

УДК 539.2+535

С. А. Федоров, Ю. А. Безус, А. Е. Рыбалка
ФГБНУ Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина
283048, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

ПОЛЯРИТОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ТОПОЛОГИЧЕСКИ УПОРЯДОЧЕННОМ НЕИДЕАЛЬНОМ ГЕКСАГОНАЛЬНОМ МАССИВЕ МИКРОПОР С ПРИМИТИВНОЙ РЕШЕТКОЙ

S. A. Fedorov, Y. A. Bezus, A. E. Rybalka
FSBSI Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering
283048, c. Donetsk, R. Luxemburg str., 72

POLARITON EXCITATIONS IN A TOPOLOGICALLY ORDERED IMPERFECT HEXAGONAL ARRAY OF MICROPORES WITH A PRIMITIVE LATTICE

В настоящей работе проведено микроскопическое рассмотрение поляритонных возбуждений в неидеальной топологически упорядоченной нанорешетке микропор с гексагональной симметрией. Изучена специфика энергетического спектра рассматриваемых квазичастиц, обусловленная как конфигурационной зависимостью входящих в гамильтониан системы параметров, так и ее симметрией.

Ключевые слова: гексагональная симметрия, поляритонные структуры, бозе-эйнштейновская конденсация.

In this paper, a microscopic examination of polariton excitations in a non-ideal topologically ordered nanolattice of micropores with hexagonal symmetry is carried out. The specifics of the energy spectrum of the quasiparticles under consideration are studied, due to both the configuration dependence of the parameters included in the Hamiltonian system and its symmetry.

Keywords: hexagonal symmetry, polariton structures, Bose-Einstein condensation.

Введение

Проведенные в работах [1], [2] детальные исследования квазичастичных состояний неидеальных поляритонных структур, необходимы как для понимания механизмов распространения электромагнитных возбуждений, в соответствующих пористых материалах, так и для дальнейшего развития квантовой нанофотоники. Прогресс в этой области определяет не только состояние современной физической науки, но и ее практические применения. Выполненные в [1], [3], [4] численные моделирования поляритонных энергий позволяют находить дисперсионные, зонные характеристики соответствующих возбуждений, их концентрационную зависимость и определять области существования поляритонного конденсата для тех систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

В настоящее время расширение возможностей функциональных пористых материалов идет за счет управляемого внедрения в них квантовых точек [3-7], структурных дефектов [8], [9], упругой деформации [10], а также путем изменения кристаллографической симметрии нанорешеток Браве [11]. В последнем случае, это может привести к появлению большего, чем в [12] числа топологических, критических точек (а, следовательно, и к большему чем в [12] особенностей соответствующих дисперсионных характеристик, используемых для создания технических устройств), как это показано в [11] при изучении экситоноподобных возбуждений двухподрешеточных массивов микропор с гексагональной симметрией. Представляет интерес провести аналогичные исследования также и для более сложных, имеющих комбинированную природу квазичастиц – поляритонов, существование которых возможно лишь при наличии квантовых точек.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе рассматриваются неидеальные, топологически упорядоченные одноподрешеточные нанокристаллические фотонные системы микропор с гексагональной симметрией и с разупорядочением лишь в подсистеме квантовых точек. Здесь предполагается, что такая подсистема является двухкомпонентной, причем квантовые точки одного сорта отличаются от квантовых точек другого сорта лишь по изотопическому составу. Ниже, для таких систем, найдены энергии соответствующих поляритонных возбуждений, изучены особенности их спектров, зонных характеристик, а также проведен сравнительный анализ с результатами более ранних работ.

