

## ФИЗИКА

УДК 530.145

### **Физические основы субатомных аттосекундных квантовых технологий аккумулирования энергии в материалах**

*С.А. Безносюк<sup>1</sup>, М.С. Жуковский<sup>2</sup>, О.А. Маслова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия)

### **Physical Foundations of Subatomic Attosecond Quantum Technologies for Storing Energy in Materials**

*S.A. Beznosyuk<sup>1</sup>, M.S. Zhukovsky<sup>2</sup>, O.A. Maslova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup>Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)

Рассматривается текущий момент развития физических основ субатомных квантовых технологий с использованием сверхкоротких аттосекундных импульсов энергии, лежащих в диапазоне электромагнитных волн жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена. Они необходимы для емкого и обратимого накопления энергии без разрушения материалов аккумуляторами нанoeлектромеханической системы (НЭМС) супраатомного масштаба с линейными размерами от 0.1 нм до 10 нм и субатомной толщиной граничных интерфейсов до 0.1 нм. В статье проведено сопоставление физических основ используемых в настоящее время фемтосекундных квантовых технологий и разрабатываемых аттосекундных квантовых технологий. Последние являются нацеленными на достижение более высоких показателей в емкости, управляемости и эффективности квантовых накопителей энергии в материалах за счет гибридного характера квантовых электронных возбуждений. В отличие от фемтосекундных, аттосекундные квантовые накопители энергии должны использовать на два-три порядка более жесткие и короткие импульсы электромагнитного ультрафиолетового или рентгеновского излучения. Реакции вещества на импульсы оптического диапазона излучения описываются в квантовой фемтохимии. В случае аттосекундных импульсов проявляются нелинейные эффекты накопления импульсов энергии высоковозбужденными квантово-запутанными субатомными парами электронов.

The article discusses the current development of physical principles of subatomic quantum technologies using ultrashort attosecond energy pulses within the ranges of deep-UV and soft X-ray radiation. It is necessary as a foundation of the process of non-destructive high-capacity reverse energy harvesting using accumulating nanoelectromechanical systems (NEMS) of supra-atomic scale with linear dimensions of 0.1 nm up to 10 nm and subatomic thickness of boundary interfaces up to 0.1 nm. The article compares the physical principles of up-to-date femtosecond quantum technologies and the prospective attosecond quantum technologies. The latter aims to improve the capacity, controllability, and performance efficiency of quantum energy storages by utilizing quantum electronic excitations of hybrid nature. Harder and shorter by one or two orders of magnitude UV and X-ray impulses are required for attosecond energy storages, unlike the femtosecond ones. Quantum femtochemistry describes the reactions caused by optical spectrum radiation pulses. In the case of attosecond pulses, highly excited quantum entangled subatomic electron pairs demonstrate nonlinear energy pulse accumulation effects. Goldstone condensates of bosonic electron pairs produce boundary shells of compact cavities of a quantum-size NEMS resonator. Hybrid electronic excitations of NEMS are a specific feature of the nonlinear quantum subatomic response of materials to attosecond deep-UV and soft X-ray pulses.

Голдстоуновские конденсаты бозонных пар электронов формируют интерфейсные оболочки компактных полостей квантово-размерного резонатора НЭМС. Гибридные электронные возбуждения НЭМС — специфика нелинейного квантового субатомного отклика материалов на воздействие аттосекундных импульсов жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена. Их аттосекундная физика — основа разработки новых субатомных аттосекундных квантовых технологий аккумулирования энергии в материалах.

**Ключевые слова:** физика конденсированного состояния, аттосекундная физика, термополевая динамика конденсированного состояния, квантовая запутанность, запутанные электронные пары, НЭМС, наноэнергетика, субатомная квантовая технология.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-01

### Введение

В настоящее время неразрушающее материал емкое и обратимое накопление, длительное хранение и быстрая передача без существенных тепловых потерь аккумулированной энергии становится одним из самых важных направлений развития наноэнергетики материалов. В современных высоких технологиях хранения и передачи энергии в материалах основная доля приходится на наномолекулярные системы (НМС) аккумуляторов энергии с разделенными зарядами, представляющие собой конденсаторы с двойным электрическим слоем. Они отличаются от давно применяемых импульсных макроконденсаторов тем, что используют не макроскопический диэлектрический слой между проводящими обкладками, а наноскопический поляризованный слой на границе раздела двух сред. Сегодня НМС накопители уже имеют удельную энергию до 0.05 кДж/см<sup>3</sup>, что в 100 раз превышает удельную энергию макроскопических импульсных конденсаторов.

