

**КУМУЛЯТИВНАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА.  
КУМУЛЯТИВНО-ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ НАНОМИРА.  
ОТКРЫТИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ СТОЯЧИХ  
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭКСИТОНОВ В НЕОДНОРОДНЫХ  
ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ (АЛМАЗА, КРЕМНИЯ,  
ГЕРМАНИЯ)**

Ф.И.Высикайло

ОАО Московский радиотехнический институт РАН  
[filvys@yandex.ru](mailto:filvys@yandex.ru)

**Аннотация.** В легированных кристаллах, в области внедрения в кристаллическую решётку инородного атома, самоформируются **наноразмерные** структуры ( $\epsilon$ -резонаторы) двух типов с квантовыми (волновыми) профилями относительной диэлектрической проницаемости с  $\epsilon(r) > \epsilon_{cr}$  или с  $\epsilon(r) < \epsilon_{cr}$  – относительная диэлектрическая проницаемость невозмущённого кристалла. Исследован способ кумуляции энергии (в виде открытых автором стоячих экситонов большого радиуса) в кумулятивно-диссипативных структурах (КДС). КДС, открытые автором, существенно отличаются от **диффузионных** диссипативных структур Пригожина–Тьюринга–Колмогорова. По экспериментальным спектрам комбинационного рассеивания (КРС), в легированных кристаллах, открыты **стоячие экситоны** большого радиуса. На базе кумулятивной квантовой механики (ККМ) предложен способ определения (по КРС) профилей  $\epsilon(r)$  в волновых  $\epsilon$ -структурах с шагом  $\Delta r \approx 0.529\epsilon(r)(n-1/4)/Z$ .  $Z$ -заряд локализованный в наноструктуре,  $n$  – главное квантовое число формирующейся квантовой точки (КТ). Сформулированы основы кумулятивной кристаллодинамики (ККД). По предложенным автором ККМ и ККД для «кристаллических» плазмоидов аналитически: 1) исследованы особенности влияния симметрии полых квантовых резонаторов на резонансные энергии захватываемых частиц; 2) рассчитаны коэффициенты объёмного сжатия кристаллов IV группы элементов; 3) исследованы аналогичные эффекты Казимира и поляризационные эффекты, открытые автором, выявлены области их доминирования.

**Введение**

Энергия сейчас трансформируется в электрическую и тепловую (как наиболее удобные для практического применения в

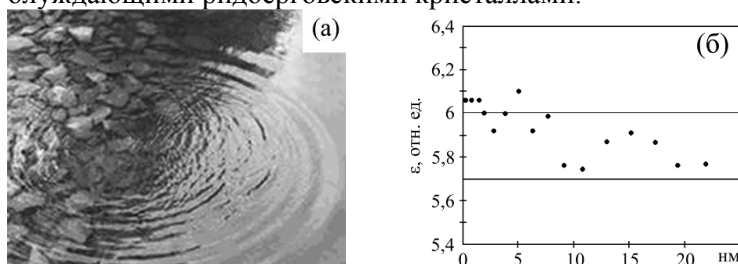
производстве и быту) преимущественно с помощью тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Станции кумуляции, аккумуляции и трансформации солнечной энергии экологически чисты, но вносят малую долю в общую выработку энергии. Трудности, препятствующие созданию экологически чистых накопителей энергии, обусловлены отсутствием технологий и детального понимания процессов кумуляции (фокусировки) и диссипации (рассеивания) электромагнитной энергии, трансформирующейся в возбуждения материальных нанометровых частиц. Так в теории **полых нанометровых** структур: КТ, квантовых линий (КЛ) и формируемых из них металлических мерцающих кристаллов (сверх решеток) имеется ряд важных парадоксов, обусловленных противоречием между гипотезой де Бройля (частицы ведут себя как волны) и требованием Дирака (ТД) об ограниченности  $\psi$ -функции [1]. Согласно ТД для случаев сферической и цилиндрической симметрии для **любых** квантовых резонаторов весь энергетический спектр симметричных  $\cos$ -волн (с резонансной энергией уровней  $E_{n-1/2} \sim \pm(n-1/2)^{\pm 2}$ ) **ошибочно** выбрасывается из-за требования ограниченности  $\psi$ -функций. При этом собственные энергетические 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 невозможно, так как во многих экспериментах **явно участвуют структуры со сферической симметрией** [2]. 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 [2], где доказано, что следует для всех симметрий **полых** квантовых резонаторов учитывать полный собственный энергетический спектр (а не только спектр полных  $2\pi$ -резонансов). Возможно применение КТ при создании из них мерцающих кристаллов или сверхрешёток в ювелирной промышленности и для мощных СВЧ транзисторов с частотами до  $10^{11}$  Гц. Возможно использование заряженных КТ и КЛ для улучшения механических и электромагнитных характеристик **солнечных батарей и термоэлектриков** [2,3]. Сферически симметричные фуллерены и замкнутые нанотрубки могут из-за поляризационных сил захватывать свободные электроны с резонансной кинетичес-