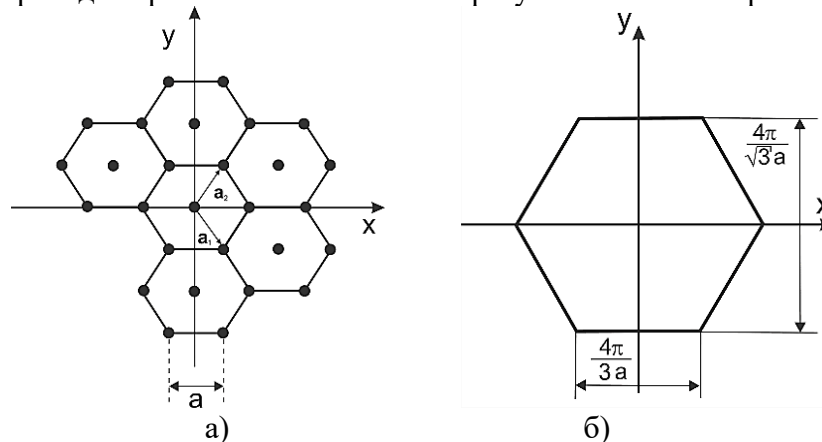


Рисунок 1 – Одноподрешеточная система микропор с гексагональной симметрией и соответствующая ей первая зона Бриллюэна

Как следует из ссылки [2], гамильтониан, определяющий искомые поляритонные состояния, можно записать в следующем виде:

$$\hat{H} = \sum_{\vec{n}, \vec{m}} [E_{\vec{n}} \delta_{\vec{n}\vec{m}} + V_{\vec{n}\vec{m}}] B_{\vec{n}}^{\dagger} B_{\vec{m}} + \sum_{\vec{n}, \vec{m}} [\hbar \Omega_{\vec{n}}^{ph} \delta_{\vec{n}\vec{m}} - A_{\vec{n}\vec{m}}] + \sum_{\vec{n}} g_{\vec{n}} [B_{\vec{n}}^{\dagger} \Psi_{\vec{n}} + \Psi_{\vec{n}}^{\dagger} B_{\vec{n}}] \quad (1)$$

где $\Omega_{\vec{n}}^{ph}$ – частота фотонной моды электромагнитного возбуждения локализованного в $\vec{n}$ -узле (микропоре); $\Psi_{\vec{n}}, \Psi_{\vec{n}}^{\dagger}$ – бозе-операторы рождения и уничтожения этой фотонной моды; $E_{\vec{n}}$ – конфигурационно зависящая энергия возбуждения квантовой точки в узле $\vec{n}$; $B_{\vec{n}}^{\dagger}, B_{\vec{m}}$ – бозе-операторы рождения и уничтожения этого возбуждения в узельном представлении; $A_{\vec{n}\vec{m}}$ – матрица резонансного взаимодействия, характеризующая перекрытие оптических полей микропор $\vec{n}$ -го и $\vec{m}$ -го узлов решетки; $V_{\vec{n}\vec{m}}$ – матрица резонансного взаимодействия квантовых точек в узлах $\vec{n}$ и $\vec{m}$, конфигурационной зависимостью которой, для рассматриваемого массива квантовых точек можно пренебречь, как показано в работе [13]; $g_{\vec{n}}$ – конфигурационно зависящая матрица резонансного взаимодействия квантовой точки в узле $\vec{n}$ с локализованным в этом узле электромагнитным полем.

Из вышесказанного следует, что гамильтониан (1) является конфигурационно зависимым оператором, вся конфигурационная зависимость которого определяется величинами $E_{\vec{n}}$ и $g_{\vec{n}}$. Для всех рассматриваемых типов (случайно разупорядоченных) неидеальных нанокристаллических фотонных систем, расчет их квазичастичных состояний удобно осуществлять используя аппарат усредненных функций Грина и приближение виртуального кристалла. В настоящей работе, такой способ применяется и для вычисления искомых поляритонных энергий $\hbar \Omega_{1,2}$. Выполняя все соответствующие расчетные процедуры по той же схеме, что и в работе [14] получим:

$$\hbar \Omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\langle E_{\vec{n}} \rangle + V(\vec{k}) + \hbar \Omega^{ph} - A(\vec{k}) \pm \sqrt{\left((\langle E_{\vec{n}} \rangle + V(\vec{k})) - (\hbar \Omega^{ph} - A(\vec{k})) \right)^2 + 4 \langle g_{\vec{n}} \rangle^2} \right] \quad (2)$$

