## УДК 537.8:548.313:544.228



Высикайло Ф.И.

# Открытие стоячих экситонов большого радиуса и классификация мерцающих кристаллов Часть 1. Общая постановка задачи о самоорганизации полых квантовых резонаторов в легированных кристаллах

Высикайло Филипп Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Московский радиотехнический институт РАН (Москва), ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов» (Троицк).

E-mail: filvys@yandex.ru

Показано, что в легированных кристаллах, в области внедрения в кристаллическую решётку инородного атома, самоформируются **наноразмерные** структуры (стоячие є-волны или є-резонаторы) с квантовыми (волновыми) профилями относительной диэлектрической проницаемости є(*r*). Исследован способ кумуляции энергии возбуждения (экситонов) в таких кумулятивно-диссипативных структурах, существенно отличающихся от диффузионных диссипативных структур Пригожина – Тьюринга – Колмогорова.

Ключевые слова: кумулятивная квантовая механика, стабильные и метастабильные квантовые точки, квантовые линии, модель Гамова α-распада атомного ядра, поляризационные квантово-размерные эффекты, возбуждённые кристаллы в опорных кристаллах, бикристалл, связанные экситоны Высикайло.

#### Введение

В настоящее время энергия трансформируется в электрическую и тепловую – как наиболее удобные и необходимые для практического применения в производстве и быту виды – преимущественно с помощью тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Станции кумуляции, аккумуляции и трансформации солнечной энергии экологически чисты, но вносят малую долю в общую выработку энергии. Трудности, препятствующие созданию экологически чистых накопителей энергии, заключены в отсутствии технологий и детального понимания процессов кумуляции (фокусировки) и диссипации (рассеивания) электромагнитной энергии, трансформирующейся в возбуждения материальных нанометровых частиц. Системные исследования поляризующихся и заряженных конвективных кумулятивно диссипативных фрактальных (состоящих из заряженных частей или фракций) структур наномира только начинаются. И это не смотря на то, что во многих лабораториях мира ведутся работы по созданию изделий на квантовых точках (КТ) и квантовых линиях (КЛ), имеющих нанометровые размеры. Понятие о КТ и их регулярных системах пересекается с такими понятиями как экситоны и кумулятивно-диссипативные наноразмерные структуры (КДС) и их регулярные системы – кумулятивно-диссипативные кристаллы (сверхрешётки и др.). Тем не менее, осознание, что нанотехнологии являются технологиями, связанными со структурными кумулятивно-диссипативными явлениями, определяемыми фокусировкой (кумуляцией) к у лоновскими силами, потенциальными барьерами или разделением объёмного заряда<sup>1</sup>, пока не занимает должного места в науке. При этом неограниченные кумулятивные процессы в квантовой механике наномира ошибочно запрещаются в классической квантовой механике, требующей регулярности у-функций частиц всюду, в том числе и в полых сферически и цилиндрически симметричных резонаторах, сгребающих к их центру у-функции частиц, с резонансной энергией. При этом собственные энер-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Vysikaylo Ph.I. "Physical Fundamentals of Hardening of Materials by Space Charge Layers." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 46.4 (2010): 291–298; Popov M., Buga S., Vysikaylo Ph., Stepanov P., Tatyanin E., Medvedev V., Denisov V., Kirichenko A., Aksenenkov V., Skok V., Blank V. "C<sub>60</sub> – doping of Nanostructured Bi-Sb-Te Thermoelectrics." Phys. Status Solidi A. 208 (2011): 105–113; Vysikaylo Ph.I. "Cumulation of de Broglie Waves of Electrons, Endoions and Endoelectrons of Fullerenes, and Resonances in the Properties of Nanocomposite Materials with Spatial Charge Layers." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 46.6 (2010): 547–557; Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part I: Prerequisites and Fundamentals of CQM." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 48.4 (2012): 293–305; Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics in Describing the Vysikaylo Polarization Quantum\_Size Effects." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 48.5 (2012): 395–411; Bысикайло Ф.И. Поляризация аллотропных полых форм углерода и её применение в конструировании нанокомпозитов // Нанотехника. 2011. T. 1. № 25. C. 19–36.

гетические спектры –  $E_{n-1/2}$  с ограниченно кумулирующими к центру резонатора  $\psi_{n-1/2}$  – функциями в случае плоскостной симметрии резонатора сохраняются, в том числе и основной тон (полуволновой или  $\pi$ -резонанс). Часто наблюдения за спектрами комбинационного рассеивания связать со структурами резонаторов с плоскостной симметрией не возможно, так как во многих экспериментах явно участвуют структуры со сферической симметрией<sup>1</sup>. Решение таких парадоксов, обусловленных неограниченной кумуляцией  $\psi_{n-1/2}$  в центре полого сферически или цилиндрически симметричного квантового резонатора в квантовой механике проведено автором в работах, приведенных в обеих подстраничных ссылках. В данных работах доказано, что следует для всех симметрий полых квантовых резонаторов учитывать полный собственный энергетический спектр (а не только спектр полных 2*π*-резонансов).



Рис. 1а. Задача Гамова-де Бройля-Гельмгольца. Схема метастабильной (квазиоткрытой) квантовой точки или линии с поляризационном зеркалом, захватывающим электрон с энергией E > 0 в поляризационную ловушку с характерным размером R+rind. Поляризационное зеркало затемнено. Модель соответствует модели Г.А. Гамова, применённой им впервые для моделирования α-распада атомных ядер. ΔE<sub>n-1/2,n</sub> энергия расщепления Высикайло уровней с главным квантовым числом n.

Рис. 1б. Задача де Бройля - Бора - Гельмгольца. Схема стабильной (закрытой) квантовой точки с окружающим её бесконечным потенциальным кулоновским барьером для частиц с полной энергией меньше нуля. Для описания энергетического спектра квантовой точки применяется модель водородоподобного атома с «радиусом орбиты» – а<sub>n</sub> и а<sub>n-1/2</sub> – характерные радиусы квантового резонатора с кулоновским потенциалом для квантовых частиц с главным квантовым числом n и энергиями  $E_n$  (с асимметричной  $\psi_n$ ) и  $E_{n-1/2}$  (с симметричной  $\psi_{n-1/2}$ ), соответственно. ΔЕ<sub>n-1/2,n</sub> - энергия расщепления Высикайло уровней с главным квантовым числом n.

