

УДК 535.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА В ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С АКТИВНЫМ СЛОЕМ

А.В. Корюкин, А.А. Ахмадеев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия
Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований,
г. Казань, 420111, Россия*

Аннотация

В статье рассмотрен процесс пропускания света одномерного гибридного фотон-плазмонного кристалла с буферным слоем. В результате моделирования были получены спектры, на которых особый интерес представлял пик пропускания в области длин волн запрещенной зоны фотонного кристалла. Изменение толщины и показателя преломления буферного слоя между фотонным кристаллом и слоем золота приводит к изменению длины волны этого пика. Увеличение толщины вызывает, в свою очередь, увеличение длины волны длину волны и меняет интенсивность пика, что говорит об перераспределении энергии в гибридной фотон-плазмонной моде. Управляя этими параметрами, можно контролировать оптические свойства гибридных фотон-плазмонных кристаллов.

Ключевые слова: таммовские плазмоны, фотонные кристаллы, металл-диэлектрические структуры

Введение

С каждым годом возрастает интерес к плазмонике. Поверхностные плазмоны представляют особый интерес вследствие их потенциального применения в химии и медицине [1–3], оптических компьютерах [4] и фотонике [5]. Таммовские плазмоны (ТП) применяются в новых типах лазерах [6] и высокочувствительных сенсорах [7]. Плазмоны – коллективные колебания электронной плотности металла [8]. Поверхностные плазмоны возникают на границе металл–диэлектрик [9], где в качестве диэлектрика обычно выступает воздух. Объединение фотонных кристаллов и слоя плазмонного материала обеспечивает возможность возбуждения нового типа плазмонов – таммовских плазмонов [10]. Их существование связано с влиянием дисперсионных свойств металла и фотонного кристалла (ФК) друг на друга. В отличие от обычных поверхностных плазмонов, ТП можно возбуждать напрямую, без дополнительных приспособлений, например призм и решеток, и они могут существовать в обеих поляризациях [10, 11]. Гибридные моды находят применение и в безапертурной спектроскопии ближнего поля [12], в то время как использование обычных поверхностных мод для этих целей нуждается в оптимизации геометрии возбуждения [13]. В результате в области запрещенной зоны ФК (диапазон длин волн, на которых волна не может распространяться по кристаллу и отражается от него [14, 15]) получается экстраординарное пропускание [16]. Такие структуры в литературе стали называть гибридными фотон-плазмонными кристаллами (ГФПК) [17–24]. Как известно, длина волны таммовского плазмона связана с брегговской длиной волны и, соответственно, с отношением показателей преломления

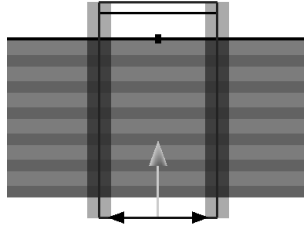


Рис. 1. Схема моделирования. Направленная вверх стрелочка показывает распространение света

ФК [10]. В пределах одной запрещенной зоны можно менять длину волны пика пропускания с помощью варьирования очередности слоев ФК или введения дополнительного, буферного слоя. Это востребовано при работе с определенными материалами или при условии, что длина волны ТП незначительно отличается от брэгговской. ГФПК с буферным слоем исследовались в работах [22, 25, 26], но преимущества внедрения дополнительного слоя не были до конца исследованы. В настоящей работе мы исследовали зависимость длины волны таммовского плазмона от толщины буферного слоя интерфейса металл – ФК. В качестве образца был выбран гибридный фотон-плазмонный кристалл на основе одномерного ФК.

1. Результаты моделирования

Для изучения зависимости длины волны ТП гибридного фотон-плазмонного кристалла были выбраны материалы с показателями преломления 1.46 и 1.95 и с толщинами слоев 145 и 110 нм соответственно. ФК состоял из шести пар слоев. Толщина слоя золота была равна 30 нм. Геометрия и оптические параметры структуры взяты из статьи [26]. Для моделирования спектров пропускания данных структур уравнения Максвелла были решены численно с помощью метода конечных разностей во временной области. Схема моделирования представлена на рис. 1.