где $V(\vec{k}) = \sum_{\vec{m}} V_{\vec{n}\vec{m}} \exp[i\vec{k}(\vec{r}_{\vec{n}} - \vec{r}_{\vec{m}})]$, $A(\vec{k}) = \sum_{\vec{m}} A_{\vec{n}\vec{m}} \exp[i\vec{k}(\vec{r}_{\vec{n}} - \vec{r}_{\vec{m}})]$. Здесь и выше, $\vec{n}$ и $\vec{m}$ целочисленные двумерные векторы, рассматриваемой двумерной решетки Браве; $\vec{k}$ двумерный вектор лежащий в первой зоне Бриллюэна обратной решетки; конфигурационно усредненные величины $\langle E_{\vec{n}} \rangle$ и $\langle g_{\vec{n}} \rangle$ обычным образом [2] связаны с соответствующими концентрациями: $\langle E_{\vec{n}} \rangle = E^{(1)}C^{(1)} + E^{(2)}C^{(2)}$, $\langle g_{\vec{n}} \rangle = g^{(1)}C^{(1)} + g^{(2)}C^{(2)}$, $C^{(1)} + C^{(2)} = 1$.

В приближении ближайших соседей, величины $V(\vec{k})$ и $A(\vec{k})$ принимают вид:

$$V(\vec{k}) = 2V(a) \left\{ \cos \left[\left(k_x - \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos \left[\left(k_x + \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos k_x a \right\} \quad (3)$$

$$A(\vec{k}) = 2A(a) \left\{ \cos \left[\left(k_x - \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos \left[\left(k_x + \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos k_x a \right\} \quad (4)$$

Формулы (2-4) определяют дисперсионную и концентрационную зависимости поляритонных энергий для экситонной области спектра атомарной подсистемы. Указанные формулы позволяют выявлять специфику спектра рассматриваемых возбуждений, связанную с конфигурационной зависимостью параметров входящих в (2) и взаимным расположением микропор. Очевидно, что более высокая симметрия решетки Браве исследуемой системы обуславливает более сложную структуру поляритонных возбуждений, большее число симметричных критических точек и большее число особенностей Ван-Хова для плотности состояний [14]. В свою очередь, это приводит, при определенной конфигурационной зависимости параметров в (2), к большому многообразию форм соответствующих дисперсионных поверхностей и, следовательно, к большому числу динамических критических точек, имеющих комбинированную природу [15]. Сказанное подтверждается графиками, приведенными на рис. 3-6.

При численном моделировании соответствующих параметров, определяющих особенности спектра электромагнитных возбуждений, в настоящей работе взяты значения величин того же порядка, что и используемые авторами ранее при исследовании подобных структур [8-12]. Значения частот резонансных фотонных мод, локализованных в микропорах решетки: $\Omega^{ph} = 2\pi \times 311 \text{ THz}$. Параметры, определяющие перекрытие оптических полей и взаимодействие квантовых точек в соседних микропорах взяты следующими: $A/2\hbar = 3.5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, $V/2\hbar = 2 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Поверхности, описывающие дисперсионную зависимость частот $\Omega_{1,2}(k, C_1, C_2)$ исследуемых коллективных возбуждений в неидеальной решетке микрорезонаторов представлены на рис. 2, со значениями концентраций $C_1 = 0.1$, $C_2 = 0.2$, $g_1/\hbar = 1.5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, $g_2/\hbar = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, $E_1/\hbar = 0.8 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$, $E_2/\hbar = 2.8 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. При этом k изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна:

$$-\frac{\pi}{d(C_1, C_2)} < k < \frac{\pi}{d(C_1, C_2)} \quad (\text{затемненная область } (k, C_{1(2)}) \text{ на рис. 2-4}).$$

Заметим, что форма дисперсионной поверхности $\Omega_{1,2}(k, C_1, C_2)$ свидетельствует о возможности существования при определенных концентрациях дефектов структуры бозе-эйнштейновского поляритонного конденсата, благодаря наличию минимумов при значениях $k \neq 0$ (дополнительно к возможности существования конденсата при $k = 0$).

