

Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 19–29.
Izvestiya of Altai State University. 2024. No 1 (135). P. 19–29.

Научная статья

УДК 538.9 : 539.21

DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-02

Развитие теории и эксперимента в области сенсорно-актуаторных квантовых технологий биомиметических материалов

Марк Сергеевич Жуковский

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Барнаул, Россия, mark@zhukovsky.org

Original article

Development of Theory and Experiment in the Field Of Sensor-Actuator Quantum Technologies of Biomimetic Materials

Mark S. Zhukovsky

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, mark@zhukovsky.org

В обзоре дан анализ проблемы создания единого подхода к экспериментальному описанию и к теоретическому расчету взаимосвязей, идущих параллельно внутри атомов аттосекундных реакций субатомных квазичастиц и фемтосекундных превращений на атомном масштабном уровне биомиметических материалов. Решение этой проблемы появилось на грани 2020-х гг., когда синхротронная генерация аттосекундных однопериодных фотонов сделала возможным экспериментальное изучение их влияния на субатомную квантовую динамику в материалах и открыла путь к квантовым технологиям управления аттосекундной динамикой пар и одиночных электронов, запутанных с однопериодными фотонами. Рассмотрены решения трех основных задач, открывающих реальные перспективы разработки квантовых наноэлектромеханических систем сенсорно-актуаторных технологий самосборки и самоорганизации биомиметических материалов, начиная с аттосекундно-субатомного масштаба и, через диссипативные энергетические цепи, заканчивая фемтосекундными процессами на атомном уровне материала. Рассмотрены значимость и актуальность построения моделей квантовой физикохимии и компьютерных расчетов механизмов иерархической системы управления квантовыми технологиями не только на субатомном и атомном, но также на более высоких нано-, микро- и мезомасштабных уровнях строения биомиметических материалов.

The review analyzes the problem of a unified approach to experimental and theoretical descriptions of parallel relationships in attosecond reactions of subatomic quasiparticles and femtosecond transformations at the atomic scale in biomimetic materials. Solutions to the problem appeared on the brink of the 2020s, when synchrotron-generated attosecond single-period photons enabled studying their influence on subatomic quantum dynamics. They paved the way for quantum technologies to control attosecond dynamics of electron pairs and electrons entangled with single-period photons. The considered solutions of the three main problems provide real prospects for development of quantum nanoelectromechanical sensor-actuator self-assembly and self-organization technologies for biomimetic materials, starting from the attosecond-subatomic scale and ending with femtosecond atomic processes. The significance and relevance of building quantum physical chemistry models and performing computer predictions of hierarchical control system mechanisms for quantum technologies are discussed and considered at the subatomic, atomic, and at higher nano-, micro-, and mesoscale structure levels of biomimetic materials.

Ключевые слова: квантовые сенсорно-актуаторные технологии, квантовые нанoeлектромеханические системы, биомиметические материалы, квантовая физикохимия, теория, эксперимент, компьютерное моделирование

Для цитирования: Жуковский М.С. Развитие теории и эксперимента в области сенсорно-актуаторных квантовых технологий биомиметических материалов // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 19–29. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-02.

Введение

С развитием НТР востребованными становятся биомиметические материалы как функциональная основа иерархически организованных интеллектуальных устройств обеспечения сверхбыстрого реагирования и принятия решений в современных сложных технологиях машиностроения, энергетики, медицины, военного дела. Ключом к получению таких материалов является разработка сенсорно-актуаторных технологий на основе аттосекундных однопериодных фотонов синхротронного излучения, обеспечивающих контроль и управление аттосекундной субатомной квантовой динамикой запутанных с этим фотоном пар и одиночных электронов. В связи с этим интенсивно разрабатываются фундаментальные подходы квантовой физики к описанию экспериментов и теоретическому расчету быстропротекающих внутри атомов аттосекундных реакций субатомных запутанных квазичастиц (фотонов, электронов, ядер) и сопряженных с ними фемтосекундных структурных превращений на атомном и супра-атомном масштабном уровне строения биомиметических материалов.

Разработка фундаментального подхода к проблеме связана с развитием нового понятийного и математического аппарата междисциплинарного предмета — квантовой физикохимии, иерархически объединяющей аттосекундную физику квантовых субатомных квазичастиц и квантовую фемтосекундную химию атомов в биомиметических материалах. С этой целью в основном решаются три взаимосвязанные фундаментальные задачи:

1. Развитие квантовой физикохимии в направлении разработки квантовых аттосекундных сенсорно-актуаторных технологий субатомного уровня и фемтосекундных сенсорно-актуаторных технологий супра-атомного уровня для их использования в энергетических цепях биомиметических материалов.

2. Разработка и внедрение в сенсорно-актуаторные квантовые технологии биомиметических материалов новых квантовых фемтохимических моделей сенсорно-актуаторных процессов в атомно-молекулярных системах (АМС) с участием субатомных квазичастиц (фотонов, электронов, протонов, ядер) и квантовых

Keywords: quantum sensor-actuator technologies, quantum nanoelectromechanical systems, biomimetic materials, quantum physical chemistry, theory, experiment, computer modeling.

For citation: Zhukovsky M.S. Development of Theory and Experiment in the Field Of Sensor-Actuator Quantum Technologies of Biomimetic Materials. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 19–29. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-02.

физикохимических моделей аттосекундных сенсорно-актуаторных процессов нанoeлектромеханических систем (НЭМС) с учетом их фазового и химического состава, топологии и геометрии образцов, а также общих условий функционирования энергетических цепей.

3. Внедрение компьютерного моделирования и расчетов физикохимических характеристик иерархических квантовых сенсорно-актуаторных комплексов биомиметических материалов в решение прикладных задач машиностроения, энергетики, медицины и вооружения.

Суть этих задач и основы их решения будут рассмотрены ниже.

Современное состояние фундаментальных исследований проблемы

В последние годы впечатляющие успехи в области технологий материалов в значительной степени связаны с фундаментальными разработками в области так называемых интеллектуальных материалов [1]. Ряд физических свойств этих материалов контролируемым образом существенно изменяется при адаптации к внешним воздействиям, таким как механическое напряжение, температура, влажность, электрические и магнитные поля, электромагнитные импульсы, химические и биохимические атаки. Наиболее известными их представителями являются ферроэлектрики, ферромагнетики и сплавы с памятью формы. В силу этой специфики интеллектуальные материалы являются ключевыми компонентами современных информационно-силовых установок, устройств и приборов, таких как инструменты ультразвуковой хирургии, гидроакустические локаторы, приборы ночного видения, импланты в медицине, элементы памяти в компьютерах и т.п. Известно, что свойства интеллектуальных материалов кардинально меняются, когда размеры их базовых сетевых инфраструктур — энергетических цепей — уменьшаются до нескольких десятков и сотен атомов. Это уже биомиметические материалы, имеющие особые физикохимические свойства, подобные живым организмам. Прогнозируется, что квантовые техноло-

гии биомиметических материалов станут ключевым направлением индустрии, которое будет определять дальнейшее научно-техническое развитие общества в XXI в. наряду с информационными технологиями и биотехнологиями. Манипулирование самосборкой и самоорганизацией биомиметических материалов посредством управления на квантовом субатомном и атомном уровнях их энергетическими цепями посредством квантовых технологий обеспечит кардинальные прорывы в основных отраслях индустрии и медицины [2].

