

УДК 535.4+681.7

В. В. Румянцев, С. А. Федоров

Государственное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина»  
283114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

## ВВЕДЕНИЕ В ПОЛЯРИТОНИКУ

V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov

Public institution «A. A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering»  
283114, Donetsk, R. Luxembourg str., 72

## INTRODUCTION TO POLARITONICS

В. В. Румянцев, С. А. Федоров

Державна установа «Донецкий физико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна»  
283114, м. Донецьк, вул. Р. Люксембург, 72

## ВВЕДЕННЯ В ПОЛЯРИТОНИКУ

В работе на основе предыдущих исследований авторов представлены две части новой области науки – поляритоники: полуклассическая поляритоника и квантовая поляритоника. В качестве примера в первой части обзора проведено численное моделирование параметров естественной оптической активности неидеального молекулярного кристалла в окрестности экситонного резонанса (предмет полуклассической поляритоники, вторая часть поляритоники представлена исследованием поляритонных возбуждений в неидеальной 1D структуре туннельно связанных микропор (резонаторов), содержащих квантовые точки. Проводимые в рамках поляритоники исследования весьма актуальны в связи с появлением оптоэлектронных устройств, использующих различные приложения современной фотоники – от локализации света в нанофотонных волноводах до квантовой обработки информации.

**Ключевые слова:** фотоника, поляритоника, структурные дефекты, поляритоны, плотность состояний квазичастичных возбуждений.

Based on the authors' previous research, the paper presents two parts of a new field of science - polaritonics: semi-classical polaritonics and quantum polaritonics. As an example, in the first part of the review, numerical modeling of the parameters of the natural optical activity of a non-ideal molecular crystal in the vicinity of exciton resonance (the subject of semi-classical polaritonics, the second part of polaritonics is represented by the study of polariton excitations in the non-ideal 1D structure of tunnel-coupled micropores (resonators) containing quantum dots. The research carried out within the framework of polaritonics is very relevant due to the appearance of optoelectronic devices using various applications of modern photonics – from the localization of light in nanophotonic waveguides to quantum information processing.

**Key words:** photonics, polaritonics, structural defects, polaritons, density of states of quasi-particle excitations.

У роботі на основі попередніх досліджень авторів представлені дві частини нової галузі науки-поляритоники: напівкласична поляритоніка і квантова поляритоніка. Як приклад у першій частині огляду проведено чисельне моделювання параметрів природної оптичної активності неідеального молекулярного кристала в околиці екситонного резонансу (предмет напівкласичної поляритоніки, друга частина поляритоніки представлена дослідженням поляритонних збуджень у неідеальній 1D структурі тунельно зв'язаних мікропор (резонаторів), що містять квантові точки. Проведені в рамках поляритоніки дослідження вельми актуальні в зв'язку з появою оптоелектронних пристроїв, що використовують різні додатки сучасної фотоніки – від локалізації світла в нанофотонних хвилеводах до квантової обробки інформації/

**Ключові слова:** фотоніка, поляритоніка, структурні дефекти, поляритони, густина станів квазічастинних збуджень.

## Введение

Исследование кристаллических структур различной конфигурации, их физических свойств и способов получения, как и создание новых материалов с полезными функциональными характеристиками, составляет важнейшую задачу физики твердого тела. От достижений в этой области зависит состояние не только современной физической науки, но и появление новых технологий (в частности, информационных, нано- и биотехнологий), которые позволяют целенаправленно воздействовать на вещество, управлять происходящими в нем физическими процессами. При этом особое значение имеет исследование эффектов распространения электромагнитных возбуждений в несовершенных кристаллических сверхрешетках и наноструктурах.

Интерес к изучению взаимодействия электромагнитных волн с кристаллами имеет давнюю историю, начиная с работ Г. А. Лоренца [1]. За 70 лет со времени экспериментального подтверждения существования экситонных состояний в твердых телах [2], он еще более возрос. Этому способствует и совершенствование методики и техники эксперимента, в результате которого стало возможным наблюдать более «тонкие» явления, и успехи в области фундаментальных теоретических исследований – на стыке кристаллооптики и теории экситонов возникла теория поляритонов, сформировалась обобщенная кристаллооптика, последовательно учитывающая пространственную дисперсию [3-5].

Огромную область экспериментальных и теоретических исследований на стыке различных научных направлений физики конденсированного состояния занимает разработка новых материалов. На основе современной кристаллооптики решаются многие проблемы квантовой электроники, фото- и оптоэлектроники диэлектриков и полупроводников. Ряд приложений теории уже сегодня нашел свое практическое использование (интегральные схемы, частотные фильтры, оптические линии задержки и т.п.). Учет эффективного взаимодействия фотонов и электронных возбуждений в структуре лежит в основе создаваемых полупроводниковых устройств, сочетающих в одном кристалле и оптические, и волноводные элементы (например, в системах обработки оптической информации). Расширение возможностей электроники идет за счет использования тонких пленок и многослойных структур, пористых структур и массивов квантовых точек, а также несовершенных кристаллических сред с сочетанием различных дефектов кристаллической структуры и композиций из них. Таким образом, представляют интерес проводимые в настоящее время исследования, связанные с модификацией физических свойств неидеальных систем [6], благодаря наличию структурных дефектов, и/или в результате внешних воздействий (например, упругой деформации [7]), и открывающие возможность контролировать распространение электромагнитных возбуждений в полученных функциональных материалах. В связи с появлением оптоэлектронных устройств, использующих различные приложения современной фотоники (от локализации света в нанофотонных волноводах до квантовой обработки информации), изучение взаимодействия несовершенных кристаллических систем с электромагнитным излучением приобретает особую *актуальность*.

Значение обозначенного круга проблем еще более возросло, начиная с 90-х гг. XX ст., в связи с получением и началом технологического использования нанокристаллических систем. Среди задач, которые приходится решать при создании новых нанокompозитных материалов, как источников когерентного излучения, и устройств, работающих на их основе, встает также проблема изучения и формирования новых структур – поляритонных кристаллов [8-10] (особого класса фотонных структур [11]), в которых реализуется сильная связь квантовых возмущений электронной подсистемы (экситонов) среды и оптического поля.