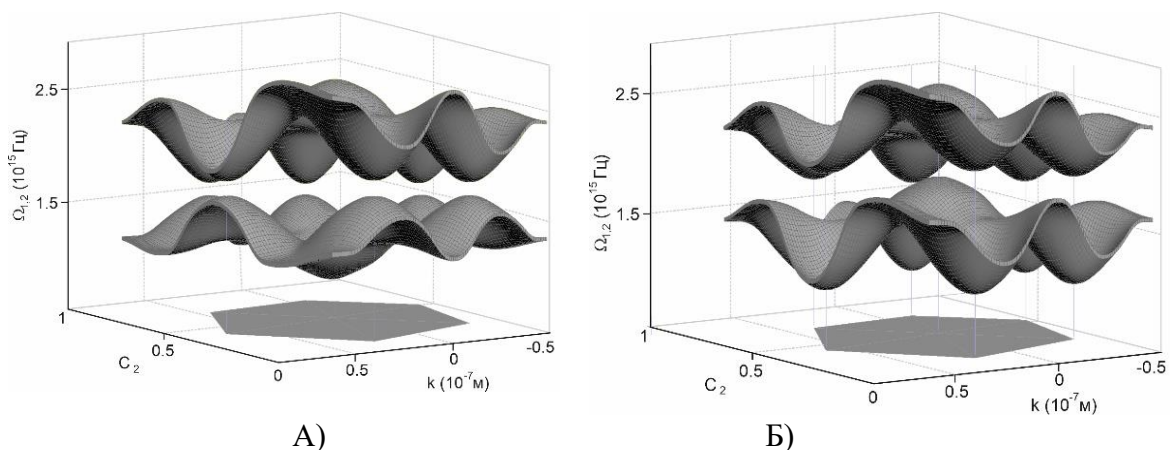


Рисунок 2 – Графическое изображение дисперсионной зависимости поляритонных возбуждений, описываемых формулой (2)

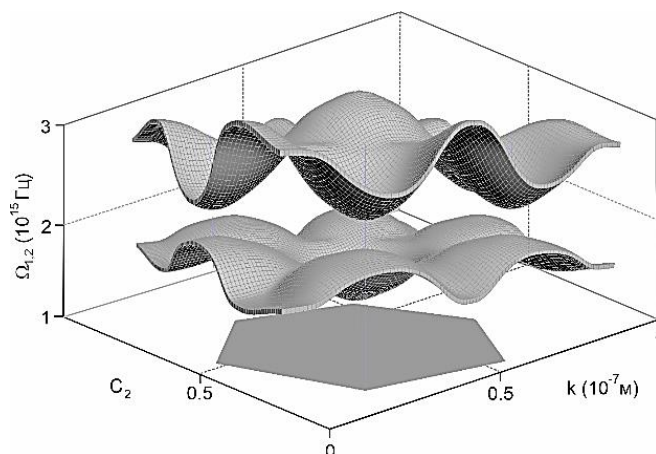


Рисунок 3 – Дисперсионная зависимость поляритонных возбуждений при слабой конфигурационной зависимости энергии возбуждения квантовой точки $\langle E_n \rangle / 2\hbar \approx E^{(0)} / 2\hbar = 2 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$; остальные значения параметров при расчете $\Omega_{1,2}(k)$ такие же, как и на рисунке 2А.

