

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ,
ПОМЕЩЕННЫХ В МАГНИТНОЕ ПОЛЕ****В.С. Горелик^{1,2}, А.Ю. Пятышев²**¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Российская Федерация
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Приведены результаты теоретического анализа оптических свойств метаматериалов, помещенных в однородное магнитное поле. Получены выражения для дисперсионных кривых электромагнитных волн метаматериалов с учетом взаимодействия электромагнитного излучения с аксионными волнами, характеризующимися псевдоскалярной поляризацией. Показано, что в спектральной области, соответствующей отрицательному показателю преломления, присутствует запрещенная зона, спектральная ширина которой сравнима с энергией покоя аксионов. Вблизи краев фотон-аксионной зоны предсказано аномальное уменьшение групповой скорости электромагнитных и аксионных волн, приводящее к повышению эффективности процессов фотон-аксионной конверсии.

Ключевые слова: электромагнитные волны, метаматериал, фотон, аксион, конверсия.

**ELECTROMAGNETIC WAVES IN METAMATERIALS PLACED
IN THE MAGNETIC FIELD****V.S. Gorelik^{1,2}, A.Yu. Pyatyshev²**¹Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

In this paper the results of theoretical investigations of optical metamaterials placed in an uniform magnetic field are presented. The equations of electromagnetic dispersion curves for metamaterials have been obtained taking into account interaction between electromagnetic emission and axion waves having pseudoscalar polarization. It is shown that there is a band-gap having the spectral width compared with the axion rest energy in the spectral region corresponding to the optical negative index. Near the boundaries of photon-axion zone an abnormal decrease in group velocity of electromagnetic and axion waves improving the photon-axion conversion is predicted.

Keywords: electromagnetic waves, metamaterial, photon, axion, conversion.

Одно из важных направлений, сформировавшихся в последние годы, — исследование свойств метаматериалов и фотонных кристаллов [1–4]. Характерным свойством метаматериалов является присутствие в их спектре области отрицательного преломления [1, 2, 5]. Электромагнитные волны при попадании в метаматериал из вакуума в спектральной области отрицательного преломления характеризуются противоположными направлениями фазовой и групповой скорости. При

этом в соответствии с законом сохранения проекции квазиимпульса на поверхность раздела двух сред угол преломления в метаматериале становится отрицательным. Таким образом, открывается возможность для создания новых типов оптических элементов [6, 7], основанных на использовании отрицательного знака показателя преломления метаматериалов. Условие для существования отрицательного показателя преломления — отрицательный знак как диэлектрической, так и магнитной проницаемости ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$). При этом квадрат показателя преломления остается положительным, но тройка векторов \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} становится “левой”, в то время как в обычных диэлектрических средах и в вакууме эта тройка является “правой”.

В последнее время была развита теория, предсказывающая существование так называемых аксионных волн в вакууме [8–15]. В отличие от электромагнитных волн, характеризующихся векторной поляризацией, аксионные волны являются псевдоскалярными, т.е. их волновые функции остаются неизменными при простых поворотах и меняют знак на противоположный при несобственных поворотах (отражениях, инверсии и т.д.) пространства. Теория предсказывает, что при наличии внешнего магнитного поля могут происходить процессы конверсии (преобразования) электромагнитных волн в аксионные, и наоборот.

В настоящей работе ставилась задача установить основные закономерности дисперсии электромагнитных волн в метаматериалах при их помещении в магнитное поле с учетом процессов фотон-аксионной конверсии.

