотрансивера, для обозначения наноструктур, обладающих одновременно двумя указанными выше свойствами. Примером эффективных нанотрансиверов являются так называемые горячие точки в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния с использованием металлодиэлектрических наноструктур [8–10], а также оптимизированные по своим параметрам металлодиэлектрические структуры для усиления фотолюминесценции [11; 12]. В то же время в процессах типа генерации гармоник, двухфотонного поглощения, а также в фотовольтаике достаточно использовать понятие приемной антенны, а в процессах электролюминесценции – передающей антенны. В многоступенчатых процессах типа фотосинтеза и фотокатализа в равной степени важны все три перенесенные из радиофизики в оптику наноструктур представления: приемная антенна, передающая антенна, оптический нанотрансивер.

В качестве основного параметра, характеризующего эффективность оптического нанотрансивера, принимающего излучение с частотой  $\omega_1$  и формирующего вторичное излучение с частотой  $\omega_2$ , предлагается принять произведение коэффициента усиления интенсивности излучения на частоте  $\omega_1$  на изменение плотности фотонных состояний на частоте  $\omega_2$

$$F_{TR} = \frac{|E(\mathbf{r}, \omega_1)|^2}{|E_0(\mathbf{r}, \omega_1)|^2} D(\mathbf{r}, \omega_2). \quad (1)$$

Первый множитель описывает эффективность нанотрансивера как принимающей антенны по отношению к излучению с частотой  $\omega_1$ , а второй множитель – его эффективность как передающей антенны на частоте  $\omega_2$ . Фактор эффективности нанотрансивера, определяемый выражением (1), непосредственно дает фактор усиления (enhancement) упругого (резонансного, рэлеевского) и неупругого (комбинационного, рамановского) рассеяния фотонов, а также максимально возможный фактор усиления интенсивности фотолюминесценции, который достигается в пределе низкого собственного квантового выхода излучающей квантовой системы (атом, молекула, полупроводниковый нанокристалл или малоатомный кластер). Расчет напряженности поля электромагнитного излучения для ряда модельных структур описан в литературе и может быть выполнен аналитически для некоторых простейших случаев (сферическая частица, сфероид, две сферические частицы) [7]. Плотность фотонных состояний в точке  $\mathbf{r}$  задается выражением

$$D(\mathbf{r}, \omega_2) = \frac{6\omega_2}{\pi c^2} \text{Im} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega_2), \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega_2)$  – функция Грина.

Во многих практических случаях удобно использовать операциональное определение локальной плотности фотонных состояний как отношение скорости (мощности) испускания излучения классическим осциллятором  $\gamma_{\text{rad}}(\mathbf{r}, \omega)$  в данной точке  $\mathbf{r}$  к скорости (мощности), испускаемой им же в вакууме  $\gamma_0(\omega)$ , что позволяет предложить эффективные практические методы расчета локальной плотности фотонных состояний без прямого использования выражения (2) [13–15].

На рис. 1 показаны характеристики простейшего нанотрансивера в виде дипольного излучателя и сферы. Для оптической области спектра наиболее эффективными являются наноструктуры из серебра, хотя с меньшей эффективностью возможно применение и других металлов (золото, алюминий, медь и др.) и даже диэлектрических материалов с высоким показателем преломления. С учетом практического применения нанотрансиверов, удобно использовать длину волны излучения в вакууме вместо частоты. Существенным является представление конечного результата в виде функции двух аргументов – длины волны (в вакууме) падающего излучения  $\lambda_1$  и длины волны (в вакууме) вторичного излучения  $\lambda_2$  – как наиболее наглядного варианта для оценки эффективности нанотрансивера. Видна корреляция коэффициентов усиления интенсивности излучения и плотности фотонных состояний с рассеивательной компонентой спектра экстинкции, что важно при конструировании практических нанотрансиверов, например, для дисплейных устройств, систем молекулярного спектрального анализа, в фотобиофизических исследованиях и различных диагностических системах, основанных на регистрации комбинационного рассеяния или флуоресценции.

