

Теоретически было предсказано [14], что в алмазоподобных полупроводниках основное состояние A^+ центра имеет полный момент равный 2. Изучение циркулярно поляризованной фотолюминесценции перехода электрон на A^+ центр в квантовых ямах GaAs/AlGaAs позволило проверить это теоретическое предсказание [15]. Также будет рассмотрено влияние локализации рекомбинирующих носителей заряда на поляризационные свойства люминесценции в образцах с различной концентрацией легирования [16].

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 14-12-00255.

Литература

- [1] H. Bethe, *Zeitschrift für Physik* **57**, 815 (1929).
- [2] M.A. Lampert, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 450 (1958).
- [3] N. Mott, *Reviews of Modern Physics* **40**, 677 (1968).
- [4] P. Norton, *Physical Review Letters* **37**, 164 (1976).
- [5] E. Gershenzon, A. Mel'nikov, R. Rabinovich, *et al.*, *Physics-Uspokhi* **23**, 684 (1980).
- [6] V.L. Ginzburg, *Soviet Physics Uspokhi* **24**, 585 (1981).
- [7] S. Huant, S.P. Najda, and B. Etienne, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1486 (1990).
- [8] A.B. Dzyubenko, A. Mandray, S. Huant, *et al.*, *Phys. Rev. B* **50**, 4687 (1994).
- [9] J. Kono, S.T. Lee, M.S. Salib, *et al.*, *Phys. Rev. B* **52**, R8654 (1995).
- [10] T. Pang and S.G. Louie, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1635 (1990).
- [11] N. Agrinskaya, Y.L. Ivanov, V. Ustinov, *et al.*, *Semiconductors* **35**, 550 (2001).
- [12] N. Agrinskaya, V. Kozub, Y.L. Ivanov, *et al.*, *J. of Experimental and Theoretical Physics* **93**, 424 (2001).
- [13] Y.L. Ivanov, N. Agrinskaya, P. Petrov, *et al.*, *Semiconductors* **36**, 929 (2002).
- [14] N. Averkiev and A. Rodina, *Physics of the solid state* **35**, 538 (1993).
- [15] P. Petrov, Y.L. Ivanov, V. Sedov, *et al.*, *Physica B: Condensed Matter* **404**, 5148 (2009).
- [16] P. Petrov, Y. L. Ivanov, and N. Averkiev, *Low Temperature Physics* **41**, 119 (2015).

Термоэлектрические и электромеханические явления в низкоразмерных полупроводниковых системах

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Низкоразмерная система (НС) — консолидированная система многих частиц, протяженность которой вдоль хотя бы одного направления в пространстве сравнима по величине хотя бы с одним из параметров размерности длины, характеризующих состояния и/или процессы в системе (см., например, [1]). Ограничения на перемещение (квази)частиц в НС приводят к квантованию их энергии как функции (квази)импульса в одном, двух или трех на-

правлениях. [Возбужденные состояния системы представляются в виде совокупности квазичастиц, только если взаимодействие квазичастиц слабое, как в разреженном газе [2]. Понятие квазиимпульса является обобщением понятия импульса на случай движения частицы в пространстве с периодически зависящей от координат ее потенциальной энергией [3].] Если квантованность (дискретность) спектра состояний системы связана только с одним направлением, то система называется двумерной (2D), если только с двумя направлениями — одномерной (1D), а если с тремя — нульмерной (0D). НС бывают также фрактальными (с дробной размерностью [4]). Вообще, размерность системы описывает число независимых компонент импульса частицы. Материалы, состоящие в основном из НС, называются наноструктурированными (наноструктурными или кратко, наноматериалами). Низкоразмерные структурные элементы придают наноматериалам особенности (по сравнению с трехмерными (3D) однородными материалами того же химического состава) в тепло- и электропроводности, каталитической активности и др. [5,6].

В лекции представлен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований термоэлектрических и электромеханических свойств НС, а также элементов устройств на их основе. Обсуждаются полученные в последнее время результаты и ассоциированные с ними рабочие гипотезы.

Эффекты Зеебека и Пельтье в низкоразмерных системах. В свете публикаций [7–9] отмечаются: особенности термоэлектрических свойств графена [10] и сверхпроводников электричества [11]; теплопроводность одномерных мезоскопических систем [12]; термоэдс при прыжковой миграции электронов (или дырок) по атомам примесей в кристаллической матрице [13–16].

Механика НС: от нульмерных до фрактальных. Далее в форме эссе дается комментарий к исследованию и применению этих четырех типов НС.