В общем случае свойства электромагнитных волн в однородной и изотропной диэлектрической среде описываются уравнениями Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\vec{E} &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}; & \operatorname{rot}\vec{H} &= \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}; \\ \operatorname{div}\vec{D} &= 0; & \operatorname{div}\vec{B} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом материальные соотношения имеют вид $\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$; $\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$. Переходя от системы уравнений (1) к волновому уравнению, получаем

$$\left(\Delta - \frac{\epsilon\mu}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \vec{E} = 0. \quad (2)$$

Здесь c_0 — скорость света в вакууме; $\epsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, которые в общем случае могут зависеть от частоты электромагнитной волны ω и волнового вектора \vec{k} [16]. Для плоской монохроматической электромагнитной волны $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$ из (2) получаем закон дисперсии $\omega(k)$ поляритонной

волны в изотропной диэлектрической среде в неявном виде

$$\omega^2 = \frac{c_0^2 k^2}{\varepsilon(\omega) \mu(\omega)}. \quad (3)$$

Для плоских монохроматических волн от системы уравнений (1) можно перейти к соотношениям [17]

$$\begin{aligned} [\vec{k} \times \vec{E}] &= \mu_0 \mu \omega \vec{H}; \\ [\vec{E} \times \vec{H}] &= \frac{\vec{E}}{\mu_0 \mu \omega}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из соотношений (4) следует, что при $\mu > 0$ тройка векторов \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} является “правой”, а при $\mu < 0$ — “левой”. Для “правых” поляритонных волн направление вектора групповой скорости волны $\vec{V}_{gr} = \partial\omega/\partial\vec{k}$, совпадающее с направлением вектора Умова–Пойтинга $\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]$, параллельно направлению вектора фазовой скорости $\vec{V}_{ph} = \frac{\omega}{k^2} \vec{k}$. Таким образом, при $\mu < 0$ (для “левых” поляритонных волн) векторы групповой и фазовых скоростей поляритонной волны являются антипараллельными. Именно это свойство и приводит к отрицательному значению показателя преломления в среде в соответствии с законом сохранения проекции квазиимпульса $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ квазичастиц (фотона и поляритона) на границе раздела двух сред согласно закону Снеллиуса – Декарта.

Соответственно, для анализа свойств метаматериала выберем отрицательное значение магнитной проницаемости: $\mu = -1$. Диэлектрическая функция может быть получена на основе использования соотношения Куросавы [18]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \frac{\omega_l^2 - \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (5)$$

где $\omega_l = 2\pi c_0 \nu_l$, $\omega_0 = 2\pi c_0 \nu_0$ — частоты продольных и поперечных мод полярной среды; $\omega = 2\pi c_0 \nu$ — круговая частота. В случае метаматериала рассмотрим простейшую ситуацию: $\varepsilon_\infty = 1$ и $\omega_0 = 0$. Тогда диэлектрическая проницаемость (5) может быть представлена в виде

$$\varepsilon(\omega) = -\frac{\omega_l^2 - \omega^2}{\omega^2}.$$

Закон дисперсии для аксионов в вакууме $\omega_a^2(k) = \omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2$. При этом энергия покоя аксионов согласно результатам экспериментального исследования и теоретического анализа [19, 20] составляет $E_0 \approx 0,1$ мэВ, что приблизительно соответствует волновому числу 1 см^{-1} . В ряде исследований [13–20] было показано, что при включении внешнего магнитного поля, вектор индукции которого перпендикулярен направлению распространения падающей электромагнитной

волны, за счет понижения симметрии рассматриваемой среды оказываются разрешенными процессы фотон-аксионной конверсии. Таким образом, при включении внешнего магнитного поля внутри полярной среды возникает резонанс, задающий дополнительный полюс $\omega_{0a} = 2\pi c_0 \nu_{0a}$ и дополнительный нуль $\omega_{1a} = 2\pi c_0 \nu_{1a}$ диэлектрической проницаемости. Значение ω_{1a} зависит от приложенного внешнего магнитного поля. В связи с необходимостью учета в этом случае пространственной дисперсии, выражение для дисперсии диэлектрической проницаемости метаматериала приобретает вид

$$\varepsilon(\omega) = -\frac{(\omega_l^2 - \omega^2)(\omega_{1a}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}{\omega^2(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получаем биквадратное уравнение для закона дисперсии $\omega(k)$:

$$\omega^4 - \omega^2(\omega_l^2 + \omega_{1a}^2) + \omega_l^2(\omega_{1a}^2 + c_0^2 k^2) - c_0^2 k^2(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2) = 0. \quad (7)$$