Следующий шаг в повышении качества и эффективности энергетических НМС технологий связывается с решением проблемы быстрой квантовой диссипации энергии аккумуляторов при уменьшении рабочей области накопления энергии в материале до супраатомного масштаба (0.1–10.0 нм). Решение этой задачи связывается с разработкой когерентных квантовых НМС накопителей энергии с разделенными зарядами в супраатомном масштабе. Этот путь был обнаружен несколько лет назад при изучении фемтосекундных квантовых механизмов фотосинтеза в биологических клетках [1, 2]. Ожидается, что характеристики когерентных квантовых НМС накопителей энергии будут повышены с использованием фемтосекундных супраатомных квантовых технологий еще на один

The attosecond physics of the processes is the basis for the development of new subatomic attosecond quantum technologies for storing energy in materials.

**Keywords:** condensed matter physics, attosecond physics, thermofield dynamics of the condensed state, quantum entanglement, tangled electron pairs, NEMS. nanoenergy, subatomic quantum technology.

порядок. Физический механизм устойчивой квантовой когерентности НМС в супраатомном масштабе связан с тем, что ее одноэлектронное (экситонное) возбуждение способно когерентно запутаться с колебательной модой ядер (фононом). В будущем методы формирования когерентных квантовых НМС хранения энергии будут опираться на достижения в области фемтохимии [3]. Известно, что в материале существует многоуровневая иерархия временных масштабов, которая простирается от аттосекундной шкалы времен субатомной электронной динамики, через фемтосекундную шкалу колебательно-вращательных коллективных мод движения атомов и далее до временной шкалы характеристик протекания в нем химических реакций и фазовых превращений [4]. Таким образом, чтобы выйти за нижние пространственно-временные пределы супраатомной фемтосекундной химии НМС, необходимо развивать квантовую субатомную аттосекундную физику и на ее основе аттосекундные квантовые технологии. Это уже реализуется более десятка лет после рождения аттосекундной физики. За истекшее время устройства, генерирующие одиночные аттосекундные импульсы и их очереди, были разработаны с целью одновременного контроля субатомных пар электронов, движущихся в атоме гелия и в молекуле Н<sub>2</sub>, а также совместного контроля электронно-ядерной динамики в молекуле D<sub>2</sub> [5–9].

Успешный старт экспериментальной аттосекундной физики атомов и простых молекул состоялся. Тем не менее пока нет оснований говорить о полной реализации концептуального плана [10–13] разработки субатомных аттосекундных квантовых технологий. Пока не решены две кардинальные проблемы. Техническая проблема состоит в том, что возбуждение и манипуляции с коррелирован-

ными двухэлектронными системами требуют полного контроля аттосекундных импульсов в областях жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена. Ожидается, что это техническое затруднение в ближайшее время будет устранено на основе разработки лазеров на свободных электронах. Вторая проблема является более фундаментальной. Ее содержание лежит в русле общего направления разветвления технологий второй квантовой революции. Суть проблемы и физические основы ее решения будут рассмотрены нами ниже.

#### Аттосекундная квантовая запутанность пар субатомных электронов

Чтобы полностью понять влияние взаимосвязанного движения электронов на протекание неравновесных процессов в веществе, необходимо детально изучить эффекты перестройки коррелированного движения электронных пар на уровне субатомного масштаба, вызванной отдельным аттосекундным импульсом. Известно, что квантовая механика субатомного электрона в веществе определяется его двумя кулоновскими электростатическими взаимодействиями с ядрами и другими электронами. Существует одноэлектронное взаимодействие с субатомными протонами ядер ( $e - p$ ), а также двухэлектронное взаимодействие ( $e - e$ ). В условиях адиабатического приближения квантовой механики электронно-ядерные субатомные частицы вещества наделяют его в стационарных состояниях атомно-молекулярной структурой. Эта структура задается топологией распределения электронной плотности  $n(r)$  в физическом пространстве  $R^3$ . Из-за тождественности  $N$ -электронов в квантовой системе распределение  $n(r)$  является только функцией плотности вероятности  $n_1(r)$  нахождения одиночного субатомного электрона в точке  $r$ :  $n(r) = N n_1(r)$ . Субатомное одноэлектронное взаимодействие ( $e - p$ ) задает супраатомный уровень атомно-молекулярных систем в материалах. Фундаментальная супраатомная масштабная длина определяется радиусом Бора  $a_0$  через квант действия, элементарный заряд и массу покоя электрона определяем формулой:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_0 e^2}. \quad (1)$$