0D-системы. Нанoeлектромеханика макромолекулы фталоцианина металла (MePc), где Me = Pb или Sn, исследована в работах [17–20]. Расчет методом молекулярных орбиталей показывает перенос эффективного электрического заряда $-0.6e$ с атома Pb и $-0.7e$ с атома Sn, где e — элементарный заряд, на макроциклическое кольцо Pc ($C_{32}H_{16}N_8$). Модель объясняет наблюдавшуюся в [21] инверсию макромолекулы PbPc под действием внешнего электрического поля иглы зондового микроскопа. Отсюда следует, что макромолекулу SnPc можно использовать как «подвижный» автоэлектронный катод в электромеханическом генераторе (рис. 1). Отметим, что макроскопические электростатические осцилляторы описаны в [22].

1D-системы. Методом молекулярных орбиталей в приближении сильной связи рассчитаны [23] строение атомного каркаса и электронная энергетическая

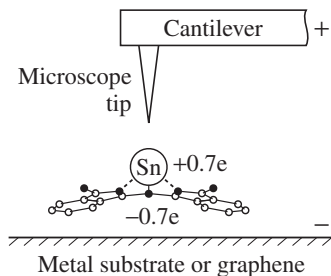


Рис. 1. Схема предлагаемого электромеханического генератора электрических колебаний с «подвижным» автоэлектронным катодом из воронкообразной макромолекулы фталоцианина олова ($\text{SnC}_{32}\text{H}_{16}\text{N}_8$) диаметром 1 nm и толщиной 0.2 nm, расположенной на «металлической» поверхности под иглой сканирующего туннельного микроскопа

зонная структура однослойной углеродной нанотрубки типа *zigzag* (6,0) при ее аксиальном механическом растяжении (рис. 2). Показано, что в основном состоянии нанотрубка имеет кекулевскую структуру химических связей между атомами углерода. При относительном удлинении $\epsilon_t \approx 9\%$ нанотрубки расчеты показывают фазовый переход, приводящий к хиноидной структуре C–C-связей. Этот переход сопровождается переходом нанотрубки от узкощелевого к среднещелевому полупроводнику, что может быть использовано для создания датчика деформации растяжение–сжатие.

В работе [24] рассмотрено баллистическое движение одного электрона проводимости в квазиодномерной проволоке, находящейся в диэлектрическом окружении (матрице) с распределенной индуктивностью. Показана возможность существования в проволоке индуктивного солитона (или индуктона) и произведена оценка его параметров. Установлено, что импульс тока индуктона сжимается в направлении его движения тем больше, чем больше индуктивность окружения. Заметим, что в [25] описан электростатический индуктон как электрон, движущийся в двумерной полупроводниковой квантовой яме параллельно рядом расположенной металлической плоскости. Ведутся разработки нанокomпьютера с битовой логикой на основе массивов решеток из нанопроволок, где каждый узел решетки представляет собой программируемый транзистор [26].

2D-системы. Из рассмотрения классов сопряженных элементов группы поворотов гексагональной решетки графена установлено, что возможно только 8 типов монослойных воронок. Воронки из графена могут найти применение как кантилеверы в сканирующем зондовом микроскопе для литографии

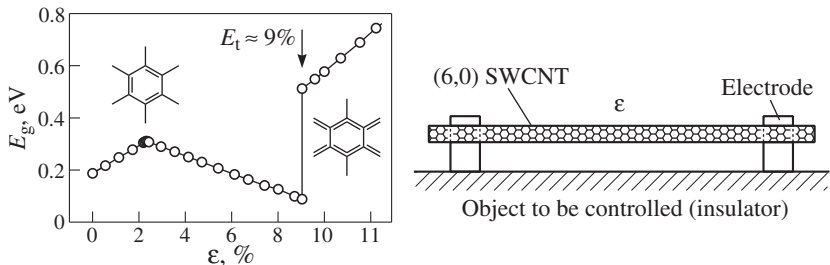


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны (энергетической щели E_g) однослойной углеродной нанотрубки (6,0) от относительного удлинения ε (слева) и схема тензодатчика на основе фазового перехода (от кекулевской структуры к хиноидной структуре химических связей между атомами углерода) при растяжении нанотрубки (справа) [23]

нанометрового разрешения [27], а также в неизображающей оптике [28].

Квантово-химическим методом молекулярных орбиталей проведены расчеты [29] электронной энергетической зонной структуры нанополосок графена типа *zigzag* (*nzGNR*), где n — число *zigzag* цепочек из атомов углерода. Расчеты показывают, что узкая нанополоска (4zGNR) является полупроводником в антиферромагнитном и ферромагнитном состояниях. Широкая нанополоска (10zGNR) в антиферромагнитном состоянии является узкощелевым полупроводником ($E_g \approx 0.1$ eV), тогда как в ферромагнитном состоянии эта нанополоска является спиновым полуметаллом (электрическим проводником для одной ориентации спинов π -электронов).

В работах [18,30] рассмотрена возможность создания генератора высокочастотного тока на основе автоэлектронной (полевой) эмиссии из прямоугольной ($2 \times 3 \mu\text{m}^2$) полосы графена, механически закрепленной с двух концов над плоской поверхностью анода (ср. со схемой генератора на рис. 1).