С точки зрения специфики моделирования биомиметические наноматериалы наделены иерархической внутренней инфраструктурой энергетических цепей с уникальными функциональными элементами — взаимно дополнительными по их функциям сенсорно-актуаторными комплексами. Сенсоры преобразуют тепло, работу сил механических напряжений, электрической и магнитной поляризации материала в энергию световых, звуковых, тепловых, химических и тактильных сигналов. Актуаторы, наоборот, преобразуют сигналы в энергию механических, электрических, магнитных трансформаций, тепловых потоков и химических превращений в энергетических цепях биомиметических материалов. Достижимые на практике уровни согласованности во времени и пространстве, четкости и скорости алгоритмической работы энергетических цепей, датчиков высокочувствительных сенсоров и высокопроизводительных актуаторов задают степени интеллектуальности биомиметического материала. Принято, что высшая степень интеллектуальности достигается у прототипов биомиметиков — биологических организмов. Поэтому часть исследований связана с детальным изучением работы сенсорно-актуаторных механизмов энергетических кислородных цепей клеток с целью разработать более совершенные биомиметические аналоги этих природных устройств [3].

В настоящее время достигнута в экспериментах степень миниатюризации функциональных элементов энергетических сенсорно-актуаторных цепей достигла масштабного уровня нанометра в пространстве и фемтосекундной длительности тактовой работы во времени протекания квантовых процессов в атомно-молекулярных наносистемах. Это уровень молекулярных актуаторов — наномолекулярных машин и молекулярных сенсоров — наномолекулярных датчиков [4]. Режимы работы интегральных схем наномолекулярных машин и датчиков биомиметических материалов принципиально отличаются от вышестоящих уровней микро-, мезо- и макромасштабов интеллектуальных материалов. Доказательства представлены явлениями жизни биологических организмов, наномолекулярный уровень сенсоров и актуаторов которых определяет специфику адаптивности и изменчивости их клеточных форм. Это высший тип са-

мосборки и самоорганизации биологических молекулярных форм интеллектуальных материалов.

Что же касается искусственных материалов биомиметиков физикохимии, то совершенствование интеллектуальных материалов такого типа продолжается. В настоящее время на переднем крае фундаментальных исследований миниатюризации элементов энергетических цепей произошел существенный прорыв в новую квантовую область субатомных пространственных масштабов и аттосекундных масштабов длительности квантовых процессов. Область масштабных уровней субатомной аттосекундной физики [5–14] и супра-атомных аттосекундных нанотехнологий [15–18] открывает неизвестные ранее динамические квантово-полевые явления в инфраструктуре функциональных сенсорно-актуаторных комплексов. Квантовые механизмы запутанности этих устройств на порядки повышают чувствительность биомиметических атомно-молекулярных сенсоров и производительность наноэлектромеханических актуаторов по сравнению с их биохимическими аналогами, что позволит создавать иерархические многоуровневые биомиметические материалы [19].

В середине прошедшего десятилетия была сформулирована фундаментальная проблема создания теоретического описания и компьютерного моделирования самосборки и самоорганизации многоуровневой пространственно-временной иерархии физико-химических процессов в неравновесных конденсированных состояниях биомиметических материалов от субатомики до макросистем [20]. Универсальный подход к математическому описанию общей постановки и решению этой задачи был развит в работах японских теоретиков еще в середине 80-х гг. прошлого века. В квантовой теории этот подход получил название «термополевая динамика конденсированного состояния» [21].

Теоретические и экспериментальные достижения в решении проблемы

В настоящее время в ряде ведущих научных лабораторий США, Японии, Китая, Южной Кореи, ЕС ведутся базовые исследования и инженерные разработки в области нанотехнологий биомиметических материалов нового поколения. Они исходят из идеи использования в реальном времени систем миниатюрных наноботов для измерения, контроля и управления процессами в материалах. Большинство подходов можно отнести к одному из двух главных направлений, которые можно классифицировать как разработку и применение атомно-молекулярных и электро-механических наноботов соответственно. В работах первого направления рассматриваются бионические наноботы [22–26]. Они могут найти применение в области инжиниринга новых функциональных материалов. В них отмечается, что в основу созда-

ния и контроля бионических наноботов можно положить клеточные процессы самосборки и самоорганизации биохимических систем. Типичными являются механизмы конверсии электронно-колебательно-вращательных возбуждений молекул или нанокристаллов в механическую работу по перемещению бионических наноботов и формированию супрамолекулярных структур типа: «ключ — замок», «хозяин — гость». В ряде работ отмечается, что наряду с достоинствами бионических наноботов, такими как скорость и селективность их ферментативно-каталитических манипуляций с атомами, у них есть существенные недостатки: высокая степень повреждаемости, слабая управляемость, малая мощность и производительность в выполнении механической работы. Недостатки касаются молекулярных моторов и транспортных систем внутри материалов. По первому направлению разработки и внедрению атомно-молекулярных машин одним из самых амбициозных проектов в мире является программа развития «синтетической биологии на химических чипах» интеллектуальных материалов, являющихся гибридами молекулярных и электронных устройств бионики, со сложностью функций живых организмов.

За последние пять лет интерес исследователей к специфической тематике формализма «сенсор — актуатор», несомненно, возрос. Стремительно развиваются направления по моделированию и созданию биомиметических соединений, которые в будущем станут более эффективными аналогами современных лекарственных средств. Как уже обозначалось ранее, сенсорно-актуаторная способность вещества по отношению к электронам и протонам является существенной с точки зрения медицинской химии, физической химии и бионеорганической химии. В последнее время изучаются водорастворимые функциональные производные фуллеренов (в частности, C_{60}), например, фуллеренол-24. Такое соединение обладает развитой системой сопряженных делокализованных электронных облаков. Поэтому он выступает в качестве антиоксиданта, дезактивируя свободные радикалы, которые могут повреждать клеточные компоненты организма [27–30]. Другую аллотропную модификацию углерода, графен, также употребляют в качестве антиоксиданта как для будущих биомедицинских применений [31–33], так и в материаловедении [34]. Особое внимание уделяется материалам на основе гибридов графена с другими частицами, имеющими высокое сродство к протонам и электронам (например, комплексами и соединениями переходных металлов).