В качестве примера использования нанотрансиверов в оптических устройствах рассмотрим простейший случай «проводящая сфера – дипольный излучатель» и проанализируем явления одно- и двухфотонного возбуждения люминесценции. В случае однофотонного возбуждения фактор изменения интенсивности фотолюминесценции определяется выражением [1]

$$F_{PL} = \frac{I(\mathbf{r}, \omega_2)}{I_0(\mathbf{r}, \omega_2)} = \frac{|E(\mathbf{r}, \omega_1)|^2}{|E_0(\mathbf{r}, \omega_1)|^2} \frac{Q(\mathbf{r}, \omega_2)}{Q_0(\omega_2)}, \quad (3)$$

где  $Q_0$  и  $Q$  – собственный квантовый выход излучателя и его значение при работе в составе нанотрансивера. Алгоритм аналитического расчета величин  $E(\mathbf{r}, \omega)$ ,  $E_0(\mathbf{r}, \omega)$ ,  $Q(\mathbf{r}, \omega)$ ,  $Q_0(\omega)$  для рассматриваемой модели описан в наших работах [13; 16–18]. Понижение  $Q_0$  увеличивает максимальную эффективность нанотрансивера примерно в  $1/Q_0$  раз.

Как уже отмечалось, выражение (3) сводится к выражению (1) при  $Q_0 \rightarrow 0$ , что следует из формулы для расчета квантового выхода фотолюминесценции

