

УДК 53.043:538.94:004

## ДИНАМИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В КЛАСТЕРНЫХ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2022 г. С. М. Аракелян<sup>1</sup> \*, Д. Н. Бухаров<sup>1</sup>, А. О. Кучерик<sup>1</sup>, Т. А. Худайберганов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

\*E-mail: arak@vlsu.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 24.01.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Рассмотрены электрофизические характеристики нанокластерных структур и механизмы электропроводимости в зависимости от топологии этих структур. Проанализированы квантовые свойства и статистика фотонов при возбуждении экситон-поляритонных состояний. Обсуждается возможность создания на новых физических принципах элементной базы микро- и наноэлектроники.

DOI: 10.31857/S0367676522060047

### ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является обсуждение возможности разработки на новых физических принципах прорывных технологий и трансфера технологий в области топологических фотоники, наноэлектроники и новых материалов с управляемыми функциональными характеристиками как одного из перспективных путей для решения проблемы цифрового суверенитета России.

В настоящее время вся современная микроэлектроника сталкивается с проблемами как технического, так и принципиального характера. В первом случае речь идет о пределах масштабирования, когда с повышением плотности расположения транзисторов увеличивается тепловыделение при технических процессах в нанометровом масштабе и возникают неопределенности из-за квантовых процессов, связанных, например, с токами утечки [1]. Кроме того, дороговизна процессов с размером в единицы нанометров (см. [2, 3]) и требования к стабильности и надежности режимов их работы в реальных условиях расположения платы (вибрации, температурные скачки, агрессивная среда, окисление и т.д.) определяют требуемый практический их масштаб в десятки и даже сотни нанометров (см., например, [4]). При этом важно подчеркнуть, что базовые физические принципы и возможные ограничения для подобных устройств были поняты уже сравнительно давно. Другое дело, что практическая их реализация на этих принципах потребовала значительно-

го времени и до сих пор задача их получения с учетом этих принципов является актуальной.

В фундаментальном аспекте ключевым недостатком традиционной архитектуры фон Неймана является тот факт, что команды для обработки данных и сами данные хранятся совместно в памяти, но операции обработки данных и выполнения собственно вычислений имеют ограниченное быстродействие [5]. Кроме того, существуют естественные принципиальные ограничения, например, размер проектируемого элемента не может быть меньше шага атомной решетки материала (для кремния, например, – это 0.5 нм).

Промежуточным решением этих проблем может быть переход к нейроморфной архитектуре фотонного процессора, когда хранение и обработка информации происходит одновременно с использованием фотонов [6]. Этот новый аппаратный уровень является вполне интегрируемым в существующие электронные схемы и функционально речь идет о гибридных системах “электрофизика + оптика” [7].

Более глобальное решение проблемы – использование квантовых технологий, включающее в себя квантовые инфокоммуникационные системы и квантовую криптографию на основе достижений теории квантовой информации теории, и как конечная цель – разработка квантового компьютера [8].

С учетом создания соответствующей элементной базы на основе достижений современных ла-

зерных экспериментов — фемтонофотоники [9], оказывается возможным регулируемое управление пространственно-временными характеристиками таких элементов в требуемом направлении для решения задачи изменения их функциональных свойств. По сути эти 4D-технологии являются инструментом, который должен позволить разрабатывать элементы логических систем на новых физических принципах. Имеется ряд направлений для реализации этих планов (см., например, [10]).

Как продемонстрировано в нашей работе [11] электросопротивление наноструктурированных образцов может изменяться в зависимости от топологии нанесенных лазерными методами на твердую подложку структур (например, нанокластеров золота — Au) более чем на 4 порядка при уменьшении размеров нанокластеров от 50 до 5 нм. При этом многие свойства определяются фрактальной размерностью  $D$  полученных нанокластерных структур (соответственно, от  $D = 1.39$  до 1.93). Более того, достаточно легко могут быть получены требуемые однородные гистограммы распределения нанокластеров по размерам, например, в масштабе  $10 \pm 0.25$  нм. Естественно, что для таких разных топологических структур изменяются и оптические спектры пропускания подложек и происходит сдвиг (изменение) плазмонных резонансов Au в районе 580 нм (для монолитных образцов Au — длина волны плазмонного резонанса в поглощении — 520 нм). При этом для  $D = 1.93$  наблюдается максимум пропускания света.