В качестве поляритонных структур могут рассматриваться, например, пространственно периодические системы связанных микропор (резонаторов), а также массивы квантовых точек, встроенных в фотонные наноструктуры [12-14]. Значительно вырос в последнее время интерес к изучению оптических мод в комбинированной системе микрорезонаторов, содержащих квантовые точки. В частности, в [15] представлены резонаторы на основе дефектов в пористых фотонных кристаллах, в [16] продемонстрировано достижение сильной связи между квантовой точкой и таким микрорезонатором. Теоретическому исследованию формирования в цепочке микрорезонаторов квантовых солитонов, связанных с поляритонами нижней дисперсионной ветви (НДВ), посвящены работы [16], [17]. Авторы [16], [17] полагают, что микрорезонаторы могут быть привлекательными для целей квантовой обработки информации. Прогресс, достигнутый в последнее время в плане создания высокодобротных полупроводниковых микрорезонаторов с брэгговскими зеркалами, позволил получить и исследовать бозе-эйнштейновскую конденсацию, а также сверхтекучие свойства НДВ-поляритонов в квантовых ямах, внедренных в полупроводниковые (CdTe/CdMgTe или GaAs) структуры микрорезонаторов [18-20].

Необходимость исследования поляритонных структур породила новую область науки – поляритонику [8], [9], как самостоятельный раздел фотоники. Причем, в зависимости от уровня рассмотрения взаимодействия света с веществом исследования, проводятся в рамках либо полуклассической либо квантовой поляритоники

Заметим, что полуклассический уровень предполагает квантовый подход при описании вещества с сохранением классической трактовки света (см., например, [21]), а в рамках квантового – осуществляется квантование не только вещества, но и излучения [14], [15]. Для иллюстрации вышесказанного в настоящей работе представлен обзор проводимых авторами в рамках поляритоники исследований.

## Естественная оптическая активность неидеальных структур в окрестности экситонного резонанса

В рамках полуклассической поляритоники в работах [21-24] на основе экситонной теории рассмотрены особенности естественной оптической активности (ЕОА) молекулярных кристаллов. Прежде всего, выполнено численное моделирование важнейшей количественной характеристики гиротропии – вращательной способности идеального кристалла – удельного угла вращения  $\rho(\mathbf{s}, \omega)$  плоскости поляризации света [23], [24]:

$$\rho(\mathbf{s}, \omega) = \frac{2\pi\omega^2}{v_0 c^2} s^t \left\{ \frac{2\hbar}{i} \frac{\mathbf{s} \times \vec{e}_{0s\mu}}{\mu E_\mu(\mathbf{s}) - \hbar} \cdot \frac{E_\mu(\mathbf{s}) E_\nu(\mathbf{s}) [\mathbf{P}_{0s\mu} \times \mathbf{P}_{sv:0}] \cdot \mathbf{s} W_{\mu\nu}^t(\mathbf{s})}{\hbar [E_\mu(\mathbf{s}) - \hbar]} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $v_0$  – объем элементарной ячейки,  $\mathbf{s} = \mathbf{k}/k$ ,  $P_{sv:0}^j$  – матричный элемент оператора дипольного момента кристалла, вычисленный на волновых функциях экситонов,  $E_\mu(\mathbf{s})$ ,  $E_\nu(\mathbf{s})$  энергии экситонов при  $k=0$ , соответствующих  $\mu$ -й и  $\nu$ -й экситонным зонам. Величины  $Q_{s\mu:0}^t$  и  $W_{\mu\nu}^t$  определяются [24] равенствами:

$$Q_{0;s\mu}^t = \sum_{f\alpha} \langle \phi_{n\alpha}^{(0)} | i \partial J_{n\alpha}^t(\mathbf{k}) / \partial k^t |_{k=0} | \phi_{n\alpha}^{(f)} \rangle [u_{f\alpha\mu}(\mathbf{s}) - v_{f\alpha\mu}(\mathbf{s})] \quad (2)$$

$$W_{\mu\nu}^t(\mathbf{s}) = \langle \Psi_{s\mu} | i \partial H^{(ex)2}(\mathbf{k}) / \partial k^t |_{k=0} | \Psi_{s\nu} \rangle$$

где  $H^{(ex)}$  – экситонная часть гамильтониана исследуемого кристалла, выделение которой осуществляется путем последовательного применения метода приближенного вторичного квантования к случаю молекулярных экситонов [25]. Согласно этому методу, переход к представлению вторичного квантования производится с помощью определенной системы волновых функций  $\phi_{n\alpha}^{(f)}$  молекул ( $f$  – набор соответствующих квантовых чисел),  $\Psi_{\mu}(\mathbf{k})$  – волновая функция экситонного состояния  $\mu$ -й экситонной зоны ( $\mathbf{k}$  – волновой вектор экситона в первой зоне Бриллюэна),  $\mathbf{J}_{n\alpha}(\mathbf{k})$  – Фурье-образ оператора плотности тока молекулы  $n\alpha$ ,  $u_{f\alpha\mu}(\mathbf{s})$ ,  $v_{f\alpha\mu}(\mathbf{s})$  – коэффициенты преобразования Боголюбова-Тябликова.

Первое слагаемое в (1) соответствует молекулярной составляющей, а второе – кристаллической составляющей вращательной способности. Для кристаллов с примитивной решеткой второе слагаемое в (1) равно нулю и частотная дисперсия описывается лишь первым слагаемым.

Особый интерес представляет исследование  $\rho(\mathbf{s}, \omega)$  неидеальных кристаллических структур вблизи экситонных резонансов, поскольку эта измеряемая характеристика позволяет объяснять частотную дисперсию оптической активности, изучать зависимость ЕОА от концентрации структурных дефектов, а также устанавливать связь экспериментально измеряемой величины удельного угла вращения с микрохарактеристиками среды.