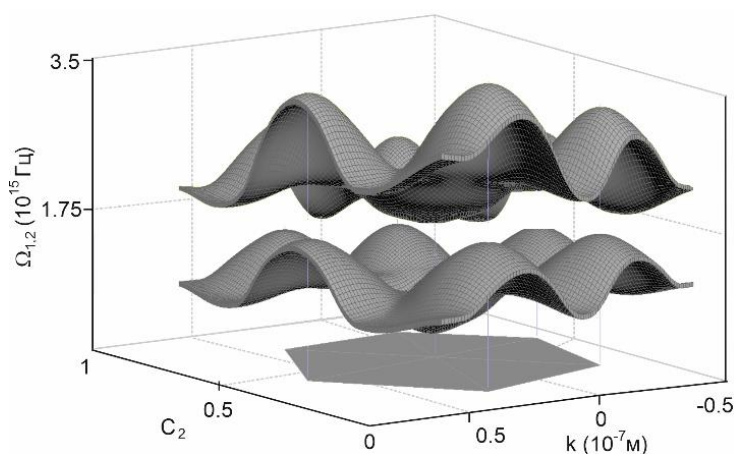


Рисунок 4 – Дисперсионная зависимость поляритонных возбуждений при слабой конфигурационной зависимости матрицы резонансного взаимодействия g_n квантовой точки $\langle g_n \rangle / \hbar \approx g / \hbar = 5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$; остальные значения параметров при расчете $\Omega_{1,2}(k)$ такие же как и на рисунке 2Б

Зависимость ширины $\Delta\Omega_{12(21)}(C_1, C_2) \equiv \min_k [\Omega_{2(1)}(C_1, C_2) - \Omega_{1(2)}(C_1, C_2)]$ соответствующей запрещенной зоны поляритонного спектра от концентрации дефектов исследуемой структуры приведена на рис. 5 А, Б.

Все вышеизложенное указывает, на благоприятные условия, перспективы и предпосылки для обнаружения Бозе-эйнштейновской конденсации при $k \neq 0$ путем численного моделирования.

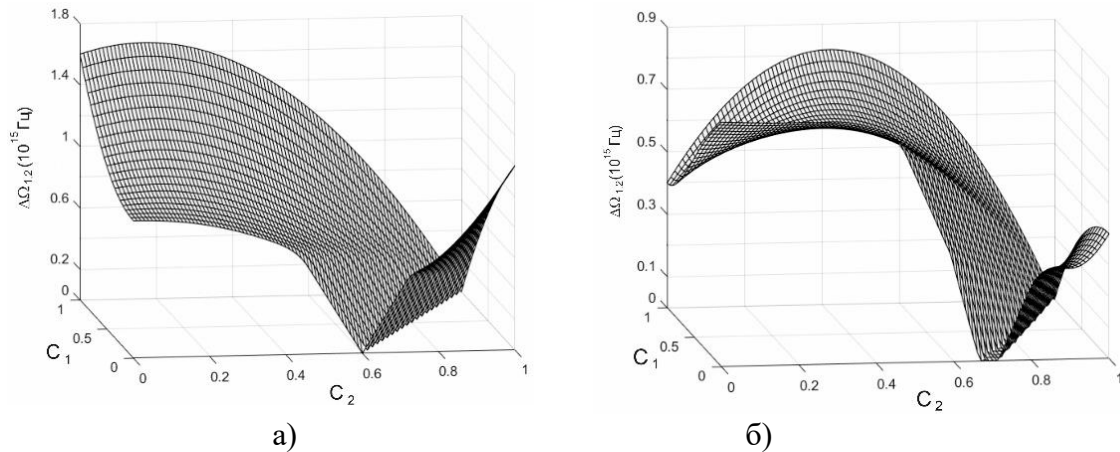


Рисунок 5 – Концентрационная зависимость запрещенной зоны соответствующей формуле (2)