В будущем КТ, экситоны и иные КДС и их регулярные системы - это огромное перспективное поле деятельности в квантовой электронике, энергетике, медицине, биологии и иной практике. Возможно применение КТ при создании из них мерцающих кристаллов или сверхрешёток не только в ювелирной промышленности, но и для мощных СВЧ транзисторов с частотами до 10<sup>11</sup> Гц. Не менее важно направление – использование заряженных КТ и КЛ для улучшения механических и иных характеристик солнечных батарей и тер-моэлектриков<sup>2</sup>. Сферически симметричные фуллерены и замкнутые нанотрубоки могут, из-за поляризационных сил, захватывать свободные электроны с резонансной кинетической энергией E<sub>n</sub> (до 6 шт. на фуллерен) и образовывать метастабильные отрицательно заряженные сферические КТ с энергией электронов больше нуля<sup>3</sup>. Этот квантоворазмерный поляризационный эффект Высикайло первого типа, с характерным размером ~1 нм, описан автором аналитически с помощью модели (рис. 1а), восходящей к модели Гамова – де Бройля – Гельмгольца, применённой Гаммовым для моделирования α-распада атомных ядер. Проведенный автором анализ возможных решений первой краевой задачи Гельмгольца<sup>4</sup> и сравнение аналитических расчётов с экспериментальными сечениями захвата полыми фуллеренами электронов с резонансными энергиями<sup>5</sup> позволили автору не только сформулировать, но и верифицировать с помощью этих экспериментов основы кумулятивной квантовой механики (ККМ)<sup>о</sup>.

В данной работе ККМ будет применена для описания спектров комбинационного рассеивания (КРС) лазерного излучения на открытых автором стоячих экситонах Высикайло (В) в легированных бором кристаллах алмаза, нахождения профиля относительной диэлектрической проницаемости – ε(r) и обобщения полученных результатов на явления в других легированных кристаллах (часть 1 и 2). Полученные результаты позволяют надеяться на создание бикристаллов на базе опорных кристаллов, легированных специальными примесями, формирующими мерцающие кристаллические решётки с нанометровыми расстояниями между узлами.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах. Парадоксы в квантовой механике и их решение на базе кумулятивной квантовой механики // Инженерная физика. 2013. № 3. С. 15–48. 2 Vraikardo Ph. I. "Physical European of Materials..." Вспол. М. Рисс S. Varikardo Ph. Stananov, P. Totrania E.

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Vysikaylo Ph.I. "Physical Fundamentals of Hardening of Materials..."; Popov M., Buga S., Vysikaylo Ph., Stepanov P., Tatyanin E., Medvedev V., Denisov V., Kirichenko A., Aksenenkov V., Skok V., Blank V. *Op. cit.* <sup>3</sup> *Ibid.*; Vysikaylo Ph.I. "Cumulation of de Broglie Waves of Electrons..."; Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM)." Part I & II; Высикайло Ф.И. Поляризация аллотропных полых форм углерода...; Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся

кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированых кристаллах... <sup>5</sup> См.: Ророv М., Buga S., Vysikaylo Ph., Stepanov P., Tatyanin E., Medvedev V., Denisov V., Kirichenko A., Aksenenkov V., Skok V., Blank V. *Op. cit.*; Туктаров Р.Ф., Ахметьянов Р.Ф., Шиховцева Е.С., Лебедев Ю.А., Мазунов В.А. Плазменные ко-лебания в молекулах фуллеренов при электронном захвате // Письма ЖЭТФ, 2005. Т. 81. № 4. С. 207–211; Jaffke T., Illenbergen E., Lezius M., Matejcik S., Smith D. Mark T.D. "Formatin of  $C_{60}$  and  $C_{70}$  by Free Electron Capture. Activation Energy and Effect of the Internal Energy on Lifetime." *Chem. Phys. Lett.* 226 (1994): 213–218; Huang J., Carman H.S. Compton R.N. "Low-Energy Electron Attachment to  $C_{60}$ ." *J. Phys. Chem.* 99 (1995): 1719–1726. <sup>6</sup> Vysikaylo Ph.I. "Cumulation of de Broglie Waves of Electrons..."; Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM)."

Part I & II; Высикайло Ф.И. Поляризация аллотропных полых форм углерода...; Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах...

Как было доказано<sup>2</sup>, плотность вероятности нахождения частицы в слое dr квантового полого резонатора при любом типе его симметрии определяется:  $W_{\rm n}(r)dr =$  $\cos^{2}(k_{n-1/2}r)dr$  или  $\sin^{2}(k_{n}r)dr$ . Нерегулярные в центре резонатора соs-решения регуляризируются в центре резонатора (рис. 2) соответствующим типу симметрии нормировочным геометрическим коэффициентом, рав-ным  $\chi(r) = 2^k \pi^{1/2} r^k$ , при  $k \neq 0$  (при плоскостной симметрии  $k = 0, \chi = 1$ ; при цилиндрической k = 0.5 и при сферической симметрии k = 1)<sup>3</sup>. При этом нет необходимости для полых резонаторов со сферической и цилиндрической симметрией выбрасывать решения с cosволнами, как это делается в работе Дирака<sup>4</sup>. Стратификация вероятности нахождения частицы в объёме квантового резонатора аналогично определяется энергией частицы, т.е. квадратом квантовых чисел ((n-1/2)<sup>2</sup> для соз-волн и  $n^2$  для sin-волн) для любого типа симметрии полого резонатора (рис. 2)<sup>5</sup>. ККМ позволила реабили-



Рис. 2. Зависимость от расстояния до центра полого квантового резонатора регуляризированных sin-(ψ1) и cos-решений (ψ1-1/2) при n=1. Регуляризация производится соответствующим типу симметрии геометрическим коэффициентом, равным  $\chi(r)$  =  $2^{k} \Pi^{1/2} r^{k}$ , при  $k \neq 0$  (при  $k = 0, \chi = 1$ )<sup>1</sup>.