Для конкретизации проблемы в рамках одноуровневой модели в [21] рассмотрены особенности вращательной способности, обусловленные наличием дефектов в структуре топологически упорядоченной кристаллической системы с примитивной кубической решеткой, в узлах которой случайным образом расположены два сорта изотопических молекул и вакансии с концентрациями соответственно  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_v$ . Причем заметим, что в каждом отдельном случае предельное значение величины  $C_v$  определяется типом химической связи меж- и внутримолекулярным взаимодействием молекул [26]).

Полагаем, что для рассматриваемой модельной структуры  $C_v \in (0, 0.15)$ . Далее в рамках приближения виртуального кристалла (ПВК) выполнен численный расчет [26] зависимости вращательной способности  $\rho(\mathbf{s}, \omega, C_2, C_v)$  (с учетом  $C_1 = 1 - C_2 - C_v$ ) от концентрации дефектов структуры для неидеального модельного молекулярного кристалла со случайной изотопической заменой молекул, например, атомов водорода на атомы дейтерия в структуре бензола в интервале  $\hbar$  вблизи типичных [27] для данного соединения молекулярных энергий возбуждения:  $E_1 = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $E_2 = 3,0033 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ .

Анализ полученной зависимости  $\rho(\mathbf{s}, \omega, C_2, C_v)$  (рис. 1) в экситонной области энергетического спектра вблизи энергии  $E_1$  возбуждения молекул при  $\hbar$ , равных  $2,9994 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $2,9996 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $2,9998 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , или вблизи энергии  $E_2$ , равных  $3,0035 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $3,0040 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $3,0050 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , показывает, что для рассматриваемой системы имеются частотные области, которым соответствуют существенно различные зависимости вращательной способности от  $C_2, C_v$ .

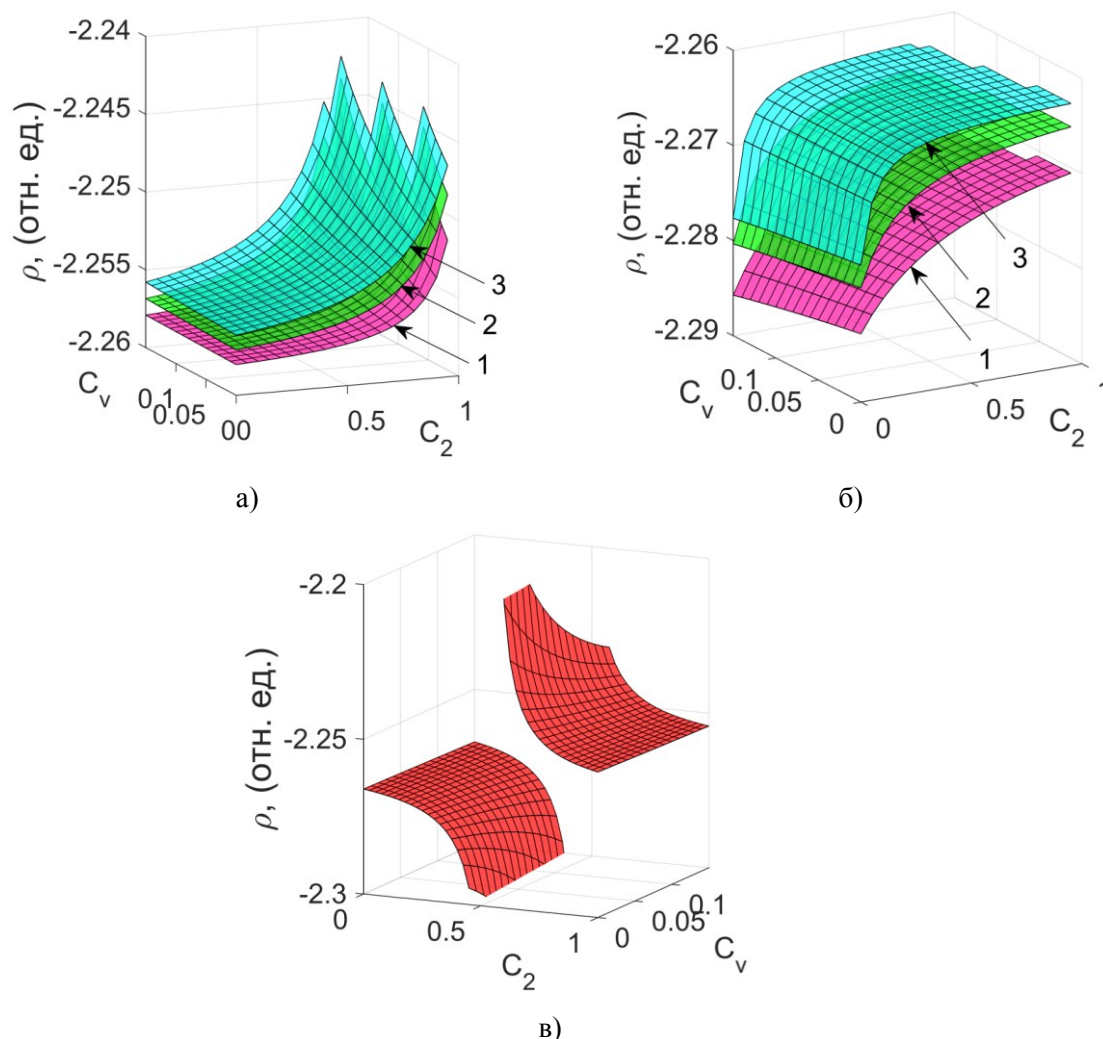


Рисунок 1 – Зависимость вращательной способности от концентрации дефектов структуры в исследуемом неидеальном молекулярном кристалле в экситонной области спектра при  $\hbar$ , равных: а)  $2,9994 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $2,9996 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $2,9998 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , б)  $3,0035 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $3,0040 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ,  $3,0050 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , соответственно поверхностям 1, 2 и 3; в) для  $\hbar = 15 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$