Решения уравнения (7) имеют вид

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{\omega_l^2 + \omega_{1a}^2}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4[\omega_l^2(\omega_{1a}^2 + c_0^2 k^2) - c_0^2 k^2(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2)]}{(\omega_l^2 + \omega_{1a}^2)^2}} \right). \quad (8)$$

Для определенности выберем следующие значения параметров, см^{-1} : $\nu_{0a} = 2$; $\nu_{1a} = 1$; $\nu_l = 5$. Для указанных значений соответствующие дисперсионные зависимости, построенные с помощью уравнения (8), представлены на рис. 1, а.

Групповую скорость, коэффициент отражения и показатель преломления можно вычислить с помощью следующих формул:

$$V_{gr} = \frac{d\omega(k)}{dk}; \quad R(\omega) = \left| \frac{\frac{c_0 k(\omega)}{\omega} - 1}{\frac{c_0 k(\omega)}{\omega} + 1} \right|^2;$$

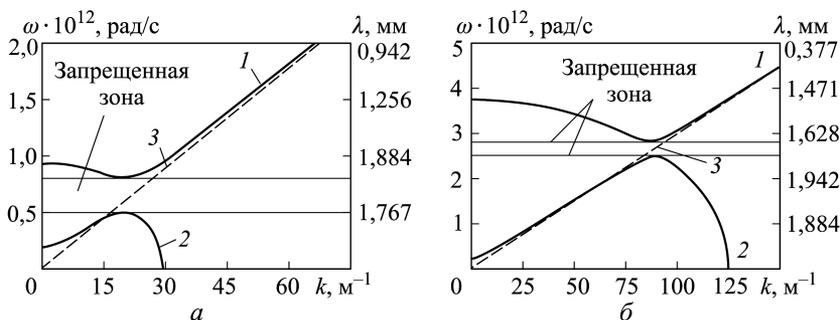


Рис. 1. Дисперсионные зависимости $\omega(k)$ для метаматериала в магнитном поле при $\nu_l = 5 \text{ см}^{-1}$ (а) и $\nu_l = 20 \text{ см}^{-1}$ (б):

1, 2 — кривые для ω_{\pm}^2 , ω_{\pm}^2 (8); 3 — закон дисперсии фотонов в вакууме

$$n(\omega) = \frac{c_0 k}{\omega(k)} \operatorname{sign} \left(\frac{d\omega(k)}{dk} \right) = \frac{c_0 k(\omega)}{\omega} \operatorname{sign} \left(\frac{dk(\omega)}{d\omega} \right).$$

Рассчитанные дисперсионные зависимости для групповой скорости, коэффициента отражения и показателя преломления метаматериала, помещенного в магнитное поле, представлены на рис. 2.

Аналогичные зависимости для значений частоты продольной моды $\nu_1 = 20 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{0a} = 2 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{1a} = 1 \text{ см}^{-1}$ представлены на рис. 1, б и рис. 3.

Следовательно, на основе развитой в настоящей работе теории можно сделать вывод о том, что при наложении внешнего магнитного поля на метаматериал в нем возникает запрещенная зона, размер которой по порядку сравним со значением энергии покоя аксиона ($\sim 0,1 \text{ мэВ}$). Вблизи края запрещенной зоны групповая скорость электромагнитной волны становится очень малой (стремится к нулю). Аномально низкая скорость распространения электромагнитных и аксионных волн вблизи края запрещенной зоны должна привести к резкому возрастанию эффективности процессов фотон-аксионной конверсии по сравнению с эффективностью аналогичных процессов в вакууме. Наблюдение таких процессов может быть осуществлено при