#### ФЕМТОНАНОФОТОНИКА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЕМЫХ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

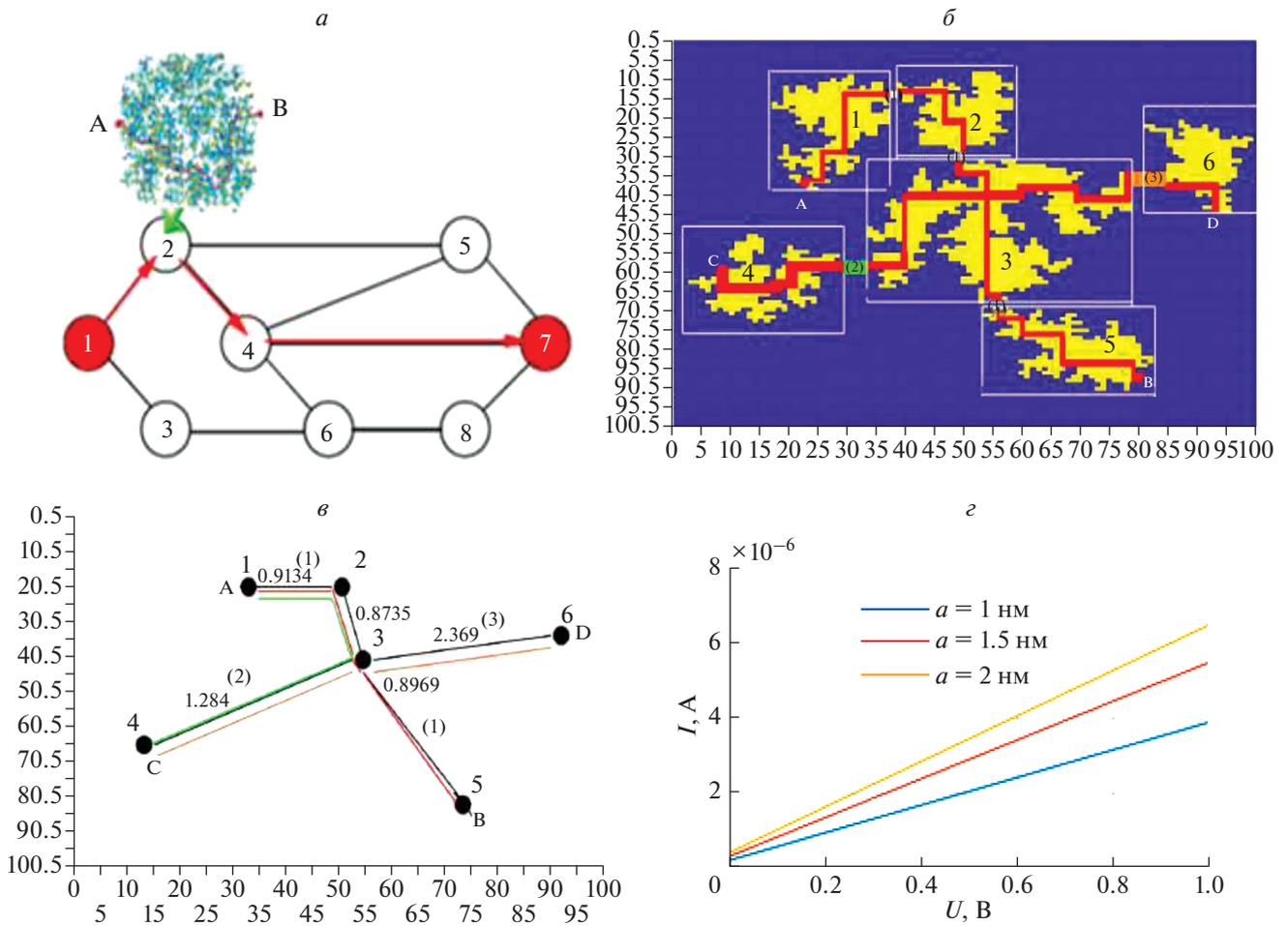
Модификация поверхности твердых тел с помощью лазерного излучения уже давно занимает важное место в фундаментальной науке и разрабатываемых на ее основе новых технологиях. Лазерные методы обладают высокой универсальностью, поскольку параметрами лазерного пучка можно управлять во времени и в пространстве, а также точно дозировать, локализовать и регулировать энергию излучения при воздействии на мишень. Таким образом появляется инструмент для направленного синтеза наноструктурированных покрытий с требуемыми параметрами на поверхности твердого тела и в тонких пленках на их поверхности. При этом использование лазеров с разной длиной волны и длительностью излучения определяет как широкий круг задач для различных модифицируемых материалов и их комбинаций в сложных композиционных составах, так

