

Унитарные поляритоны в однородных средах и фотонных кристаллах

© В.С. Горелик, В.В. Филатов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены свойства унитарных поляритонов – квазичастиц электромагнитных волн, распространяющихся в материальных средах и удовлетворяющих условию $n = \pm 1$. Определены параметры унитарных поляритонов в различных кристаллах: NaCl, ZnSe, рубине, а также в глобулярном фотонном кристалле на основе искусственного опала. Установлено существование бозе-эйнштейновского конденсата унитарных поляритонов при комнатной температуре. Предложен процесс конверсии двух унитарных поляритонов в скалярный бозон.

Ключевые слова: унитарный поляритон, закон дисперсии, диэлектрическая проницаемость, электромагнитная волна.

Введение. Свойства электромагнитных полей, распространяющихся в материальных средах, отличаются от свойств этих полей в вакууме: взаимодействие фотонов с элементарными возбуждениями среды приводит к формированию новых квазичастиц – поляритонов – квантов нормальных электромагнитных волн, распространяющихся в среде в области резонансов [1]. Целью данной работы является исследование так называемых унитарных поляритонов. Электромагнитные волны, соответствующие унитарным поляритонам, характеризуются показателем преломления n , абсолютная величина которого равна единице. Согласно формулам Френеля [2], в этом случае вещество становится полностью прозрачным для электромагнитных волн. При этом справедливо соотношение

$$n^2 = \varepsilon\mu = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1, \quad n = \pm 1, \quad (1)$$

где ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости рассматриваемого материала; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; k – соответствующее волновое число; ω – циклическая частота электромагнитной волны.

В немагнитных материалах в общем случае $\mu = \pm 1$. Знак плюс соответствует «правым» волнам (с правой тройкой векторов $\{\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}\}$), знак минус – «левым» волнам (с левой тройкой этих векторов) [3]. Как было показано в работах [4–6], «левые» волны связаны с отрицательной групповой скоростью, что в свою очередь обусловлено отрицательным показателем преломления среды [7–9].

В соответствии с классической моделью заряженных осцилляторов в материальной среде [10] дисперсия диэлектрической проницаемости имеет следующий вид:

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

С учетом (1) получаем частоту унитарных поляритонов

$$\omega_u = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\infty} \mu \omega_l^2 - \omega_0^2}{\varepsilon_{\infty} \mu - 1}}. \quad (3)$$

Поскольку групповая скорость квазичастицы определяется известным соотношением $v = d\omega/dk$ [11], то с учетом соотношений (1) и (2) получаем для групповой скорости

$$v_u = c \left(1 + \frac{(\omega_l^2 - \omega_0^2)\omega_u^2}{(\omega_0^2 - \omega_u^2)(\omega_l^2 - \omega_u^2)} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Масса поляритона [11]

$$m_u = \left(\frac{d^2 E}{dp^2} \right)^{-1} = \hbar \left(v_u \frac{dv}{d\omega} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Здесь $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – редуцированная постоянная Планка. Вследствие громоздкости полученного выражения его окончательный вид не приводится.

Используем соотношения (1–5) для расчета параметров унитарных поляритонов в различных веществах: ионном кристалле (NaCl), собственном полупроводнике (ZnSe), активной среде твердотельного лазера (рубин), а также метаматериале – глобулярном фотонном кристалле (ГФК) на основе искусственного опала с диаметром глобул 250 нм.

Во всех перечисленных материалах есть несколько резонансов диэлектрической проницаемости. В данной работе проведено исследование унитарных поляритонов вблизи резонанса, представляющего наибольший практический интерес. Так, для NaCl это резонанс на длине волны $\lambda_0 = 61$ мкм, в случае ZnSe $\lambda_0 = 47$ мкм.

Известно, что в рубине имеются резонансы как в инфракрасной (ИК), так и в видимой областях спектра. Для ИК-области $\lambda_0 = 18$ мкм, в видимой области выбран резонанс $\lambda_0 = 694,3$ нм, соответствующий рабочей длине волны рубинового лазера. Вследствие отсутствия данных о дисперсионной зависимости $\varepsilon(\omega)$ диэлектрической проницаемости $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ в видимом диапазоне спектра значение

параметра ϵ_∞ для видимой области принято равным 3,08, как и для ИК-области. В качестве нуля $\epsilon(\omega)$ использована длина волны линии перехода R_2 ($2A \rightarrow 4A_2$), соответствующая $\lambda_l = 692,9$ нм.