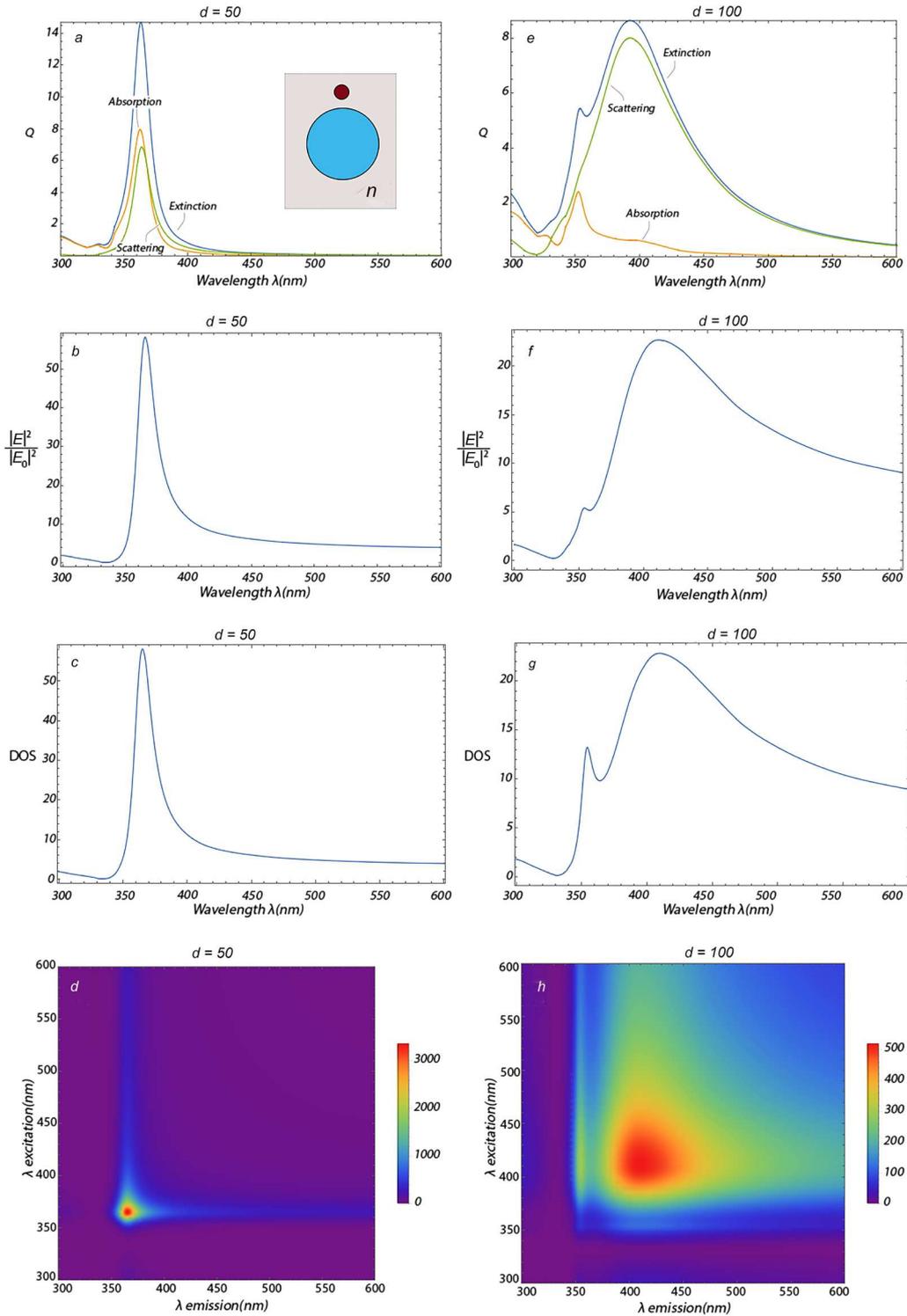


Рис. 1. Характеристики простейшего нанотрансивера с серебряной наночастицей диаметром  $d = 50$  нм ( $a-d$ ) и  $d = 100$  нм ( $e-h$ ):  $a, e$  – спектры экстинкции (extinction) с компонентами, обусловленными рассеянием (scattering) и поглощением (absorption);  $b, f$  – усиление электромагнитного поля;  $c, g$  – плотность фотонных состояний;  $d, h$  – фактор эффективности нанотрансивера, определяемый выражением (1), в зависимости от длины волны  $\lambda$  возбуждения (excitation) и испускания (emission)

Fig. 1. Characteristics of the simplest nanotransceiver with a silver nanoparticle with diameter  $d = 50$  nm ( $a-d$ ) and  $d = 100$  nm ( $e-h$ ):  $a, e$  – extinction spectra with components relevant to scattering and absorption;  $b, f$  – electromagnetic field enhancement;  $c, g$  – photon density of states;  $d, h$  – nanotransceiver efficiency factor determined by expression (1) depending on the extinction and emission wavelength  $\lambda$