Спектры пропускания базового одномерного ФК, а также ФК с золотым слоем с вышеуказанными параметрами изображены на рис. 2–4. На них мы видим характерную широкую запрещенную зону одномерного ФК и ее изменение при наличии золотого слоя. Интенсивность пропускания в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda > 760$ нм) значительно уменьшается вплоть до нуля, но остается пик связанный с возбуждением поверхностного плазмонного резонанса. Наблюдается также различие в спектрах в зависимости от того, какой слой ФК будет граничным с слоем золота, то есть слой золота находится на слое с показателем преломления, равным либо 1.46, либо 1.95. Увеличение показателя преломления граничного слоя фотонного кристалла ведет к смещению пика пропускания в длинноволновую область. Это можно увидеть на рис. 3 и 4.

При моделировании одномерного ГФПК с дополнительным буферным слоем толщина слоя варьировалась от 10 до 200 нм. Рассматривались два варианта буферного слоя с показателями преломления 1.46 и 1.95. Таким образом, буферный слой был продолжением граничного слоя фотонного кристалла.

Сначала рассмотрим буферный слой с показателем преломления, равным 1.46. На рис. 5 изображен спектр пропускания ГФПК с буферным слоем толщиной 50 нм и показателем преломления 1.46.

При увеличении толщины буферного слоя пик пропускания смещается в длинноволновую область, и его интенсивность сначала увеличивается, затем уменьшается

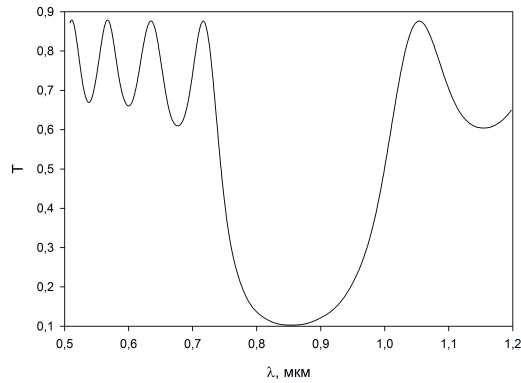


Рис. 2. Спектр пропускания ФК

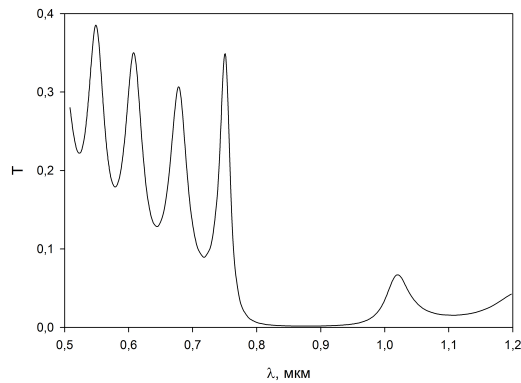


Рис. 3. Спектр пропускания ГФПК, слой золота на граничном слое ФК с показателем преломления 1.46

ется. На рис. 6 представлена зависимость длины волны пика пропускания от толщины буферного слоя, а на рис. 7 – зависимость интенсивности пика от толщины слоя.

Далее рассмотрим буферный слой с показателем преломления, равным 1.95. На рис. 8 изображен спектр пропускания ГФПК с буферным слоем толщиной 160 нм и показателем преломления 1.95.

При увеличении толщины буферного слоя пик пропускания, так же как в первом случае, смещается в длинноволновую область и интенсивность сначала увеличивается, затем уменьшается. Что характерно, с определенной толщины слоя (примерно 80 нм) происходит смещение длины волны пика в первоначальную область. Это можно увидеть в виде разрыва на рис. 9, на котором показана зависимость длины волны пика пропускания от толщины буферного слоя, а на рис. 10 – зависимость интенсивности пика от толщины слоя. Это наблюдается также у ГФПК с буферным слоем с показателем преломления, равным 1.46, при толщине примерно 250 нм.

