

## «СВЕТЛЫЕ» ПЛАЗМОНЫ ТРЕУГОЛЬНОГО ИЛИ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНОГО КЛАСТЕРА НАНОПРОВОДОВ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

### Введение

В последнее время наноструктуры из благородных металлов (в частности, золота и серебра) вызывают значительный интерес, что обусловлено, прежде всего, их электродинамическими свойствами и возможностью сильной локализации света на субволновом уровне за счет возбуждения поверхностных и локализованных плазмонов. Хотя серебряные нанопровода как плазмонные компоненты широко теоретически и экспериментально изучены, но систематическое их исследование до сих пор отсутствует. Многие авторы акцентируют внимание на создание нанопроводов [1, 2] и их применение в фотонике, плазмонике и т.д. Так, в последние годы, нанопроводы из благородных металлов, особенно серебра, являются объектом исследований из-за их уникальных физических и химических свойств, которые широко используются в катализе [3], оптических, электрических [4, 5] и антибактериальных [6] областях. Исследователи из многих стран используют нанопроводы для создания полупроводников [7], высокопроизводительных оптико-электронных приборов [8], смарт-одежды [9], прозрачных дисплеев и пленок [10 – 12], солнечных батарей [13], лазеров с концентрической активной областью [14] и многого другого.

В работе [15] теоретически исследованы плазмонные резонансы ансамблей связанных металлических нанопроводов, расположенных в вершинах правильного треугольника или квадрата. Для решения задачи применен строгий математический метод. Проведено полное исследование плазмонных гибридных мод, исследованы их все возможные классы симметрий, распределения ближних полей, спектральные характеристики и добротности. Продемонстрированы «светлые» и «темные» плазмоны.

В данной работе исследованы серебряные и золотые наноструктуры с плазмонными резонансами для их потенциального использования в наноантенных, нанолазерных и сенсорных применениях. В частности, изучается влияние пространственной конфигурации нанопроводов из благородных металлов на чувствительность гибридных плазмонов к изменению свойств внешней среды и на возможности концентрации ближнего поля.

### Постановка задачи и ее решение

Рассматриваются структуры, состоящие из нанопроводов из благородных металлов, расположенных в вершинах правильного треугольника или квадрата. Будем называть такие структуры кластерами (ансамблями) треугольной или четырехугольной конфигурации соответственно. Моделями таких проводов являются круговые цилиндры бесконечной протяженности радиуса  $a$ , расстояние между которыми  $d$  (рис. 1,  $a$ ,  $b$ ). Внешняя среда – недиспергирующий диэлектрик с проницаемостью  $\varepsilon_1$ , среда внутри каждого нанопровода описывается диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$ , взятой из экспериментальной работы [16].

Аналогично случаю линейной цепочки металлических нанопроводов [17] в поперечном сечении каждого цилиндра введем локальные полярные системы координат  $(\rho_i, \varphi_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$  или  $i = 1, 2, 3, 4$ , связанные с каждым цилиндром, глобальную полярную систему координат  $(\rho, \varphi)$  и систему прямоугольных декартовых координат  $(x, y)$ , центр которых совпадает с центром симметрии структуры (рис. 1). Каждый цилиндр ориентирован вдоль оси  $Oz$ .