В частности, из полученных графиков, которые приведены (в относительных единицах) на рис. 1а), б) следует, что при удалении  $\hbar$  от энергий возбуждения  $E_1, E_2$  поверхности  $\rho(C_2, C_v)$  иллюстрируют при увеличении величины  $C_2$  резкий рост для  $\hbar$ , в то же время для  $\hbar$  поверхности  $\rho(C_2, C_v)$  становятся более пологими, т.е. концентрационная зависимость вращательной способности от структурных дефектов слабеет. С другой стороны, при малых  $C_2$  для  $\hbar$  оптическая активность менее чувствительна к изменению концентрации  $C_2$ , а для  $\hbar$  график указывает на резкое убывание  $\rho(C_2, C_v)$ . Что касается роли вакансий в исследуемой системе, для частотной области  $\hbar$  ЕОА оказывается более чувствительной к изменению  $C_v$ , чем для  $\hbar$ . На этот факт указывает и график

на рис. 1в, который отражает поведение функции  $\rho(\omega, C_2, C_v)$  при значениях  $\hbar$  внутри интервала  $(E_1, E_2)$ . Появление сингулярности на графике  $\rho(\omega, C_2, C_v)$  для определенных значений концентраций  $C_2, C_v$  структурных дефектов свидетельствует о наличии экситонного резонанса в системе.

## Поляритонные возбуждения в неидеальной 1D решетке микропор, содержащей квантовые точки

В качестве примера исследований, проведенных в рамках квантовой поляритоники, рассмотрим поляритонные возбуждения в неидеальной двухподрешеточной 1D структуре туннельно связанных микропор (резонаторов), содержащих квантовые точки одного сорта в одной из подрешеток (рис. 2).

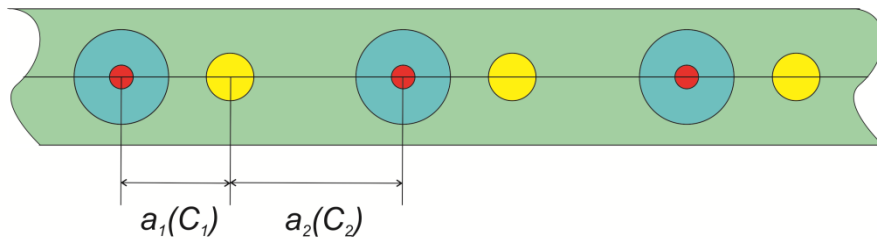


Рисунок 2 – Схема неидеальной двухподрешеточной 1D структуры микропор, содержащих квантовые точки одного сорта в первой подрешетке

В частности, интерес представляет изучение особенностей дисперсии квазичастичных возбуждений в таких системах, вызванных случайными вариациями положений микропор.

В данном случае в рамках общей модели [15] с использованием ПВК спектр поляритонных возбуждений  $\Omega(k)$  определяется в приближении ближайших соседей соотношением:

$$\begin{vmatrix} \hbar & & & & & & \\ & \hbar & & & & & \\ & & -\Omega(k) & & & & \\ & & & \hbar & & & \\ g_1 & & & & \hbar & & \\ & & & & & -A_{12}(k) & \\ 0 & & & & & & \hbar \\ & & & & & & & \hbar \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $\omega_2^{at} = 2\pi \cdot 202 \text{ THz}$  и  $\omega_1^{ph} = 2\pi \times 311 \text{ THz}$ ,  $\omega_2^{ph} = 2\pi \times 331 \text{ THz}$  – соответственно значения частот возбуждения: квантовой точки в микропоре и резонансных фотонных мод, локализованных в резонаторах решетки. Вслед за [15] возьмем те же численные значения Фурье-образов компонентов  $A_{12}(k, C_1, C_2) \approx A_{21}(k, C_1, C_2)$ ,  $V_{11}(k, C_1, C_2)$ ,  $g_1$  – соответственно: матрицы резонансного взаимодействия, характеризующей перекрытие оптических полей резонаторов соседних узлов решетки (следовательно, определяющей вероятность перескока соответствующего электромагнитного возбуждения), матрицы резонансного взаимодействия квантовых точек ближайших узлов, параметров резонансного взаимодействия квантовой точки в любом узле с локализованным в этом узле электромагнитным полем (в данном случае эти величины для разных узлов – одинаковые, поскольку квантовые точки по составу не варьируются).

На рис. 3 представлены поверхности, описывающие дисперсионную зависимость частот  $\Omega_{1,2,3}(k, C_1, C_2)$  исследуемых коллективных возбуждений (поляритонов) в неидеальной решетке микрорезонаторов, содержащих в одной из подрешеток квантовые точки (нумерация поверхностей – снизу вверх). Волновое число  $k$  изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна:  $-\frac{\pi}{d(C_1, C_2)} < k < \frac{\pi}{d(C_1, C_2)}$  (затемненная область плоскости  $(k, C_{1(2)})$  на рис. 3 а – г). Заметим, что форма дисперсионной поверхности  $\Omega_3(k, C_1, C_2)$  на рис. 3 а – г свидетельствует о возможности существования при определенных концентрациях дефектов структуры бозе-эйнштейновского поляритонного конденсата, благодаря наличию локального минимума при значениях  $k \neq 0$  (дополнительно к возможности существования конденсата при  $k = 0$ , на которую указывают поверхности  $\Omega_{1,2}(k, C_1, C_2)$ ).