Так как этот пик пропускания связан с плазмонным резонансом в золоте, его смещение означает возникновение возбуждения и распространение плазмон-поляритонов на границе буферного слоя с золотом. Это позволяет сделать вывод

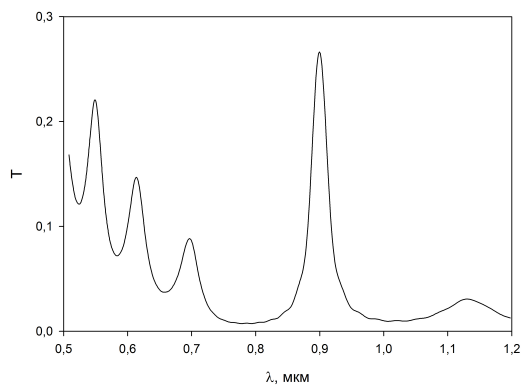


Рис. 4. Спектр пропускания ГФПК, слой золота на граничном слое ФК с показателем преломления 1.95

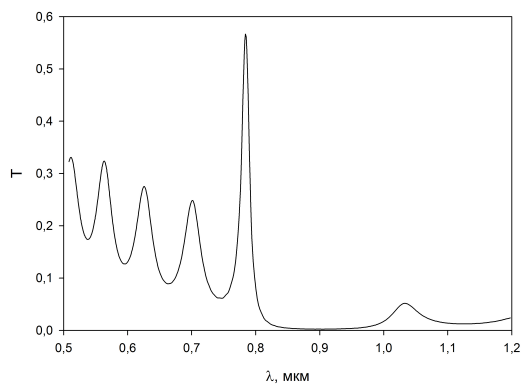


Рис. 5. Спектр пропускания ГФПК с толщиной буферного слоя 50 нм ($n = 1.46$)

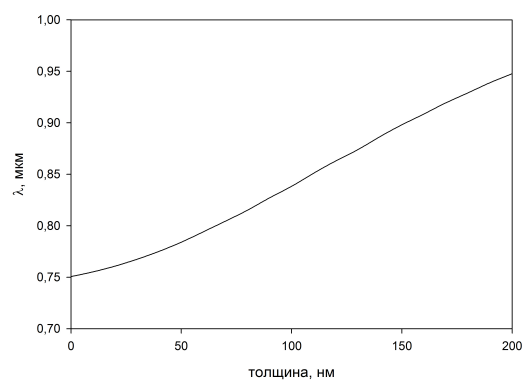


Рис. 6. Зависимость длины волны пика пропускания от толщины буферного слоя с показателем преломления 1.46

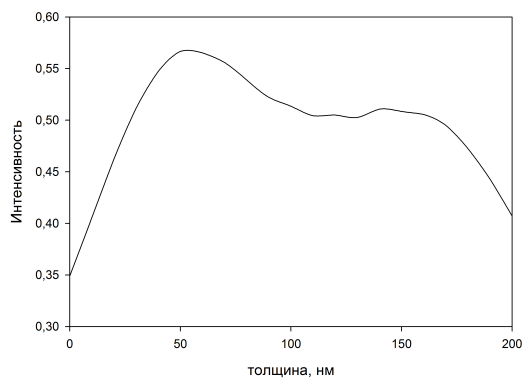


Рис. 7. Зависимость интенсивности пика пропускания от толщины буферного слоя с показателем преломления 1.46