тировать и модифицировать модели Френкеля – Ванье – Мотта – де Бройля – Бора – Гельмгольца и применить авторскую модель стоячих экситонов Высикайло (В) для аналитического описания с точностью до третьего знака КРС и вычисления профиля относительной диэлектрической проницаемости –  $\varepsilon(r)$  на наноразмерах от внедрённого в решётку алмаза атома бора<sup>6</sup>. Без привлечения ККМ, 2/3 (больше половины) линий КРС в легированных бором алмазах невозможно идентифицировать в рамках квантовой механики, требующей ограниченности собственных у-функций.

В данной работе предложен новый физико-химический способ формирования квантовых точек – стоячих экситонов Высикайло, с характерными нанометровыми размерами

$$r_n = n^2 \varepsilon(r) a_0$$

близкими к размерам экситонов Ванье - Мотта . Размеры бегущих экситонов Ванье - Мотта определяются согласно теории Бора для атома водорода -

$$r_a = \frac{m_0}{m_r} n^2 \varepsilon_k a_0$$

(см. подробнее параграф «Экситоны»). В отличие от модели экситонов Ванье – Мотта – Бора – Гельмгольца – Шредингера, в которой относительная диэлектрическая проницаемость считается постоянной по кристаллу  $\varepsilon_c$  = const, в авторской модели стоячих экситонов В относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = \varepsilon(r)$ , т.е. является функцией от расстояния до центра экситона (легирующего центра). Именно профиль  $\varepsilon(r) > \varepsilon_c = \text{const } \mathbf{b}$  области легирующей примеси обеспечивает кумуляцию электромагнитных волн в эту область. Это повышает вероятность возбуждения экситона в области легирующего центра. Значит, локальное увеличение  $\varepsilon(r) > \varepsilon_c$  обеспечивает большую рождаемость экситонов в области легирующего центра при облучении всего легированного кристалла. Отличие относительной диэлектрической проницаемости невозмущённого кристалла с  $\varepsilon_c$  = const от  $\varepsilon(r)$  в нанометровой области легирующего центра обеспечивает и продолжительную локализацию в этой области повышенного возбуждения экситонов, что и делает экситон стоячим. Связана такая локализация с тем, что собственная энергия  $E_n \sim 1/(\varepsilon(r)n)^2$  стоячего экситона зависит от  $\varepsilon(r)$  и из-за этой зависимости не совпадает с собственными энергиями экситонов в невозмущённом кристалле  $E_n \sim 1/(\epsilon_k n)^2$ . Отсутствие энергетического резонанса и приводит к локализации стоячего экситона в области легирующего центра.

В первой части данной работы рассмотрим общую постановку задачи о самоорганизации и формировании в мерцающие кристаллы стоячих экситонов большого радиуса, с размерами близкими к размерам экситонов Ванье – Мотта (ВМ), в легированных кристаллах. Эти квантовые резонаторы самоформируются профилем относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(r)$  в области внедрения в кристаллическую решётку алмаза атомов легирующей примеси. Характерные профили  $\varepsilon(r)$ , т.е. характерные размеры стоячих  $\varepsilon$ -волн в легированных бором алмазах, автором определены на основании экспериментальных КРС и разработанной автором модели стоячих экситонов Высикайло.

Во второй части будут приведены сравнения конкретных экспериментальных КРС, полученных в многочисленных экспериментах с аналитическими расчётами энергетических резонансных спектров по модифицированной автором модели Ванье – Мотта – де Бройля – Бора – Гельмгольца – Шредингера (первой краевой неоднородной задачи Гельмгольца с профилем кулоновского потенциала  $\sim 1/r$ ) для **полого** резонатора.

#### 1. Экситоны

Представление об экситоне введено в 1931 г. Я.И. Френкелем для объяснения отсутствия фотопроводимости некоторых кристаллов: при поглощении света поглощённая энергия расходуется не на создание носителей

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Там же

 <sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики. М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ. 1979. 480 с.
 <sup>5</sup> Vysikaylo Ph.I. "Cumulation of de Broglie Waves of Electrons..."; Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM)."
 Part I & II; Высикайло Ф.И. Поляризация аллотропных полых форм углерода...; Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах... <sup>6</sup> Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах...

заряда, а на образование экситона – локализованного энергетического возбуждения, которое распространяется по невозмущённому кристаллу в виде уединённой волны энергии. Этим Френкель теоретически обосновал возможность перехода одного из атомов (или молекул) кристалла в возбуждённое состояние и последовательную передачу этого возбуждения от одного атома в кристалле к другому, т. е. перенос квантового возбуждения на макроскопические расстояния.

Так естественно возникли задачи о: 1) кумуляции энергии электромагнитных волн в энергию возбуждения – экситона, 2) локализации и самофокусировке экситонов и 3) трансформации их энергии, переносе и накоплении этой энергии в аккумуляторе и т.д.

Экситон (от лат. excito – возбуждаю) – квазичастица, соответствующая электронному возбуждению в кристалле диэлектрика или полупроводника, мигрирующему по кристаллу в виде локализованной (сфокусированной) кулоновским потенциалом (рис. 1) волны энергии, но не связанному с переносом электрического заряда и массы (в виде частиц). Однако известно, что перенос энергии без массового носителя возможен только в виде электромагнитной волны. Решение этого парадокса в теории экситонов без привлечения виртуальных электромагнитных волн возможно, если: 1) при перемещении в 3D пространстве возбужденного электрона на его место одновременно из этой области приходит не возбуждённый электрон с меньшей кинетической энергией и 2) при резонансном обмене энергией возбуждения между различными электронами, т.е. возбуждение передается от одного электрона к другому, который и формирует с соответствующей дыркой новый экситон.