Согласно работе [12], закон дисперсии поляритонов в глобулярном фотонном кристалле вдоль направления [111] нормали к естественной грани роста (111) определяется следующим соотношением:

$$\cos k_1 a_1 \cdot \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \sin k_1 a_1 \cdot \sin k_2 a_2 = \cos ka. \quad (6)$$

Здесь $i = 1$ – индекс, относящийся к SiO_2 (опаловой матрице); $i = 2$ – индекс, соответствующий веществу в порах композита; $n_1 = n_1(\omega)$ – показатель преломления кремнезема; $n_2 = 1$ – показатель преломления воздуха в порах; η – коэффициент пористости образца; D – диаметр глобул кварца; $a = D \sqrt{\frac{2}{3}}$ – эффективный период ГФК вдоль направления [111]; $a_1 = (1 - \eta)a$ и $a_2 = \eta a$ – эффективные толщины слоев композита; ω_i – циклическая частота электромагнитной волны; $k_i(\omega) = \omega n_i / c$ – волновое число в i -й среде; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. С учетом известных структурных характеристик искусственных опалов (ГЦК-решетка) коэффициент $\eta = 0,26$.

В данной работе аппроксимирован точный закон дисперсии (6) поляритонов в ГФК соотношениями вида (1) и (2). Для этого решена задача нахождения неизвестных параметров (ϵ_∞ , ω_0 , ω_l) отдельно для «правых» и «левых» волн по известным значениям положений первых двух запрещенных зон ([13]).

Значения параметров, определяющих диэлектрическую проницаемость (2) рассматриваемых веществ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры исследованных кристаллов для расчета дисперсионных зависимостей

Вещество	ϵ_∞	$\omega_0, 10^{13}$ рад/с	$\omega_l, 10^{13}$ рад/с	Источник
NaCl	2,25	3,09	4,88	[10]
ZnSe	5,93	4,01	4,89	[14]
Рубин:				
ИК-диапазон	3,08	10,5	30,4	[14]
видимый диапазон	3,08	271	272	[15]
ГФК:				
$\mu = +1$	1,46	620	710	[13]
$\mu = -1$	0,107	344	640	[13]

Графические зависимости $\omega = \omega(k)$ для рассматриваемых материалов, построенные в соответствии с соотношением (1), представлены на рис. 1–3, где прямая $\omega = ck$ характеризует закон дисперсии в вакууме, точка U пересечения кривых $\omega = \omega(k)$ и $\omega = ck$, определяющая частоту ω_u и волновое число k_u , соответствует спектральному положению унитарного поляритона.

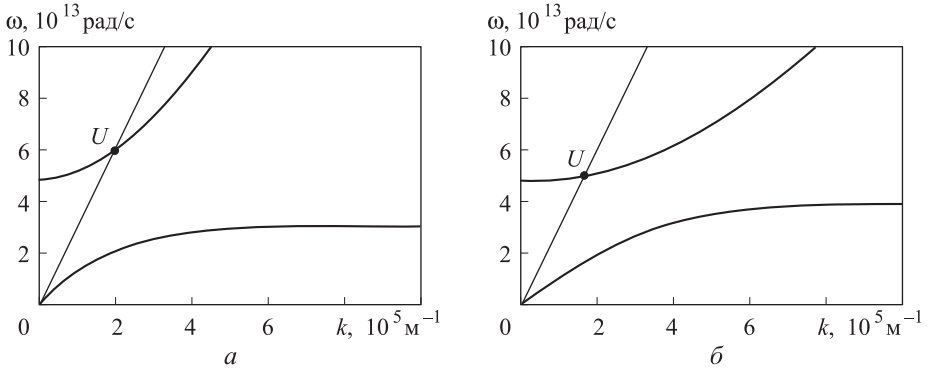


Рис. 1. Закон дисперсии поляритонных волн в кристалле NaCl (а) и ZnSe (б)

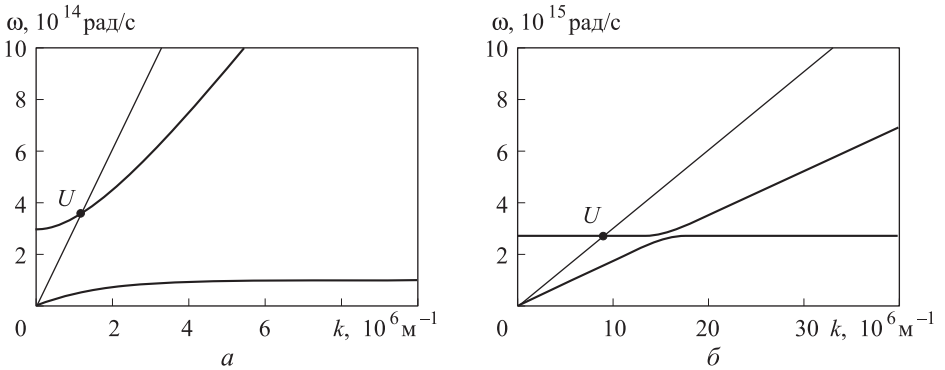


Рис. 2. Закон дисперсии поляритонных волн для рубина в ИК-диапазоне (а) и видимой области спектра (б)