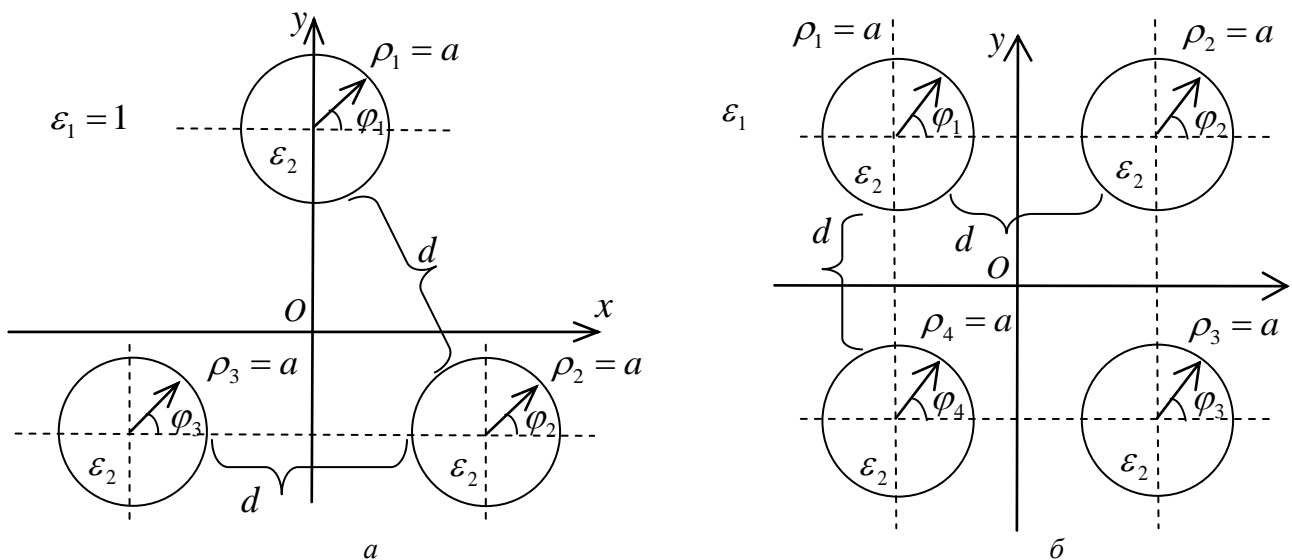


Рис. 1. Геометрия задачи

Пусть плоская однородная волна падает на кластер определенной конфигурации

$$H(\rho, \varphi) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} (-i)^s J_s(n_1 k \rho) e^{is(\varphi - \alpha)} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением падения плоской волны и положительным направлением оси  $Ox$ .

Решение задачи получаем таким же способом, как и в случае дифракции на цепочке, т.е. разложив прошедшее и отраженное поля по подходящим цилиндрическим функциям:

$$H = \sum_{i=1}^N \sum_{s=0}^{\infty} B_s^i H_s^{(2)}(n_1 k \rho_i) e^{is\varphi_i}, \quad (\rho_i > a), \quad (2)$$

$$H = \sum_{s=0}^{\infty} A_s^{(i)} J_s(n_2 k \rho_s) e^{is\varphi_i}, \quad \text{если } (\rho_i < a), \quad (3)$$

где  $N$  – число проводов в кластере ( $N = 3$  или  $N = 4$ ),  $k = \omega/c$  – волновое число для вакуума,  $c$  – скорость света в вакууме.

Неизвестные коэффициенты находим из граничных условий, которые заключаются в требовании непрерывности тангенциальных компонент на поверхности каждого нанопровода. Чтобы «сшить» поля на границах, применяем теорему сложения для функций Бесселя [18], что приводит к получению блочной  $(3 \times 3)$  или  $(4 \times 4)$  бесконечной системы уравнений. После преобразований полученную систему записываем в Фредгольмовом виде, что гарантирует сходимость приближенного решения к точному при увеличении порядка усечения матрицы. Подробное решение данной задачи представлено в работе [15].

### Численные результаты и обсуждение

1. *Влияние окружающей среды на плазмонные резонансы в кластере связанных нанопроводов из благородных металлов.* В данном пункте изучено влияние окружающей среды на плазмонные резонансы в ансамблях связанных нанопроводов из благородных металлов.

Рассматривается поперечное сечение рассеяния (ПРС) золотых или серебряных проводов, образующих кластер треугольной или четырехугольной конфигурации. Радиус каждой нити  $a = 25$  нм, расстояние между ними  $d = 350$  нм для серебряных проводов и  $d = 520$  нм для золотых. Цель данного исследования – изучить влияние окружающей среды на положение плазмонного резонанса треугольного или четырехугольного кластера.