и позволяет сформировать различные подходы к изменению функциональных и конструктивных характеристик для одного конкретного материала в определенном изделии в зависимости от условий его эксплуатации (см., например, [7]).

Отмеченные особенности проявления фундаментальных эффектов в наноструктурированных тонкопленочных покрытиях позволяют говорить о формировании новых направлений — топологической фотоники и топологического материаловедения, имеющих несомненную прикладную перспективу для усовершенствования существующих технологий и развития наукоемкого производства. Однако возникает принципиальная проблема сопоставления лазерно-индуцированных топологических параметров подобных структур с функциональными и конструктивными характеристиками конкретных изделий. В полном объеме эта задача вряд ли разрешима на сегодняшний день, но даже нахождение доминирующих тенденций и трендов представляет значительный интерес для повышения конкурентоспособности, импортозамещения и коммерциализации достижений НИОКТР при лазерной обработке материалов (см., например, [12, 13]). Тем более, что сообщается о реализации на практике технических процессов с масштабом 3 нм уже в 2022 году [14]. В связи с этим представляется актуальным рассмотреть ряд прототипов возможных логических устройств фотоники нового поколения (см., например, [15–20]). Они могут быть полезны при разработке элементов и устройств на базе квантовых технологий [21], нелинейной динамики [7] и с учетом спонтанного нарушения симметрии [22]. Подобные исследования интенсивно ведутся в настоящее время в различных лабораториях мира в конкурентных условиях.

#### ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ ДЛЯ НАНОТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР — МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА

Уникальность электронных свойств кластерных наноструктур связана с тем, что их размеры лежат в нанометровом диапазоне во всех трех измерениях (см., например, [9]). Это приводит к эффектам размерного квантования энергетических уровней электрона, что определяет макроскопические квантовые эффекты в ансамбле нанообъектов. Управление электропроводимостью в таких топологических структурах имеет особое значение для исследования возможностей перехода в сверхпроводящее состояние. Для тонкого слоя металла и для малых гранулированных частиц здесь имеется аналогия, например, с металлами со значительным сильным беспорядком, когда для делокализованных электронов может возникать сильное электрон-фононное взаимодействие, приводящее к формированию связан-



**Рис. 1.** Схема, поясняющая рассматриваемую модель. К кластерам (островкам) 1 и 7 подведено напряжение, траектория движения тока проходит по островкам 1–2–4–7, в рамках островка 2 траектория – линия АВ (а). Структура островковой пленки PbTe в рамках модели DLA: к точкам А, В, С, D подведено напряжение, отмечены траектории протекания тока (АВ, АС, CD); траектории прыжков при  $a \leq 1$  (1), 1.5 (2), 2 нм (3) (б). Соответствующий случайный граф с 6 вершинами и ребрами (к достижимым вершинам) с выделенным кратчайшим расстоянием между точками А, В, С, D (в). Расчетная ВАХ при  $\phi = 0.3$  эВ,  $T = 300$  К и величине гранулы 10 нм для  $a \leq 1$  (1), 1.5 (2), 2 нм (3) (г).

ных куперовских пар (см., например, [23]), в нашем случае – из-за топологии и поверхностных эффектов в нанокластерной системе.