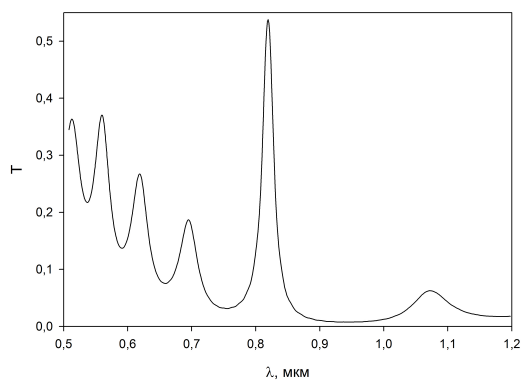


Рис. 8. Спектр пропускания ГФПК с толщиной буферного слоя 160 нм ($n = 1.95$)

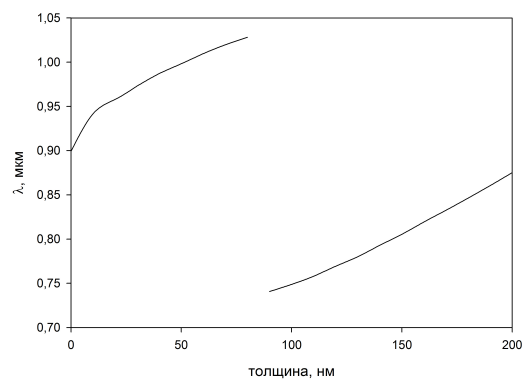


Рис. 9. Зависимость длины волны пика пропускания от толщины буферного слоя с показателем преломления 1.95

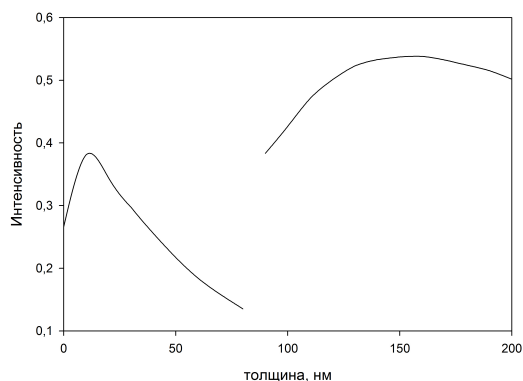


Рис. 10. Зависимость интенсивности пика пропускания от толщины буферного слоя с показателем преломления 1.95

о том, что при отсутствии буферного слоя мы имеем дело с возбуждением ТП. При добавлении буферного слоя имеет место возбуждение гибридной фотон-плазмонной моды, которая при увеличении его толщины постепенно переходит в обычную плазмонную моду. Изменяя толщину и показатель преломления буферного слоя, можно управлять распределением энергии внутри гибридной моды.

Заключение

По результатам моделирования показано, что длина волны таммовского плазмона зависит от показателя преломления первого слоя фотонного кристалла, граничащего с золотым слоем. Выявлено также, что изменение толщины и показателя преломления буферного слоя приводит к изменению длины волны таммовского плазмона. Таким образом, с помощью варьирования толщины и показателя преломления буферного слоя можно менять длину волны таммовского плазмона в пределах связанной с ним запрещенной зоны. Такое влияние дополнительного слоя можно использовать в лазерах и сенсорах на основе гибридных фотон-плазмонных кристаллов.

Литература

1. *Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T. W.* Surface plasmon subwavelength optics // *Nature*. – 2003. – V. 424. – P. 824–830. – doi: 10.1038/nature01937.
2. *Homola J., Ye S.S., Gauglitz G.* Surface plasmon resonance sensors: review // *Sens. Actuators, B*. – 1999. – V. 54, No 1–2. – P. 3–15. – doi: 10.1016/S0925-4005(98)00321-9.
3. *Kneipp K., Kneipp H., Itzkan I., Dasari R.R., Feld M.S.* Surface-enhanced Raman scattering and biophysics // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2002. – V. 14, No 18. – P. R597–R624. – doi: 10.1088/0953-8984/14/18/202.
4. *Krasavin A.V., Zayats A.V., Zheludev N.I.* Active control of surface plasmon-polariton waves // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2005. – V. 7. – P. S85–S89. – doi: 10.1088/1464-4258/7/2/011.
5. *Zayats A.V., Smolyaninov I.I.* Near-field photonics: Surface plasmon polaritons and localized surface plasmons // *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.* – 2003. – V. 5. – P. S16–S50. – doi: 10.1088/1464-4258/5/4/353.