В связи с недавним стремительным развитием методов квантовой химии симуляция физикохимических взаимодействий «сенсор — актуатор» с целью изучения механизмов взаимодействий и предсказаний по лучшим условиям проведения только начина-

ся. Гораздо больше направлений представлено именно «сенсорной» частью. Так, фуллерены и их модификации можно использовать для детектирования присутствия ацетона [35], формальдегида [36]. Производные на основе фуллеренов могут использоваться как оптические, электрохимические и биохимические сенсоры [37, 38]. Комплексные соединения переходных металлов уже начинают изучаться с позиций концепции «сенсор — актуатор». Так, у некоторых комплексов присутствует поведение спин-кроссовера между низкоспиновыми и высокоспиновыми состояниями в ответ на внешние стимулы, такие как температура, давление, контроль напряжения и световое облучение. Поэтому они представляют интерес для функциональных устройств, таких как датчики, устройств молекулярной электроники, устройств спинтроники, а также для приложений памяти и обработки информации [39].

Сенсорно-актуаторные технологии НЭМС биомиметических материалов

Направление создания сенсорно-актуаторных технологий биомиметических материалов на базе наномеханических систем только формируется, но уже имеет определенные теоретические наработки [40–44]. Разработка адаптивных к внешним условиям среды автономных кибернетических устройств и приборов являлась наиболее приоритетной целью инжиниринга микроэлектромеханических систем (МЭМС) в течение 80–90-х гг. XX в. Следующим по миниатюризации уровнем наномеханических систем (НЭМС) начали заниматься с развитием нанотехнологий. Особую значимость это направление представляет для повышения эффективности и надежности производства, переработки и утилизации энергии, информации, материалов, а также создания принципиально новых наносистем с высокими ресурсами надежности, мощности и производительности работы биомиметического интеллекта.

Разработки квантовых электромеханических наномашин дополняют подходы и методы в области разработки квантовых атомно-молекулярных наноботов. В частности, в аспекте практического применения основное различие состоит в том, что НЭМС технологии основываются на аттосекундном импульсном воздействии жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена на материал с целью создания в нем активных квантовых электромеханических наноботов. Синтез устройств атомно-молекулярных наноботов ведется на основе фемтохимических процессов с применением пикосекундного инфракрасного и фемтосекундного оптического импульсных излучений. Так как для функций наноботов кроме пространственных размеров существенную роль играют длительность во времени выполнения операций, то существуют также принципиальные различия между свойства-

ми атомно-молекулярных и электромеханических наноботов. Атомно-молекулярные структуры химии по временным характеристикам процессов в области малых квантовых систем существенно уступают электромеханическим структурам в физике конденсированного состояния. Химическая атомно-молекулярная структура материала является устойчивой лишь для импульсных воздействий на квантовую субатомную электродинамическую систему ядер и электронов в области адиабатических процессов фемтосекундных превращений. Напротив, квантовая электродинамическая структура конденсированного состояния сохраняет свою устойчивость и в не адиабатических условиях при коротких аттосекундных импульсных воздействиях, когда адиабатическая атомно-молекулярная сверхструктура материала уже утрачивает физический смысл. Поэтому «нехимические» квантовые механизмы движения НЭМС-ботов должны стать основными в развитии робототехнического инжини-

ринга биомиметических материалов, работающих в экстремальных условиях высокоэнергетических, высокоскоростных импульсных процессов.

Следует заметить, что развитие НЭМС направления квантовых субатомных аттосекундных технологий существенно сдерживалось до рубежа 2020-х гг. отсутствием источников однопериодного импульсного излучения в диапазоне вакуумного и экстремального ультрафиолета, а также мягкого рентгена. Сегодня осуществлен реальный прорыв в решении этой проблемы — ондуляторные схемы отвода излучения в синхротронах дали однопериодные сверхкороткие фотонные импульсы аттосекундной длительности [45–47]. На рисунке 1 представлено сравнение лазерного фемтосекундного оптического импульса с однопериодным фотоном синхротронного излучения, полученным с использованием ондулятора в 2019 г. [45]. Такие фотоны содержат один период аттосекундных электромагнитных колебаний.

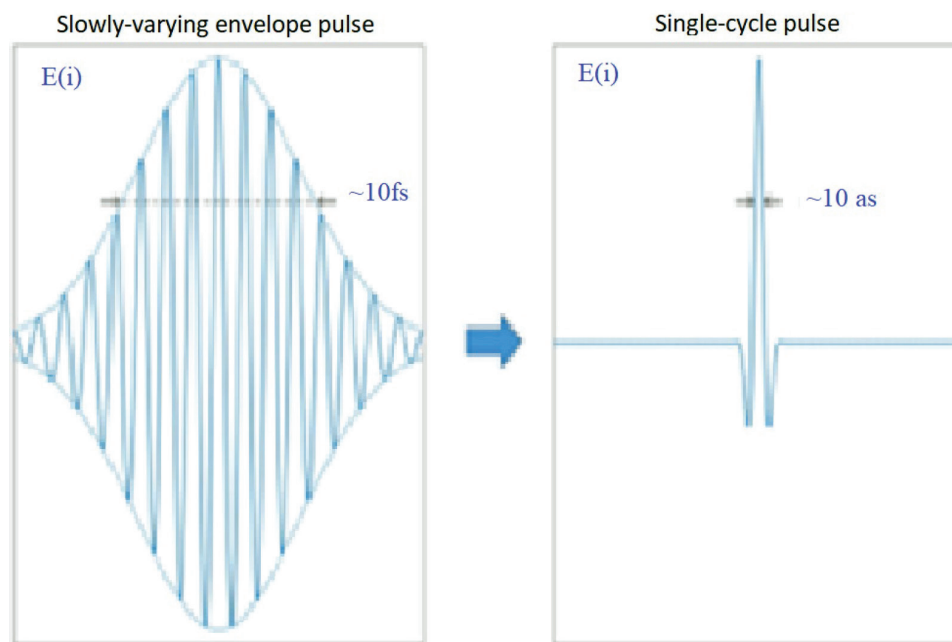


Рис. 1. Оптический импульс и аттосекундный однопериодный фотон

Для описания нелинейного воздействия и квантового запутывания таких фотонов с электронами в субатомных масштабах стали востребованными развиваемые в рамках релятивистской квантовой теории поля и термополевой динамики подходы [48–52].

Еще в 2018 г. нами были опубликованы [48] результаты рассмотрения квантового запутывания одного электрона и пары электронов с модами аттосекундных однопериодных фотонов. Запутывание движения электронной пары на субатомном уровне, вызванное запутыванием с парой запутанных аттосекундных однопериодных фотонов, показано на ри-

сунке 2. На диаграмме показаны три этапа генерации запутанной электронной пары в субатомной области одного из атомов и распространение ее кинематической волны плотности на соседние атомы в полости биомиметического материала.