Нами была разработана модель электропроводимости, описывающая вольт-амперные характеристики (ВАХ) с учетом туннелирования и прыжков электронов между островками [7, 11, 13]. Система островков нанопленки формировала кластер проводимости – площадку, в рамках которой наиболее вероятно прохождение тока. ВАХ нанопленки оценивалась как сумма сил тока, протекающего по островкам и между ними, вычисленных в соответствии с законом Ома. Дорожка проводимости между островками определялась по алгоритму Дейкстры для дендритовых наноструктур как кратчайшее расстояние с минимальным весом на сетке Миллера–Абрахамса на основе случайного взвешенного графа с сопро-

тивлением, вычисленным по процедуре, описанной в [24]:

$$R_h = \sum_{i=1}^n R_{ij}, \quad R_{ij} = R_{03} \exp\left(\frac{2w_{ij}}{a} + \frac{\phi}{k_B T}\right),$$

где  $R_{ij}$  – сопротивление ребер ( $n$  – их число), входящих в дорожку проводимости,  $R_{03}$  – постоянная, зависящая от радиуса и распределения островковых центров локализации,  $w_{ij}$  – вес ребра, входящего в дорожку проводимости,  $a$  – радиус локализации электрона,  $\phi$  – энергия активации проводимости,  $T$  – температура,  $k_B$  – постоянная Больцмана.

На рис. 1 показана реализация предложенного подхода для образца нанокластерной (островковой) пленки PbTe. Модельная структура была реализована в рамках диффузионно-ограниченной

агрегации (DLA) фрактала для клеточного автомата (КА) с окрестностью фон Неймана при варьировании величины прилипания (столкновения частиц) от 1 до 0.01. Результирующая пленка состояла из 6 кластеров (островков) с величиной гранулы 10 нм (рис. 1а); структура которых показана на рис. 1б. Для нее был построен соответствующий случайный граф, где электрическое напряжение прикладывается к вершинам-островкам (рис. 1в), и оценены траектории тока, по которым были выполнены расчеты ВАХ (рис. 1г) для различных значений  $a$ . Погрешность моделирования была  $\sim 10\%$ . Сравнение с экспериментом [13] показывает удовлетворительную степень совпадения модельных и экспериментальных данных, в т.ч. при значительных скачках величины электросопротивления.

Наибольший интерес в данном аспекте представляют наноструктурированные материалы на основе диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) в связи с наличием уникальных эксплуатационных и физических свойств [25]. Например, они проявляют металлическую или полупроводниковую электропроводимость в зависимости от степени окисления, а также обладают большой концентрацией поверхностных дефектов и высоким показателем преломления, что делает их перспективными для различных приложений нанoeлектроники и нанофотоники.

Система микротрубок  $\text{TiO}_2$  была сформирована путем сворачивания тонких пленок диоксида титана во внешнем неоднородном магнитном поле, осаждаемых на стеклянную подложку в процессе лазерной абляции титановой мишени в воздушной среде [26]. Для описания структуры и свойств полученных образцов была использована модель системы случайно расположенных в расчетной пространственной области ( $X, Y$ ) микротрубок. Модель представляла собой систему прямых линий со случайными длинами, полученными на основе равномерного распределения. Для сгенерированной системы оценивалось наличие перколяции между двумя границами расчетной области. Указанная оценка осуществлялась путем определения пересекающихся друг с другом линий. На рис. 2 показана модельная система из 100 микротрубок с длинами от 5 до 100 мкм. Там же в виде ломаной линии показана возможная траектория линии тока.

Предложенная модель позволяет оценить длины траекторий для тока и сопротивления. Такая модель может быть полезна для оценки электропроводимости и ВАХ систем микротрубок как для диоксида титана, так и для структур из других материалов, например, полупроводниковых нанопленок и нанокластеров благородных металлов, а также допированных углеродных нанотрубок.