6. *Symonds C., Lheureux G., Hugonin J.P., Greffet J.J., Laverdant J., Brucoli G., Lemaitre A., Senellart P., Bellessa J.* Confined Tamm plasmon lasers // *Nano Lett.* – 2013. – V. 13. – P. 3179–3184. – doi: 10.1021/nl401210b.
7. *Zhang W.L., Wang F., Rao Y.J., Jiang Y.* Novel sensing concept based on optical Tamm plasmon // *Optic Express.* – 2014. – V. 22. – P. 14524–14529. – doi: 10.1364/OE.22.014524.
8. *Novotny L., Hecht B.* Principles of Nano-Optics. – N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2006. – 539 p.
9. *Maier S.* Plasmonics: Fundamentals and Applications. – Springer, 2007. – 224 p.
10. *Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Kavokin A.V., Shelykh I.A.* Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror // *Phys. Rev. B.* – 2007. – V. 76, No 16. – Art. 165415, P. 1–5. – doi: 10.1103/PhysRevB.76.165415.
11. *Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Iorsh I.V., Shelykh I.A., Egorov A.Yu., Vasil'ev A.P., Mikhlin V.S., Kavokin A.V.* Tamm plasmon-polaritons : first experimental observation // *Superlattices Microstruct.* – 2010. – V. 47, No 1. – P. 44–49. – doi: 10.1016/j.spmi.2009.09.003.
12. *De Angelis F., Das G., Candeloro P., Patrini M., Galli M., Bek A., Lazzarino M., Maksymov I., Liberale C., Andreani L.C., Di Fabrizio E.* Nanoscale chemical mapping using three-dimensional adiabatic compression of surface plasmon polaritons // *Nat. Nanotechnol.* – 2010. – V. 5. – P. 67–72. – doi: 10.1038/NNANO.2009.348.
13. *Gazizov A.R., Zohrabi M., Kharintsev S.S., Salakhov M.Kh.* Improvement of near-field enhancement with a grating-assisted gold tapered nanoantenna // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – V. 714. – Art. 012010, P. 1–5. – doi: 10.1088/1742-6596/714/1/012010.
14. *Yablonovitch E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – P. 2059–2062. – doi: 10.1103/PhysRevLett.58.2059.
15. *Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. – Princeton: Princeton Univ. Press, 2008. – 286 p.
16. *Ding B., Pemble M.E., Korovin A.V., Peschel U., Romanov S.G.* Three-dimensional photonic crystals with an active surface: Gold film terminated opals // *Phys. Rev. B.* – 2010. – V. 82. – Art. 035119, P. 1–9. – doi: 10.1103/PhysRevB.82.035119.
17. *Lopez-Garcia M., Galisteo-Lopez J.F., Blanco A., Sanchez-Marcos J., Lopez C., Garcia-Martin A.* Enhancement and directionality of spontaneous emission in hybrid self-assembled photonic-plasmonic crystals // *Small.* – 2010. – V. 6, No 16. – P. 1757–1761. – doi: 10.1002/smll.201000216.
18. *Lopez-Garcia M., Galisteo-Lopez J.F., Blanco A., Lopez C., Garcia-Martin A.* High degree of optical tunability of self-assembled photonic-plasmonic crystals by filling fraction modification // *Adv. Funct. Mater.* – 2010. – V. 20. – P. 4338–4343. – doi: 10.1002/adfm.201001192.
19. *Ding B., Bardosova M., Pemble M.E., Korovin A.V., Peschel U., Romanov S.G.* Broadband omnidirectional diversion of light in hybrid plasmonic-photonic heterocrystals // *Adv. Funct. Mater.* – 2011. – V. 21. – P. 4182–4192. – doi: 10.1002/adfm.201100695.
20. *Romanov S.G., Korovin A.V., Regensburger A., Peschel U.* Hybrid colloidal plasmonic-photonic crystals // *Adv. Mater.* – 2011. – V. 23. – P. 2515–2533. – doi: 10.1002/adma.201100460.
21. *Galisteo-Lopez J.F., Lopez-Garcia M., Blanco A., Lopez C.* Studying light propagation in self-assembled hybrid photonic-plasmonic crystals by fourier microscopy // *Colloidal Nanoplasmonics.* – 2012. – V. 28. – P. 9174–9179. – doi: 10.1021/la300448y.

