

УДК 535.338.32

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В КАПИЛЛЯРНЫХ СВЕТОВОДАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**В.С. Горелик<sup>1,2</sup>, М.Г. Бурданова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация  
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: burdanova\_maria@mail.ru

*Рассмотрен новый тип световодов, представляющих собой капилляры с большой апертурой и управляемыми параметрами. Проведен теоретический анализ дисперсионных кривых электромагнитного излучения в капиллярных световодах, содержащих редкоземельные элементы (эрбий, иттербий и тулий). Для описания поляритонных кривых в однородных средах, легированных ионами редкоземельных элементов, была использована модель Лоренца. Рассчитаны дисперсионные зависимости для поляритонных и аксион-поляритонных волн в инфракрасном диапазоне на основе взаимодействия электромагнитных волн с резонансными электронными состояниями ионов эрбия, иттербия, тулия при наличии магнитного поля и его отсутствии.*

**Ключевые слова:** вторичное излучение, эрбий, иттербий, тулий, спектр фотолюминесценции, люминесценция, поляритоны, аксионы, резонанс, капилляр, световод, лазер.

## ELECTROMAGNETIC WAVES IN CAPILLARY FIBERS IN A MAGNETIC FIELD

**V.S. Gorelik<sup>1,2</sup>, M.G. Burdanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation  
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: burdanova\_maria@mail.ru

*The paper considers a new type of optic fiber cores representing capillaries with large aperture and controlled parameters. The authors carry out a theoretical analysis of the dispersion curves of electromagnetic radiation in capillary fibers doped with rare-earth ions (erbium, ytterbium, and thulium). The Lorentz model is used for describing polariton curves in homogeneous mediums doped with rare-earth ions. The dispersion dependences of polariton and axion-polariton waves in the infrared band are determined. It is done on the basis of interaction between electromagnetic waves and resonance electronic ion states of erbium, ytterbium, and thulium, both in the presence and absence of a magnetic field.*

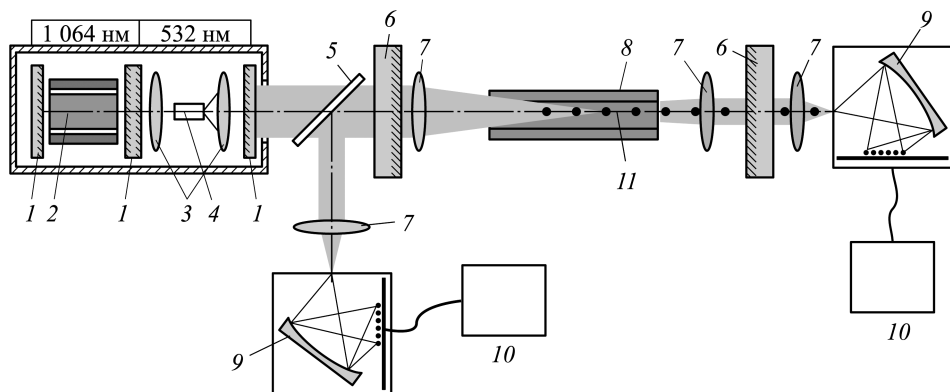
**Keywords:** secondary radiation, erbium, ytterbium, thulium, photoluminescence spectrum, dispersion relations, polaritons, axion, resonance, capillary, optic fiber core, laser.

**Введение.** В материальной среде в результате взаимодействия электромагнитной волны с осцилляциями заряженных частиц возникает волна, которая называется поляритонной. Квазичастицы, соответствующие поляритонным волнам, получили название поляритонов [1].

Однако в нескольких теоретических работах (например, [2, 3]) было предсказано, что в вакууме наряду с электромагнитными волнами присутствуют так называемые аксионные волны. Первая часть исследований касалась поляритонных волн, возникающих в капиллярных световодах при отсутствии магнитного поля [4]. В настоящей работе проведен теоретический анализ дисперсии аксион-поляритонных волн, возникающих в однородных средах в капиллярных световодах в магнитном поле. Рассчитаны условия для формирования поляритонов и их взаимодействия с аксионами. Представлена конструкция устройства для наблюдения вторичного излучения и лазерной генерации на основе капиллярных световодов. Проанализирована возможность создания капиллярных световодов, заполненных жидкостями и растворами солей редкоземельных элементов, помещенных во внешнее магнитное поле.