При этом все обменивающиеся пространственными местами уровни возбуждения (соответствующие им энергии электронов) должны находиться в квантовом резонансе, т.е. полная энергия невозбуждённого электрона –  $E_1$  с соответствующей кинетической энергией и замещающая его энергия –  $E_n$  возбужденного электрона обязательно должны принадлежать общему собственному энергетическому спектру  $(E_n \sim 1/(\varepsilon_k n)^2)$ . Если относительная диэлектрическая проницаемость кристалла  $\varepsilon(r)$  меняется от расстояния до внедрённого в кристаллическую решётку атома легирующей примеси, то резонансного обмена энергиями электронов происходить не может. Это локализует экситон, родившийся или сфокусированный кулоновским потенциалом (рис. 1), в области легирующей примеси, где  $\varepsilon(r)$  имеет другие значения, чем в удалённых от атома примеси местах. Понятие экситон близко к понятию уединенной волны или солитона. При поглощении энергии формируются разнесённые в пространстве электроны и дырки. Они на любых расстояниях испытывают кулоновское взаимодействие. Взаимодействие приводит к тому, что электроны и дырки следует рассматривать в 3D-пространстве как связанную электронно-дырочную пару – экситон. В этом случае экситон – это квазичастица, возникающая при бестоковых возбуждениях в полупроводниках. В зависимости от характера связи в литературе отмечают<sup>1</sup> два типа экситонов, локализующихся в потенциальных ямах (рис. 16). Первый тип – **свободные** экситоны большого радиуса (экситоны ВМ), характерные размеры которых достигают десятков и сотен межатомных расстояний. Второй тип - связанные экситоны малого радиуса (экситоны Френкеля), их размеры не превышают в кристалле межатомного расстояния<sup>2</sup>.

Свободные экситоны Ванье-Мота – экситоны большого радиуса исследованы в 1937–1938 Дж. Ванье (G. Wannier)<sup>3</sup> и Н. Моттом (N. Mott)<sup>4</sup>. Такой экситон перемещается по кристаллу виде связанных состояний электрона и дырки, которые могут находиться на различных узлах кристаллической решётки (перемещающийся экситон большого радиуса). Обычно, экситон Френкеля (Ф) представляют<sup>э</sup> как предельный случай, когда связанные электрон и дырка сидят на одном и том же узле (экситон малого радиуса). Экситон ВМ чаще наблюдается в полупроводниках и диэлектриках с  $\varepsilon_k > 1$ .

Экситон Ванье – Мотта – де Бройля – Бора представляет собой водородоподобное связанное состояние электрона и дырки. Модель BM учитывает, что эффективные массы электрона me и дырки mh отличаются от массы свободного электрона *m*<sub>0</sub> и, что энергия кулоновского взаимодействия электрона и дырки в кристалле ослаблена в ε<sub>k</sub><sup>2</sup> раз наличием постоянной по кристаллу относительной диэлектрической проницаемости среды – є<sub>k</sub>. Размеры радиуса взаимодействия возрастают в є<sub>k</sub> раз. Полная энергия электрона в экситоне BM, рис. 1 $\delta$ ) выражается как и для атома водорода<sup>6</sup>):

$$E_n = -\frac{m_r e^4}{8(\varepsilon_k \varepsilon_0 h)^2} \cdot \frac{1}{n^2},\tag{1}$$

где  $m_r = m_e m_h / (m_e + m_h)$  – приведенная масса системы (электрона и дырки);  $\varepsilon_k$  – постоянная диэлектрическая проницаемость кристалла; *n* – главное квантовое число экситона. При *n* = 1 получаем энергию связи для основного состояния экситона ВМ. Для состояния с главным квантовым числом n, в соответствии с атомной моделью Бора, определяется характерный радиус экситона  $r_a(n)^7$  (рис. 16):

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика: Учеб. пособ. для вузовие Т. 9: Статистическая физика. Ч. 2: Теория конденсированного состояния. 4-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 496 с.; Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: Учеб. пособие. М.: Техносфера, 2007. 300 с. [Электронный ресурс] // Кафедра физики твёрдого тела Петрозаводского государственного университета Режим доступа: http://dssp.petrsu.ru/p/tutorial/ftt/giv.htm.

Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Wannier G.H. "The Structure of Electronic Excitation Levels in Insulating Crystals." *Physical Review* 52.3 (1937): 191–197.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Mott N.F. "On the Absorption of Light by Crystals." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 167.930 (1938): 384–391. См. также: Gurney R.W., Mott N.F. "Luminescence in Solids." *Transactions of the* Faraday Society 35 (1939): 69–73

Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Указ. соч.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Там же

<sup>7</sup> Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Указ. соч.

$$r_a = \frac{m_0}{m_r} n^2 \varepsilon a_0 \,. \tag{2}$$

Полная энергия свободного экситона ВМ состоит из суммы его кинетической энергии

$$\frac{\hbar^2 k^2}{2(m_e + m_h)}$$

определяемой движением центра масс и потенциальной энергии  $E_n^{-1}$ :

$$E(k) = +E_{n} + \frac{\hbar^{2}k^{2}}{2(m_{e} + m_{h})} = -\frac{m_{r}e^{4}}{8(\varepsilon_{k}\varepsilon_{0}h)^{2}} \cdot \frac{1}{n^{2}} + \frac{\hbar^{2}k^{2}}{2(m_{e} + m_{h})},$$
(3)

где k – волновой вектор экситона как целой частицы,  $a_0$  – радиус невозбуждённого атома Бора.

Каждая из зависимостей E(k) с заданным n образует экситонную зону. Формулы (1)-(3) следует рассматривать для бегущих экситонов как оценочные, т. к. они не учитывают таких факторов, как, например, влияние сложной зонной структуры кристалла, взаимодействие электронов и дырок с фононами и т.д. Для полупроводни-ков типа Ge и Si и групп  $A^{II}B^V$ ,  $A^{II}B^V$  типичны значения  $m_r = 0.1 m_0$ ,  $\varepsilon_k \sim 10$ , что приводит к значениям  $E_n \sim 10^{-2}$  эВ, *a*<sub>r</sub>~10<sup>-8</sup> м. Энергии связи экситона в полупроводниках много меньше характерных атомных энергий, а их радиусы много больше межатомных расстояний в кристалле. Большие значения *a*<sub>r</sub> означают, что экситон BM по существу есть макроскопическое энергетическое образование в кристалле и глобальная структура кристалла лишь определяет параметры *ε*<sub>k</sub> и *m*<sub>г</sub>. Поэтому экситон ВМ в кристалле рассматривают как квазиатом, движущийся в вакууме с постоянной относительной диэлектрической проницаемостью є<sub>к</sub>=const>1<sup>2</sup>. Искажение структуры кристалла присутствием экситона или даже большого числа экситонов в модели ВМ считается пренебрежимо мало<sup>3</sup>. Экспериментально водородоподобная структура энергетического спектра экситона BM  $E_n \sim E_1/n^2$  впервые наблюдалась Е.Ф. Гроссом в 1952 г. в кристаллах Cu<sub>2</sub>O при температуре жидкого азота, когда удалось наблюдать девять линий водородоподобной экситонной серии (исключая уровень с главным квантовым числом  $n=1)^4$ .