В 2019 г. в работе [49] также была опубликована дорожная карта для экспериментальной реализации сильной квантовой связи между электронами и фотонами, аналитически исследовано явления запутанности, возникающее в этом режиме. Показано, что полостные фотоны создают запутанность между электронами «некулоновского» типа. Поскольку

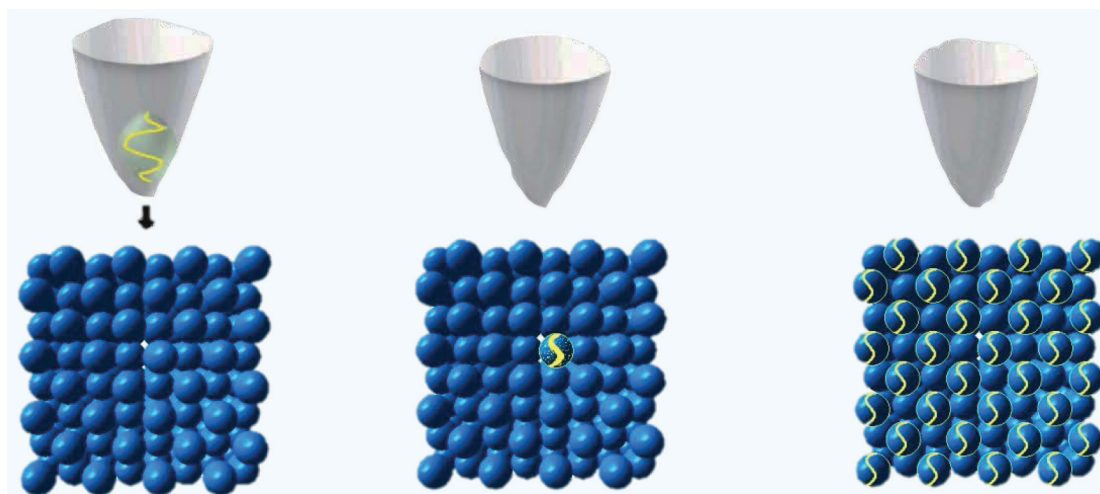


Рис. 2. Субатомный механизм образования запутанной однопериодными фотонами кинематической волны запутанной пары электронов

сильная связь может преобразовывать запутанность между парами фотонов в запутанность пары фотон — электрон, пучки запутанных электронов можно будет использовать для квантовой связи. Пока такое реализовано исключительно для фотонов. Данная дорожная карта была реализована экспериментально в 2020 г. в работе [50]. В этом же году в публикации [51] приведены результаты экспериментального применения аттосекундных фотонных импульсов для управления волновыми функциями отдельного электрона. В 2021 г. был опубликован обзор работ по применению ультрабыстрых электронов к исследованию неравновесных состояний материалов [52].

Заключение

В настоящее время приложения эффектов квантовой запутанности фотонов с электронами в субатомных областях материалов составляют основу второй квантовой революции в развитии высоких технологий. В последние годы базирующаяся на гибридной природе сильно связанных состояний света и вещества поляритонная химия мезоуровня материалов также стала быстро развивающейся областью [53]. В ней сделан ряд экспериментальных прорывов, указывающих на достижимость квантового контроля в полостях мезоуровня свыше 1 мкм локальных химических реакций атомного диапазона. В резонаторных полостях мезоуровня материалов сильная связь фотонных оптических резонансных мод с электрон-ядерными модами колебаний может управлять с верхнего мезомасштабного уровня локальными химическими процессами на атомном уровне [54]. Были опубликованы также работы по полостному поляритонному контролю переноса энергии и сведения о повышении критической температуры в сверхпроводниках. Теоретические работы [55] стремятся к детальному

пониманию основного движущего механизма мезоскопической поляритонной химии, так как появление в мезополостях квантовых гибридных состояний «свет — материя» представляет собой сложнейшую теоретическую задачу квантовой электродинамики материалов (КЭД). В ней наряду со сложностью электронно-ядерной динамики сильная связь с модами электромагнитного поля вводит новые квантовые состояния поляритонов, которые порождают резкое увеличение сложности описания из-за большой размерности комбинированных свето-вещественных степеней свободы. Появление эффектов коллективной связи позволяет передавать энергию в материалах на субмикронные расстояния. Считается, что коллективная связь вводит квантовую когерентность в мезоскопическом масштабе в условиях окружающей среды, при этом сильное взаимодействие света с веществом приводит к образованию коррелированных темных состояний возбуждений, которые не могут быть заселены за счет поглощения света [56]. Это еще больше повышает сложность описания поляритонной химии. Существующие до сих пор симуляции показывают только то, что коллективные эффекты вызывают локальные модификации, которые могут влиять на ландшафт свободной энергии поляритонного ансамбля и, таким образом, могут использоваться для управления химической реактивностью. Однако во всех работах остается неясной природа резонаторных полостей поляритонной химии, которые должны формироваться в рамках КЭД как иерархическая система полостных интерфейсов.

В связи с этим обнаруживается тесная связь между рассмотренными в данном обзоре субатомными квантовыми подходами физикохимии новых квантовых субатомных технологий НЭМС с проблемой формирования поляритонных молекулярных резонатор-

ных полостей мезоскопического уровня на примере биомиметических материалов. В отличие от других теорий в данном подходе исходно учтены иерархическая многоуровневая самосборка и самоорганизация НЭМС интерфейсных полостей конденсированного состояния, начиная с фундаментального субатомного уровня КЭД [19, 43, 44]. Это позволяет перебросить мосты между удаленными по масштабу свето-вещественными квантовыми явлениями современных технологий материалов.

Современные разработки квантовых НЭМС дополняют подходы и методы создания атомно-молекулярных машин, которые используют фемтосекундные квантово-химические процессы, применяя

импульсное фемтосекундное оптическое излучение. Развитие научного направления квантовых НЭМС как гибридных квантовых устройств основывается на аттосекундном импульсном воздействии фотонов жесткого ультрафиолета или мягкого рентгена. Прорыв в этой области аттосекундных субатомных квантовых технологий материалов в экспериментах на рубеже 2020-х гг. поддержан новыми теоретическими концепциями междисциплинарной дисциплины квантовой физикохимии. В дальнейшем ожидается усиление симбиоза фундаментальных теоретических и экспериментальных работ в этом быстро прогрессирующем направлении современного технологического развития.