**Методика эксперимента.** Принципиальная схема экспериментальной установки для получения лазерной генерации или регистрации спектров вторичного излучения с использованием капиллярного световода, имеющего круглое сечение, приведена на рис. 1. Принцип действия капиллярного световода основан на эффекте полного внутреннего отражения. Для обеспечения этого световод должен быть изготовлен из металла.

В рассматриваемой установке первичное излучение, подаваемое от источника, фокусируется в активную среду 2, помещаемую в капиллярный световод 8. В результате прохождения излучения через резонатор, образованный зеркалами 6, возникает лазерная генерация. Вторичное излучение регистрируется миниспектрометрами 9 и анализируется компьютерами 10.



**Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для получения лазерной генерации с капиллярным световодом круглого сечения:**

1 — зеркала лазера; 2 — активная среда; 3 — линзы; 4 — нелинейно-оптический кристалл; 5 — дихроичное зеркало; 6 — зеркала второго резонатора; 7 — линзы; 8 — капиллярный световод; 9 — миниспектрометры; 10 — компьютеры; 11 — среда, в которой возникает вторичное излучение

Для экспериментального анализа дисперсии аксион-поляритонных волн к указанной установке необходимо подвести внешнее магнитное поле, влияющее на оптические свойства материальной среды, в которой распространяется электромагнитное излучение. Кроме того, для исследования аксион-поляритонных волн могут быть использованы световоды, изготовленные из магнитных материалов.

**Теоретическая часть.** В диэлектрических средах закон дисперсии  $\omega(k)$  в неявном виде задается соотношением [5]:

$$\omega^2 = \frac{c_0^2 k^2}{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}; \quad \mu(\omega) = 1. \quad (1)$$

Рассмотрим дисперсию электромагнитных волн для изотропной диэлектрической среды, в которой присутствует лишь один тип полярных колебаний с частотой  $\omega_0$ . В области частоты, далекой от резонансной частоты  $\omega_0$ , показатель преломления полагается равным  $n_\infty$ . Проанализируем свойства немагнитных сред, для которых  $\mu = 1$ . В этом случае диэлектрическая функция имеет вид

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

Значения частоты поперечных колебаний для гидрата нитрата натрия определено в работе [4]. При этом отношение частот продольных и поперечных мод имеет один порядок. Для частоты продольной моды имеет место соотношение  $\omega_{LO} \approx 1,1\omega_{TO}$  [6].

Электромагнитные волны, соответствующие унитарным поляритонам, характеризуются показателем преломления, равным по абсолютной величине единице [6]. При этом выполняется соотношение

$$n^2 = \varepsilon\mu = \frac{c_0^2 k^2}{\omega^2} = 1. \quad (3)$$

При включении внешнего постоянного магнитного поля закон дисперсии аксионных волн имеет вид [5]

$$\begin{aligned} \omega_{0a}^2(k) &= \omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2; \\ \omega_{la}^2(k) &= \omega_{la}^2 + c_0^2 k^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega_{0a} \approx 1 \text{ см}^{-1}$  [7];  $\omega_{la} = 2 \text{ см}^{-1}$ .

Учитывая вклад аксионных волн в диэлектрическую функцию, получаем

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \frac{(\omega_l^2 - \omega^2)(\omega_{la}^2(k) - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)(\omega_{0a}^2(k) - \omega^2)}; \quad \varepsilon_\infty = n_\infty^2. \quad (5)$$

После подстановки (4) в (5) запишем соотношение, задающее вид диэлектрической функции с учетом аксион-поляритонных волн в ди-

электрической среде

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \frac{(\omega_l^2 - \omega^2)(\omega_{la}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}. \quad (6)$$