В квантовой полевой электродинамике конденсированного состояния на субатомном уровне, помимо электростатических взаимодействий электрона, его калибровочная кинематическая связь ( $e \sim \gamma$ ) с электромагнитным  $\gamma$ -полем [14, 15] снизу ограничивает субатомный масштаб динамики комптоновской длины электрона, которая не зависит от элементарного заряда  $e$ , но зависит от скорости с распространения электромагнитного  $\gamma$ -поля в вакууме:

$$\lambda_e = \frac{\hbar}{m_0 c}. \quad (2)$$

Масштабы субатомной и супраатомной квантовой динамики электрона в материале связаны между собой безразмерной константой тонкой структуры физического вакуума  $\alpha = 1/137$  следующим образом [6]:

$$a_0 = \lambda_e / \alpha. \quad (3)$$

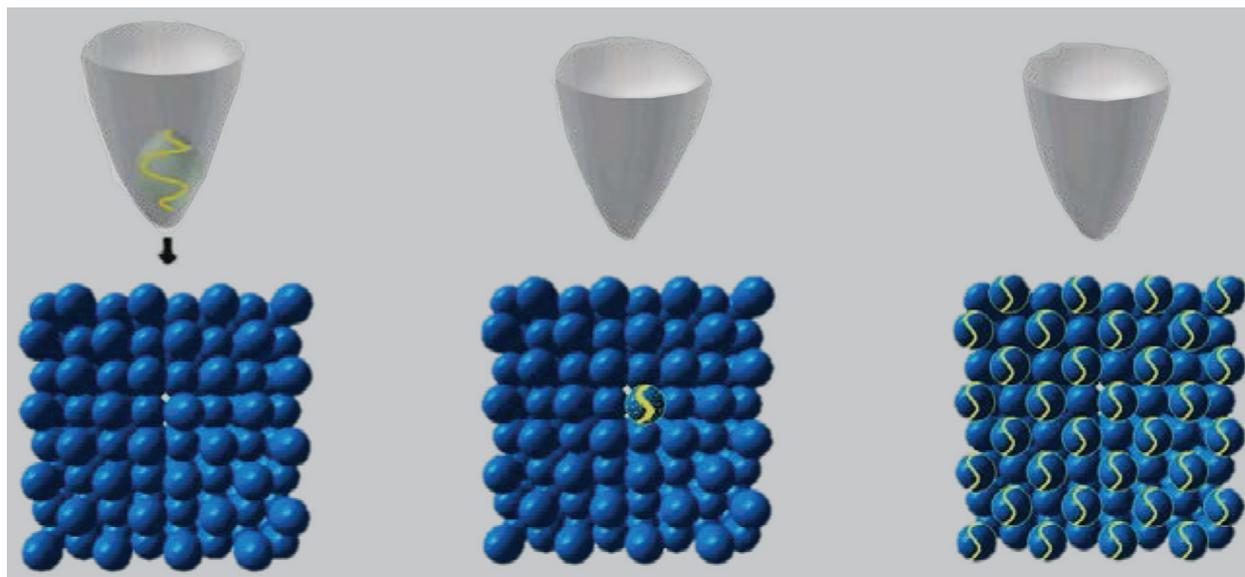
Известно, что взаимодействие двух электронов в физическом пространстве не сводится только к мгновенному электростатическому взаимодействию ( $e - e$ ) из-за конечной скорости с распространения возмущений калибровочного электромагнитного поля. В рамках концепции термодинамики [14] нами было показано [4, 15], что в неравновесном конденсированном состоянии спонтанно возникающая статическая  $\chi$ -мода кинематической волны плотности калибровочного электромагнитного поля способна запутать пару электронов, как субатомная энергетическая «струна» ( $e \sim \chi \sim e$ ). Расстояние  $R$  между запутанными электронами фиксируется, и центр масс электронов  $r$  движется с течением синхронизированного времени  $t$ , описываясь волновой функцией  $\phi_R(r|t)$ . В свою очередь, кинематическая волна плотности биелектронной квазичастицы  $\phi_R(r|t)$  заключена в пространственную полость в материале. Верхняя граница длины полости  $L$  определяется расстоянием распространения квантовой кинематической волны плотности  $\phi_R(r|t)$  за время существования субатомной запутанной биелектронной квазичастицы. Если обозначить через  $|R|$  фиксированную длину струны между запутанными электронами пары, то длина  $L$  будет определяться соотношением [4]:

$$L = |R| / \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры. Параметр  $L$  задает верхнюю границу супраатомного масштабного уровня неравновесного состояния материала.