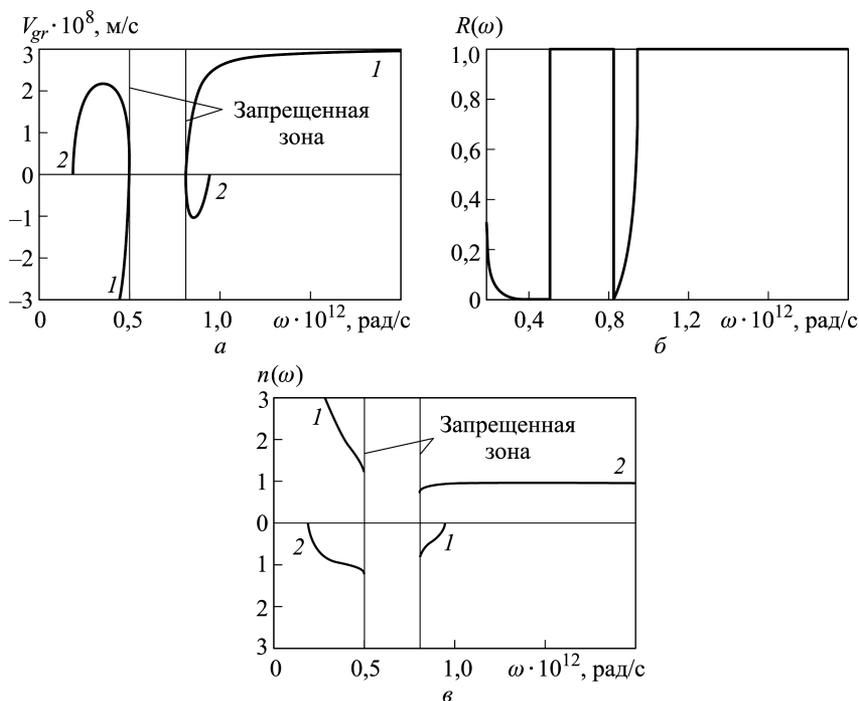


Рис. 2. Дисперсионные зависимости групповой скорости (а), коэффициента отражения (б) и показателя преломления (в) метаматериала, помещенного в магнитное поле:

1, 2 — кривые, соответствующие кривым 1 и 2, приведенным на рис. 1, а

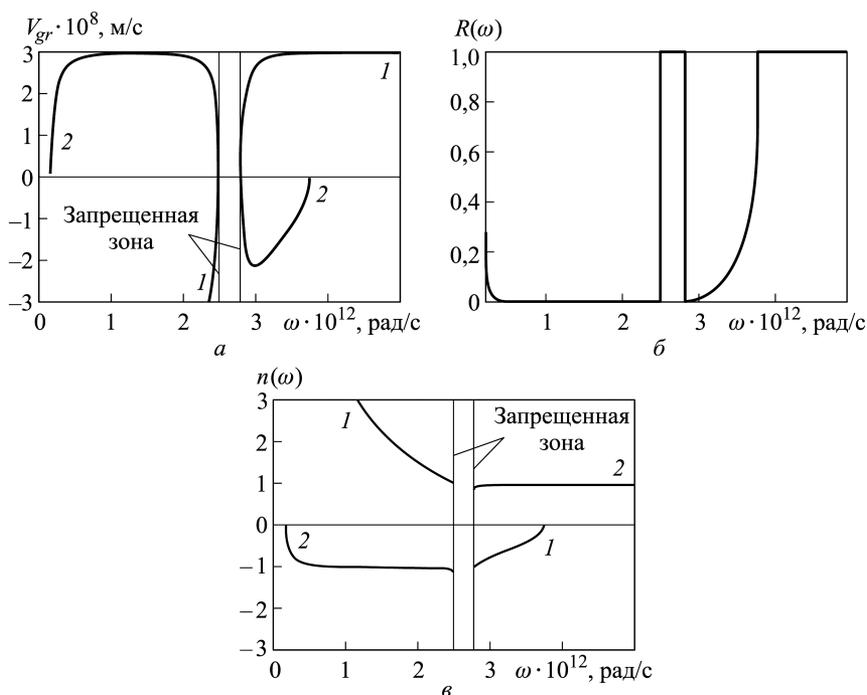


Рис. 3. Дисперсионные зависимости групповой скорости (а), коэффициента отражения (б) и показателя преломления (в) метаматериала, помещенного в магнитное поле:

1, 2 — кривые, соответствующие кривым 1 и 2, приведенным на рис. 1, б

воздействии на метаматериал, помещенный в магнитное поле, электромагнитного излучения, частота которого близка к спектральному положению края запрещенной зоны. При этом, как и в вакууме, сохраняются условия для выполнения синхронизма (законов сохранения энергии и квазиимпульса в элементарном процессе фотон-аксионной конверсии), так как показатель преломления вблизи края запрещенной зоны приближается к единице (см. рис. 1).

Отметим также, что влияние внешнего магнитного поля на вероятность процессов фотон-аксионной конверсии обусловлено понижением симметрии вакуума до точечной группы симметрии внешнего магнитного поля ($C_{\infty h}$). Поэтому, если точечная группа симметрии молекулярной структуры, из которой сформирован метаматериал, ниже группы симметрии $C_{\infty h}$ (например, C_{2h} , C_{3h} , C_{4h} и т. д.), то аналогичный эффект фотон-аксионной конверсии можно наблюдать в низкосимметричном метаматериале и без наложения внешнего магнитного поля. В частности, обсуждаемый эффект может быть реализован для метаматериала, состоящего из глицина, триглицинсульфата или триптофана [21].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00491, № 13-02-00449, № 13-02-90420, № 14-02-00190).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yablonovitch E.* Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // *Phys. Rev. Letters.* 1987. Vol. 58. Iss. 20. P. 2059–2062.
2. *John S.* Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // *Phys. Rev. Letters.* 1978. Vol. 58. Iss. 23. P. 2486–2506.
3. *Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects / V.N. Astratov, V.N. Bogomolov, A.A. Kaplyanskii, A.V. Prokofiev, L.A. Samoilovich, S.M. Samoilovich, Yu.A. Vlasov // Nuovo Cimento.* 1995. Vol. 17D. Iss. 11–12. P. 1349–1354.
4. *Photonic band gap in the visible range in a three-dimensional solid state lattice / V.N. Bogomolov, S.V. Gaponenko, A.M. Kapitonov, A.V. Prokofiev, A.N. Ponyavina, N.I. Silvanovich, S.M. Samoilovich // Applied Physics A.* 1996. Vol. 63. Iss. 6. P. 613–616.
5. *Smith D.R., Pendry J.B., Wiltshire M.C.K.* Metamaterials and Negative Refractive // *Index. Science.* 2004. Vol. 305. P. 788–792.
6. *Веселаго В.Г.* Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления // *УФН.* 2003. Т. 173. № 7. С. 790–794. DOI: 10.1070/PU2003v046n07ABEH001614
7. *Pendry J.B., Smith D.R.* REVERSING light with negative refraction // *Physics Today.* 2004. Vol. 57. No. 6. P. 37–43.
8. *Proposed experiment to produce and detect light pseudoscalars / K. van Bibber, N.R. Dagdeviren, S.E. Koonin, A.K. Kerman, H.N. Nelson // Phys. Rev. Letters,* 1987. Vol. 59. Iss. 7. P. 759–762.
9. *High resolution search for dark-matter axions / L.D. Duffy, P. Sikivie, D.B. Tanner, S.J. Asztalos, C. Hagmann, D. Kinion, L.J. Rosenberg, K. van Bibber, D.B. Yu, R.F. Bradley // Phys. Rev. D.* 2006. Vol. 74. Iss. 1. P. 012006-1–012006-11.
10. *Sikivie P., Tanner D.B., Van Bibber K.* Resonantly Enhanced Axion-Photon Regeneration // *Phys. Rev. Letters.* 2007. Vol. 98. Iss. 17. P. 172002–172006.
11. *Experimental Limit on Optical-Photon Coupling to Light Neutral Scalar Bosons / A. Afanasev, O.K. Baker, K.B. Beard, G. Biallas, J. Boyce, M. Minarni, R. Ramdon, M. Shinn, P. Slocum // Phys. Rev. Letters.* 2008. Vol. 101. Iss. 12. P. 120401-1–120401-10.
12. *Okun' L.B.* Limits on electrodynamics: paraphotons? // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 1982. Vol. 56. No. 3. P. 502–505.
13. *Hoffmann S.* Paraphotons and axions: Similarities in stellar emission and detection // *Phys. Letters B.* 1987. Vol. 193. Iss. 1. P. 117–122.
14. *Limits on Light Scalar and Pseudoscalar Particles from a Photon Regeneration Experiment / G. Ruoso, R. Cameron, G. Cantatore, A. Melissinos, Y. Semertzidis, H. Halama, D. Lazarus, A. Prodell, F. Nezirick, C. Rizzo, E. Zavattini // Zeitschrift für Physik C: Particles and Fields.* 1991. Vol. 56. P. 505–508.
15. *Search for nearly massless, weakly coupled particles by optical techniques / R. Cameron, G. Cantatore, A.C. Melissinos, G. Ruoso, Y. Semertzidis, H.J. Halama, D.M. Lazarus, A.G. Prodell, F. Nezirick, C. Rizzo, E. Zavattini // Phys. Rev. D.* 1993. Vol. 47. Iss. 9. P. 3707–3725.
16. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
17. *Сивухин Д.В.* Об энергии электромагнитного поля в диспергирующих средах // *Оптика и спектроскопия.* 1957. Т. 3. Вып. 4. С. 308–312.
18. *Agranovich V.M., Ginzburg V.L.* Theory of Raman scattering of light with formation of polaritons (real excitons) // *Soviet Physics JETP.* 1972. Vol. 34. No. 3. P. 662–667.
19. *Hoffmann C., Lefloch F., Sanquer M.* Mesoscopic transition in the shot noise of diffusive superconductor–normal-metal–superconductor junctions // *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 70. Iss. 18. P. 180503(R)–180503-4.