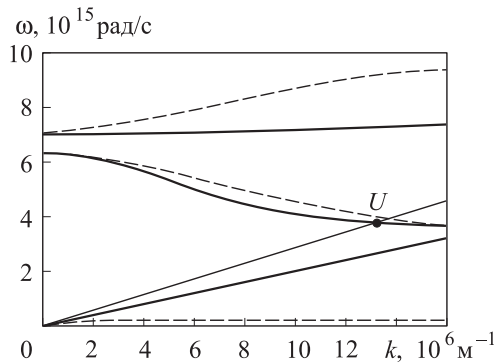


Рис. 3. Закон дисперсии поляритонных волн в ГФК на основе искусственного опала с диаметром глобул 250 нм, рассчитанный по (1) и (2). Пунктирные кривые соответствуют дисперсионной зависимости, рассчитанной по (6)

Числовые значения параметров квазичастиц – циклическая частота ω_u , длина волны λ_u , волновое число k_u , показатель преломления n_u , коэффициент прозрачности среды T_u , групповая скорость унитарного поляритона v_u и его эффективная масса m_u – приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры унитарных поляритонов в рассматриваемых средах

Вещество	$\omega_u, 10^{13}$ рад/с	λ_u , мкм	$k_u, 10^6$ м ⁻¹	n_u	T_u	$v_u, 10^8$ м/с	$m_u, 10^{-34}$ кг
NaCl	5,94	32	0,20	1	1	1,1	0,002
ZnSe	5,05	37	0,17	1	1	0,21	0,006
рубин:							
ИК-диапазон	36,3	5,2	1,2	1	1	0,92	0,02
видимый диапазон	272	0,69	9,1	1	1	0,009	4
ГФК	383	0,49	12,75	-1	1	-0,63	0,07

Замедление атомов с использованием охлаждающей аппаратуры позволяет получить сингулярное квантовое состояние, известное как конденсат Бозе – Эйнштейна [16]. Изучению этого состояния вещества посвящены работы [17–23]. До недавнего времени считалось, что бозе-эйнштейновская конденсация возможна только при крайне низких температурах [24]. Однако в 2010 г. была осуществлена высокотемпературная конденсация фотонов в микрополости [25].

Рассмотрим возможность бозе-эйнштейновской конденсации унитарных поляритонов. Как известно [26], критическая температура перехода в конденсированное состояние для однородного трехмерного газа, состоящего из невзаимодействующих частиц без каких-либо внутренних степеней свободы,

$$T_C = \left(\frac{n}{\zeta(3/2)} \right)^{2/3} \frac{2\pi\hbar^2}{m_u k} \approx 3,3125 \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{m_u k}. \quad (7)$$

Здесь n – концентрация поляритонов; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. После подстановки данных табл. 2 в формулу (6) с учетом $n = 2,6 \cdot 10^{15}$ м⁻³ (постоянная Лошмидта) получим значения T_C порядка нескольких сотен тысяч градусов, т. е. можно полагать, что уже при комнатной температуре унитарные поляритоны находятся в состоянии бозе-конденсата.

Следует отметить, что в работах [27–29] прогнозируется эффект конверсии двух фотонов в скалярный бозон («парафотон») при взаимодействии электромагнитного и скалярного полей. Согласно работе

[30], лагранжиан, описывающий взаимодействие электромагнитного поля с полем скалярных бозонов, имеет следующий вид:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial^\mu \Psi \partial_\mu \Psi - m^2 \Psi^2) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{4} \frac{\Psi}{M} F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}, \quad (8)$$

где $F_{\mu\nu}$ – тензор напряжений электромагнитного поля; $F_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu\rho\lambda} F_{\rho\lambda}$ – дуальный тензор. Первые два слагаемых в соотношении (8) соответствуют скалярному и электромагнитному полям, третий член задает взаимодействие между ними, т. е. описывает трехчастичные процессы конверсии двух фотонов вакуума в скалярный бозон (и наоборот). При этом имеют место законы сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega_s = \hbar\omega_u + \hbar\omega_u; \quad \hbar\vec{k}_s = \hbar\vec{k}_u + \hbar\vec{k}_u; \quad (9)$$

$$\hbar\omega_u + \hbar\omega_u = \hbar\omega_s; \quad \hbar\vec{k}_u + \hbar\vec{k}_u = \hbar\vec{k}_s. \quad (10)$$

Правила отбора разрешают такие процессы для centrosymmetric среды, в том числе и для вакуума. Данный эффект был изучен с применением лазеров высокой мощности по схеме Light Shining Through Wall [31] (рис. 4).