Связанные экситоны Френкеля – это локализованный на дефекте экситон малого радиуса, являющийся связанным. Связанные экситоны образуются на нейтральных центрах, хотя возможно их образование и на заряженных дефектах. Примесный атом искажает потенциальную энергию электрона в решетке, образуя при этом глубокую потенциальную яму, считается не превышающую в размере межатомное расстояние<sup>5</sup> (рис. 16). Энергетический уровень основного состояния экситона Ф, считается<sup>6</sup>, находится ниже аналогичного уровня экситона ВМ, т. е. энергия диссоциации Eex для связанного экситона Ф больше, чем для свободного экситона ВМ. Для некоторых материалов энергия диссоциации может составлять доли электрон вольта. Поэтому экситон Ф более стабилен при комнатной температуре по сравнению с экситоном большого радиуса. Спектр излучательной рекомбинации связанных экситонов более узкий, чем спектр свободных экситонов, т.к. связанный экситон локализован в пространстве и его кинетическая энергия невелика по сравнению с таковой у свободного экситона большого радиуса<sup>7</sup>.

Автор считает, что экситоны типа Френкеля и Ванье – Мотта могут быть в легированных кристаллах как связанными, так и свободными и радиусы их могут быть разными, из-за локального изменения  $\varepsilon(r)$  в области внедрённого (в кристаллическую решётку опорного кристалла) легирующего атома (что будет описано в части 2). Возможна сложная самоконденсация экситонов в области внедрения инородного атома в решетку опорного кристалла, где происходят изменения характерных размеров межатомных расстояний в решётке опорного кристалла, что и отражается на модуляции  $\varepsilon(r)$ .

## 2. Стоячие Е-волны в легированных кристаллах и конденсирующиеся в них кумулятивно-диссипативные структуры – стоячие экситоны Высикайло

Далее описан новый, открытый автором, способ самофокусировки энергии электромагнитных волн в легированных кристаллах в стоячих  $\varepsilon$ -волнах с переменной относительной диэлектрической проницаемостью –  $\varepsilon(r)$ в области внедрения атома примеси в решётку легированных кристаллов. Если удастся внедрять атомы легирующей примеси с формированием периодических наноструктур, то, возможно, тем самым автором о т к р ы т новый физико-химический способ выращивания фотонных кристаллов с периодом решётки ~ 10 ÷ 20 нм.

Из общих соображений, в рамках классической квантовой механики (волновой механики), понятно, что при легировании (внедрении инородного атома примеси в идеальную кристаллическую решётку с образованием им химических связей с окружающими его атомами решётки) любого кристалла с диэлектрической проницаемостью – є, из этой области расходится волна возмущения (изменения, например, є) локальных свойств кристаллической решётки (ε<sub>k</sub>). При этом сам кристалл как часть целого будет (например, согласно принципу Ле Шателье – Брауна) стремиться уменьшить это возмущение обратной сходящейся волной (условие Зоммерфельда). В результате протяжённого взаимодействия в кристалле сходящейся к внедрённому атому или молекуле волны (с у -функцией) и волны расходящейся (диссипирующейся волны с у-функцией) происходит

<sup>1</sup> Там же; Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Указ. соч.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Указ. соч.

Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Указ. соч.

Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Указ. соч.

<sup>5</sup> Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Там же.

формирование стоячей волны (потенциальной **стратифицированной** кумулятивно-диссипативной квантовой твёрдотельной системы с  $\psi^* \psi = |\psi|^2$ ) и, следовательно, в частности, происходит волновое изменение относительной диэлектрической проницаемости –  $\varepsilon(r)$  легированного кристалла в области внедрения в решётку инородного атома. Так формируются кумулятивно-диссипативные волновые (квантовые) стационарные потенциальные профилированные поляризационные  $\varepsilon(r)$ -структуры Высикайло в легированных кристаллах. Стоячие  $\varepsilon$ -волны, возникающие в кристалле при допировании атомами или молекулами примеси, согласно гипотезе де Бройля, аналогичны волнам на воде при бросании камня в воду (рис. 3).



Рис. 3. Волны: *a*) на воде, согласно гипотезе де Бройля, аналогичны *б*) волнам ε(**r**) в легированном алмазе в области внедрения в решётку атома бора<sup>1</sup>.

Только в кристалле, при внедрении легирующей примеси в решётку, квантовые волны застывают (рис. 36). Их описание следует проводить с учётом изменяющегося в пространстве  $\varepsilon(\mathbf{r})$ . При  $\varepsilon >> 1$  размеры, квантовых структур в легированных кристаллах в  $\sim \varepsilon(\mathbf{r})n^2$  раз превосходят размеры невозбуждённых атомов  $a_t \sim a_0 = 0.529$  Å. Размеры стоячих  $\varepsilon$ -волн Высикайло близки к размерам свободных экситонов ВМ. Такое грубое представление, требует дальнейшей детализации, но для аналитических расчётов резонансных стоячих экситонов В, локализующихся на возмущениях  $\varepsilon(\mathbf{r})$ , обусловленных внедрением инородных атомов в кристаллическую решётку опорного кристалла, является достаточным для идентификации линий КРС (что будет показано в части 2).