кой энергией  $E_n$  (до 6 шт. на фуллерен) и образовывать метастабильные **отрицательно** заряженные сферические КТ с энергией электронов больше нуля [2]. Этот квантоворазмерный поляризационный эффект первого типа с характерным размером  $\sim 1$  нм описан автором аналитически с помощью модели, восходящей к модели Гамова–де Бройля–Гельмгольца. Проведенный в [2] анализ возможных решений первой краевой задачи Гельмгольца и сравнение аналитических расчётов с экспериментальными сечениями захвата полыми фуллеренами электронов с резонансными энергиями позволили сформулировать и верифицировать, с помощью экспериментов, основы ККМ в [2,3]. Автор утверждает, что в ряде экспериментов с **полыми** квантовыми резонаторами нанометрового размера наблюдаются состояния с резонансными симметричными ( $\psi_{n-1/2}$ ) cos-волнами и соответствующие им квантовые энергетические переходы. Эти наблюдения связать со структурами резонаторов с плоскостной симметрией не возможно (в  $C_{60}$ ). Парадоксы решаются в рамках авторской ККМ, опирающейся на 1) модель Г.А.Гамова для атомного ядра и 2) модифицированные современные модели атома водорода и модель свободных экситонов большого радиуса Ванье-Мотта.

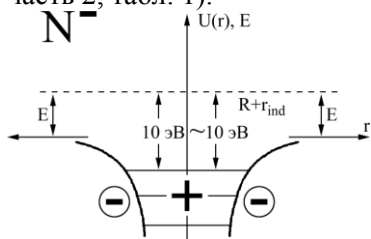
Показано, что в легированных кристаллах, в области внедрения в кристаллическую решётку инородного атома, самоформируются **наноразмерные** структуры (стоячие  $\varepsilon$ -волны или  $\varepsilon$ -резонаторы) двух типов с квантовыми (волновыми) профилями относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(r)$  (см. рис. 1-3). Исследован способ кумуляции энергии возбуждения (экситонов) в таких КДС, существенно отличающихся от диффузионных диссипативных структур Пригожина–Тьюринга–Колмогорова. Стоячие экситоны большого радиуса, открытые автором, развиваются в области внедрённых в решётку атомов примеси (в квантовых резонаторах), кумулируют в себя энергию опорного кристалла и излучают её в виде резонансных электромагнитных волн, соответствующих переходам в КТ.

Предлагается способ изготовления макроскопического твёрдого кристалла с заданной концентрацией КТ и соответствующим главным числом  $n$ , описывающим степень возбуждения КТ, формирующих возбуждённый (мерцающий) кристалл (сверхрешётку) внутри опорного кристалла. При облучении легированного кристалла резонансным излучением, КТ переходят в возбуждённые состояния и их электронные оболочки перекрываются, форми-

руя возбуждённый (мерцающий) кристалл металлического (водородного) типа в матрице опорного кристалла. При легировании кристаллов IV группы атомами V группы возможно формирование **отрицательных** стоячих экситонов, формирующих **отрицательные бикристаллы** с куперовскими парами электронов. Бикристаллы с мерцающими кристаллами в матрице опорного кристалла могут многократно возбуждаться, поэтому являются более удобными для исследований по сравнению с газообразными блуждающими ридберговскими кристаллами.

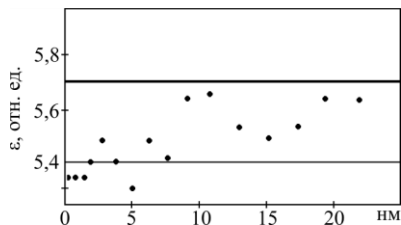


**Рис. 1.** Волны на воде (а), согласно гипотезе де Бройля, аналогичны волнам  $\epsilon(r)$  в легированном алмазе (б) в области внедрения в решётку атома бора (подробнее и ссылки см. в [2] часть 2, табл. 1).



**Рис. 2**

**Рис. 2.** Стоячий отрицательно заряженный экситон с куперовской парой.



**Рис. 3**

**Рис. 3.** Возможный профиль относительной диэлектрической проницаемости в алмазе, легированном азотом и иными атомами из V группы элементов.

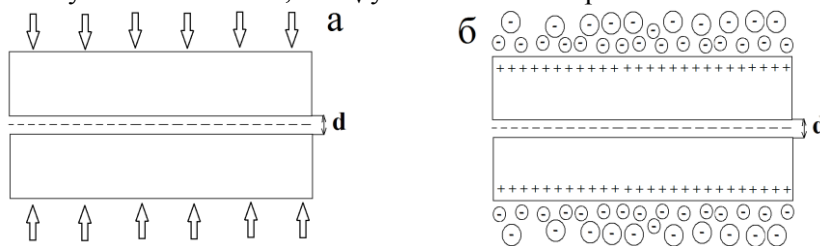
ККМ в легированных кристаллах описывает [2]: 1) расщепление Висикайло уровня с главным квантовым числом  $n$  на два (с энергией расщепления  $\Delta E_{n-1/2,n} \sim n^{-1/4}$  в случае потенциального барьера и с  $\Delta E_{n-1/2,n} = 13.56(((\epsilon_{n-1/2}(r)(n-1/2))^{-2} - (\epsilon_n(r)n)^{-2})$  эВ в случае потенциальной ямы с профилированным  $\epsilon(r)$  и 2) все известные в

литературе КРС полых водородоподобных КТ – стоячих экситонов, формирующих мерцающие или возбуждённые микро- или нанокристаллы, в любых опорных кристаллах, допированных примесями, замещающими атомы в кристаллической решётке. Возможно применение мерцающих кристаллов, открытых автором, в качестве активной среды терагерцовых лазеров.