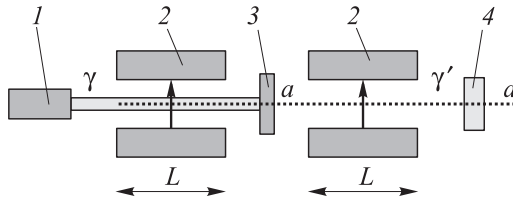


Рис. 4. Принципиальная схема установки для реализации фотон-аксионной конверсии:

1 – лазер; 2 – соленоиды; 3 – непрозрачная «стенка»; 4 – приемник излучения; γ , γ' – кванты исходного и вторичного излучений; a – аксионы (отмечены точками)

Отметим, что для унитарных поляритонов автоматически выполняются условия синхронизма для процесса конверсии двух унитарных поляритонов в скалярный бозон, так как показатели преломления для обеих частиц равны единице (с точностью до знака). В связи с этим в данной работе предлагается использовать унитарные поляритоны для реализации процесса конверсии пар поляритонов в скалярный бозон в материальной среде. В этом случае законы сохранения (9) и (10) оказываются выполненными. Кроме того, вероятность поляритон-бозонной конверсии в материальной среде должна существенно превышать аналогичную величину в вакууме, так как в материальной среде возможны процессы типа комбинационного рассея-

ния с участием фононов [32]. Возникающие в среде в результате поляритон-бозонной конверсии скалярные бозоны могут распространяться в свободном пространстве и в других материальных средах без существенных потерь [32]. Для детектирования скалярных бозонов, распространяющихся в свободном пространстве, можно использовать такой же кристалл, в котором происходил процесс поляритон-бозонной конверсии.

Заключение. Установлено, что при определенных частотах в диэлектрических материальных средах формируются унитарные поляритоны – квазичастицы, для которых показатель преломления соответствующих электромагнитных волн равен по абсолютной величине единице.

Показано, что при использовании дополнительных источников излучения, частота которых близка к частоте унитарного поляритона, создаются благоприятные условия для бозе-эйнштейновской конденсации поляритонов.

Предложен метод осуществления процесса конверсии пар унитарных поляритонов в скалярные бозоны в материальной среде, а также способ детектирования скалярных бозонов на основе наблюдения обратного процесса: реконверсии скалярного бозона в пары унитарных поляритонов в том же кристалле. Генерация скалярных бозонов открывает возможности для бездиссипативной передачи энергии на большие расстояния.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11-02-00164, 12-02-00491, 12-02-90422, 12-02-90021, 13-02-90420, 13-02-00449).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агранович В.М., Гартштейн Ю.Н. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света. *УФН*, 2006, т. 176, № 10, с. 1051–1068.
- [2] Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed. Cambridge, Cambridge university press, 1999, 986 p.
- [3] Горелик В.С., Щавлев В.В. Оптические устройства на основе материалов с отрицательным преломлением. *Краткие сообщения по физике*, 2010, т. 37, № 12, с. 23–32.
- [4] Мандельштам Л.И. *Полное собрание трудов*. Т. 5, Ленинград, Изд-во АН СССР, 1950, 470 с.
- [5] Мандельштам Л.И. *ЖЭТФ*, 1945, т. 15, № 9, с. 475–478.
- [6] Мандельштам Л.И. *Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике*. Москва, Наука, 1972, 440 с.
- [7] Веселаго В.Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления. *УФН*, 2003, № 7, с. 790–794.
- [8] Макаров В.П., Рухадзе А.А. Электромагнитные волны с отрицательной групповой скоростью и тензор энергии-импульса. *УФН*, 2011, т. 181, № 12, с. 1357–1368.