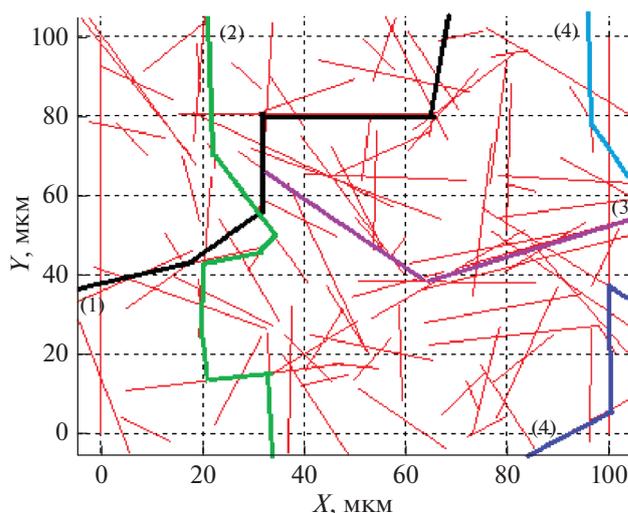


Рис. 2. Результаты моделирования система микротрубок с отмеченными траекториями перколяции (по-яснения см. в тексте).

Для последнего случая интересные результаты получены в [27].

## КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ СИСТЕМ

Методами квантовых фазовых пространств была решена квантовая задача для экситон-поляритонной системы, которая моделировалась как два связанных квантовых диссипативных осциллятора. При этом один из них был нелинейным, а другой находился под действием внешнего когерентного (лазерного) воздействия [28]. Результаты моделирования показаны на рис. 3, где

$\Delta = \frac{\omega_{ph} - \omega_{ex}}{2}$  – половина экситон ( $\omega_{ex}$ )-фотон-

ной ( $\omega_{ph}$ ) отстройки,  $\Omega = \omega_d - (\omega_{ph} + \omega_{ex})/2$  – отстройка частоты накачки ( $\omega_d$ ) от середины между частотами собственных состояний экситон-фотонной системы (лазерная отстройка). Показаны область существования эффекта бистабильности (рис. 3а); число фотонов  $n_{ph}$  в квазиклассическом и квантовом приближениях для частотных параметров  $\Delta = 3.12 \text{ пс}^{-1}$  и  $\Omega = -4.92$  (оранжевая кривая),  $-4.91$  (синяя кривая),  $-4.9$  (красная кривая),  $-4.89 \text{ пс}^{-1}$  (зеленая кривая) (рис. 3б). Данные соответствуют точкам на изображении (рис. 3в). Кривым на рис. 3б соответствуют графики второго статистического момента для фотонов (рис. 3г). Результаты численного моделирования квантовых скачков между стационарными состояниями на петле бистабильности показаны на рис. 3д и 3е для случаев, соответствующих красной двойной стрелке и красной одинарной стрелке, показанных на рис. 3б.