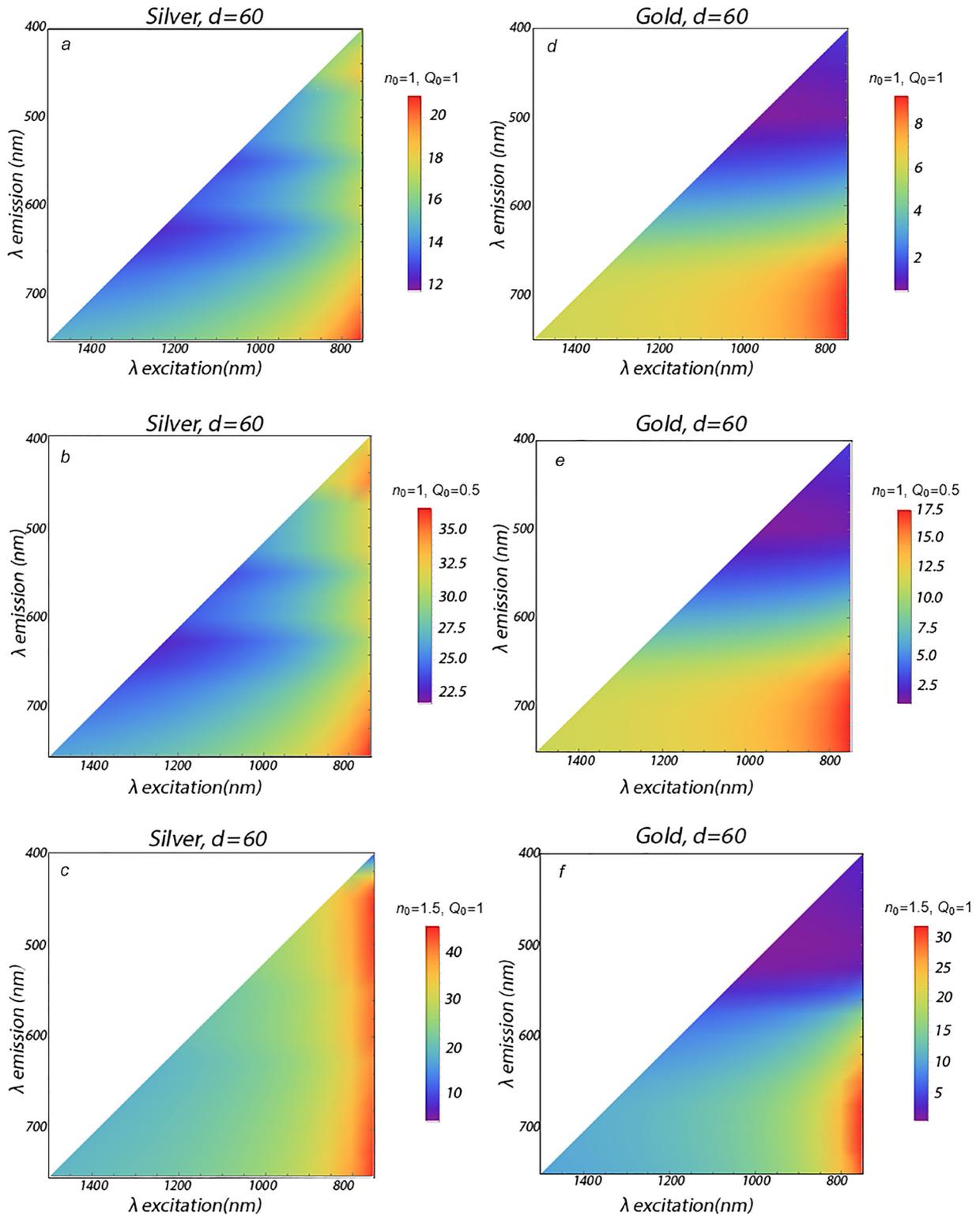


Рис. 2. Увеличение интенсивности фотолюминесценции при двухфотонном возбуждении для дипольного излучателя вблизи сплошной наносферы серебра (a–c) и золота (d–f) диаметром 60 нм, расстояние от излучателя до поверхности металла 7 нм. Дипольный момент излучателя ориентирован нормально к поверхности наносферы,  $n_0$  – показатель преломления среды,  $Q_0$  – собственный квантовый выход излучателя

Fig. 2. Photoluminescence intensity enhancement at two-photon excitation for a dipole emitter near a solid silver (a–c) and gold nanosphere (d–f) of 60 nm diameter at a distance of 7 nm from the emitter to the metal surface. The emitter dipole moment is normal to the nanosphere surface,  $n_0$  is the ambient medium refractive index,  $Q_0$  is the emitter intrinsic quantum yield

$$\frac{Q(\mathbf{r}, \omega)}{Q_0(\omega)} = \frac{(\gamma_{\text{rad}}(\mathbf{r}, \omega) / \gamma_0(\omega)) / Q_0(\omega)}{\gamma_{\text{rad}}(\mathbf{r}, \omega) / \gamma_0(\omega) + \gamma_{\text{nr}}(\mathbf{r}, \omega) / \gamma_0(\omega) + (1 - Q_0(\omega)) / Q_0(\omega)},$$

где  $\gamma_{\text{nr}}$  – скорость безызлучательных переходов вблизи нанобъекта. Примеры использования металлодиэлектрических наноструктур как нанотрансиверов для усиления эффективности однофотонно возбуждаемой люминесценции можно найти, например, в [12; 13].