На рис. 4 приведены схемы, поясняющие различие и общность эффектов Казимира и поляризационных эффектов, открытых автором. Давление вытесненного электронного ферми-газа сжимающего пластины:  $P=F/S=\rho V_e^2 = n_e m_e V_e^2$ . Поскольку на один вырожденный электрон (на электрон ферми-газа) с длиной волны де Бройля –  $\lambda_e$  и импульсом –  $p_e$  приходится фазовая ячейка с объёмом, пропорциональным  $n_e^{-1}(m_e V_e)^3 = (\lambda_e p_e)^3$ , которая ограничена величиной  $h^3/2$ , мы имеем:  $V_e \approx 2^{-1/3} h n_e^{1/3} m_e^{-1}$ . Из зазора между пластинами квантово-механически выдавливаются все электроны с длиной волны де Бройля  $\lambda_e$  больше  $d/2$  в результате возникает сжимающее пластины давление (рис. 4б):

$$P_V = F/S = 2^{-2/3} h^2 \lambda_e^{-5} m_e^{-1} = 0.97 \cdot 10^7 \text{ [Па]} / d^5 \text{ [нм]} \quad (1)$$

Если учесть cos-волны, то  $P_V$  увеличиться в  $2^5$  раз.



**Рис. 4.** Схема эффектов: а) Казимира, стрелками показаны силы, сжимающие пластинки; б) нано- и фемто-размерных квантовых поляризационных эффектов, обуславливающих притяжение металлических пластин. «+» – ионы кристаллической решётки, «-» – вырожденные электроны, квантово-механически выдавленные из пространства между полированными пластинами.

В случае пластин из металлов кинетические энергии электронов не превышают нескольких электрон-вольт. Поэтому зависимость давления, сжимающего пластины от размера зазора обратно пропорциональна  $d^5$ , т.е. круче, чем в эффекте Казимира, где давление зависит от  $d^4$ . Для случая релятивистских электронов в

(1) зависимость от  $\lambda_e^{-5}$  следует изменить на  $\lambda_e^{-4}$  и соотношение (1) модифицируется в:

$$P_V = 8hc/d^4 \approx 1.6 \cdot 10^{12} [\text{Па}]/d^4[\text{нм}]. \quad (2)$$

Согласно (2) силы Казимира ( $P_C = hc\pi/480d^4 \approx 1.3 \cdot 10^9 [\text{Па}]/d^4[\text{нм}]$ ) становятся ничтожно малыми по сравнению с силами вырожденного релятивистского электронного газа, сжимающего структуру. Квантовые поляризационные силы ( $P_V$ ), согласно (1)-(2), превосходят силы Казимира ( $P_C$ ) на размерах менее  $10^{-10}$  м, т.е. до того как ферми-газ станет релятивистским. На этих размерах соотношение сил Казимира и сил поляризационного динамического поверхностного натяжения, открытого автором требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

ККМ применена для описания кумулятивных (фокусирующих) квантовых явлений в любых плазмоидах от атомного ядра до ядер галактик [4], объяснения экспериментальных КРС лазерного излучения на открытых автором стоячих экситонах в легированных бором кристаллах алмаза, нахождения профиля относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon(r)$  и обобщения полученных результатов на явления в других легированных кристаллах [2]. Полученные результаты позволяют надеяться на создание: 1) бикристаллов на базе опорных кристаллов, легированных специальными примесями, формирующими мерцающие кристаллические решётки с **нанометровыми расстояниями между узлами** и 2) терагерцовых лазеров при когерентном поведении элементов мерцающего кристалла.

*Работа проводилась при финансовой поддержке грантами РФФИ № 13-07—0027; 14-07-00277.*

### Литература

1. Дирак П.А.М. *Принципы квант. мех.* М.: Наука, 1979. - 480 с.
2. Высикайло Ф.И. Открытие стоячих экситонов большого радиуса и аналитическое описание спектров их комбинационного рассеивания. // *Электронная обработка материалов*.ч. 1-2. 2014, **50**(3), 104–117.
3. Blank V., Vysikaylo Ph. et al. C60 – doping of Nanostructured Bi-Sb-Te Thermoelectrics. *Phys. Status Solidi A*. 2011, **208**, 105–113.
4. Vysikaylo P.I.// *SURFACE ENGINEERING AND APPLIED ELECTROCHEMISTRY* 2013. Vol. 49. No. 3. 222–234.