Таким образом, закон дисперсии для аксион-поляритонных волн приобретает вид

$$\omega^2 = \frac{c_0^2 k^2}{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)} = \frac{c_0^2 k^2 (\omega_0^2 - \omega^2)(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}{\varepsilon_\infty (\omega_l^2 - \omega^2)(\omega_{la}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}. \quad (7)$$

После преобразования (7) получаем соотношение

$$k^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon_\infty (\omega_l^2 - \omega^2)(\omega_{la}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}{c_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2)(\omega_{0a}^2 + c_0^2 k^2 - \omega^2)}, \quad (8)$$

а затем — соотношение

$$k^4 + \left( \omega_{la}^2 - \omega^2 - \varepsilon_\infty \omega^2 \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_l^2 - \omega^2)} \right) \frac{k^2}{c_0^2} + \left( \frac{\varepsilon_\infty \omega^4 (\omega_0^2 - \omega^2)}{c_0^4 (\omega_l^2 - \omega^2)} - \frac{\varepsilon_\infty \omega^2 \omega_{0a}^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{c_0^4 (\omega_l^2 - \omega^2)} \right) = 0. \quad (9)$$

Для упрощения введем обозначения

$$p = \frac{\omega_{la}^2}{c_0^2} - \frac{\omega^2}{c_0^2} - \frac{\varepsilon_\infty \omega^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{c_0^2 (\omega_l^2 - \omega^2)}, \quad (10)$$

$$q = \frac{\varepsilon_\infty \omega^4 (\omega_0^2 - \omega^2)}{c_0^4 (\omega_l^2 - \omega^2)} - \frac{\varepsilon_\infty \omega^2 \omega_{0a}^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{c_0^4 (\omega_l^2 - \omega^2)}.$$

Тогда от уравнения (8) с учетом (9) приходим к биквадратному уравнению

$$k^4 + pk^2 + q = 0. \quad (11)$$

Точное решение уравнения (11) задает две ветви:

$$k_{\pm}(\omega) = \sqrt{-\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}}. \quad (12)$$

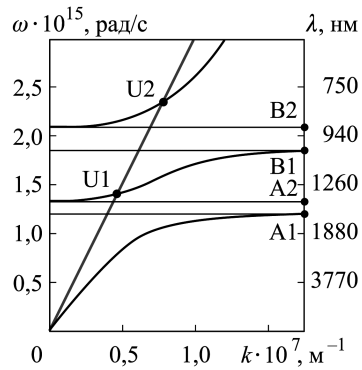
Групповая скорость поляритонов и аксион-поляритонов определяется по соотношению

$$V(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \left( \frac{dk}{d\omega} \right)^{-1}. \quad (13)$$

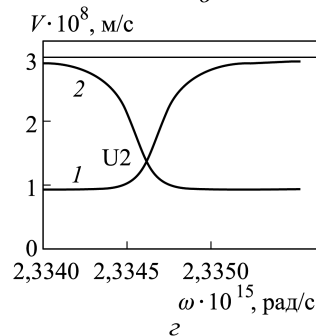
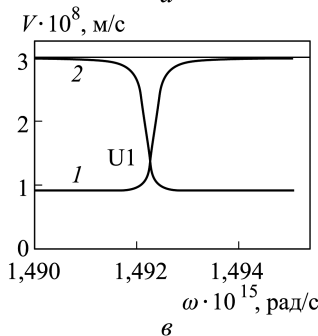
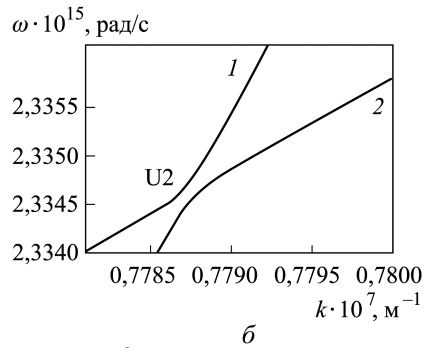
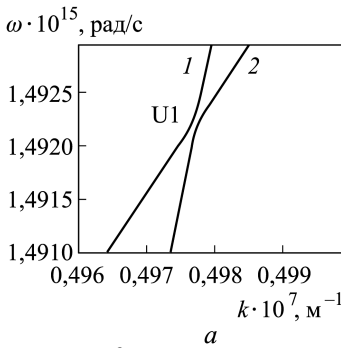
**Закон дисперсии электромагнитных волн в капиллярном световоде при наличии магнитного поля.** Рассмотрим дисперсию поляритонных и аксион-поляритонных волн в капиллярном световоде, заполненном жидкостями и растворами солей редкоземельных элементов (эрбия, тулия и иттербия).