Профилированные, внедрением инородных атомов в кристаллическую решётку, потенциальные наноструктуры с  $\varepsilon(r)$ , открытые автором, выступают топологическими центрами кумуляции энергии (возбуждения в кристалле) – экситонов Ф и свободных экситонов ВМ. После захвата экситона ВМ или экситонов Ф, в стоячей  $\varepsilon$ волне В, профилем  $\varepsilon(r)$  формируется стоячий экситон В (локализованное энергетическое возмущение легированного кристалла с размерами  $\sim a_0\varepsilon(r)n^2$ ). Автор по экспериментально измеренным КРС на стоячих экситонах В определил, формирующие его профили  $\varepsilon(r)$  (рис.  $3\delta$ ) для алмаза легированного бором. Колебательные профили  $\varepsilon(r)$  (рис.  $3\delta$ ) возникают в области примесных центров в легированных кристаллах и затухают от расстояния до атома легирующей примеси. На базе анализа обширных экспериментов автором установлено, что примесные атомы, внедряясь в кристаллическую решётку, формируют протяжённый ( $\sim 20$  нм) сложный колебательный профиль относительной диэлектрической проницаемости –  $\varepsilon(r)$  в опорном кристалле. Этот протяжённый профиль с **повышенными значениями**  $\varepsilon(r)$  в центре КТ (рис.  $3\delta$ ; подробнее это будет изложено во второй части статьи) с больших объёмов кумулирует любую энергию электромагнитного излучения к центру такой КТ и делает рождающиеся в этой области экситоны связанными в области внедрения атома примеси. Происходит этот захват из-за больших значений  $\varepsilon(r)$  в стоячей  $\varepsilon$ -волне (рис.  $3\delta$ ), чем в основном кристалле с  $\varepsilon_k = \text{const.}$ 

По этой причине такие КТ кумулируют энергию электромагнитных волн, формируют стоячие экситоны, которые при взаимодействии с падающим на кристалл излучением наблюдаются в КРС. Так, в области внедрения примеси в решётку, возникают, усиливаются и исчезают, через резонансное излучение электромагнитных волн, стоячие экситоны Высикайло с характерными размерами близкими к размерам свободных экситонов Ванье – Мотта.

Кумулятивно-диссипативные структуры (КДС) – КТ с профилированным значением  $\varepsilon(r) > \varepsilon_k$  и с локализованными экситонами и др. возмущениями, являются частным случаем КДС Высикайло<sup>2</sup>. Они отличаются по свойствам и своей архитектуре от диффузионных диссипативных структур Тьюринга<sup>3</sup>. Связано это с тем, что в КДС Высикайло присутствуют не только процессы диссипации (диффузии), но и конвективные процессы ку-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Collins A.T., Williams A.W.S. "The Nature of the Acceptor Centre in Semiconducting Diamond." *J. Phys. C: Solid State Phys.* 4 (1971): 1789–1800; Cherenko R.M. "Boron, the Dominant Acceptor in Semiconducting Diamond." *Phys. Rev. B.* 7 (1973): 4560–4567; Collins A.T., Lightowlers E.C., Dean P.J. "Role of Phonons in the Oscillatory Photoconductivity Spectrum of Semiconducting Diamond." *Phys. Review* 183.3 (1969): 725–730; Denisov V.N., Mavrin B.N., Polyakov S.N., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Blank V.D. "First Observation of Electronic Structure of the Even Parity Boron Acceptor States in Diamond." *Physics Letters A* 376 (2012): 2812–2815; Kim H., Vogelgesang R., Ramdas A.K., Rodriguez S., Grimsditch M., Anthony T.R. "Electronic Raman and Infrared Spectra of Acceptors in Isotopically Controlled Diamonds." *Physical Review B* 57.24 (1998): 15316–15327. См. также: Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах... Подробнее будет описано во второй части статьи.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013, 352 с. <sup>3</sup> Turing A.M. The chemical basis of the morphogenesis." *Proc. Roy. Soc. В* 273 (1952): 37–71; Пригожин И. Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: УРСС, 2003. 240 с.

муляции. В потенциальных зародышах – стоячих  $\varepsilon(r)$ -волнах, открытых автором, при облучении легированного кристалла электромагнитным излучением, формируются и растут КДС (по мере самофокусировки – локализации свободных экситонов Френкеля или Ванье – Мотта в стоячую  $\varepsilon(r)$ -волну, растёт главное квантовое число *n* стоячего экситона Высикайло).

#### 3. Мерцающие кристаллы металлического типа

При перекрытии электронных оболочек стоячих КДС (КТ или стоячих экситонов Высикайло) с n>1 в легированных кристаллах, формируются стоячие **наномолекулы** и далее из молекул формируются мерцающие кумулятивно-диссипативные кристаллы (КДК) или сверх решётки металлического (водородного) типа с характерными размерами сверх решётки ~10 нм ( $\approx 2\varepsilon(r)a_0n^2$ ) и более. Для образования мерцающих кристаллов в кристаллах, легированных примесями, необходимо электромагнитными волнами возбуждать в опорных легированных кристаллах стоячие экситоны, которые и будут формировать КДК. Представляют интерес экспериментальные исследования электромагнитных и иных свойств **стоячих** мерцающих водородоподобных кристаллов металлического типа в легированных кристаллах в зависимости от интенсивности облучения и концентрации легирующей примеси. Экспериментальные и аналитические исследования таких явлений мерцающих кристаллов, а электромагнитных бикристаллов могут определяться механическими свойствами опорных кристаллов, а электромагнитные свойства уже свойствами мерцающих макрокристаллов с характерными размерами решёток нанометрового размера, определяемого интенсивностью возбуждающего излучения и процессами релаксации (диссипации и излучения электромагнитных волн).

## 4. Коллапс ψ-функции свободных электронов при формировании куперовской пары в атомах v-группы, легирующих алмаз

Легирование алмаза проводится не только атомами донорной примеси (бор и др. элементами из III группы периодической системы Менделеева), но и акцепторной примесью (азот и др. элементами из V группы периодической системы Менделеева). Оказывается, не представляет большого труда рассчитать спектры отрицательных экситонов большого радиуса, в которых формируются куперовские пары электронов (рис. 4). Отрицательный ион формируется при коллапсе у-функции свободного электрона в области атома азота, легирующего алмаз. В этом случае спектры такого отрицательного экситона, с захваченной куперовской парой электронов одной положительно заряженной дыркой, будут соответствовать спектрам атома водорода. Но так как эффективный кулоновский потенциал, действующий на каждый из электронов в области отражающего «зеркала» U(r) = -1/r+1/(2r) = -1/(2r), согласно квантовомеханической модели атома водорода, частота собственных уровней в таком экситоне будет в 4 раза гуще, чем в атоме водорода.

При этом и для отрицательных экситонов большого радиуса следует учитывать возможную модификацию эффективного значения относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(r)$  в области внедрения акцепторной примеси (рис. 5). Захват свободных электронов и формирование отрицательных экситонов при легировании акцепторными примесями (бором и др. элементами из III группы периодической системы Менделеева) может привести к улучшению диэлектрических свойств алмаза, кремния или германия, в которых не удается избавиться от донорной примеси.