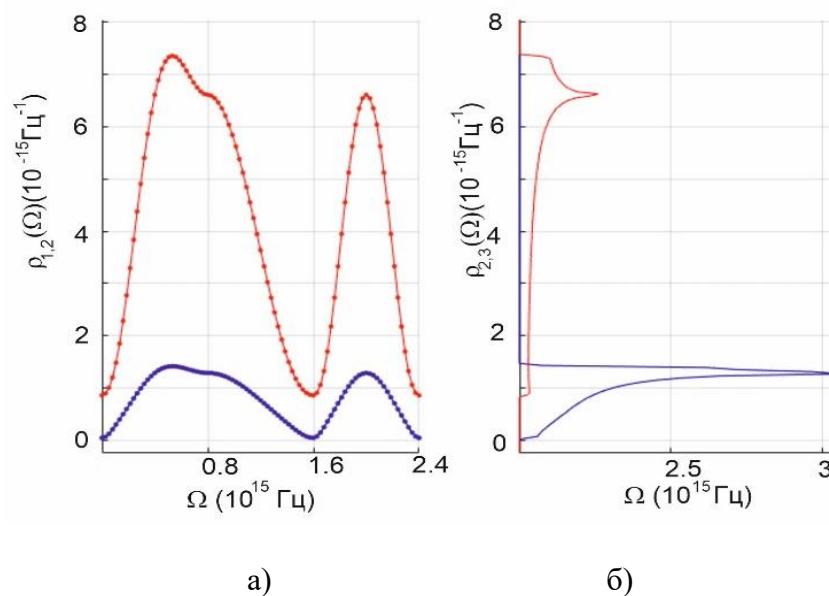


Рисунок 6 – Плотность состояний дисперсионных поверхностей $\Delta\Omega_{1,2}$ в области концентраций C_1, C_2 .

Заключение

Полученные в работе результаты существенно расширяют возможности численного моделирования дисперсионных и зонных характеристик квазичастичных возбуждений для нанокристаллических фотонных кристаллов и позволяют выявлять критерии существования поляритонного конденсата для тех пористых систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

Список литературы

1. Алоджанц А.П. Фазовые переходы и хранение квантовой оптической информации на основе поляритонов в пространственно-периодических структурах / А.П. Алоджанц, С.М. Аракелян, С.Н. Багаев. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2010. Т.1, №1. С. 7-25.

2. Румянцев В. В. Поляритоны в неидеальном массиве ультрахолодных квантовых точек / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник. *Физика низких температур*. 2016. Т. 42, № 5. С. 347–353.
3. Румянцев В.В. Элементы поляритоники неидеальных структур / В. В. Румянцев, С.А. Федоров, А.Г. Петренко. *Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки*. 2017. № 4. С. 69–78.
4. Паладян Ю.А. *Эффекты распространения электромагнитных и акустических возбуждений в несовершенных кристаллических средах*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / ДОНФТИ. Д., 2022. 112 с.
5. Румянцев В.В. Введение в поляритонику / В. В. Румянцев, С.А. Федоров. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. №2 (25). С. 29–39.
6. Шици Ся. Нетрадиционные состояния плоских полос в фотонных решётках Либа / Ся Шици. Рамачандран Ажит, Ся Шициан и др. *Physical Review Letters*, 121, 26, 263902. 2018. С. 1–5.
7. Вахала К. Дж. *Оптические микрорезонаторы* / К. Дж. Вахала. *Природа*. 2003. Т. 424. С. 839–846.
8. Румянцев В. В. Дисперсионные характеристики электромагнитных возбуждений в неупорядоченной одномерной решётке связанных микрорезонаторов / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, М. В. Сычанова. *Physica B: Конденсированное вещество*. 2015. Т. 461. С. 32–37.
9. Румянцев В. В. Электромагнитные возбуждения в неидеальной цепочке микропор с двумя подрешётками / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, Дж. А. Паладян. *Physica B: Конденсированное вещество*. 2019. Т. 571. С. 296–300.
10. Румянцев В.В. Спектр электромагнитных возбуждений в неидеальной цепочке микропор в условиях однородной упругой деформации / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, К.В. Гуменник, Д.А. Гуров. *ФТВД*. 2018. Т.28. №1. С. 87–95.
11. Румянцев В.В. Экситоноподобные возбуждения в неидеальных гексагональных нанорешетках микропор / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, Ю.А. Безус, А.В. Безус, А.Е. Рыбалка. *ФТВД*. 2025. Т. 35. №1. С. 44–51.
12. Румянцев В. В. Экситоноподобные электромагнитные возбуждения в неидеальных микрополостных сверхкристаллах / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, М. Сычанова, А. В. Кавокин *Scientific Reports*. 2014. Т. 4: 6945. С. 1–6.
13. Броуде В.Л. *Спектроскопия молекулярных экситонов* / В.Л. Броуде, Э.И. Рашба, Е.Ф. Шека. М: Энергоиздат, 1981. 248 с.
14. Румянцев В.В. Моделирование зависимости плотности состояний поляритонных возбуждений от концентрации дефектов в неидеальной 1D решетке микропор, содержащих квантовые точки / В.В. Румянцев, А.Е. Рыбалка, С.А. Федоров, К.В. Гуменник. *Проблемы Искусственного интеллекта*. 2023. №3(26). С. 41–50.
15. Федоров С.А. *Особенности спектра спиновых волн многоподрешеточных антиферромагнетиков*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.02, 01.04.07 / ДОНФТИ АН УССР. Д., 1987. 117 с.