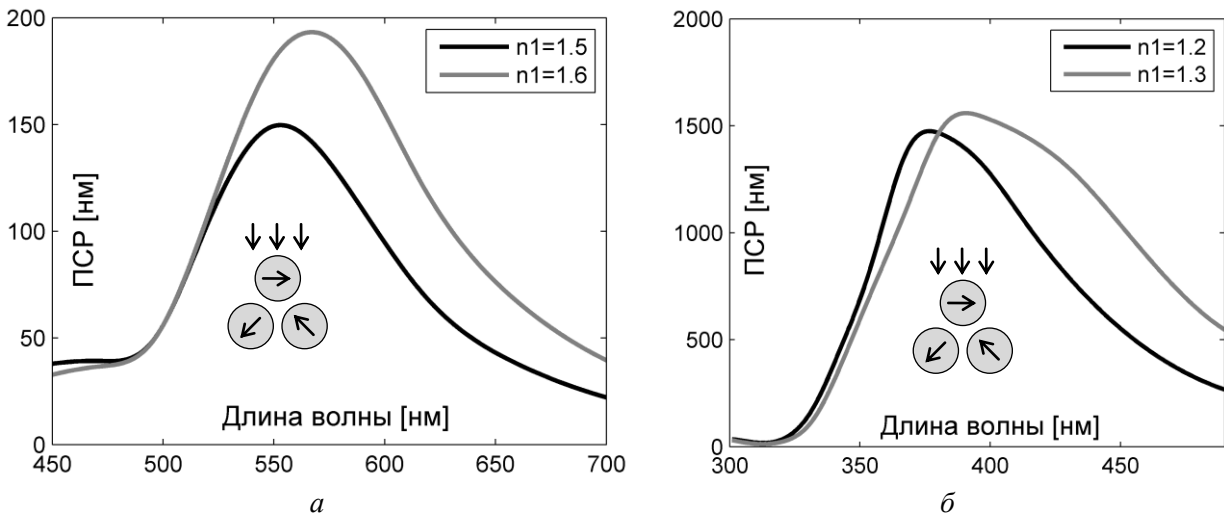


Рис. 2. ПСР (а) золотых ( $d = 520$  нм) и (б) серебряных ( $d = 350$  нм) проводов, образующих кластер треугольной конфигурации, для разных значений показателя преломления внешней среды ( $a = 25$  нм)

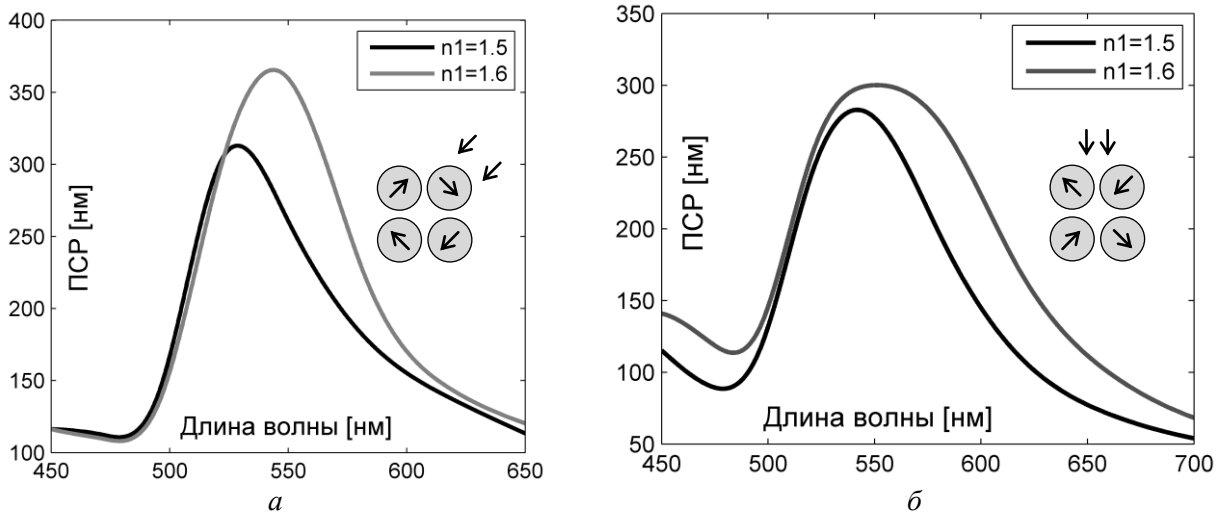


Рис. 3. ПСР золотых нанопроводов квадратного кластера для разных значений показателя преломления внешней среды ( $a = 25$  нм,  $d = 520$  нм)