Напомним, что константа  $\varepsilon_\infty = n^2$  в (8) характеризует показатель преломления на частотах, далеких от резонансной частоты. Для дистиллированной воды показатель преломления  $n_b = 1,33$ .

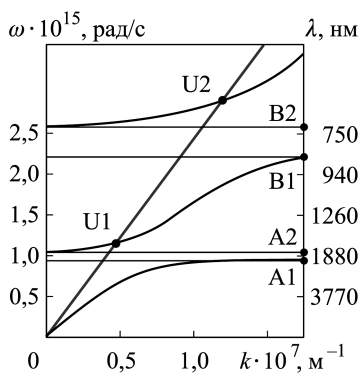
Фотолюминесценция гидрата нитрата эрбия в инфракрасной области при комнатной температуре наблюдалась на двух резонансных частотах [4, 8]. Закон дисперсии поляритонных волн в ближней инфракрасной области спектра с учетом двух полярных колебаний в гидрате нитрата эрбия, рассчитанный по (1) и (2), приведен на рис. 2. Именно эта область спектра является основным рабочим диапазоном для лазеров, создаваемых на основе ионов эрбия. Законы дисперсии аксион-поляритонных волн для гидрата нитрата эрбия, полученные на основе соотношения (11), показаны на рис. 3, а, б; зависимости  $V(\omega)$  аксион-поляритонов для гидрата нитрата эрбия, построенные по формуле (13), — на рис. 3, в, г.



**Рис. 2. Закон дисперсии для поляритонных волн в ближней инфракрасной области в гидрате нитрата эрбия:** длины волн, нм: A1 — 1548; A2 — 1407; B1 — 988; B2 — 897; U1 — 1327; U2 — 792



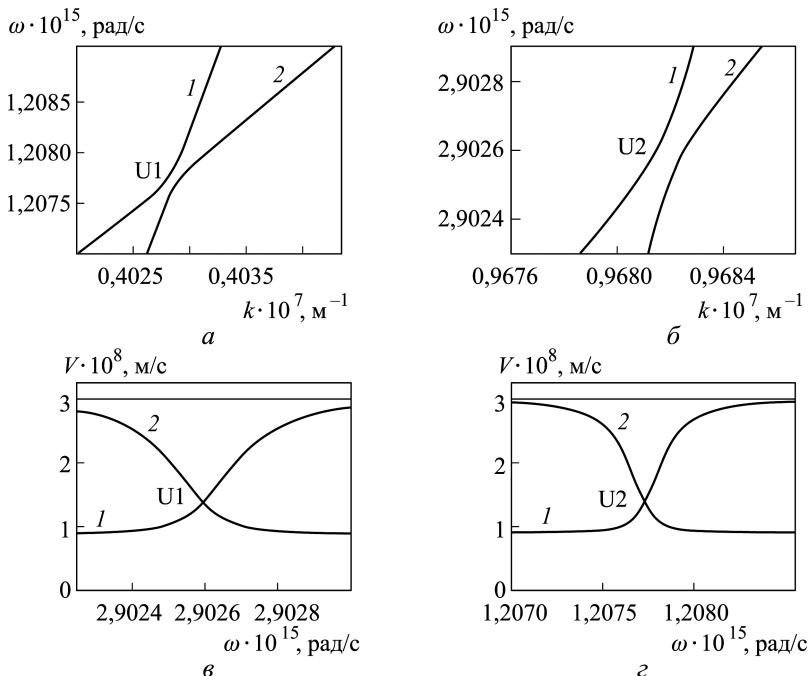
**Рис. 3. Законы дисперсии аксион-поляритонных волн в гидрате нитрата эрбия в инфракрасной области спектра (а, б) и зависимости  $V(\omega)$  (в, г), построенные по формуле (13), для поляритонной (1) и аксионной (2) волн**