References

1. Alojants A.P. Phase transitions and storage of quantum optical information based on polaritons in spatially periodic structures / A.P. Alojants, S.M. Arakelyan, S.N. Bagaev // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. – 2010. – Vol.1, No. 1. – pp. 7–25.
2. Rumyantsev V.V. Polaritons in a nonideal array of ultracold quantum dots / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk // *Low Temperature Physics*. -2016. –V.42, No.5. – P. 347–353.
3. Rumyantsev V.V. Elements of polaritonics of non-ideal structures / V. V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, A.G. Petrenko // *Bulletin of DonNU. Ser. A: Natural Sciences*. 2017. No. 4. pp. 69–78.
4. Paladian Yu.A. Effects of propagation of electromagnetic and acoustic excitations in imperfect crystalline media: dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 04/01/07 / DONFTI. – D., 2022. – 112 p.
5. Rumyantsev V.V. Introduction to polaritonics / V. V. Rumyantsev, S.A. Fedorov // *Problems of artificial intelligence*. – 2022. – №2 (25). – Pp. 29–39.
6. Shiqi Xia. Unconventional Flatband Line States in Photonic Lieb Lattices / Xia Shiqi. Ramachandran Ajith, Xia Shiqiang et al. // *Physical Review Letters*, 121, 26, 263902. – 2018. – P. 1–5.
7. Vahala K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // *Nature*. – 2003. – V. 424. – P. 839–846.
8. Rumyantsev V.V. Dispersion characteristics of electromagnetic excitations in a disordered one-dimensional lattice of coupled microresonators / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, M.V. Sychanova // *Physica B: Condensed Matter*. – 2015. – V. 461. – P. 32–37.
9. Rumyantsev V.V. Electromagnetic excitations in a non-ideal two-sublattice microcavity chain [Text] / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, J.A. Paladyan // *Physica B: Condensed Matter*. – 2019. – V. 571. – P. 296–300.
10. Rumyantsev V.V. The spectrum of electromagnetic excitations in a non-ideal chain of micropores under conditions of homogeneous elastic deformation / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, D.A. Gurov // *FTVD*. – 2018. – Vol.28. – No. 1. – pp. 87–95.

11. Rumyantsev V.V. Exciton-like excitations in imperfect hexagonal nanolattices of micropores / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, Yu.A. Bezus, A.V. Bezus, A.E. Rybalka // FTVD. – 2025. – Vol. 35. – No. 1. – pp. 44-51.
12. Rumyantsev V.V. Exciton-like electromagnetic excitations in non-ideal microcavity supercrystals / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, M. Sychanova, A.V. Kavokin // Scientific Reports. – 2014. – V. 4:6945. – P. 1-6.
13. Brode V.L. Spectroscopy of molecular excitons / V.L. Brode, E.I. Rashba, E.F. Sheka. Moscow: Energoizdat, 1981. 248 p.
14. Rumyantsev V.V. Modeling the dependence of the density of states of polariton excitations on the concentration of defects in an imperfect 1D lattice of micropores containing quantum dots / V.V. Rumyantsev, A.E. Rybalka, S.A. Fedorov, K.V. Gumennik // Problems of Artificial Intelligence. – 2023. №3(26). – Pp . 41-50.
15. Fedorov S.A. Features of the spectrum of spin waves of multipath antiferromagnets: dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 04/01/02, 04/01/07 / DONFTI Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. – D., 1987. – 117 p.