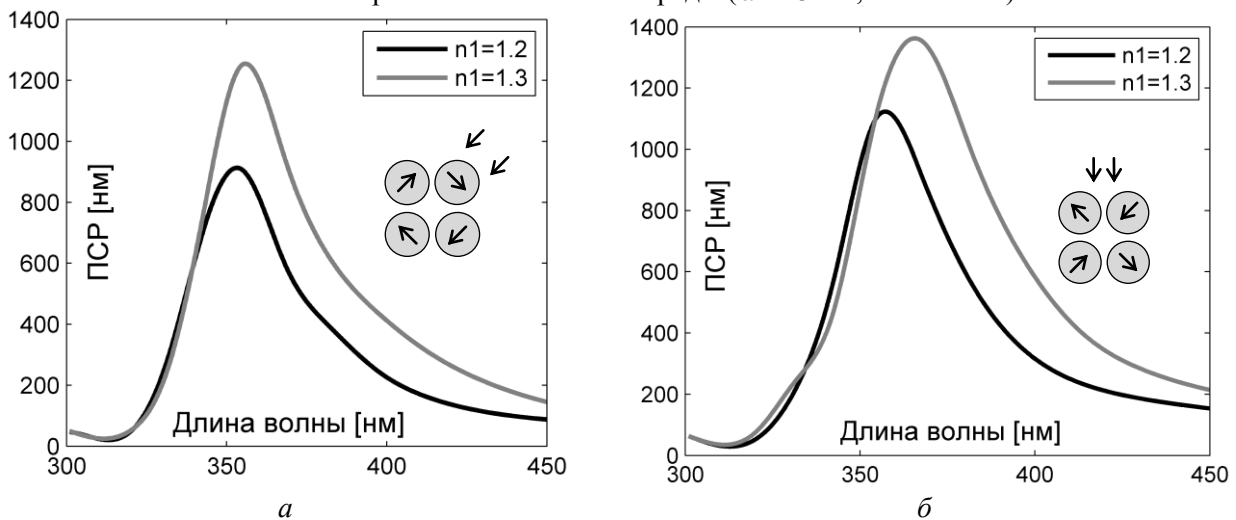


Рис. 4. ПСР четырех связанных серебряных нанопроводов, расположенных в вершинах квадрата, для разных значений показателя преломления внешней среды ( $a = 25$  нм,  $d = 350$  нм)

На рис. 3 – 4 приведены аналогичные результаты для золотых (рис. 3) или серебряных (рис. 4) нанопроводов, расположенных в вершинах квадрата. Максимальный сдвиг плазмонного резонанса происходит для серебряных проводов при падении плоской волны в направлении, показанном на рис. 4, б. В этом случае, изменение показателя преломления на величину 0,1 от значения 1,2 до значения 1,3 смещает резонансную длину волны на 7 нм (с  $\lambda = 359$  нм до  $\lambda = 366$  нм).

На рис. 2 представлено ПСР для (а) золотых или (б) серебряных нанопроводов соответственно, расположенных в вершинах правильного треугольника. Направления падения плоской волны и ориентация возбуждаемых дипольных плазмонов показаны на вставках.

В серебряном треугольном кластере смещение показателя преломления внешней среды на величину 0,1 (от значения 1,2 до значения 1,3) смещает резонансную длину волны на 18 нм (с  $\lambda = 373$  нм до  $\lambda = 391$  нм). Для золотых проводов изменение показателя преломления внешней среды от значения 1,5 до значения 1,6 приводит к сдвигу резонанса на 11 нм (с  $\lambda = 552$  нм до  $\lambda = 563$  нм).

Следовательно, наибольшей чувствительностью к изменению свойств внешней среды обладают плазмоны серебряного треугольного кластера. Следует также отметить, что плазмоны рассмотренных кластеров более чувствительны к изменению свойств внешней среды, чем плазмоны линейной цепочки, состоящей из того же числа проводов [см. 19].

2. Участки сильной концентрации поля в кластерах серебряных нанопроводов. В данном пункте исследованы возможности увеличения концентрации полей и появление участков их локализации в треугольном и четырехугольном кластерах серебряных нанопроводов.

На рис. 5 представлено распределение модуля  $z$  – координаты ближнего поля, нормированного амплитудой падающей волны, серебряных проводов треугольного кластера. При сближении нанопроводов увеличивается интенсивность и степень концентрации поля в центре симметрии структуры.