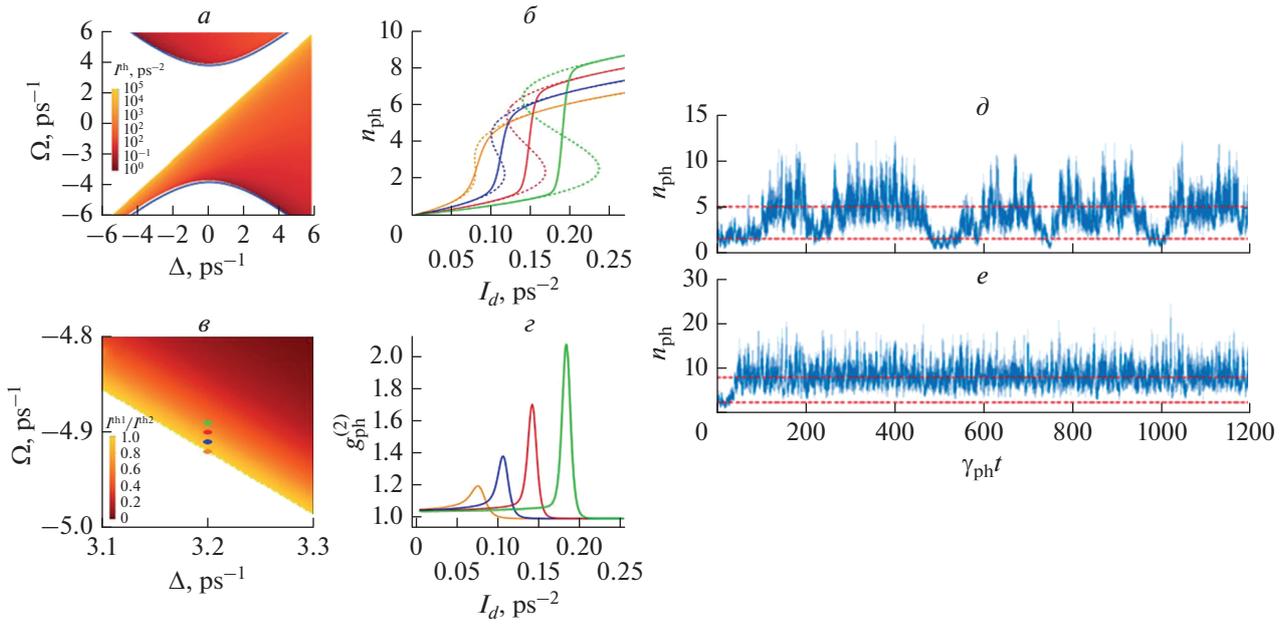


Рис. 3. Квантовая статистика экситон-поляритонных систем.