22. *Chen Y., Zhang D., Zhu L., Wang R., Wang P., Ming H., Badugu R., Lakowicz J.R.* Tamm plasmon- and surface plasmon-coupled emission from hybrid plasmonic-photonic structures // *Optica*. – 2014. – V. 1, No 6. – P. 407–413. – doi: 10.1364/OPTICA.1.000407.
23. *Liu T.-l., Russel K.J., Cui S., Hu E.L.* Two-dimensional hybrid photonic/plasmonic crystal cavities // *Opt. Express*. – 2014. – V. 22, No 7. – P. 8219–8225. – doi: 10.1364/OE.22.008219.
24. *Lin T., Lin J., Guo J., Kan H.* Suppression of photonic bandgap reflection by localized surface plasmons in self-assembled plasmonic-photonic crystals // *Adv. Opt. Mater.* – 2015. – V. 3. – P. 1470–1475. – doi: 10.1002/adom.201500168.
25. *Frederich H., Wen F., Laverdant J., Coolen L., Schwob C., Maitre A.* Isotropic broadband absorption by a macroscopic self-organized plasmonic crystal // *Opt. Express*. – 2011. – V. 19, No 24. – P. 24424–24433. – doi: 10.1364/OE.19.024424.
26. *Afinogenov B.I., Bessonov V.O., Nikulin A.A., Fedyanin A.A.* Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – V. 103, No 6. – Art. 061112, P. 1–4. – doi: 10.1063/1.4817999.

Поступила в редакцию
07.12.17

Корюкин Артем Валерьевич, инженер кафедры оптики и нанофотоники; научный сотрудник

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
ул. Баумана, д. 20, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: akoryukin@gmail.com

Ахмадеев Альберт Азатович, кандидат физико-математических наук, инженер кафедры оптики и нанофотоники; научный сотрудник

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
ул. Баумана, д. 20, г. Казань, 420111, Россия

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)
2018, vol. 160, no. 1, pp. 89–99

Calculation of the Transmission Peak at the Band Gap of One-Dimensional Photonic Crystal with an Active Layer

*A.V. Koryukin**, *A.A. Akhmadeev*

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

Institute for Advanced Study, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, 420111 Russia

E-mail: **akoryukin@gmail.com*

Received December 7, 2017

Abstract

Tamm plasmons (TP) attract interest due to their applications in a new type of lasers and high sensitivity sensors. Hybrid plasmonic-photonic crystals allow direct excitation of TP without prisms and gratings. These crystals consist of two components: photonic crystal (PC) and metal layer on the surface of PC. The optical transmission has been still insufficiently studied for the hybrid plasmonic-photonic crystal with a buffer layer between PC and a layer of gold. In this paper, we have considered the dependence of the wavelength of the TP on the thickness and refraction index of the buffer layer. Photonic crystal has spatial periodicity of the refraction index in one direction. The transmission spectra of 1D plasmonic-photonic crystals have been calculated by FDTD modeling. The wavelength of the transmission peak in the photonic band gap increases along with the increase of the refractive index and thickness of the first dielectric layer in the metal-PC interface. The intensity of the transmission peak in the photonic band gap increases and then decreases along with the increase with the thickness of the first dielectric layer in metal-PC interface. Therefore, we can change the distribution of energy inside the hybrid photonic-plasmonic mode. The wavelength of the TP can be changed by tuning the refractive index and the thickness of the buffer layer. These results have application potential for developing lasers and sensors.