#### Аттосекундная генерация субатомной гибридной электронной системы

Эффекты перестройки коррелированного движения электронных пар на субатомном уровне, вызванные одиночным аттосекундным импульсом, показаны на рисунке. На диаграмме показаны основные этапы генерации запутанной электронной пары в субатомной области одного из атомов и дальнейшее распространение его кинематической волны плотности  $\phi_R(r|t)$  на соседние атомы в компактной пространственной полости на супраатомном уровне материала, ограниченной интерфейсом кинематической волны плотности  $\phi_R(r|t)$ .



Аттосекундный импульсный механизм субатомного образования запутанной пары электронов ( $e\sim\chi\sim e$ ) и распространения кинематической волны биэлектронной плотности  $\phi_R(r|t)$  на супраатомном уровне материала

Таким образом, в рамках субатомной аттосекундной термополевой квантовой динамики конденсированного состояния предполагается, что в материале, помимо системы субатомных одиночных электронов, имеется подсистема короткоживущих запутанных пар электронов — биэлектронных квазичастиц. Обобщенное гильбертово пространство  $H^{NP}$  состояний гибридной электронной системы строится, как обычно, прямым произведением гильбертова пространства состояний  $N$  электронов (фермионов) и гильбертова пространства состояний  $P$  биэлектронов (бозонов):

$$H^{NP} = H^{Ne} \otimes H^{P(2e)}. \quad (5)$$

В уравнении (5) гильбертово пространство  $H^{Ne}$  состояний  $N$  электронов представлено как антисимметричное прямое произведение пространств отдельных одиночных электронов:

$$H^{Ne} = Asym(H_1^{1e} \otimes H_2^{1e} \otimes \dots \otimes H_N^{1e}). \quad (6)$$

Точно так же гильбертово пространство  $H^{P(2e)}$  состояний  $P$  запутанных биэлектронов представляется как симметричное прямое произведение пространств отдельных запутанных электронных пар:

$$H^{P(2e)} = Sym(H_1^{2e} \otimes H_2^{2e} \otimes \dots \otimes H_P^{2e}). \quad (7)$$

Общее фокковское пространство  $H_{OES}$  состояний открытой единой электронной системы, состоящей из электронов и биэлектронов, строится как прямая сумма гильбертовых пространств состояний  $\{H^{NP}\}$  с переменным числом электронов  $N = 1, 2, \dots$

и переменное количество запутанных электронных пар  $P = 1, 2, \dots$

$$H_{OES} = \otimes_N \otimes_P H^{NP}. \quad (8)$$

Отметим особый статус субатомного уровня аттосекундных импульсных квантовых процессов. Только на этом базовом уровне многомасштабной структуры неравновесного конденсированного состояния образуются запутанные субатомные пары электронов с высокой энергией. Они способны накапливать квантовую электромеханическую энергию, конденсируясь на интерфейсах границ капсул квантовых накопителей электромеханической энергии. 2D-интерфейсы образуют оболочки капсул электромеханических систем (НЭМС) накопителей энергии в материалах. Они дополняют обычные электронно-колебательно-вращательные каналы аккумуляции и диссипации энергии в условиях импульсной накачки материалов.

Уникальность супраатомного уровня структуры неравновесного состояния материала заключается в том, что на нем одновременно протекают атомо-молекулярные процессы квантовой фемтохимии и процессы квантовой аттофизики нанoeлектромеханических систем. Здесь функционируют два типа наноразмерных квантовых накопителей энергии — НЭМС и НМС. Они сосуществуют в аттосекундном и фемтосекундном ритмах времени.

### Заключение

В настоящее время приложения эффектов квантовой запутанности составляют основу второй квантовой революции в развитии высоких технологий.