В соответствии с данными, приведенными в таблице 1, связь С–С имеет длину порядка 1,53 Å, что соответствует относительной диэлектрической проницаемости алмаза –  $\varepsilon \approx 5,7$ .



Рис. 4. Стоячий отрицательно заряженный экситон с куперовской парой.



Рис. 5. Возможный профиль относительной диэлектрической проницаемости в алмазе легированном азотом и иными атомами из V группы элементов.

## Таблица 1

X	Кимические	связи.	их	эне	огии	и	ллины	1
4 :	kindin icentie	CD/D/D/19	IIA	JIIC	<b>PI III</b>		A MILLIPI	

Связь	Энергия связи, кДж/моль	Длина связи, Å	Связь	Энергия связи, кДж/моль	Длина связи, Å
C–C	342,76	1,53	C–N	292,6	1,47
C=C	661,46	1,33	C=N	749,26	1,22
C≡C	807,22	1,21	C≡N	877,12	1,15

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Миронова Г.А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Т. 1. М.: Физический факультет МГУ, 2004. 532 с.

Длина связи В-С равна 1,57 Å, что, согласно данной работе и спектрам комбинационного рассеивания (о чём подробнее будет сказано во второй части статьи), соответствует в области внедрения атома из III группы элементов  $\varepsilon \approx 6.06$ . Так как длина связи N–C порядка 1,47 Å, то можно ожидать в области внедрения атома азота  $\varepsilon \approx 5,1.5,2$ , при этом нижний уровень стоячего нейтрального экситона будет порядка 0,5.0,54 эВ. Коллапс у-функции свободных электронов при формировании куперовской пары в атомах V группы, легирующих алмаз, может повышать его диэлектрические свойства, а при определённых условиях и соответствующих концентрациях такой примеси может приводить к его сверхпроводимости.

## 5. Классификация стоячих экситонов Высикайло и их мерцающих кристаллов

Можно классифицировать два типа стоячих экситонов Высикайло в соответствии с типом донорной или акцепторной примеси. Как известно, при слабом легировании кристаллов происходит существенное изменение их электромагнитных свойств при сохранении механических свойств опорного кристалла. При активации мерцающих кристаллов в бикристаллах возможно существенное изменение их электромагнитных свойств уже при ничтожных концентрациях примеси. При одновременном легировании донорной и акцепторной примесями возможно не только улучшение свойств опорного кристалла, но и формировании двух мерцающих кристаллов в одном опорном кристалле. Свойства такого трикристалла (например, из бора, азота и углерода) могут существенно меняться от интенсивности и длины волны накачивающей стоячие экситоны Высикайло.

Таким образом, нами проведена классификация стоячих экситонов большого радиуса и соответствующих им мерцающих кристаллов в зависимости от валентности атомов, легирующих кристаллы IV-группы элементов и рассчитаны возможные спектры нейтральных и отрицательных экситонов большого радиуса, в которых формируются куперовские пары электронов. Для дальнейшей детализации явлений требуются подробные эксперименты.

#### Заключение

Ранее считалось<sup>1</sup>, что атом примеси возмущает кристалл, т.е. модифицирует локальные значения  $\varepsilon(r)$ , на уровне размеров между узлами (связанный экситон Френкеля) и при этом в самом кристалле  $\varepsilon(r) = \varepsilon_k \equiv \text{const}$  (модель Ванье – Мотта (1)-(3)). Это действительно так при учёте только значительных изменений, но даже слабые изменения  $\varepsilon(r)$  могут существенно менять картину функционирования кумулятивно-диссипативных структур, формирующихся на слабой модуляции  $\varepsilon(r)$ . Это асимптотические парадоксы, решение которых осуществляется учётом малых возмущений. На базе анализа модели (Ванье – Мотта) свободных экситонов большого радиуса, автором открыты и классифицированы, в легированных кристаллах, в области внедрения в кристаллическую решётку инородного атома, самоформирующиеся наноразмерные структуры (стоячие є-волны или є-резонаторы) с квантовыми (волновыми) профилями относительной диэлектрической проницаемости –  $\varepsilon(r)$ . Тем автор предполагает, что существуют связанные (сверхтяжёлые) экситоны Высикайло и они обусловлены квантовыми (волновыми профилями  $\varepsilon(r)$ ) эффектами, вызванными внедрением инородного атома в кристаллическую решётку легируемого кристалла и происходит это в полном соответствии с гипотезой Луи де Бройля (рис. 3, 6, 7). Из аналогии с моделью свободных экситонов Ванье - Мотта (рис. 3, 5) следует, что внедрение в кристалл инородного атома возмущает кристалл (его относительную диэлектрическую проницаемость) на характерных размерах  $\approx a_0 n^2 \epsilon(r)$ (до 20 нм) и эти возмущения можно фиксировать с помощью КРС (см. рис. 36 и часть 2). Стоячие гипер атомы с размерами в нанометры могут формировать регулярные системы – мерцающие кристаллы.



Рис. 6. Легированная углеродная нанотрубка с стоячим нанометровым экситоном (+).



Рис. 7. Распространение волн на поверхности воды и не только. Фото с сайта http://zaryad.com/forum/

Профилированием концентрации легирующей примеси можно управлять и кумулятивными, и диссипативными свойствами мерцающих є(r)-кристаллов Высикайло, и тем сложно осуществлять структурный перенос и кумуляцию или диссипацию энергии в опорном 3D-кристалле.

Если удастся внедрять атомы легирующей примеси с формированием периодических наноструктур, то возможно, тем самым мы сможем выращивать фотонные кристаллы по новому физико-химическому способу.

Исследован способ кумуляции электромагнитной энергии в кумулятивно-диссипативных структурах (КДС) из-за больших значений є в центре структуры, чем на её периферии. Такие КДС существенно отличаются от диффузионных диссипативных структур Пригожина – Тьюринга – Колмогорова<sup>2</sup>. В части 2 на базе модели (1)–

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Указ. соч.; Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Указ. соч. <sup>2</sup> Turing А.М. *Ор. cit.*; Пригожин И. Стенгерс И. Указ. соч.