Библиографический список

1. Intelligent Materials / Edited by M. Shahinpoor, H.-J. Schneider. Cambridge, UK: Thomas Graham House. 2008. 532 p.
2. Жуковский М.С., Безносюк С.А., Потекаев А.И., Старостенков М.Д. Теоретические основы компьютерного наноинжиниринга биомиметических наносистем. Томск: Изд-во Научно-техническая литература, 2011. 236 с.
3. Martin D.R., Matyushov D.V. Electron-transfer Chain in Respiratory Complex I // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-017-05779-y
4. Эббот Д., Дэвис П., Пати А. Квантовые аспекты функционирования биологических структур. Долгопрудный: Изд-во Интеллект. 2014. 320 с.
5. Corkum P.B. Attosecond Pulses at Last // *Nature*. 2000. Vol. 403. P. 845–846. DOI: 10.1038/35002711
6. Levesque J., Corkum P.B. Attosecond Science and Technology // *Canadian Journal of Physics*. 2006. Vol. 84. No 1. P. 1–18. DOI: 10.1139/p05-068
7. Niikura H., Corkum P.B. Attosecond and Angstrom Science // *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2006. Vol. 54. P. 511–548. DOI: 10.1016/S1049-250X(06)54008-X
8. Corkum P.B., Krausz F. Attosecond Science // *Nature Physics*. 2007. Vol. 6. No 3. P. 381–387. DOI: 10.1038/nphys620
9. Krausz F., Ivanov M., Attosecond Physics // *Reviews of Modern Physics*. 2009. Vol. 81. No 1. P. 163–234. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.163
10. Gallmann L., Cirelli C., Keller U. Attosecond Science: Recent Highlights and Future Trends // *Annual Review of Physical Chemistry*. 2012. Vol. 63. P. 447–469. DOI: 10.1146/annurev-physchem-032511-143702
11. Ranitovic P., Hogle C. W., Rivière P., Palacios A., Tong X.M., Toshima N., et al. Attosecond Vacuum UV Coherent Control of Molecular Dynamics // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2014. Vol. 111. P. 912–917. DOI: 10.1073/pnas.1321999111
12. Kim D.E. Extreme Metrology for Ultrafast Electron Dynamics at the Atomic Scale // *Journal of the Korean Physical Society*. 2018. Vol. 73. P. 227–234. DOI: 10.3938/jkps.73.227
13. Hofmann C., Bray A., Koch W. et al. Quantum Battles in Attoscience: Tunnelling // *The European Physical Journal D*. 2021. Vol. 75. P. 1–13. DOI: 10.1140/epjd/s10053-021-00224-2
14. Armstrong G.S.J., Khokhlova M.A., Labeye M., et al. Dialogue on Analytical and Ab Initio Methods in Attoscience // *The European Physical Journal D*. 2021. Vol. D 75. No 209. P. 1–31. DOI: 10.1140/epjd/s10053-021-00207-3
15. Жуковский М.С., Безносюк С.А., Ладыгин Ю.И. Компьютерный наноинжиниринг функциональных биомиметических материалов и устройств // *Нанотехника*. 2011. № 1 (25). С. 80–85.
16. Жуковский М.С., Безносюк С.А., Ванчинкхуу Дж. Теоретические основы и компьютерное моделирование фемтосекундного импульсного синтеза активных центров наноструктурных превращений материалов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2013. Т. 10. С. 176–184.
17. Жуковский М.С., Безносюк С.А. Квантовая теория моделирования фемтосекундно-импульсной самосборки и самоорганизации активных нанометровых частиц в материалах // *Нанотехника*. 2013. № 1 (33). С. 41–45.
18. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S., Zhukovsky T.M. Theory and Computer Simulation of Quantum Nems Energy Storage in Materials // *International Journal of Nanoscience*. 2015. Vol. 14. P.147–152. DOI: 10.1142/S0219581X14600230
19. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S. Multiscale Space-Time Dissipative Structures in Materials: Two-Electron Genesis of Nonequilibrium Electromechanical Interfaces // *Physical Mesomechanics*. 2017. Vol. 20. P. 102–110. DOI: 10.1134/S102995991701009X
20. Steinhauser M.O. Computational Multiscale Modeling of Fluids and Solids: Theory and Applications : 2nd Edition.

- Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2017. 419 p. DOI: 10.1007/978-3-662-53224-9
21. Умэдзава Х., Мацумото Х., Татики М. Термополевая динамика и конденсированные состояния: пер с англ. М.: Физматлит, 1985. 509 с.
22. Hess H. Toward Devices Powered by Biomolecular Motors // *Science*. 2006. Vol. 312. P. 860–861. DOI: 10.1126/science.1126399
23. Lund K., Manzo A.J., Dabby N., et al. Molecular Robots Guided by Prescriptive Landscapes // *Nature*. 2010. Vol. 465 (7295). P. 206–210. DOI: 10.1038/nature09012
24. Lerner E.J. Biomimetic Nanotechnology // *The Industrial Physicist*. 2010. No 4. P. 16–19.
25. Horejs C., Mitra M.K., Pum D., Sleytr U.B., Muthukumar M. Monte Carlo Study of the Molecular Mechanisms of Surface-Layer Protein Self-Assembly // *The Journal of Chemical Physics*. 2011. Vol. 134 (12). P. 125103. DOI: 10.1063/1.3565457
26. Horejs C., Gollner H., Pum D., Sleytr U.B., Peterlik H., Jungbauer A., Tscheliessnig R. Atomistic Structure of Monomolecular Surface Layer Self-Assemblies: Toward Functionalized Nanostructures // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5 (3). P. 2288–2297. DOI: 10.1021/nn1035729
27. Injac R., Prijatelj M., Strukelj B. Fullerene Nanoparticles: Toxicity and Antioxidant Activity // *Oxidative Stress and Nanotechnology: Methods and Protocols*. 2013. Vol. 1028. P. 75–100. DOI: 10.1007/978-1-62703-475-3_5
28. Kovel E., Sachkova A., Vnukova N., Churilov G., Knyazeva E., Kudryasheva N. Antioxidant Activity and Toxicity of Fullerenols via Bioluminescence Signaling: Role of Oxygen Substituents // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20 (9), No 2324. P. 1–16. DOI: 10.3390/ijms20092324
29. Kovel E.S., Kicheeva A.G., Vnukova N.G., Churilov G.N., Stepin E.A., Kudryasheva N.S. Toxicity and Antioxidant Activity of Fullerene C₆₀, 70 with Low Number of Oxygen Substituents // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22 (12). No 6382. P. 1–17. DOI: 10.3390/ijms22126382
30. Tang N., Ding Z., Zhang J., Cai Y. and Bao X. Recent Advances of Antioxidant Low-Dimensional Carbon Materials for Biomedical Applications // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. P. 1–6. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1121477
31. El-Hnayn R., Canabady-Rochelle L., Desmarests C., Balan L., Rinnert H., Joubert O., et al. One-Step Synthesis of Diamine-Functionalized Graphene Quantum Dots from Graphene Oxide and Their Chelating and Antioxidant Activities // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. P. 1–18. DOI: 10.3390/nano10010104
32. Vatandost E., Saraei A.G., Chekin F., Raeisi S.N., Shahidi S. Antioxidant, Antibacterial and Anticancer Performance of Reduced Graphene Oxide Prepared via Green Tea Extract Assisted Biosynthesis // *Chemistry Select*. 2020. Vol. 5. P. 10401–10406. DOI: 10.1002/slct.202001920
33. Tara N., Siddiqui S.I., Nirala R.K., Abdulla N.K., Chaudhry S.A. Synthesis of Antibacterial, Antioxidant And Magnetic Nigella Sativa–Graphene Oxide Based Nanocomposite BC-GO@Fe₃O₄ for Water Treatment // *Colloid and Interface Science Communications*. 2020. Vol. 37. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.colcom.2020.100281
34. Yao W., Zhou S., Wang Z., Lu Z., Hou C. Antioxidant Behaviors of Graphene in Marine Environment: a First-Principles Simulation // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 499. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143962
35. Chang X., Xu S., Liu S., Wang N., Sun S., Zhu X., et al. Highly Sensitive Acetone Sensor Based on WO₃ Nanosheets Derived from WS₂ Nanoparticles with Inorganic Fullerene-Like Structures // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. Vol. 343. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130135
36. Gakhar T., Rosenwaks Y., Hazra A. Fullerene (C₆₀) Functionalized TiO₂ Nanotubes for Conductometric Sensing of Formaldehyde // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022. Vol. 364. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131892
37. Shetti N.P., Mishra A., Basu S., Aminabhavi T. M. Versatile Fullerenes as Sensor Materials // *Materials Today Chemistry*, 2021. Vol. 20. No 100454. P. 1–27. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100454
38. Uygun H.D.E., Uygun Z.O. Fullerene Based Sensor and Biosensor Technologies // *Smart Nanosystems for Biomedicine, Optoelectronics and Catalysis*. Intech. Open. 2020. Vol. 1. P. 1–16.
39. Amin N.A.A.M., Said S.M., Salleh M.F.M., Afifi A.M., Ibrahim N.M.J.N., Hasnan M.M.I.M., Tahir M., Hashim N.Z.I., Review of Fe-Based Spin Crossover Metal Complexes in Multiscale Device Architectures // *Inorganica Chimica Acta*. 2023. Vol. 544. P. 12168–1–121168-12. DOI: 10.1016/j.ica.2022.121168
40. Blencowe M. Quantum Electromechanical Systems // *Physics Reports*. 2004. Vol. 395. P. 159–222. DOI: 10.1016/j.physrep.2003.12.005
41. Desai T., Bhatia S. Therapeutic Micro/Nanotechnology. BioMEMS and Biomedical Nanotechnology. Berlin: Springer. 2007. 1856 p.
42. Безносюк С.А., Жуковский М.С., Потехаев А.И. Теория движения в конденсированном состоянии квантовых электромеханических плазмодных наноботов // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 5. С. 55–64. DOI: 10.1007/s11182-013-0067-8
43. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Quantum Infrastructure of Attosecond Sensors and Actuators of Nonequilibrium Physical Media in Smart Materials // *Physical Mesomechanics*. 2019. Vol. 22. P. 432–438. DOI: 10.1134/S1029959919050096
44. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Hybrid Quantum Technologies of Intellectual Nanomaterials // *International Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 16. P. 22–33. DOI: 10.1504/IJNT.2019.102389
45. Mak A., Shamuilov G., Salén C., et al. Attosecond Single-Cycle Undulator Light: A Review // *Reports on Progress in Physics*. 2019. Vol. 82. P. 1–30. DOI: 10.1088/1361-6633/aafa35
46. Maroju P.K., Grazioli C., Fraia M. Di., et al. Attosecond Pulse Shaping Using a Seeded Free-Electron Laser // *Nature*. 2020. Feb. Vol. 578 (7795). P. 386–391. DOI: 10.1038/s41586-020-2005-6

47. Aseev S.A., Mironov B.N., Ryabov E.A., et al. Ultrafast Transmission Electron Microscope for Studying The Dynamics of the Processes Induced by Femtosecond Laser Beams // *Quantum Electronics*. 2017. Vol. 47. P. 116–122. DOI: 10.1070/QEL16276
48. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Attosecond Nanotechnology: From Subatomic Electrostatic Strings Entangling Electron Pairs to Supra-Atomic Quantum Nanoelectromechanical Systems Energy Storage in Materials // *International Journal of Nanotechnology*. 2018. Vol. 15. P. 245–257. DOI: 10.1504/IJNT.2018.094783
49. Ofer K. Entanglements of Electrons and Cavity Photons in the Strong-Coupling Regime // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. P. 103602-1–103602-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.103602
50. Agueny H. Coherent Electron Displacement for Quantum Information Processing Using Attosecond Single Cycle Pulses // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 21869. P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-020-79004-8
51. Vanacore G.M., Madan I., Carbone F. Spatio-Temporal Shaping of a Free-Electron Wave Function Via Coherent Light-Electron Interaction // *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2020. Vol. 43. P. 567–597. DOI: 10.1007/s40766-020-00012-5
52. Siwick B.J., Arslan I., Wang X. Frontier Nonequilibrium Materials Science Enabled by Ultrafast Electron Methods // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 688–693. DOI: 10.1557/s43577-021-00148-7
53. Ebbesen T.W. Hybrid Light-Matter States in a Molecular and Material Science Perspective // *Accounts of Chemical Research*. 2016. Vol. 49 (11). P. 2403–2412. DOI: 10.1021/acs.accounts.6b00295
54. Thomas A., et al. Tilting a Ground-State Reactivity Landscape by Vibrational Strong Coupling // *Science*. 2019. Vol. 363. P. 615–619. DOI: 10.1126/science.aau7742
55. Sidler D., Ruggenthaler M., Schäfer C., Ronca E., Rubio A. A Perspective on Ab Initio Modeling of Polaritonic Chemistry: The Role of Non-Equilibrium Effects and Quantum Collectivity // *The Journal of Chemical Physics*. 2022. Vol. 156. P. 1–23. DOI: 10.1063/5.0094956
56. Gonzalez-Ballester C., Feist J., Gonzalo Badia E., et al. Uncoupled Dark States Can Inherit Polaritonic Properties // *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 117. P. 156402-1–156402-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.156402