RESUME

S. A. Fedorov, Y. A. Bezus, A. E. Rybalka

Polariton excitations in a topologically ordered imperfect hexagonal array of micropores with a primitive lattice

Background: The relevance of research into physical systems at the nanostructural scale stems both from the need for continued advancement in quantum nanophotonics and from practical applications of nanotechnology. Of particular interest is the study of quasiparticle excitations in imperfect arrays of micropores, which is essential for modeling technical devices with specified characteristics. The enhancement of functional porous materials is achieved not only through the controlled introduction of quantum dots, structural defects, or elastic deformation, but also by altering the crystallographic symmetry of Bravais nanolattices, as demonstrated in the simple case of exciton-like excitations. In this work, a similar symmetry-based approach is employed to calculate the states of quasiparticles with a more complex, hybrid nature—polaritons

Materials and methods: This study employs the following methodologies: a quantum-mechanical approach for describing quasiparticle excitations; the framework of averaged Green's functions to determine the concentration dependence of the corresponding states; and numerical modeling of dispersion surfaces.

Results: The formulas derived for polariton energies in this work make it possible to reveal the specific features of polariton dispersion, which are linked to the concentration-dependent parameters appearing in the corresponding analytical expressions and the spatial arrangement of micropores. It is evident that the high symmetry of the Bravais lattice in the system under investigation leads to a more complex structure of polariton excitations, a greater number of symmetry-related critical points, and more Van Hove singularities in the density of states compared to systems with lower symmetry.

Conclusion: The results obtained in this work significantly enhance the capabilities of numerical modeling for the dispersion and band characteristics of quasiparticle excitations in nanocrystalline photonic crystals. They also make it possible to identify criteria for the existence of a polariton condensate in porous systems where Bose–Einstein condensation may occur.

РЕЗЮМЕ

С. А. Федоров, Ю. А. Безус, А. Е. Рыбалка

Поляритонные возбуждения в топологически упорядоченном неидеальном гексагональном массиве микропор с примитивной решеткой

Актуальность исследований физических систем наноструктурного масштаба обусловлена как потребностями дальнейшего развития квантовой нанофотоники, так и с точки зрения практических применений нанотехнологий. Особый интерес при этом представляет изучение квазичастичных возбуждений неидеальных массивов микропор необходимое для моделирования технических устройств с заданными характеристиками. Расширение возможностей функциональных пористых материалов осуществляется не только за счет управляемого внедрения в них квантовых точек, структурных дефектов, упругой деформации, но также и путем изменения кристаллографической симметрии нанорешеток Браве, как это показано на простейшем примере экситоноподобных возбуждений. В настоящей работе аналогичный симметричный подход используется при расчете состояний квазичастиц имеющих более сложную, комбинированную природу – поляритонов.

Материалы и методы: в работе используется: квантовомеханический подход к описанию квазичастичных возбуждений; аппарат усредненных функций Грина для нахождения концентрационной зависимости соответствующих состояний; численное моделирование дисперсионных поверхностей.

Результаты: полученные в работе формулы для поляритонных энергий позволяют выявлять специфику дисперсии поляритонов, связанную с концентрационной зависимостью параметров входящих в соответствующие аналитические выражения и взаимным расположением микропор. Очевидно, что высокая симметрия решетки Браве исследуемой системы обуславливает более сложную структуру поляритонных возбуждений, большее число симметричных критических точек и большее число особенностей Ван Хова для плотности состояний, чем для систем с низкой симметрией.

Вывод: Полученные в работе результаты существенно расширяют возможности численного моделирования дисперсионных и зонных характеристик квазичастичных возбуждений для нанокристаллических фотонных кристаллов и позволяют выявлять критерии существования поляритонного конденсата для тех пористых систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

Федоров Станислав Афанасьевич – кандидат ф-м наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта stan.fedorov2023@yandex.ru, адрес: РФ, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д.2 б, телефон: +7(949) 420-51-95.

Безус Юлия Александровна – кандидат ф-м наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта paladyan0108@yandex.ru, адрес: 283048, РФ, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72, телефон: +7(949) 373-67-30.

Рыбалка Алексей Евгеньевич – младший научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта rrybalkaalexei@yandex.ru, адрес: 283052, РФ, ДНР, г. Донецк, б. Шевченко, д.103, кв.18, телефон: +7(949) 421-90-73.

Статья поступила в редакцию 21.07.2025.