Keywords: Tamm plasmon polaritons, photonic crystals, metal-dielectric structures

Figure Captions

- Fig. 1. Modeling scheme. The upward arrow indicates light propagation.
- Fig. 2. The transmission spectrum of the photonic crystal (PC).
- Fig. 3. The transmission spectrum of hybrid plasmonic-photonic crystal (HPPC), a layer of gold on the boundary layer of PC with the refraction value of 1.46.
- Fig. 4. The transmission spectrum of HPPC with the refraction value of 1.95.
- Fig. 5. The transmission spectrum of HPPC with the buffer layer thickness of 50 nm ($n = 1.46$).
- Fig. 6. The dependence of the transmission peak wavelength on the buffer layer thickness with the refraction value of 1.46.
- Fig. 7. The dependence of the transmission peak intensity on the buffer layer thickness with the refraction value of 1.46.
- Fig. 8. The transmission spectrum of HPPC with the buffer layer thickness of 160 nm ($n = 1.95$).

Fig. 9. The dependence of the transmission peak wavelength on the buffer layer thickness with the refraction value of 1.95.

Fig. 10. The dependence of the transmission peak intensity on the buffer layer thickness with the refraction value of 1.95.

References

1. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W. Surface plasmon subwavelength optics. *Nature*, 2003, vol. 424, pp. 824–830. doi: 10.1038/nature01937.
2. Homola J., Ye S.S., Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: Review. *Sens. Actuators, B*, 1999, vol. 54, nos. 1–2, pp. 3–15. doi: 10.1016/S0925-4005(98)00321-9.
3. Kneipp K., Kneipp H., Itzkan I., Dasari R.R., Feld M.S. Surface-enhanced Raman scattering and biophysics. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2002, vol. 14, no. 18, pp. R597–R624. doi: 10.1088/0953-8984/14/18/202.
4. Krasavin A.V., Zayats A.V., Zheludev N.I. Active control of surface plasmon-polariton waves. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, vol. 7, pp. S85–S89. doi: 10.1088/1464-4258/7/2/011.
5. Zayats A.V., Smolyaninov I.I. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons. *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 2003, vol. 5, pp. S16–S50. doi: 10.1088/1464-4258/5/4/353.
6. Symonds C., Lheureux G., Hugonin J.P., Greffet J.J., Laverdant J., Brucoli G., Lemaitre A., Senellart P., Bellessa J. Confined Tamm plasmon lasers. *Nano Lett.*, 2013, vol. 13, pp. 3179–3184. doi: 10.1021/nl401210b.
7. Zhang W.L., Wang F., Rao Y.J., Jiang Y. Novel sensing concept based on optical Tamm plasmon. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, pp. 14524–14529. doi: 10.1364/OE.22.014524.
8. Novotny L., Hecht B. *Principles of Nano-Optics*. New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 539 p.
9. Maier S. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer, 2007. 224 p.
10. Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Kavokin A.V., Shelykh I.A. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror. *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 76, no. 16, art. 165415, pp. 1–5. doi: 10.1103/PhysRevB.76.165415.
11. Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Iorsh I.V., Shelykh I.A., Egorov A.Yu., Vasil'ev A.P., Mikhlin V.S., Kavokin A.V. Tamm plasmon-polaritons: First experimental observation. *Superlattices Microstruct.*, 2010, vol. 47, no. 1, pp. 44–49. doi: 10.1016/j.spmi.2009.09.003.
12. De Angelis F., Das G., Candeloro P., Patrini M., Galli M., Bek A., Lazzarino M., Maksymov I., Liberale C., Andreani L.C., Di Fabrizio E. Nanoscale chemical mapping using three-dimensional adiabatic compression of surface plasmon polaritons. *Nat. Nanotechnol.*, 2010, vol. 5, pp. 67–72. doi: 10.1038/NNANO.2009.348.
13. Gazizov A.R., Zohrabi M., Kharintsev S.S., Salakhov M.Kh. Improvement of near-field enhancement with a grating-assisted gold tapered nanoantenna. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, vol. 714, art. 012010, pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/714/1/012010.
14. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, vol. 58, pp. 2059–2062. doi: 10.1103/PhysRevLett.58.2059.
15. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton, Princeton Univ. Press, 2008. 286 p.