В качестве второго примера рассмотрим применение нанотрансивера для повышения эффективности двухфотонно возбуждаемой люминесценции, например, в биомикроскопии или в составе визуализаторов инфракрасного (ИК) излучения. Для двухфотонно возбуждаемой люминесценции эффективность применения нанотрансивера значительно повышается в сравнении с однофотонно возбуждаемой люминесценцией в связи с тем, что эффективность возбуждения в этом случае пропорциональна не первой, а второй степени интенсивности возбуждающего излучения, т. е.

$$F_{PL} = \frac{I(\mathbf{r}, \omega_2)}{I_0(\mathbf{r}, \omega_2)} = \frac{|E(\mathbf{r}, \omega_1)|^4}{|E_0(\mathbf{r}, \omega_1)|^4} \frac{Q(\mathbf{r}, \omega_2)}{Q_0(\omega_2)}.$$

Рассмотрим случаи, когда возбуждающее излучение находится в интервале 1400–800 нм (ИК-диапазон), и вторичное излучение – в интервале 700–400 нм (видимый диапазон). Отметим, что двухфотонное возбуждение флуоресценции рассматривается как перспективный метод визуализации биотканей [19].

Пример расчетов представлен на рис. 2, где рассмотрены различные комбинации значений показателя преломления среды ( $n_0$ ) и собственного квантового выхода излучателя ( $Q_0$ ) для серебряных (рис. 2, *a–c*) и золотых (рис. 2, *d–f*) наночастиц в зависимости от используемых длин волн возбуждения (excitation) и испускания (emission). Наблюдается более высокая эффективность наночастиц серебра по сравнению с золотом для всех рассмотренных случаев. Более того, как и для однофотонного случая, видна обратная зависимость фактора эффективности нанотрансивера от  $Q_0$  (рис. 2, *a* и *b*). Потенциально возможным является получение многократного усиления излучения при использовании полупроводникового лазера на длинах волн 810 или 750 нм, а также при использовании твердотельного Nd лазера – 1064 или 1320 нм.

**Заключение.** Предложена концепция нанотрансивера как оптического устройства, повышающего эффективность преобразования первичного электромагнитного излучения во вторичное с использованием процессов спонтанного упругого и неупругого рассеяния, а также испускания фотонов. Для описания нанотрансивера введен фактор эффективности, равный произведению коэффициента изменения интенсивности на частоте первичного излучения и локальной плотности фотонных состояний на частоте вторичного излучения. Данный параметр задает коэффициент усиления (enhancement) рассеяния (упругого и неупругого) фотонов в металлодиэлектрических и диэлектрических нанотрансиверах, коэффициент усиления фотолюминесценции в диэлектрических нанотрансиверах и его максимально возможное значение в металлодиэлектрических устройствах, достигаемое для излучателей с предельно низким собственным квантовым выходом фотолюминесценции. Приведены примеры конструирования и определена эффективность простейших нанотрансиверов для фотолюминесцентной визуализации инфракрасного излучения и двухфотонной флуоресцентной микроскопии.

### Список использованных источников

1. Gaponenko, S. V. Colloidal plasmonics for active nanophotonics / S. V. Gaponenko, D. V. Guzatov // Proceedings of the IEEE. – 2020. – Vol. 108, N 5. – P. 704–720. <https://doi.org/10.1109/jproc.2019.2958875>
2. Soler, M. Principles, technologies, and applications of plasmonic biosensors / M. Soler, L. M. Lechuga // J. Appl. Phys. – 2021. – Vol. 129, N 11. – Art. 111102. <https://doi.org/10.1063/5.0042811>
3. Plasmonic core-shell nanomaterials and their applications in spectroscopies / Y. J. Zhang [et al.] // Advanced Materials. – 2021. – Vol. 33, N 50. – Art. 2005900. <https://doi.org/10.1002/adma.202005900>
4. Fischer, H. Engineering the optical response of plasmonic nanoantennas / H. Fischer, O. J. F. Martin // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16, N 12. – P. 9144–9154. <https://doi.org/10.1364/oe.16.009144>