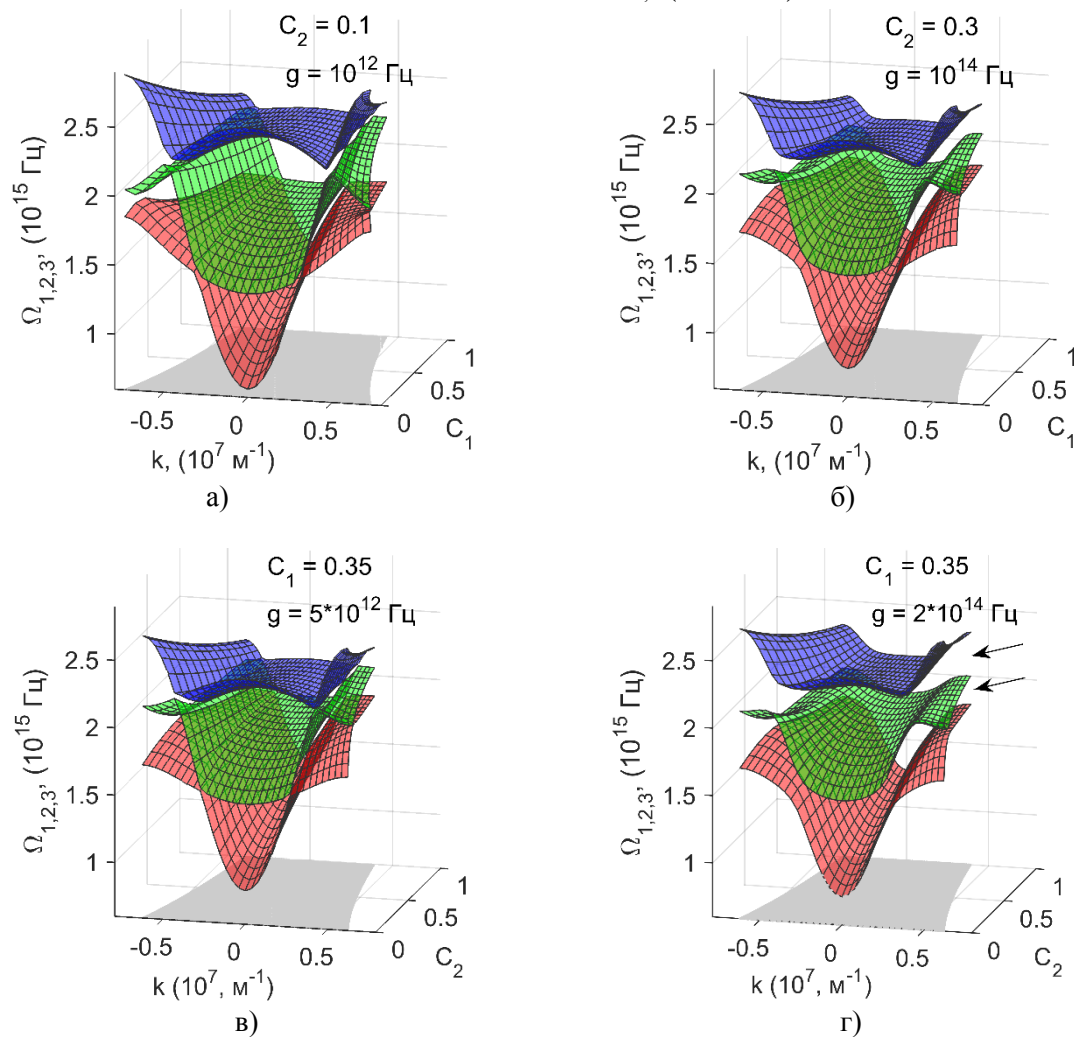


Рисунок 3 – Зависимость дисперсии поляритонов  $\Omega_{1,2,3}(k, C_1, C_2)$  от концентрации дефектов структуры для различных значений параметра  $g \equiv g_1 / \hbar$  резонансного взаимодействия квантовой точки в узле с локализованным в этом узле электромагнитным полем (стрелки указывают на изменение величины «бутылочного горла» в зависимости от величины  $g$ )



Полученные выше особенности поляритонного спектра (рис 3) проявляются в их плотности состояний  $\rho_{1,2,3}(\Omega, C_1, C_2)$  (рис. 4). Применительно к случаю неидеальной одномерной системы микрорезонаторов выражение для функции  $\rho_{1,2,3}(\Omega, C_1, C_2)$  имеет вид:

$$\rho_{1,2,3}(\Omega, C_1, C_2) = \frac{d(C_1, C_2)}{2\pi} \sum_i \frac{1}{\left| \frac{d\Omega_{1,2,3}(k, C_1, C_2)}{dk} \right|_{k_i}} \quad (4)$$