# ТЕОРИИ, КОНЦЕПЦИИ, ПАРАДИГМЫ

(3) будет сформулирована аналитическая модель стоячих экситонов Высикайло, которая позволит идентифицировать все уровни стоячего экситона В и по экспериментально измеренным КРС, определить профили относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(r)$ , в нанометровой области допированного в кристаллическую решётку атома примеси (рис. 6). Такие профилированные, внедрением инородного атома в идеальную кристаллическую решётку области кумулируют электромагнитные волны, аналогично как происходит самофокусировка лазерного излучения в воздухе. В результате такой кумуляции электромагнитной энергии формируются, развиваются и, излучая электромагнитные волны, погибают кумулятивно-диссипативные структуры и их регулярные системы – кристаллы (кумулирующие и диссипирующие энергию) в легированных опорных кристаллах с профилями относительной диэлектрической проницаемости –  $\varepsilon(r)$ . Такие синергетические много фазные или мульти фазные твердотельные системы с мерцающими (стоячими экситонными) кристаллическими подсистемами могут оказаться весьма перспективными при структурных переносе и утилизации электромагнитную энергии и тепловой энергии в электрическую и при разработке управляющих и иных электронных **наноразмерных** устройств.

Особый интерес представляет исследование легирования графена атомами бора. В этом случае возможно формирование плоско-цилиндрических квазиатомов водорода – стоячих экситонов (рис. 6) и их КДК (рис. 7).

Продолжение следует

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013, 352 с.
- Высикайло Ф.И. Поляризация аллотропных полых форм углерода и её применение в конструировании нанокомпозитов // Нанотехника. 2011. Т. 1. № 25. С. 19–36.
- Высикайло Ф.И. Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах. Парадоксы в квантовой механике и их решение на базе кумулятивной квантовой механики // Инженерная физика. 2013. № 3. С. 15–48.
- Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: Учеб. пособие. М.: Техносфера, 2007. 300 с. [Электронный ресурс] // Кафедра физики твёрдого тела Петрозаводского государственного университета Режим доступа: http://dssp.petrsu.ru/p/tutorial/ftt/giv.htm.
- 5. Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики. М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ. 1979. 480 с.
- Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузовие Т. 9: Статистическая физика. Ч. 2: Теория конденсированного состояния. 4-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 496 с.
- Миронова Г.А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Т. 1. М.: Физический факультет МГУ, 2004. 532 с.
- 8. Пригожин И. Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: УРСС, 2003. 240 с.
- 9. Туктаров Р.Ф., Ахметьянов Р.Ф., Шиховцева Е.С., Лебедев Ю.А., Мазунов В.А. Плазменные колебания в молекулах фуллеренов при электронном захвате // Письма ЖЭТФ. 2005. Т. 81. № 4. С. 207–211.
- 10. Cherenko R.M. "Boron, the Dominant Acceptor in Semiconducting Diamond." Phys. Rev. B. 7 (1973): 4560–4567.
- Collins A.T., Lightowlers E.C., Dean P.J. "Role of Phonons in the Oscillatory Photoconductivity Spectrum of Semiconducting Diamond." *Phys. Review* 183.3 (1969): 725–730.
- 12. Collins A.T., Williams A.W.S. "The Nature of the Acceptor Centre in Semiconducting Diamond." J. Phys. C: Solid State Phys. 4 (1971): 1789–1800.
- Denisov V.N., Mavrin B.N., Polyakov S.N., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Blank V.D. "First Observation of Electronic Structure of the Even Parity Boron Acceptor States in Diamond." *Physics Letters A* 376 (2012): 2812–2815.
- 14. Gurney R.W., Mott N.F. "Luminescence in Solids." Transactions of the Faraday Society 35 (1939): 69–73.
- 15. Huang J., Carman H.S. Compton R.N. "Low-Energy Electron Attachment to C<sub>60</sub>." J. Phys. Chem. 99 (1995): 1719–1726.
- Jaffke T., Illenbergen E., Lezius M., Matejcik S., Smith D. Mark T.D. "Formatin of C<sup>-</sup><sub>60</sub> and C<sup>-</sup><sub>70</sub> by Free Electron Capture. Activation Energy and Effect of the Internal Energy on Lifetime." *Chem. Phys. Lett.* 226 (1994): 213–218.
- Kim H., Vogelgesang R., Ramdas A.K., Rodriguez S., Grimsditch M., Anthony T.R. "Electronic Raman and Infrared Spectra of Acceptors in Isotopically Controlled Diamonds." *Physical Review B* 57.24 (1998): 15316–15327.
- Mott N.F. "On the Absorption of Light by Crystals." Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 167.930 (1938): 384–391.
- Popov M., Buga S., Vysikaylo Ph., Stepanov P., Tatyanin E., Medvedev V., Denisov V., Kirichenko A., Aksenenkov V., Skok V., Blank V. "C<sub>60</sub> doping of Nanostructured Bi-Sb-Te Thermoelectrics." *Phys. Status Solidi A*. 208 (2011): 105–113.
- 20. Turing A.M. The chemical basis of the morphogenesis." Proc. Roy. Soc. B 273 (1952): 37-71.
- Vysikaylo Ph.I. "Cumulation of de Broglie Waves of Electrons, Endoions and Endoelectrons of Fullerenes, and Resonances in the Properties of Nanocomposite Materials with Spatial Charge Layers." *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 46.6 (2010): 547–557.
- Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part I: Prerequisites and Fundamentals of CQM." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 48.4 (2012): 293–305.
- Vysikaylo Ph.I. "Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part II. Application of Cumulative Quantum Mechanics in Describing the Vysikaylo Polarization Quantum\_Size Effects." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 48.5 (2012): 395–411.
- 24. Vysikaylo Ph.I. "Physical Fundamentals of Hardening of Materials by Space Charge Layers." Surface Engineering and Applied Electrochemistry 46.4 (2010): 291–298.
- 25. Wannier G.H. "The Structure of Electronic Excitation Levels in Insulating Crystals." Physical Review 52.3 (1937): 191–197.

## Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11-2011:

Высикайло, Ф. И. Открытие стоячих экситонов большого радиуса и классификация мерцающих кристаллов Часть 1. Общая постановка задачи о самоорганизации полых квантовых резонаторов в легированных кристаллах / Ф.И. Высикайло // Пространство и Время. — 2014. — № 3(17). — С. 85—93. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provr st3-17.2014.24