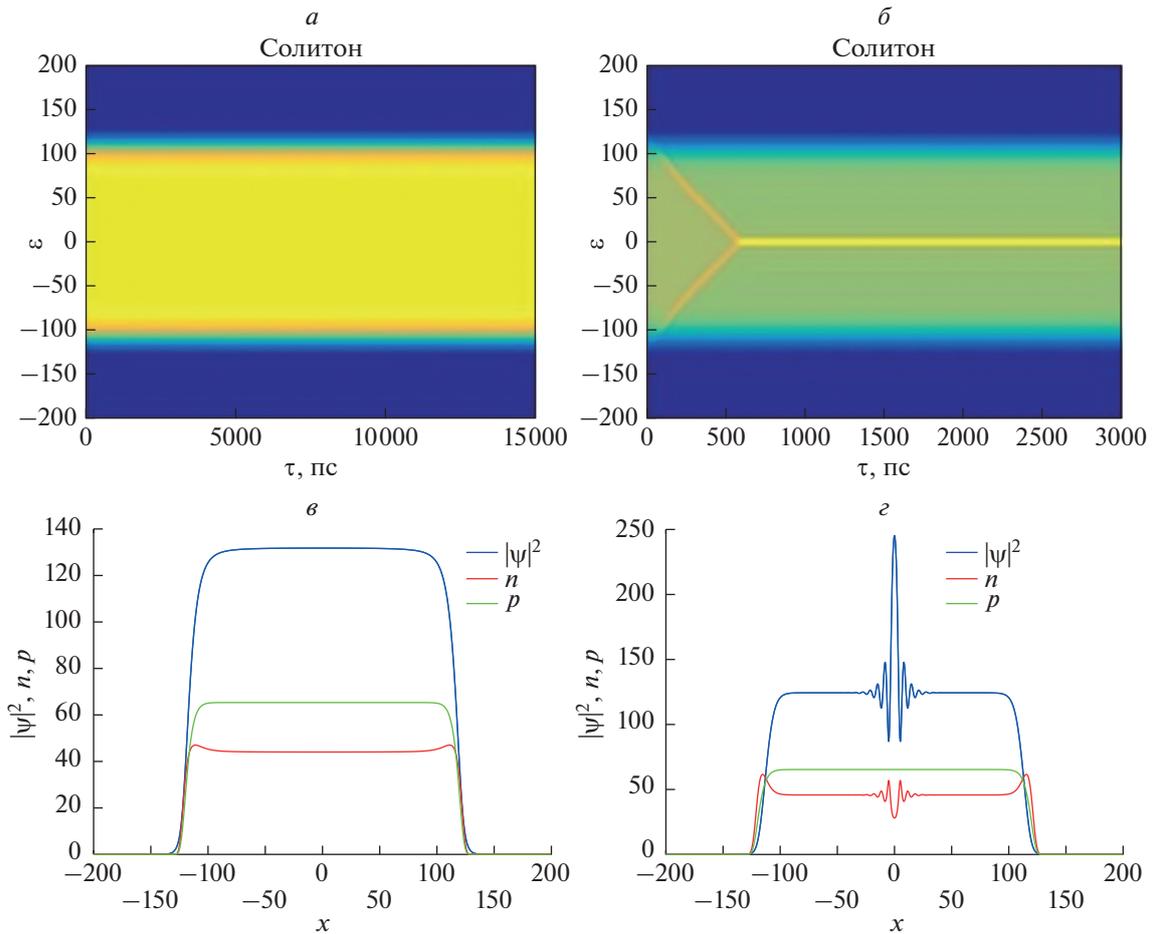


Рис. 4. Динамика поляритонного конденсата. Однородное стационарное решение (а). Решение с образованием стокового (sink) солитона (б). Профиль однородного решения, соответствующего рис. 4а (в). Профиль солитонного решения, соответствующего изображению рис. 4б (г), где  $|\psi|^2$  – плотность конденсата,  $n$  – населенность резервуара горячих экситонов,  $p$  – профиль нерезонансной лазерной накачки.

Квантовое решение разделяет диаграмму стационарных решений с бистабильностью на две части; такая динамическая бистабильность определяет границу стабильных и метастабильных решений. В области разделения полуклассической кривой на две части наблюдается пик второго момента фотонов с явно выраженным эффектом их группировки.

Кроме того, был проанализирован эффект тепловой самолокализации поляритонного конденсата в 1D-объекте (микропроводе) (рис. 4). При нагреве лазерным излучением решетки такого микрорезонатора с квантовой ямой эффективно меняются параметры экситон-поляритонной системы. При образовании в схеме с микропроводом квантового состояния в месте его локализации наводится эффективный потенциал, что приводит к формированию стокового (sink) солитона — локализованного устойчивого конденсата, аналогично состоянию полярона. Он возникает при эффективном взаимодействии поля упругой деформации решетки с электроном. Такие квантовые состояния могут быть использованы в различных приложениях [29].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявлены условия реализации различных механизмов и процессов электропроводимости (туннелирование, прыжки между разными кластерами) нанокластерных систем, что позволило установить зависимость электрофизических параметров от топологических особенностей, возникающих в лазерном эксперименте при соответствующих граничных условиях. Проанализированы квантовые и нелинейные экситон-поляритонные эффекты, формируемых в низкоразмерных полупроводниковых структурах в широкой области вариации параметров для резонансных частот: экситон-фотонной отстройки, отстройки частоты лазерной накачки, а также для разных значений нелинейности, интенсивности накачки и других. Рассмотренные эффекты могут быть использованы для решения практических задач квантовой информатики и криптографии. Развитая парадигма может стать основой для построения цифрового суверенитета России на основе элементной базы, использующей новые физические принципы и достижения нанофотоники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-02-00515, № 20-32-90052) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках темы государственного задания № 0635-2020-0013.