На рис. 6 аналогичные результаты приведены для серебряных нанопроводов, расположенных в вершинах квадрата. Направления падения плоской волны показано на вставках. Видим, что в этом случае также при уменьшении расстояния между проводами наблюдается увеличение концентрации поля, но такие поля обладают меньшей интенсивностью.

Сравнение рис. 5 и 6 показывает, что интенсивность поля на участке сильной концентрации выше в треугольном кластере близкорасположенных проводов.

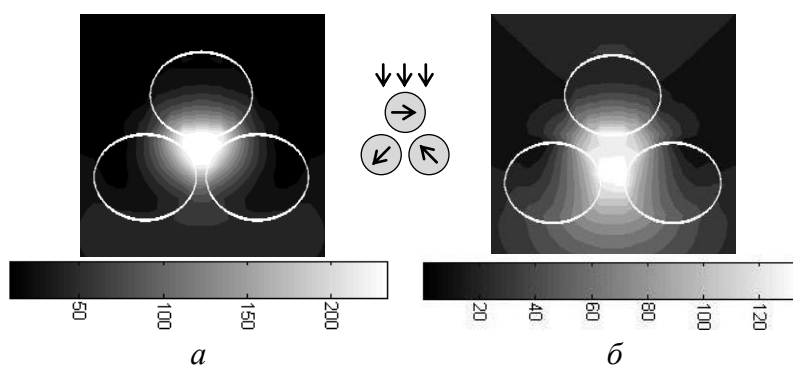


Рис. 5. Распределение модуля  $z$  – координаты магнитного поля, нормированного амплитудой падающей волны, серебряных проводов треугольного кластера для разного расстояния между ними ( $n_1 = 1$ ): (а)  $d = 5$  нм,  $\lambda = 339$  нм, (б)  $d = 12,5$  нм,  $\lambda = 365$  нм

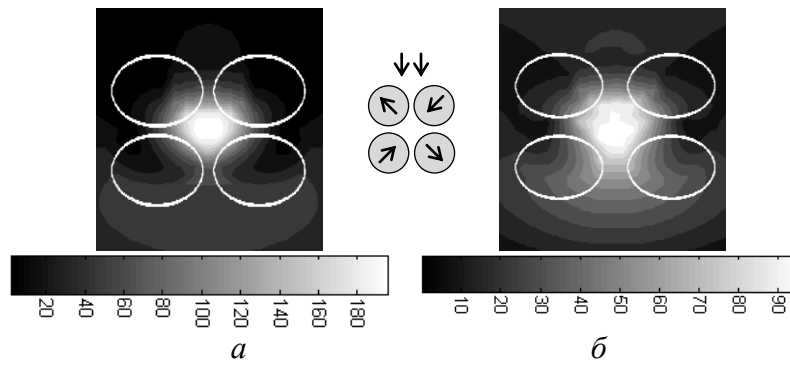


Рис. 6. Распределение модуля  $z$ -координаты магнитного поля, нормированного амплитудой падающей волны, серебряных проводов четырехугольного кластера для разного расстояния между ними ( $n_1 = 1$ ): (а)  $d = 5$  нм,  $\lambda = 338,5$  нм, (б)  $d = 12,5$  нм,  $\lambda = 364$  нм

## Выводы

Проведено исследование резонансных свойств «светлых» плазмонов нанопроводов их благородных металлов (золота, серебра) треугольного или четырехугольного кластера. Установлено, что плазмоны серебряного треугольного кластера обладают наибольшей чувствительностью к изменению свойств внешней среды по сравнению с плазмонами квадратного кластера, а также по сравнению с аналогичными конфигурациями золотых нанопроводов.

Показано, что в центре симметрии ансамблей существуют участки сильной концентрации полей, причем при уменьшении расстояния между проводами наблюдается увеличение интенсивности. Поля с наибольшей концентрацией наблюдаются в серебряном треугольном кластере.