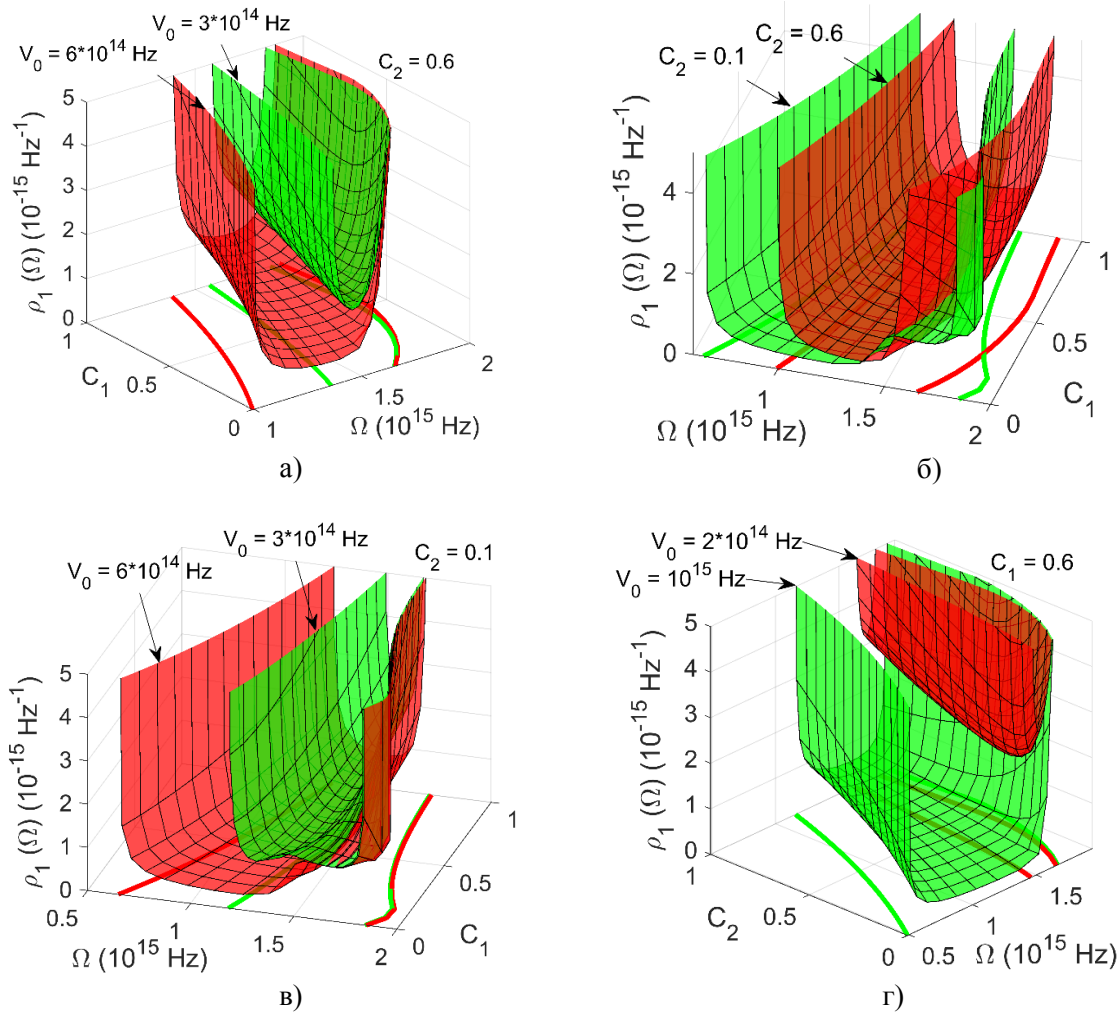


Рисунок 4 – Зависимость плотности состояний  $\rho_1(\Omega, C_1, C_2)$  квазичастиц в исследуемом 1D массиве микропор от концентрации структурных дефектов

В качестве примера рассмотрена плотность состояний поляритонных возбуждений, которые отражает на графиках (рис. 4) функция  $\rho_1(\Omega, C_1, C_2)$ . Хорошо видны особенности плотности состояний – сингулярности Ван Хова, которые, в частности, связаны с наличием локальных экстремумов, в том числе минимумов  $\Omega_1(k, C_1, C_2)$ , при которых групповая скорость возбуждений равна нулю. Поверхности  $\rho_1(\Omega, C_1, C_2)$  отражают и другие особенности поведения функции  $\Omega_1(k, C_1, C_2)$  в  $k$ -пространстве (рис. 3 и рис. 4).



## Заключение

В настоящей работе на примерах предыдущих исследований [7-9], [15], [21-24], [28] авторов представлены две части новой области науки: полуклассическая поляритоника и квантовая поляритоника. В первой части рассмотрены особенности ЕОА неидеального молекулярного кристалла в окрестности экситонного резонанса. Вторая часть поляритоники проиллюстрирована в работе рассмотрением когерентных эффектов, связанных с взаимодействием двухуровневых структурных элементов атомарной подсистемы (квантовых точек, размещенных в туннельно связанных микропорах нанокompозитного материала) с квантованным электромагнитным полем, локализованным в данных порах-микрорезонаторах неидеальной фотонной структуры. В частности, представлена модификация энергетической структуры квазичастичных возбуждений и, следовательно, оптических свойств пористого материала вследствие наличия дефектов структуры.

Рассмотренные модельные структуры – шаг в направлении поиска нового класса функциональных наноструктурированных материалов – поляритонных систем, позволяющих контролировать распространение электромагнитных возбуждений в таких композитных структурах, а следовательно, и скорость передачи сигнала в соответствующем оптоэлектронном устройстве, в частности, путем управляемого внедрения структурных дефектов.

## Список литературы

1. Лорентц Г. А. Теория электронов [Текст] / Г. А. Лорентц. – М. : Гостехиздат, 1956. – 472 с.
2. Гросс Е. Ф. ДАН СССР [Текст] / Е. Ф. Гросс, Н. А. Каррыев. – 1952. – 84(2). – С. 261–266.
3. Пекар С. И. Кристаллооптика и добавочные световые волны [Текст] / С. И. Пекар. – К. : Наукова думка. 1982. – 296 с.
4. Агранович В. М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов [Текст] / В. М. Агранович, В. Л. Гинзбург. – М. : Наука, 1979. – 432 с.
5. Бродин М. С. Поляритоны в кристаллооптике [Текст] / М. С. Бродин, Э. Н. Мясников, С. В. Марисова. – Киев : Наукова думка, 1984.
6. Sunkyuu Yu. Top-Down Design of Disordered Photonic Structures [Текст] / Sunkyuu Yu, Xianji Piao, Namkyoo Park // *Multidisciplinary Approaches Inspired by Quantum and Network Concepts*. – Singapore : Springer Nature, 2019. – 88 p.
7. Superlattices and Microstructures [Текст] / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk, D. A. Gurov, A. V. Kavokin. – 2018. – P. 120. – P. 642–649.
8. Румянцев В. В. Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки [Текст] / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, А. Г. Петренко. – 2017. – 4. – С. 69–78.
9. Romyantsev V. V. Selected topics from non-ideal structure polaritonics, *Conference Proceedings* [Текст] / V.V. Romyantsev, S.A. Fedorov, A.V. Kavokin // 7<sup>th</sup> Int. Conf. “Modern Nanotechnologies and Nanophotonics for Science and Industry”, November 8-12, 2018, Suzdal, Russia). – Vladimir, 2018. – P. 88–89.
10. Phys. Rev. A. [Текст] / E. S. Sedov, A. P. Alodjants, S. M. Arakelian, Y.-L. Chuang, Y. Y. Lin, W.-X. Yang, R.-K. Lee. – 2014. – № 89. – P. 033828.
11. Photonic Crystals. Molding the Flow of Light [Текст] / J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade // Second Edition. – Princeton: Princeton University Press, 2008.
12. The Mesoscopic Nature of Quantum Dots in Photon Emission, in: P. Michler (Ed.) [Текст] / P. Tighineanu, A. S. Sørensen, S. Stobbe, and P. Lodahl // *Quantum Dots for Quantum Information Technologies. Nano-Optics and Nanophotonics*. – Cham: Springer, 2017.
13. Söllner I. Hansen et al., Nature Nanotechnology [Текст] / I. Söllner, S. Mahmoodian, S. Lindskov. – 2015. – № 10. – P. 775.
14. Lodahl P. Quantum Science and Technology [Текст] / P. Lodahl. – 2018. – № 3. – P. 013001.
15. Physica B: Condensed Matter [Текст] / V.V. Romyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, Yu.A. Paladyan. – 2019. – 571(15). – P. 296–300.