**Рис. 4.** Закон дисперсии поляритонных волн в ближней инфракрасной области спектра в гидрате нитрата тулия:

длины волн, нм: A1 — 1900; A2 — 1729; B1 — 791; B2 — 719; U1 — 1653; U2 — 678

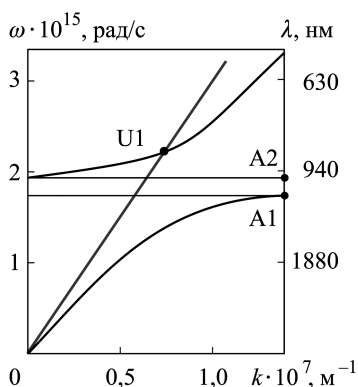
Фотолюминесценция нитрата гидрата иттербия в инфракрасной области спектра при комнатной температуре реализуется на одной резонансной частоте [10]. Закон дисперсии поляритонных волн в ближней инфракрасной области спектра с учетом одного полярного колебания ионов иттербия, рассчитанный по (1) и (2), приведен на



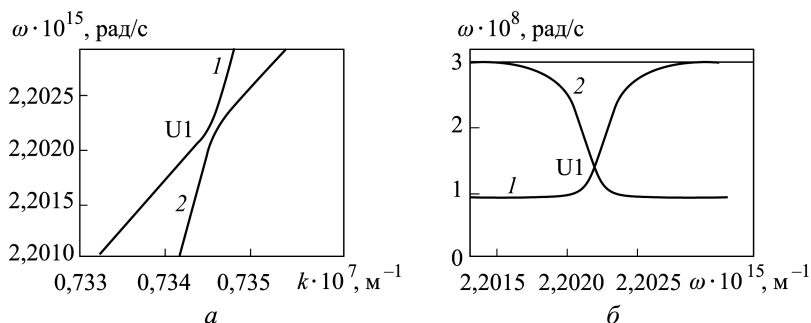
**Рис. 5.** Законы дисперсии аксион-поляритонных волн в гидрате нитрата эрбия в инфракрасной области спектра (а, б) и зависимости  $V(\omega)$  (в, г), построенные по формуле (13), для поляритонной (1) и аксионной (2) волн

рис. 6. Закон дисперсии аксион-поляритонных волн для гидрата нитрата иттербия, полученный на основе соотношения (8), показан на рис. 7, а; зависимость  $V(\omega)$  аксион-поляритонов для гидрата нитрата иттербия, построенная по формуле (13), — на рис. 7, б.

**Заключение.** В результате проведенного анализа построены поляритонные и аксион-поляритонные кривые для водных растворов солей редкоземельных элементов. Установлено, что наблюдаются разрывы в спектральной области, соответствующей аксион-поляритонным волнам. Рассчитаны значения частот унитарных поляритонов. Найдено условие синхронизма, обеспечивающее эффективный процесс фотон-аксионной конверсии в магнитном поле. Определены значения групповых скоростей аксион-поляритонных волн. Выявлено значительное снижение их скорости. В точках, соответствующих унитарным поляритонам, скорость аксион-поляритонных волн уменьшается до 0,4 от скорости света. Таким образом, спектральная плотность световой энергии внутри капиллярного световода, заполненного водными растворами редкоземельных элементов, должна возрастать по сравнению со скоростью раствора в стандартном световоде.