References

1. *Intelligent Materials* / Edited by M. Shahinpoor, H.-J. Schneider. Cambridge, UK: Thomas Graham House. 2008. 532 p.
2. Zhukovsky M.S., Beznosyuk S.A., Potekaev A.I., Starostenkov M.D. *Theoretical Foundations of Computer Nanoengineering of Biomimetic Nanosystems*. Tomsk: Publishing House Scientific and Technical Literature, 2011. 236 p. (In Russ.).
3. Martin D.R., Matyushov D.V. Electron-transfer Chain in Respiratory Complex I. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-017-05779-y
4. Abbott D., Davis P., Pati A. *Quantum Aspects of The Functioning of Biological Structures*. Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2014. 320 p. (In Russ.).
5. Corkum P.B. Attosecond Pulses at Last. *Nature*. 2000. Vol. 403. P. 845–846. DOI: 10.1038/35002711
6. Levesque J., Corkum P.B. Attosecond Science and Technology. *Canadian Journal of Physics*. 2006. Vol. 84. No 1. P. 1–18. DOI: 10.1139/p05-068
7. Niikura H., Corkum P.B. Attosecond and Angstrom Science. *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2006. Vol. 54. P. 511–548. DOI: 10.1016/S1049-250X(06)54008-X
8. Corkum P.B., Krausz F. Attosecond Science. *Nature Physics*. 2007. Vol. 6. No 3. P. 381–387. DOI: 10.1038/nphys620
9. Krausz F., Ivanov M. Attosecond Physics. *Reviews of Modern Physics*. 2009. Vol. 81. No 1. P. 163–234. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.163
10. Gallmann L., Cirelli C., Keller U. Attosecond Science: Recent Highlights and Future Trends. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2012. Vol. 63. P. 447–469. DOI: 10.1146/annurev-physchem-032511-143702
11. Ranitovic P., Hogle C. W., Rivière P., Palacios A., Tong X.M., Toshima N., et al. Attosecond vacuum UV Coherent Control of Molecular Dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2014. Vol. 111. P. 912–917. DOI: 10.1073/pnas.1321999111
12. Kim D.E. Extreme Metrology for Ultrafast Electron Dynamics at the Atomic Scale. *Journal of the Korean Physical Society*. 2018. Vol. 73. P. 227–234. DOI: 10.3938/jkps.73.227
13. Hofmann C., Bray A., Koch W., et al. Quantum Battles in Attoscience: Tunnelling. *The European Physical Journal D*. 2021. Vol. 75. P. 1–13. DOI: 10.1140/epjd/s10053-021-00224-2
14. Armstrong G.S.J., Khokhlova M.A., Labeye M., et al. Dialogue on Analytical and Ab Initio Methods in Attoscience. *The European Physical Journal D*. 2021. Vol. D 75. No 209. P. 1–31. DOI: 10.1140/epjd/s10053-021-00207-3
15. Zhukovsky M.S., Beznosyuk S.A., Ladygin Yu.I. Computer Nanoengineering of Functional Biomimetic Materials and Devices. *Nanotekhnika*. 2011. No 1 (25). P. 80–85. (In Russ.).
16. Zhukovsky M.S., Beznosyuk S.A., Vanchinkhuu J. Theoretical Foundations and Computer Modeling of Femtosecond Pulsed Synthesis of Active Centers of Nanostructural Transformations of Materials. *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. 2013. Vol. 10. P. 176–184. (In Russ.).
17. Zhukovsky M.S., Beznosyuk S.A. Quantum Theory of Modeling Femtosecond-Pulse Self-Assembly and Self-Organization of Active Nanometer Particles in Materials. *Nanotechnology*. 2013. No 1 (33). P. 41–45. (In Russ.).
18. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S., Zhukovsky T.M. Theory and Computer Simulation of Quantum Nems Energy Storage in Materials. *International Journal of Nanoscience*. 2015. Vol. 14. P. 147–152. DOI: 10.1142/S0219581X14600230
19. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S. Multiscale Space-Time Dissipative Structures in Materials: Two-Electron Gene-