16. Alodjants A. P. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* [Текст] / A. P. Alodjants, I. O. Barino., S. M. Arakelian. – 2010. – 43. – P. 095502.
17. *Phys. Rev. A.* [Текст] / E. S. Sedov, A. P. Alodjants, S. M. Arakelian, Y.-L. Chuang, Y. Y. Lin, W.-X. Yang, R.-K. Lee. – 2014. – 89. – P. 033828.
18. *Nature* [Текст] / J. Kasprzak, et al. – 2006. – № 443. – P. 409.
19. *Science* [Текст] / R. Balili, et al. – 2007. – № 316. – P. 1007.
20. *Nature Physics* [Текст] / A. Amo, et al. – 2009. – № 5. – P. 805.
21. *Оптика и спектроскопия* [Текст] / А. Е. Рыбалка, В. В. Румянцев, С. А. Федоров, К. В. Гуменник. – 2021. – № 129(7). – С. 871–875.
22. *Журнал прикладной спектроскопии* [Текст] / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, К. В. Гуменник, А. Е. Рыбалка. – 2022. – № 89(3). – С. 354–359.
23. Romyantsev V. V. *Theory of Optically Active Imperfect Composite Materials. Selected Topics* [Текст] / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk. – Colne : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 52 p.
24. Рыбалка А. Е. *Мониторинг. Наука и технологии* [Текст] / А. Е. Рыбалка, В. В. Румянцев, С. А. Федоров. – 2020. – № 44(2). – С. 79–86.
25. Давыдов А. С. *Теория молекулярных экситонов.* [Текст] / А. С. Давыдов. – М. : Наука, 1968. – 296 с.
26. Стоунхэм А. М. *Теория дефектов в твердых телах* [Текст] / А. М. Стоунхэм. – Т. 2. – М. : Наука, 1978. – 357 с.
27. Броуде В. Л. *Спектроскопия молекулярных кристаллов* [Текст] / В. Л. Броуде, Э. И. Рашба, Е. Ф. Шека. – М. : Энергоиздат, 1981. – 248 с.
28. *Nature. Sci. Rep.* [Текст] / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk, M. Sychanova, A. V. Kavokin. – 2014. – № 4. – P. 6945.
29. Румянцев В. В. *Моделирование генерации экситонных поляритонов в алмазоподобных полупроводниках полем движущейся в-частицы* [Текст] / В. В. Румянцев // *Проблемы искусственного интеллекта.* – 2019. – № 1 (12). – С. 27–40.
30. Галинский М. К. *Математическое моделирование структуры электромагнитного пространственно-временного волнового пакета* [Текст] / М. К. Галинский, В. В. Румянцев, С. А. Федоров // *Проблемы искусственного интеллекта.* – 2021. – № 1 (20). – С. 37–43.

## References

1. Lorentz G.A. *Teoriya elektronov [The theory of electrons]*. M: Gostekhizdat. 1956. 472 p.
2. Gross E.F., Karyev N.A. *DAN SSSR [DAN USSR]*. 1952. 84(2), P. 261-266.
3. Pekar S.I. *Kristaloptika i dobavochnyye svetovyye volny [Crystal Optics and Additional Light Waves]*, Benjamin/Cummings Publishing Company, 1983
4. Agranovich V.M., Ginzburg V.L. *Kristaloptika s uchetom prostranstvennoy dispersii i teoriya eksitonov [Spatial Dispersion in Crystal Optics and the Theory of Excitons]*, John Wiley & Sons, 1966. 432p.
5. Brodin M.S., Miasnikov E.N., Marisova S.V. *Polyaritony v kristaloptike [Polaritons in Crystal Optics]*, Naukova Dumka Publishers, 1984.
6. Sunkyu Yu, Xianji Piao, Namkyoo Park. *Top-Down Design of Disordered Photonic Structures. Multidisciplinary Approaches Inspired by Quantum and Network Concepts.* Singapore: Springer Nature. 2019. 88p.
7. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Gurov D.A., Kavokin A.V. *Superlattices and Microstructures*. 2018. 120, P. 642-649.
8. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Petrenko A.G. *Vestnik DonNU. Ser. A: Yestestvennyye nauki [Bulletin of DonNU. Ser. A: Natural Sciences]*. 2017. 4. P. 9-78.
9. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Kavokin A.V. *Selected topics from non-ideal structure polaritonics*, Conference Proceedings. 7<sup>th</sup> Int. Conf. “Modern Nanotechnologies and Nanophotonics for Science and Industry”, November 8-12, 2018, Suzdal, Russia) Vladimir, 2018, P. 88-89
10. Sedov E. S., Alodjants A. P., Arakelian S. M., Chuang Y.-L., Lin Y. Y., Yang W.-X., Lee R.-K. *Phys. Rev. A.* 2014. 89, P. 033828.
11. Joannopoulos J.D., Johnso S.G., Winn J.N., Meade R.D. *Photonic Crystals. Molding the Flow of Light.* Second Edition. Princeton: Princeton University Press, 2008.
12. Tighineanu P., Sørensen A. S., Stobbe S., and Lodahl P. *The Mesoscopic Nature of Quantum Dots in Photon Emission*, in: P. Michler (Ed.), *Quantum Dots for Quantum Information Technologies. Nano-Optics and Nanophotonics*, Cham: Springer, 2017.
13. Söllner I., Mahmoodian S., Lindskov S. Hansen et al., *Nature Nanotechnology* 2015. 10. P. 775.