В представленной статье обсуждаются квантовые эффекты импульсной запутанности в субатомных и супраатомных масштабах неравновесного конденсированного состояния. Мы рассмотрели физические основы их использования для разработки принципиально новых субатомных аттосекундных квантовых технологий аккумуляции энергии в материалах. В разделе 1 проанализировали перспективы реализации механизма аттосекундного импульсного запутывания пар субатомных электронов. В разделе 2 рассмотрели организацию гибридных электронных возбуждений на супраатомном уровне конденсированного состояния вещества с помощью интерфейсов субатомных запутанных электронных пар. Нами также был рассмотрен квантовый формализм описания комбинированной бозонной подсистемы первичных высокоэнергетических субатомных и вторичных низкоэнергетических супраатомных запутанных электронно-ядерных возбуждений в квантово-размерных полостях резонаторов НЭМС.

Современные разработки квантовых НЭМС дополняют подходы и методы создания атомно-молекулярных устройств НМС. Молекулярные наномашинны создаются фемтохимическими процессами с использованием пикосекундного инфракрасного и фемтосекундного импульсного оптического излучения. Развитие направления квантовых НЭМС, как гибридных бинарных двухуровневых квантовых устройств накопителей энергии, должно основываться на аттосекундном импульсном воздействии жесткого ультрафиолетового излучения или мягкого рентгеновского излучения на материал. Прорыв в этой области аттосекундных субатомных квантовых технологий энергетики материалов сдерживается не только из-за отсутствия теоретических концепций и адекватных компьютерных моделей, но и из-за отсутствия натуральных экспериментов. Необходимы дальнейшие фундаментальные физические исследования в этой области.

### Библиографический список

1. Christensson N., Kauffmann H.F. et al., Origin of long-lived coherences in light-harvesting complexes // *J. Phys. Chem. B*. 2012. Vol. 116.
2. Halpin A., Johnson Ph.J.M., et al. Two-dimensional spectroscopy of a molecular dimer unveils the effects of vibronic coupling on exciton coherences // *Nature Chemistry*. 2014. № 6.
3. Zewail A.H. Femtochemistry: Atomic-scale dynamics of the chemical bond // *Angew Chem Int Ed Engl*. 2000. Vol. 39.
4. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S. Multiscale space-time dissipative structures in materials: Two-electron genesis of nonequilibrium electromechanical interfaces // *Phys. Mesomech*. 2017. Vol. 20. № 1.
5. Pisharody S.N., Jones R.R. Probing two-electron dynamics of an atom // *Science*. 2004. Vol. 303.
6. Vanroose W., Martin F., Rescigno T.N. & McCurdy C.W. Complete photo-induced breakup of the H<sub>2</sub> molecule as a probe of molecular electron correlation // *Science*. 2005. Vol. 310.
7. Morishita T., Watanabe S. & Lin C.D. Attosecond light pulses for probing two-electron dynamics of helium in the time domain // *Phys. Rev. Lett*. 2007. Vol. 98.
8. Ott C., Kaldun A., Argenti L., Raith P., Mayer K., Laux M., et al. Reconstruction and control of a time-dependent two-electron wave packet // *Nature* 2014. Vol. 516.
9. Ranitovic P., Hogle C.W., Rivière P., Palacios A., Tong X.M., Toshima N., et al. Attosecond VUV coherent control of molecular dynamics // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2014 Vol. 111.
10. Levesque J. and Corkum P.B. Attosecond science and technology // *Can. J. Phys*. 2006. Vol. 84.
11. Corkum P.B., Krausz F. Attosecond science // *Nature Physics*. 2007. Vol. 3.
12. Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics // *Rev. Mod. Phys*. 2009. Vol. 81.
13. Gallmann L, Cirelli C., Keller U. Attosecond Science: Recent Highlights and Future Trends // *Annual Review of Physical Chemistry*. 2012. Vol. 63.
14. Umezawa H., Matsumoto H., Tachiki M. *Thermo Field Dynamics and Condensed States*. North-Holland Pub. Co., Amsterdam. 1982, 591 p.
15. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Maksimov D.Yu. & Zhukovsky M.S. Attosecond nanotechnology: from subatomic electrostatic strings entangling electron pairs to supra-atomic quantum nanoelectromechanical systems energy storage in materials // *Int. J. Nanotech*. Vol. 15. № 4/5.