- [9] Макаров В.П., Рухадзе А.А., Самохин А.А. Об электромагнитных волнах с отрицательной групповой скоростью и связанных с ними эффектах. *Прикладная физика*, 2010, № 5, с. 5–18.
- [10] Born M., Huang Kun. *Dynamical Theory of Crystal Lattices*. Oxford, Clarendon press, 1962, 420 p.
- [11] Ashcroft N., Mermin N. *Solid State Physics*. Harcourt, Orlando, 1976, 848 p.
- [12] Горбачевич А.А., Горелик В.С., Фриман А.В. Оптические свойства фотонных кристаллов, заполненных парами йода. *Краткие сообщения по физике*, 2013, т. 40, № 2, с. 28–35.
- [13] Горелик В.С., Филатов В.В. Дисперсионные характеристики глобулярных фотонных кристаллов, заполненных водой и золотом. *Неорганические материалы*, 2012, т. 48, № 4, с. 429–436.
- [14] Bass M., DeCusatis Ca., Enoch J., Lakshminarayanan V., Li G., MacDonald C., Mahajan V., Stryland van E. *Handbook of Optics, Third Edition vol. IV: Optical Properties of Materials, Nonlinear Optics, Quantum Optics (set)*, McGraw Hill Professional, 2009, 1152 p.
- [15] Maiman T.H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 1960, vol. 187 (4736), pp. 493–494.
- [16] Einstein A. *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases – Zweite Abhandlung*. Sitzungsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften, 1925, ss. 3–10.
- [17] Anderson M.H., Ensher J.R., Matthews M.R., Wieman C.E., Cornell E.A. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor. *Science*. 1995, vol. 269, pp. 198–201.
- [18] Davis K.B., Mewes M.-O., Andrews M.R., van Druten N.J., Kurn D.M., Ketterle W. Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 75, pp. 3969–3973.
- [19] Bradley C.C., Sackett C.A., Hulet R.G. Bose-Einstein Condensation of Lithium: Observation of Limited Condensate Number. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 78, pp. 985–989.
- [20] Deng H., Weihs G., Santori C., Bloch J., Yamamoto Y. Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons. *Science*, 2002, vol. 298, pp. 199–202.
- [21] Kasprzak J., Richard M., Rundermann S., Bass A., Jeambrun P., Keeling J.M.J., Marchetti F.M., Szymańska M.H. Bose-Einstein condensation of exciton polaritons. *Nature*, 2006, vol. 443, pp. 409–414.
- [22] Balili R., Hartwell V., Snoke D., Pfeiffer L., West K. Bose-Einstein Condensation of Microcavity Polaritons in a Trap. *Science*, 2007, vol. 316, pp. 1007–1010.
- [23] Demokritov S.O., Demidov V.E., Dzyapko O., Melkov G.A., Serga A.A., Hillebrands B., Slavin A.N. Bose-Einstein Condensation of quasi-Equilibrium Magnons at Room Temperature Under Pumping. *Nature*, 2006, vol. 443, pp. 430–433.
- [24] Cornell E., Wieman C. Bose-Einstein Condensation in a Dilute Gas. The first 70 years and some recent experiments. Nobel lecture, no. 12, 2001, URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/cornellwieman-lecture.pdf (accessed 12 April 2013).
- [25] Klaers J., Schmitt J., Vewinger F., Weitz M. Bose-Einstein Condensation of Photons in an Optical Microcavity. *Nature*, 2010, vol. 468, pp. 545–548.
- [26] Pitaevskii L., Stringari S. *Bose-Einstein condensation*. Oxford, New York, Clarendon Press, 2003, 382 p.
- [27] Jaeckel J., Redondo J., Ringwald A. Hidden Laser Communications through Matter – An Application of meV-scale Hidden Photons. *EPL*, 2009, vol. 87, 10010 p.
- [28] Jaeckel J., Ringwald A. Search for Hidden Sector Photons with the ADMX Detector. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, 171801 p.
- [29] Afanasev A. LIPSS Collaboration. Experimental Limit on Optical-Photon Coupling to Light Neutral Scalar Bosons. *Phys. Rev. Lett.* 2008, vol. 101, 120401 p.

- [30] Троицкий С.В. Вокруг CAST'a: поиски аксионов и других легких частиц. URL: <http://www.inr.ac.ru/a/r/11/11513/tro.pdf> (дата обращения: 12.05.2013)
- [31] Sikivie P. Tanner D.B., van Bibber K. Resonantly Enhanced Axion-Photon Regeneration. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 98. 172002 p.
- [32] Gorelik V.S. Optics of Globular Photonic Crystals. *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37. pp. 409–432.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

Горелик Владимир Семенович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией ФИАН, заслуженный деятель науки РФ. e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru.

Филатов Владимир Викторович – аспирант кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: filatov-vladimir@yandex.ru.