14. Lodahl P. *Quantum Science and Technology*. 2018. 3. P.013001
15. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Paladyan Yu.A. *Physica B: Condensed Matter*. 2019. 571(15). P. 296-300
16. Alodjants A.P., Barino I. O., Arakelian S. M. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2010. 43, P. 095502.
17. Sedov E. S., Alodjants A. P., Arakelian S. M., Chuang Y.-L., Lin Y. Y., Yang W.-X., Lee R.-K. *Phys. Rev. A*. 2014. 89. P. 033828.
18. Kasprzak J., et al., *Nature*. 2006. 443. P. 409.
19. Balili R., et al. *Science*. 2007. 316. P. 1007.
20. Amo A., et al. *Nature Physics*. 2009. 5. P. 805.
21. Rybalka A.Ye, Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy]. 2021. 129(7). P. 871-875.
22. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Rybalka A.Ye. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy]. 2022. 89(3). P. 354-359.
23. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. *Theory of Optically Active Imperfect Composite Materials. Selected Topics*. Colne: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 52p.
24. Rybalka A.Ye., Romyantsev V.V., Fedorov S.A. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* [Monitoring Science and Technology]. 2020. 44(2). P. 79-86.
25. Davydov A.S. *Teoriya molekulyarnykh eksitonov* [The theory of molecular excitons], M., Nauka, 1968, 296 p.
26. Stoneham A.M. *Teoriya defektov v tverdykh telakh* [Theory of defects in solids]. Vol.2. M.: Nauka. 1978. 357 p.
27. Brode V.L., Rashba E.I., Sheka E.F. *Spektroskopiya molekulyarnykh kristallov* [Spectroscopy of molecular crystals]. M., Energoizdat, 1981, 248p.
28. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Sychanova M., Kavokin A.V. *Nature. Sci. Rep.* 2014. 4. P. 694
29. Romyantsev V. V. Modelirovaniye generatsii eksitonnykh polaritonov v almazopodobnykh poluprovodnikakh polem dvizhushcheyasya b-chastitsy [Simulation of exciton polariton generation in diamond-like semiconductors by the field of a moving b-particle]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of artificial intelligence]. 2019, No 1 (12), P. 27-40.
30. Galinsky M. K., Romyantsev V. V., Fedorov S. A. Mathematical Modeling of the Structure of an Electromagnetic Space-Time Wave Packet *Problems of Artificial Intelligence* [Problems of Artificial Intelligence], 2021, no. 1(20), pp. 37-43.

## RESUME

**V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov**  
**Introduction to Polaritonics**

Due to the appearance of optoelectronic devices using various applications of modern photonics (from localization of light in nanophotonic waveguides to quantum information processing), the study of the interaction of imperfect crystal systems with electromagnetic radiation is becoming particularly relevant.

Numerical simulation using the virtual crystal approximation, theoretical analysis of the results.

The need to use polariton structures has given rise to a new field of science – polaritonics, as an independent section of photonics. Moreover, depending on the level of consideration of the interaction of light with matter, studies are carried out in the framework of either semi-classical or quantum polaritonics. This fact is illustrated in this paper by examples of obtaining specific modeling results.

Using the examples of the authors' previous research, two parts of a new field of science are presented in the paper: semi-classical polaritonics and quantum polaritonics. In the first part, the features of the EOA of an imperfect molecular crystal in the vicinity of exciton resonance are considered. The second part of polaritonics is illustrated by the consideration of coherent effects associated with the interaction of structural elements of an atomic subsystem (quantum dots placed in tunnel-connected micropores of a nanocomposite material) with a quantized electromagnetic field localized in these pores-microresonators of an imperfect

photonic structure. In particular, a modification of the energy structure of quasi-particle excitations and, consequently, the optical properties of a porous material due to the presence of structural defects is presented.

The considered model structures are a step towards the search for a new class of functional nanostructured materials – polariton systems that allow controlling the propagation of electromagnetic excitations in such composite structures and, consequently, the signal transmission rate in the corresponding optoelectronic device, in particular, by controlled introduction of structural defects.

## РЕЗЮМЕ

*В. В. Румянцев, С. А. Федоров*

*Введение в поляритонику*

В связи с появлением оптоэлектронных устройств, использующих различные приложения современной фотоники (от локализации света в нанофотонных волноводах до квантовой обработки информации), изучение взаимодействия несовершенных кристаллических систем с электромагнитным излучением приобретает особую актуальность.

Численное моделирование с использованием приближения виртуального кристалла, теоретический анализ результатов.

Необходимость использования поляритонных структур породила новую область науки – поляритонику, как самостоятельный раздел фотоники. Причем, в зависимости от уровня рассмотрения взаимодействия света с веществом исследования, проводятся в рамках либо полуклассической, либо квантовой поляритоники. Этот факт проиллюстрирован в данной работе на примерах получения конкретных результатов моделирования.

В работе на примерах предыдущих исследований авторов представлены две части новой области науки: полуклассическая поляритоника и квантовая поляритоника. В первой части рассмотрены особенности ЕОА неидеального молекулярного кристалла в окрестности экситонного резонанса. Вторая часть поляритоники проиллюстрирована рассмотрением когерентных эффектов, связанных с взаимодействием структурных элементов атомарной подсистемы (квантовых точек, размещенных в туннельно связанных микропорах нанокompозитного материала) с квантованным электромагнитным полем, локализованным в данных порах-микрорезонаторах неидеальной фотонной структуры. В частности, представлена модификация энергетической структуры квази-частичных возбуждений и, следовательно, оптических свойств пористого материала вследствие наличия дефектов структуры.

Рассмотренные модельные структуры – шаг в направлении поиска нового класса функциональных наноструктурированных материалов – поляритонных систем, позволяющих контролировать распространение электромагнитных возбуждений в таких композитных структурах, а следовательно, и скорость передачи сигнала в соответствующем оптоэлектронном устройстве, в частности, путем управляемого внедрения структурных дефектов.

Статья поступила в редакцию 20.04.2022.