**Список литературы:** 1. Horio, A., Sakurai, T., Lakshmi, V.S., Avasthi, D.K., Sugimoto, M., Yamaki, T. and Seki, S. Formation of nanowires via single particle-triggered linear polymerization of solid-state aromatic molecules // *Nanoscale*. – 2016. – Vol. 8. – P. 14925-14931. 2. Panciera, F., Chou, Y.-C., Reuter, M. C., Zakharov, D., Stach, E. A., Hofmann, S. and Ross, F. M. Synthesis of nanostructures in nanowires using sequential catalyst reactions // *Nature Materials*. – 2015. – Vol. 14. – P. 820–825. 3. Shi, C., Cheng, M., Qu, Z. and Bao, X. Investigation on the catalytic roles of silver species in the selective catalytic reduction of NOx with methane // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2004. – Vol. 51, No. 3. – P. 171–181. 4. Zhang, X. Y., Zhang, T. and Zhu, S. Q. Fabrication and spectroscopic investigation of branched silver nanowires and nanomeshworks // *Nanoscale Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – P. 596-604. 5. Lin, M. N., Zhu, S. Q., Zhang, X. Y., Zhang, T. and Su, D. Islandshaped gold nanoparticle film with controlable optical properties for surface enhanced Ramanscattering // *Journal of Nanomaterials*. – 2014. – Vol. 14. – P. 736165-736173. 6. Lok, C. N., Ho, C. M. and Chen, R. Proteomic analysis of the mode of antibacterial action of silver nanoparticles // *Journal of Proteome Research*. – 2006. – Vol. 5, No. 4. – P. 916–924. 7. Larsen, T. W., Petersson, K. D., Kuemmeth, F., Jespersen, T. S., Krogstrup, P., Nygard, J. and Marcus, C.M. Semiconductor-nanowire-based superconducting qubit // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – Vol. 115. – P. 127001. 8. Kang, S., Kim, T., Cho, S., Lee, Y., Choe, A., Walker, B., Ko, S.-J., Kim, J.-Y. and Ko, H. Capillary printing of highly aligned silver nanowire transparent electrodes for high-performance optoelectronic devices // *Nano Lett.* – 2015. – Vol. 15, No. 12. – P. 7933–7942. 9. Huang, G.-W., Xiao, H.-M. and Fu, S.-Y. Wearable electronics of silver-nanowire/poly(dimethylsiloxane) nanocomposite for smart clothing // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – P. 13971. 10. Lee, H.E., Kim, S., Ko, J., Yeom, H.-I., Byun, C.-W., Lee, S.H., Joe, D.J., Im, T.H., Park, S.-H. Ko and Lee, K.J. Skin-like oxide thin-film transistors for transparent displays // *Advanced Functional Materials*. – 2016. – DOI: 10.1002. – P. 20160129. 11. Xiong, X., Zou, C.-L., Ren, X.F., Liu, A.-P., Ye, Y.-X., Sun, F.-W. and Guo, G.-C. Silver nanowires for photonics applications // *Laser and Photonics Reviews*. – 2013. – Vol. 7, No. 6. – P. 901–919. 12. Song, Y.-J., Chen, J., Wu, J.-Y. and Zhang, T. Applications of silver nanowires on transparent conducting film and electrode of electrochemical capacitor // *Journal of Nanomaterials*. – 2014. – Vol. 14. – P. 193201-193208. 13. Savin, H., Repo, P., Gastrow, G., Ortega, P.,

*Calle, E., Garín, M. and Alcuilla, R.* Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10. – P. 624–628. 14. *D.M.* Electromagnetic analysis of a silver nanowire laser with a concentric active region // General Assembly and Scientific Symposium, 2014 XXXIth URSI (URSI GASS), Beijing, China. – 16-23 August 2014. – P. 1 – 4. 15. *Стогний, Н.П., Сахненко, Н.К.* Плазмоны в кластере нанопроводов треугольной или четырехугольной конфигурации // *Радиотехника*. – 2013. – Вып. 174. – С. 105–111. 16. *Johnson, P.B. and Christy, R.W.* Optical constants of noble metals // *Physical Review B*. – 1972. – Vol. 6, No. 12. – P. 4370 – 4379. 17. *Stognii, N.P. and Sakhnenko, N.K.* Plasmon resonances and their quality factors in a finite linear chain of coupled metal wires // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2013. – Vol. 19, N. 3. – P. 4602207. 18. *Градиштейн, И. С., Рыжик, И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М. : Физматгиз. – 1963. – С. 1100. 19. *Stognii, N.P. and Sakhnenko, N.K.* Accurate investigation of coupled plasmonic resonances in a chain of silver nanowires // 16<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2016), Lviv, Ukraine. – July 5-7 2016. – P. 192-195.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 05.07.2017*