20. Beck C. Possible Resonance Effect of Axionic Dark Matter in Josephson Junctions // *Phys. Rev. Letters*. 2013. Vol. 111. Iss. 23. P. 231801-1–231801-5.
21. Горелик В.С., Пятышев А.Ю. Дисперсионные зависимости для поляритон-аксионных волн в кристаллах триптофана // *Краткие сообщения по физике*. 2014. № 11. С. 18–27. DOI: 10.3103/S1068335614110037

REFERENCES

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Letters*, 1987, vol. 58, iss. 20, pp. 2059–2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Letters*, 1978, vol. 58, iss. 23, pp. 2486–2506.
- [3] Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskii A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects. *Nuovo Cimento*, 1995, vol. 17D, iss. 11–12, pp. 1349–1354.
- [4] Bogomolov V.N., Gaponenko S.V., Kapitonov A.M., Prokofiev A.V., Ponyavina A.N., Silvanovich N.I., Samoilovich S.M. Photonic band gap in the visible range in a three-dimensional solid state lattice. *Applied Physics A*, 1996, vol. 63, iss. 6, pp. 613–616.
- [5] Smith D.R., Pendry J.B., Wiltshire M.C.K. Metamaterials and Negative Refractive. *Index. Science*, 2004, vol. 305, pp. 788–792.
- [6] Veselago V.G. Electrodynamics of materials with negative index of refraction *Phys. Usp.*, 2003, vol. 46, no. 7, pp. 764–768.
DOI: 10.1070/PU2003v046n07ABEH001614
- [7] Pendry J.B., Smith D.R. Reversing light with negative refraction. *Physics Today*, 2004, vol. 57, no. 6, pp. 37–43.
- [8] Van Bibber K., Dagdeviren N.R., Koonin S.E., Kerman A.K., Nelson H.N. Proposed experiment to produce and detect light pseudoscalars. *Phys. Rev. Letters*, 1987, vol. 59, iss. 7, p. 759–762.
- [9] Duffy L.D., Sikivie P., Tanner D.B., Asztalos S.J., Hagmann C., Kinion D., Rosenberg L.J., Van Bibber K., Yu D.B., Bradley R.F. High resolution search for dark-matter axions. *Phys. Rev. D.*, 2006, vol. 74, iss. 1, pp. 012006-1–012006-11.
- [10] Sikivie P., Tanner D.B., Van Bibber K. Resonantly Enhanced Axion-Photon Regeneration. *Phys. Rev. Letters*, 2007, vol. 98, iss. 17, pp. 172002–172006.
- [11] Afanasev A., Baker O.K., Beard K.B., Biallas G., Boyce J., Minarni M., Ramdon R., Shinn M., Slocum P. Experimental Limit on Optical-Photon Coupling to Light Neutral Scalar Bosons. *Phys. Rev. Letters*, 2008, vol. 101, iss. 12, pp. 120401-1–120401-10.
- [12] Okun' L.B. Limits on electrodynamics: paraphotons? *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1982, vol. 56, no. 3, pp. 502–505.
- [13] Hoffmann S. Paraphotons and axions: Similarities in stellar emission and detection. *Phys. Letters B.*, 1987, vol. 193, iss. 1, pp. 117–122.
- [14] Ruoso G., Cameron R., Cantatore G., Melissinos A., Semertzidis Y., Halama H., Lazarus D., Prodell A., Nezrick F., Rizzo C., Zavattini E. Limits on Light Scalar and Pseudoscalar Particles from a Photon Regeneration Experiment. *Zeitschrift für Physik C: Particles and Fields*, 1991, vol. 56, pp. 505–508.