16. Ding B., Pemble M.E., Korovin A.V., Peschel U., Romanov S.G. Three-dimensional photonic crystals with an active surface: Gold film terminated opals. *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 82, art. 035119, pp. 1–9. doi: 10.1103/PhysRevB.82.035119.
17. Lopez-Garcia M., Galisteo-Lopez J.F., Blanco A., Sanchez-Marcos J., Lopez C., Garcia-Martin A. Enhancement and directionality of spontaneous emission in hybrid self-assembled photonic-plasmonic crystals. *Small*, 2010, vol. 6, no. 16, pp. 1757–1761. doi: 10.1002/smll.201000216.
18. Lopez-Garcia M., Galisteo-Lopez J.F., Blanco A., Lopez C., Garcia-Martin A. High degree of optical tunability of self-assembled photonic-plasmonic crystals by filling fraction modification. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, vol. 20, pp. 4338–4343. doi: 10.1002/adfm.201001192.
19. Ding B., Bardosova M., Pemble M.E., Korovin A.V., Peschel U., Romanov S.G. Broadband omnidirectional diversion of light in hybrid plasmonic-photonic heterocrystals. *Adv. Funct. Mater.*, 2011, vol. 21, pp. 4182–4192. doi: 10.1002/adfm.201100695.
20. Romanov S.G., Korovin A.V., Regensburger A., Peschel U. Hybrid colloidal plasmonic-photonic crystals. *Adv. Mater.*, 2011, vol. 23, pp. 2515–2533. doi: 10.1002/adma.201100460.
21. Galisteo-Lopez J.F., Lopez-Garcia M., Blanco A., Lopez C. Studying light propagation in self-assembled hybrid photonic-plasmonic crystals by fourier microscopy. *Colloidal Nanoplasmonics*, 2012, vol. 28, pp. 9174–9179. doi: 10.1021/la300448y.
22. Chen Y., Zhang D., Zhu L., Wang R., Wang P., Ming H., Badugu R., Lakowicz J.R. Tamm plasmon- and surface plasmon-coupled emission from hybrid plasmonic-photonic structures. *Optica*, 2014, vol. 1, no. 6, pp. 407–413. doi: 10.1364/OPTICA.1.000407.
23. Liu T.-l., Russel K.J., Cui S., Hu E.L. Two-dimensional hybrid photonic/plasmonic crystal cavities. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 7, pp. 8219–8225. doi: 10.1364/OE.22.008219.
24. Lin T., Lin J., Guo J., Kan H. Suppression of photonic bandgap reflection by localized surface plasmons in self-assembled plasmonic-photonic crystals. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, vol. 3, pp. 1470–1475. doi: 10.1002/adom.201500168.
25. Frederich H., Wen F., Laverdant J., Coolen L., Schwob C., Maitre A. Isotropic broadband absorption by a macroscopic self-organized plasmonic crystal. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 24, pp. 24424–24433. doi: 10.1364/OE.19.024424.
26. Afinogenov B.I., Bessonov V.O., Nikulin A.A., Fedyanin A.A. Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, no. 6, art. 061112, pp. 1–4. doi: 10.1063/1.4817999.

⟨ **Для цитирования:** Корякин А.В., Ахмадеев А.А. Моделирование пропускания света в запрещенной зоне одномерного фотонного кристалла с активным слоем // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 89–99. ⟩

⟨ **For citation:** Koryukin A.V., Akhmadeev A.A. Calculation of the transmission peak at the band gap of one-dimensional photonic crystal with an active layer. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 89–99. (In Russian) ⟩