5. Оптические наноантенны / А. Е. Краснюк [и др.] // Успехи физ. наук. – 2013. – Т. 183, № 6. – С. 561–589. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0183.201306a.0561>
6. Slepuyan, G. Y. Quantum antennas / G. Y. Slepuyan, S. Vlasenko, D. Mogilevtsev // *Adv. Quantum Technol.* – 2020. – Vol. 3, N 4. – Art. 1900120. <https://doi.org/10.1002/qute.201900120>
7. Gaponenko, S. V. *Introduction to Nanophotonics* / S. V. Gaponenko. – Cambridge, 2010. – 465 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511750502>
8. Brus, L. Noble metal nanocrystals: plasmon electron transfer photochemistry and single-molecule Raman spectroscopy / L. Brus // *Acc. Chem. Res.* – 2008. – Vol. 41, N 12. – P. 1742–1749. <https://doi.org/10.1021/ar800121r>
9. Gaponenko, S. V. Possible rationale for ultimate enhancement factor in single molecule Raman spectroscopy / S. V. Gaponenko, D. V. Guzatov // *Chem. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 477, N 4–6. – P. 411–414. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2009.07.043>
10. Гапоненко, С. В. Высокочувствительная колебательная спектроскопия с использованием наноструктур и ее применение в исследовании произведений живописи / С. В. Гапоненко, Е. В. Шабуня-Клячковская, М. В. Бельков // *Журн. приклад. спектроскопии.* – 2023. – Т. 90, № 2. – С. 156–164. <https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-156-164>
11. Metal enhanced fluorescence (MEF) for biosensors: General approaches and a review of recent developments / Y. Jeong [et al.] // *Biosens. Bioelectron.* – 2018. – Vol. 111. – P. 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.04.007>
12. Кулакович, О. С. Металлодиэлектрические наноструктуры для усиления молекулярной флуоресценции / О. С. Кулакович, С. В. Гапоненко, Д. В. Гузатов // *Журн. приклад. спектроскопии.* – 2023. – Т. 90, № 3. – С. 447–455.
13. 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>
14. Kidwai, O. Effective-medium approach to planar multilayer hyperbolic metamaterials: Strengths and limitations / O. Kidwai, S. V. Zhukovsky, J. E. Sipe // *Phys. Rev. A.* – 2012. – Vol. 85, N 5. – Art. 053842. <https://doi.org/10.1103/physreva.85.053842>
15. Klimov, V. V. Spontaneous emission of an atom in the presence of nanobodies / V. V. Klimov, M. Ducloy, V. S. Letokhov // *Quantum Electron.* – 2001. – Vol. 31, N 7. – Art. 569. <https://doi.org/10.1070/qe2001v031n07abeh002007>
16. Guzatov, D. V. Plasmonic enhancement of electroluminescence / D. V. Guzatov, S. V. Gaponenko, H. V. Demir // *AIP Adv.* – 2018. – Vol. 8, N 1. – Art. 015324. <https://doi.org/10.1063/1.5019778>
17. Гузатов, Д. В. Использование плазмонного усиления люминесценции для улучшения характеристик светодиодных систем / Д. В. Гузатов, С. В. Гапоненко // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2016. – Т. 60, № 6. – С. 37–42.
18. Гапоненко, С. В. Усиление люминесценции молекулы вблизи сферической металлической наночастицы / С. В. Гапоненко, Д. В. Гузатов // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2012. – Т. 56, № 3. – С. 57–62.
19. Diaspro, A. Two-photon fluorescence excitation and related techniques in biological microscopy / A. Diaspro, G. Chirico, M. Collini // *Q. Rev. Biophys.* – 2005. – Vol. 38, N 2. – P. 97–166. <https://doi.org/10.1017/s0033583505004129>