Использовано оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного

центра коллективного использования перспективных и конкурентоспособных технологий в областях разработки и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение № 075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гантмахер В.Ф.* Электроны в неупорядоченных средах. М.: Физматлит, 2013. 232 с.
2. <https://hightech.plus/2021/03/14/tsmc-uvetchit-investicii-v-proizvodstvo-chipov-v-ssh-a-s-12-mlrd-do-35-mlrd>.
3. <https://hightech.plus/2021/03/14/apple-i-tsmc-sovmestno-rabotayut-nad-2-nm-processorom>.
4. *Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.* Основы нанoeлектроники: учебное пособие. М.: Логос, 2006. 496 с.
5. [https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/228\\_nanomaterials\\_nanotechnology\\_nanoelectronics.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/228_nanomaterials_nanotechnology_nanoelectronics.pdf).
6. *Galekovic G.N., Severtsev V.N., Shurchkov I.O.* // *Engin. Bull. Don.* 2012. V. 2. No. 20. P. 315.
7. *Arakelian S.M., Chestnov I.Yu., Istratov A.V. et al.* // In: *Proc. First Intern. Nonlinear Dynamics Conference (NODYCON 2019).* V. 3. Springer: Cham, 2020. P. 121.
8. *Ожигов Ю.И.* Квантовый компьютер. М.: МАКС Пресс, 2020. 172 с.
9. *Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. и др.* Введение в фемтонанопотонику. Фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие. Москва: Логос, 2015. 744 с.
10. <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=d96f9b47-49cb-41f8-8627-3f6e3c6e0d06#content>.
11. *Arakelian S., Kutrovskaya S., Kucherik A. et al.* // *Opt. Quant. Electron.* 2016. V. 48. P. 342.
12. *Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В., Галушкин М.Г.* Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. Москва: Физматлит, 2009. 663 с.
13. *Багаев С.Н., Аракелян С.М., Кучерик А.О. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 12. С. 1682; *Bagayev S.N., Arakelian S.M., Kucherik A.O. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020. V. 84. No. 12. P. 1427.
14. <https://club.dns-shop.ru/digest/40132-tsmc-nachnetmassovoe-proizvodstvo-3-nm-chipov-v-2022-goduzavod>.
15. *Sedov E., Sedova I., Arakelian S. et al.* // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. Art. No. 8131.
16. *Седова И.Е., Седов Е.С., Аракелян С.М., Кавокин А.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 12. С. 1711; *Sedova I.E., Sedov E.S., Arakelian S.M., Kavokin A.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020. V. 84. No. 12. P. 1453.
17. *Худайбергенов Т.А., Худобин П.П., Аракелян С.М.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 12. С. 1717; *Khu-*

- daberganov T.A., Khudobin P.P., Arakelian S.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 12. P. 1459.
18. *Chestnov I.Y., Arakelian S.M., Kavokin A.V.* // New J. Phys. 2021. V. 23. No. 2. Art. No. 023024.
  19. *Samyshkin V., Prusov E., Osipov A. et al.* // Nanomaterials. 2021. V. 11. No. 4. Art. No. 1043.
  20. *Kutrovskaya S., Samyshkin V., Lelekova A. et al.* // Nanomaterials. 2021. V. 11. Art. No. 763.
  21. *Gong M., Wang S., Zha C. et al.* // Science. 2021. V. 372. No. 6545. P. 948.
  22. *Sedov E., Arakelian S., Kavokin A.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. No. 1. Art. No. 22382.
  23. *Абрикосов А.А.* Основы теории металлов. М.: Наука, 1987. 520 с.
  24. *Suvakov M., Tadic B.* // Cond. Matter. 2010. No. 22. Art. No. 163201.
  25. *Konstantinova E.A., Gayvoronskiy V.Y., Timoshenko V.Y., Kashkarov P.K.* // Semiconductors. 2010. V. 44. No. 8. P. 1093.
  26. *Antipov A.A., Arakelian S.M., Kutrovskaya S.V. et al.* // Quant. Electron. 2010. V. 40. No. 7. P. 642.
  27. *Eremin T.V., Obraztsov P.A., Velikanov V.A. et al.* // Sci. Rep. 2019. V. 9. No. 1. Art. No. 14985.
  28. *Kasprzak J., Richard M., Kundermann S. et al.* // Nature. 2006. V. 443. No. 7110. P. 409.
  29. *Chestnov I.Yu., Khudaiberganov T.A., Alodjants A.P., Kavokin A.V.* // Phys. Rev. B. 2018. No. 98. Art. No. 115302.

## **Dynamic and quantum effects in cluster low-dimensional multilayer solid-state nanostructures for development of a basic elements for micro- and nanoelectronics**

**S. M. Arakelian<sup>a, \*</sup>, D. N. Bukharov<sup>a</sup>, A. O. Kucherik<sup>a</sup>, T. A. Khudaiberganov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: arak@vlsu.ru*

The electrophysical characteristics of nanoclusters and the mechanisms of electrical conductivity depending on the topology of these structures are considered. Quantum properties and statistics of photons under exciton-polariton states excitation are also analyzed. The possibility for creation of a basic elements of micro- and nanoelectronics on new physical principles is discussed.