**Рис. 6.** Закон дисперсии поляритонных волн в ближней инфракрасной области спектра в гидрате нитрата тулия: длины волн, нм: A1 — 1040; A2 — 947; U1 — 880



**Рис. 7.** Закон дисперсии аксион-поляритонных волн в гидрате нитрата эрбия в инфракрасной области спектра (а) и зависимость  $V(\omega)$  (б), построенная по формуле (13), для поляритонной (1) и аксионной (2) волн

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Henry C.H., Hopfield J.J. Raman Scattering by Polaritons // *Phys. Rev. Lett.* 1965. Vol. 15 (25). P. 964–966.
2. Beck C. Possible Resonance Effect of Axionic Dark Matter in Josephson Junctions // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. P. 231–235.
3. Murayama H. Axions and other very light bosons. Part 1 // *European Physical Journal.* 2000. Vol. 15 (1). P. 298–312.
4. Gorelik V.S., Burdanova M.G. Photoluminescence and polariton dispersion in erbium nitrate hydrate // *Laser Phys.* 2014.
5. Литвинов О.С., Горелик В.С. Электромагнитные волны и оптика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 448 с.
6. Горелик В.С., Филатов В.В. Унитарные поляритоны в однородных средах и фотонных кристаллах // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2013. Вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/907.html> (дата обращения: 10.11.2014).
7. Hoffmann C., Lefloch F., Sanquer M. Mesoscopic transition in the shot noise of diffusive S/N/S junctions // *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 70. P. 107–110.
8. Горелик В.С., Бурданова М.Г. Поляритонные кривые в аморфном кварце, легированном ионами эрбия  $\text{Er}^{3+}$  // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2014. № 2. С. 90–100.
9. Meltah A., Wyart J.-F., Champion N. Observation and interpretation of the  $\text{Tm}^{3+}$  free ion spectrum // *Eur. Phys. J. D.* 2007. Vol. 44. P. 35–45.
10. Dieke G.H. Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystal. Int. Pub. N.Y.: John Wiley & Sons, 1968.

## REFERENCES

- [1] Henry C.H., Hopfield J.J. Raman Scattering by Polaritons. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, vol. 15 (25), pp. 964–966.
- [2] Beck C. Possible Resonance Effect of Axionic Dark Matter in Josephson Junctions. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 111, pp. 231–235.
- [3] Murayama H. Axions and other Very Light Bosons. Part 1. *European Physical Journal.*, 2000, vol. 15 (1), pp. 298–312.
- [4] Gorelik V.S., Burdanova M.G. Photoluminescence and Polariton Dispersion in Erbium Nitrate Hydrate. *Laser Phys.*, 2014.
- [5] Litvinov O.S., Gorelik V.S. Elektromagnitnye volny i optika [Electromagnetic Waves and Optics]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2006. 448 p.
- [6] Gorelik V.S., Filatov V.V. Unitary Polaritons in Homogeneous Media and Photonic Crystals. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. “Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii”* [El. Sc.-Techn. Publ. “Eng. J.: Science and Innovation”], 2013, vol. 8. URL: <http://engjournal.ru/articles/907/eng/907.pdf> (accessed 10.11.2014).
- [7] Hoffmann C., Lefloch F., Sanquer M. Mesoscopic Transition in the Shot Noise of Diffusive S/N/S Junctions. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 70, pp. 107–110.
- [8] Gorelik V.S., Burdanova M.G. Polariton Curves in Amorphous Quartz Doped with Ions of Erbium  $\text{Er}^{3+}$ . *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2014, no. 2, pp. 90–100 (in Russ.).
- [9] Meltah A., Wyart J.-F., Champion N. Observation and Interpretation of the  $\text{Tm}^{3+}$  Free Ion Spectrum. *Eur. Phys. J. D.*, 2007, vol. 44, pp. 35–45.



[10] Dicke G.H. Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystal. Int. Pub. N.Y., John Wiley & Sons, 1968.

Статья поступила в редакцию 16.02.2015

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

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. — D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Laboratory for Raman Scattering, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

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.

Бурданова Мария Геннадьевна — студентка кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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

Burdanova M.G. — student, 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., Бурданова М.Г. Электромагнитные волны в капиллярных световодах в магнитном поле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 5. С. 3–11.

**Please cite this article in English as:**

Gorelik V.S., Burdanova M.G. Electromagnetic waves in capillary fibers in a magnetic field. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2015, no. 5, pp. 3–11.