- [15] Cameron R., Cantatore G., Melissinos A.C., Ruoso G., Semertzidis Y., Halama H.J., Lazarus D.M., Prodell A.G., Nezrick F., Rizzo C., Zavattini E. Search for nearly massless. Weakly coupled particles by optical techniques. *Phys. Rev. D.*, 1993, vol. 47, iss. 9, pp. 3707–3725.
- [16] Agranovich V.M., Ginzburg V.L. Crystal optics with spatial dispersion and excitons. Berlin, Springer-Verlag, 1984.

- [17] Sivukhin D.V. The energy of electromagnetic waves in dispersive media. *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 1957, vol. 3, iss. 4, pp. 308–312 (in Russ.).
- [18] Agranovich V.M., Ginzburg V.L. Theory of Raman scattering of light with formation of polaritons (real excitons). *Soviet Physics Jetp*, 1972, vol. 34, no. 3, pp. 662–667.
- [19] Hoffmann C., Lefloch F., Sanquer M. Mesoscopic transition in the shot noise of diffusive superconductor–normal-metal–superconductor junctions. *Phys. Rev. B.*, 2004, vol. 70, iss. 18, pp. 180503(R)–180503-4.
- [20] Beck C. Possible Resonance Effect of Axionic Dark Matter in Josephson Junctions. *Phys. Rev. Letters*, 2013, vol. 111, iss. 23, pp. 231801-1–231801-5.
- [21] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Yu. Dispersion dependences for polariton-axion waves in tryptophan crystals. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2014, vol. 41, iss. 11, pp. 18–27, pp. 316–322. DOI: 10.3103/S1068335614110037

Статья поступила в редакцию 23.01.2015

Горелик Владимир Семенович — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией “Комбинационное рассеяние света” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gorelik V.S. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Raman Scattering laboratory, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Professor of Physics department, Bauman Moscow State Technical University.

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskiy prospect 53, Moscow, 119991 Russian Federation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Пятьшев Александр Юрьевич — аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Pyatyshev A.Yu. — post-graduate student of Physics department, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Горелик В.С., Пятьшев А.Ю. Электромагнитные волны в метаматериалах, помещенных в магнитное поле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 1. С. 36–44.

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-36-44

Please cite this article in English as:

Gorelik V.S., Pyatyshev A.Yu. Electromagnetic waves in metamaterials placed in the magnetic field. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 1, pp. 36–44.

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-36-44