## References

1. Gaponenko S. V., Guzatov D. V. Colloidal plasmonics for active nanophotonics. *Proceedings of the IEEE*, 2020, vol. 108, no. 5, pp. 704–720. <https://doi.org/10.1109/jproc.2019.2958875>
2. Soler M., Lechuga L. M. Principles, technologies, and applications of plasmonic biosensors. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 11, art. 111102. <https://doi.org/10.1063/5.0042811>
3. Zhang Y. J., Radjenovic P. M., Zhou X. S., Zhang H., Yao J. L., Li J. F. Plasmonic core-shell nanomaterials and their applications in spectroscopies. *Advanced Materials*, 2021, vol. 33, no. 50, art. 2005900. <https://doi.org/10.1002/adma.202005900>
4. Fischer H., Martin O. J. F. Engineering the optical response of plasmonic nanoantennas. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 12, pp. 9144–9154. <https://doi.org/10.1364/oe.16.009144>
5. Krasnok A. E., Denisyuk A. I., Belov P. A., Simovski C. R., Kivshar Yu. S., Maksymov I. S., Miroshnichenko A. E. Optical nanoantennas. *Physics-Uspekhi*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 539–564. <https://doi.org/10.3367/ufne.0183.201306a.0561>
6. Slepuyan G. Y., Vlasenko S., Mogilevtsev D. Quantum antennas. *Advanced Quantum Technologies*, 2020, vol. 3, no. 4, art. 1900120. <https://doi.org/10.1002/qute.201900120>
7. Gaponenko S. V. *Introduction to Nanophotonics*. Cambridge, 2010. 465 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511750502>
8. Brus L. Noble metal nanocrystals: plasmon electron transfer photochemistry and single-molecule Raman spectroscopy. *Accounts of Chemical Research*, 2008, vol. 41, no. 12, pp. 1742–1749. <https://doi.org/10.1021/ar800121r>
9. Gaponenko S. V., Guzatov D. V. Possible rationale for ultimate enhancement factor in single molecule Raman spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, 2009, vol. 477, no. 4–6, pp. 411–414. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2009.07.043>
10. Gaponenko S. V., Shabunya-Klyachkovskaya E. V., Belkov M. V. High-sensitivity vibrational spectroscopy using nanostructures and its application to art painting research. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2023, vol. 90, pp. 257–264. <https://doi.org/10.1007/s10812-023-01530-w>
11. Jeong Y., Kook Y. M., Lee K., Koh W. G. Metal enhanced fluorescence (MEF) for biosensors: General approaches and a review of recent developments. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, vol. 111, pp. 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.04.007>
12. Kulakovich O. S., Gaponenko S. V., Guzatov D. V. Metal-dielectric nanostructures for enhancement of molecular fluorescence. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2023, vol. 90, pp. 567–575. <https://doi.org/10.1007/s10812-023-01567-x>
13. Guzatov D. V., Vaschenko S. V., Stankevich V. V., Lunevich A. Ya., Glukhov Yu. 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>

14. Kidwai O., Zhukovsky S. V., Sipe J. E. Effective-medium approach to planar multilayer hyperbolic metamaterials: Strengths and limitations. *Physical Review A*, 2012, vol. 85, no. 5, art. 053842. <https://doi.org/10.1103/physreva.85.053842>
15. Klimov V. V., Ducloy M., Letokhov V. S. Spontaneous emission of an atom in the presence of nanobodies. *Quantum Electronics*, 2001, vol. 31, no. 7, art. 569. <https://doi.org/10.1070/qe2001v031n07abeh002007>
16. Guzatov D. V., Gaponenko S. V., Demir H. V. Plasmonic enhancement of electroluminescence. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 1, art. 015324. <https://doi.org/10.1063/1.5019778>
17. Guzatov D. V., Gaponenko S. V. Application of plasmonic luminescence enhancement for improvement of LED systems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 37–42 (in Russian).
18. Gaponenko S. V., Guzatov D. V. Enhancement of molecule fluorescence near a spherical metal nanoparticle. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 57–62 (in Russian).
19. Diaspro A., Chirico G., Collini M. Two-photon fluorescence excitation and related techniques in biological microscopy. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 2005, vol. 38, no. 2, pp. 97–166. <https://doi.org/10.1017/s0033583505004129>

### Информация об авторах

*Гапоненко Сергей Васильевич* – академик, д-р физ.-мат. наук, директор. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by](mailto:s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by).

*Ефимова Таисия Адамовна* – аспирант, мл. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [t.efimova@ifanbel.bas-net.by](mailto:t.efimova@ifanbel.bas-net.by).

### Information about the authors

*Gaponenko Sergey V.* – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director. 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](mailto:s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by).

*Efimova Taisia A.* – Postgraduate Student, Junior 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: [t.efimova@ifanbel.bas-net.by](mailto:t.efimova@ifanbel.bas-net.by).