- sis of Nonequilibrium Electromechanical Interfaces. *Physical Mesomechanics*. 2017. Vol. 20. P. 102–110. DOI: 10.1134/S102995991701009X
20. Steinhäuser M.O. Computational Multiscale Modeling of Fluids and Solids: Theory and Applications : *2nd Edition*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2017. 419 p. DOI: 10.1007/978-3-662-53224-9
21. Umezawa H., Matsumoto H., Tatiki M. *Thermofield Dynamics and Condensed States: Translated from English*. Moscow: Fizmatlit, 1985. 509 p. (In Russ.).
22. Hess H. Toward Devices Powered by Biomolecular Motors. *Science*. 2006. Vol. 312. P. 860–861. DOI: 10.1126/science.1126399
23. Lund K., Manzo A.J., Dabby N., et al. Molecular Robots Guided by Prescriptive Landscapes. *Nature*. 2010. Vol. 465 (7295). P. 206–210. DOI: 10.1038/nature09012
24. Lerner E.J. Biomimetic Nanotechnology. *The Industrial Physicist*. 2010. No 4. P. 16–19.
25. Horejs C., Mitra M. K., Pum D., Sleytr U.B., Muthukumar M. Monte Carlo Study of the Molecular Mechanisms of Surface-Layer Protein Self-Assembly. *The Journal of Chemical Physics*. 2011. Vol. 134 (12). P. 125103. DOI: 10.1063/1.3565457
26. Horejs C., Gollner H., Pum D., Sleytr U.B., Peterlik H., Jungbauer A., Tscheliessnig R. Atomistic Structure of Monomolecular Surface Layer Self-Assemblies: Toward Functionalized Nanostructures. *ACS Nano*. 2011. Vol. 5 (3). P. 2288–2297. DOI: 10.1021/nn1035729
27. Injac R., Prijatelj M., Strukelj B. Fullerene Nanoparticles: Toxicity and Antioxidant Activity. *Oxidative Stress and Nanotechnology: Methods and Protocols*. 2013. Vol. 1028. P. 75–100. DOI: 10.1007/978-1-62703-475-3_5
28. Kovel E., Sachkova A., Vnukova N., Churilov G., Knyazeva E., Kudryasheva N. Antioxidant Activity and Toxicity of Fullerenols via Bioluminescence Signaling: Role of Oxygen Substituents. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20 (9). No 2324. P. 1–16. DOI: 10.3390/ijms20092324
29. Kovel E.S., Kicheeva A.G., Vnukova N.G., Churilov G.N., Stepin E.A., Kudryasheva N.S. Toxicity and Antioxidant Activity of Fullerene C₆₀, 70 with Low Number of Oxygen Substituents. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22 (12). No 6382. P. 1–17. DOI: 10.3390/ijms22126382
30. Tang N., Ding Z., Zhang J., Cai Y. and Bao X. Recent Advances of Antioxidant Low-Dimensional Carbon Materials for Biomedical Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. P. 1–6. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1121477
31. El-Hnayn R., Canabady-Rochelle L., Desmarests C., Balan L., Rinnert H., Joubert O., et al. One-Step Synthesis of Diamine-Functionalized Graphene Quantum Dots from Graphene Oxide and Their Chelating and Antioxidant Activities. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. P. 1–18. DOI: 10.3390/nano10010104
32. Vatandost E., Saraei A.G., Chekin F., Raeisi S.N., Shahidi S. Antioxidant, Antibacterial and Anticancer Performance of Reduced Graphene Oxide Prepared via Green Tea Extract Assisted Biosynthesis. *Chemistry Select*. 2020. Vol. 5. P. 10401–10406. DOI: 10.1002/slct.202001920
33. Tara N., Siddiqui S.I., Nirala R.K., Abdulla N.K., Chaudhry S.A. Synthesis of Antibacterial, Antioxidant And Magnetic Nigella Sativa-Graphene Oxide Based Nanocomposite BC-GO@Fe₃O₄ for Water Treatment. *Colloid and Interface Science Communications*. 2020. Vol. 37. 100281. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.colcom.2020.100281
34. Yao W., Zhou S., Wang Z., Lu Z., Hou C. Antioxidant Behaviors of Graphene in Marine Environment: a First-Principles Simulation. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 499. 143962. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143962
35. Chang X., Xu S., Liu S., Wang N., Sun S., Zhu X., et al. Highly Sensitive Acetone Sensor Based on WO₃ Nanosheets Derived from WS₂ Nanoparticles with Inorganic Fullerene-Like Structures. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. Vol. 343. 130135. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130135
36. Gakhar T., Rosenwaks Y., Hazra A. Fullerene (C₆₀) Functionalized TiO₂ Nanotubes for Conductometric Sensing of Formaldehyde. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022. Vol. 364. P. 131892. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131892
37. Shetti N.P., Mishra A., Basu S., Aminabhavi T.M. Versatile Fullerenes as Sensor Materials. *Materials Today Chemistry*. 2021. Vol. 20. No 100454. P. 1–27. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100454
38. Uygun H.D.E., Uygun Z.O. Fullerene Based Sensor and Biosensor Technologies. *Smart Nanosystems for Biomedicine, Optoelectronics and Catalysis. Intech. Open*. 2020. P. 1–16.
39. Amin N.A.A.M., Said S.M., Salleh M.F.M., Affi A.M., Ibrahim N.M.J.N., Hasnan M.M.I.M., Tahir M., Hashim N.Z.I., Review of Fe-Based Spin Crossover Metal Complexes in Multiscale Device Architectures. *Inorganica Chimica Acta*. 2023. Vol. 544. P. 12168–1–121168–12. DOI: 10.1016/j.ica.2022.121168
40. Blencowe M. Quantum Electromechanical Systems. *Physics Reports*. 2004. Vol. 395. P. 159–222. DOI: 10.1016/j.physrep.2003.12.005
41. Desai T., Bhatia S. Therapeutic Micro/Nanotechnology. *BioMEMS and Biomedical Nanotechnology*. Berlin: Springer, 2007. 1856 p.
42. Beznosyuk S.A., Zhukovsky M.S., Potekaev A.I. Theory of Motion in the Condensed State of Quantum Electromechanical Plasmoid Nanobots. *Russian Physics Journal*. 2013. T. 56. P. 55–64. DOI: 10.1007/s11182-013-0067-8. (In Russ.).
43. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Quantum Infrastructure of Attosecond Sensors and Actuators of Nonequilibrium Physical Media in Smart Materials. *Physical Mesomechanics*. 2019. Vol. 22. P. 432–438. DOI: 10.1134/S1029959919050096
44. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Hybrid Quantum Technologies of Intellectual Nanomaterials. *International Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 16. P. 22–33. DOI: 10.1504/IJNT.2019.102389
45. Mak A., Shamuilov G., Salén P., et al. Attosecond Single-Cycle Undulator Light: A Review. *Reports on Progress in Physics*. 2019. Vol. 82. P. 1–30. DOI: 10.1088/1361-6633/aafa35

46. Maroju P.K., Grazioli C., Fraia M. Di., et al. Attosecond Pulse Shaping Using A Seeded Free-Electron Laser. *Nature*. 2020, Feb. Vol. 578 (7795). P. 386–391. DOI: 10.1038/s41586-020-2005-6
47. Aseev S.A., Mironov B.N., Ryabov E.A., et al. Ultrafast Transmission Electron Microscope for Studying the Dynamics of The Processes Induced by Femtosecond Laser Beams. *Quantum Electronics*. 2017. Vol. 47. P. 116–122. DOI: 10.1070/QEL16276
48. Beznosyuk S.A., Maslova O.A., Zhukovsky M.S. Attosecond Nanotechnology: From Subatomic Electrostatic Strings Entangling Electron Pairs to Supra-Atomic Quantum Nanoelectromechanical Systems Energy Storage in Materials. *International Journal of Nanotechnology*. 2018. Vol. 15. P. 245–257. DOI: 10.1504/IJNT.2018.094783
49. Ofer K. Entanglements of Electrons and Cavity Photons in the Strong-Coupling Regime. *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. P. 103602-1-103602-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.103602
50. Agueny H. Coherent Electron Displacement For Quantum Information Processing Using Attosecond Single Cycle Pulses. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 21869. P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-020-79004-8
51. Vanacore G.M., Madan I., Carbone F. Spatio-Temporal Shaping of a Free-Electron Wave Function Via Coherent Light-Electron Interaction. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2020. Vol. 43. P. 567–597. DOI: 10.1007/s40766-020-00012-5
52. Siwick B.J., Arslan I., Wang X. Frontier Nonequilibrium Materials Science Enabled by Ultrafast Electron Methods. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 688–693. DOI: 10.1557/s43577-021-00148-7
53. Ebbesen T.W. Hybrid Light-Matter States in a Molecular and Material Science Perspective. *Accounts of Chemical Research*. 2016. Vol. 15. No 49 (11). P. 2403–2412. DOI: 10.1021/acs.accounts.6b00295
54. Thomas A., Lethuillier-Karl L., Nagarajan K., Vergauwe R.M.A., George J., Chervy T., Shalabney A., Devaux E., Genet C., Moran J., Ebbesen T.W. Tilting a Ground-State Reactivity Landscape by Vibrational Strong Coupling. *Science*. 2019. Vol. 8. No 363 (6427). P. 615–619. DOI: 10.1126/science.aau7742
55. Sidler D., Ruggenthaler M., Schäfer C., Ronca E., Rubio A. A Perspective on Ab Initio Modeling of Polaritonic Chemistry: the Role of Non-Equilibrium Effects and Quantum Collectivity. *The Journal of Chemical Physics*. 2022. Vol. 156. P. 1–23. DOI: 10.1063/5.0094956
56. Gonzalez-Ballester C., Feist J., Gonzalo Badia E., et al. Uncoupled Dark States Can Inherit Polaritonic Properties. *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 117. P. 156402-1-156402-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.156402

Информация об авторе

М.С. Жуковский, кандидат химических наук, доцент кафедры информационных систем в экономике, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия.

Information about the author

M.S. Zhukovsky, Candidate of Sciences in Chemistry, Associate Professor of the Department of Information Systems in Economics, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.