Фрактальные системы. В лабораторных условиях (при комнатной температуре, на воздухе) зарегистрирована зависимость фазы сигнала стационарного электронного спинового резонанса (синфазного с модуляцией внешнего магнитного поля) образцов каменного угля в виде отдельных штуффов (кусков) от их размеров вдоль магнитной компоненты сверхвысокочастотного электромагнитного поля в резонаторе радиоспектрометра [31]. В связи с этим в рамках концепции спиновой наномеханики [32] дискутируется возможность стимулирования магнитопластичности горных пород [33]. Возможно, что развитие электромеханики каменных углей различной степени метаморфизма позволит предсказывать (и предотвращать [34]) внезапные выбросы угля в

шахтах при его добыче.

Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция» Республики Беларусь.

Литература

- [1] M.S. Dresselhaus, *Mater. Res. Lett.* **2**, 1–9 (2014).
- [2] Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, *Квазичастицы в физике конденсированного состояния* (Физматлит, М., 2007) 632 с.
- [3] Р. Пайерлс, *УФН* **161**, 161–176 (1991).
- [4] М. Газале, *Гномон. От фараонов до фракталов* (Ин-т компьютерных исследований, Москва-Ижевск, 2002) 272 с.
- [5] Р.А. Андриевский, *УФН* **183**, 277–285 (2013).
- [6] *Nanoelectronics and information technology: Advanced electronic materials and novel devices* / Ed. by R. Waser. (Wiley-VCH, Weinheim, 2012) 1040 p.
- [7] А.В. Шевельков, *Успехи химии* **11**, 3–21 (2008).
- [8] А.В. Дмитриев, И.П. Звягин, *УФН* **180**, 821–838 (2010).
- [9] P. Mani, N. Nakpathomkun, E.A. Hoffmann, *et al.*, *Nano Lett.* **11**, 4679–4681 (2011).
- [10] А.А. Варламов, А.В. Кавокин, И.А. Лукьянчук и др., *УФН* **182**, 1229–1234 (2012).
- [11] В.Л. Гинзбург, *УФН* **168**, 363–368 (1998).
- [12] K. Schwab, E.A. Henriksen, J.M. Worlock, *et al.*, *Nature* **404**, 974–977 (2000).
- [13] А.Г. Андреев, А.Г. Забродский, И.П. Звягин и др., *ФТП* **31**, 1174–1179 (1997).
- [14] С.В. Демишев, М.В. Кондрин, А.А. Пронин, и др., *Письма в ЖЭТФ* **68**, 801–806 (1998).
- [15] Н.А. Поклонский, С.Ю. Лопатин, *ФТТ* **43**, 2126–2134 (2001).
- [16] Ю.И. Равич, С.А. Немов, *ФТП* **36**, 3–23 (2002).
- [17] Н.А. Поклонский, Е.Ф. Кисляков, Д.И. Сагайдак и др., *Письма в ЖТФ* **27**, 17–23 (2001).
- [18] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, *et al.*, *Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures. Reviews and Short Notes: Proc. of the Int. Conf. Nanomeeting-2015*, Minsk, 26–29 May 2015 / Eds. V.E. Borisenko *et al.* (World Scientific, Singapore, 2015) [in press].
- [19] A.S. Nizovtsev, S.G. Kozlova, *J. Phys. Chem. A* **117**, 481–488 (2013).
- [20] B. Mukherjee, A.K. Ray, A.K. Sharma, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **103**, 074507 (4 pp.) (2008).
- [21] R. Strohmaier, C. Ludwig, J. Petersen, *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 1079–1082 (1996).
- [22] В.А. Саранин, *УФН* **182**, 749–758 (2012).
- [23] N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko, *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* **545**, 71–77 (2012).
- [24] N.A. Poklonski, A.T. Vlassov, S.A. Vyrko, *et al.*, *Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures. Reviews and Short Notes: Proc. of the Int. Conf. Nanomeeting-2013*, Minsk, 28–31 May 2013 / Ed. by V.E. Borisenko *et al.* (World Scientific, Singapore, 2013) P. 36–39.

- [25] S. Bednarek, B. Szafran, *Phys. Rev. B* **73**, 155318 (5 pp.) (2006).
- [26] J. Yao, H. Yan, S. Das, *et al.*, *PNAS* **111**, 2431–2435 (2014).
- [27] Н.А. Поклонский, А.Т. Власов, С.А. Вырко, *Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур: матер. междунар. науч. конф.*, Минск, 16–20 сент. 2013 г. / под общ. ред. Г.И. Михасева, Х. Альтенбаха (Изд. центр БГУ, Минск, 2013) С. 95–98.
- [28] Р. Уинстон, *В мире науки* № 5, 44–50 (1991).
- [29] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, *et al.*, *J. Nanophotonics* **6**, 061712 (9 pp.) (2012).
- [30] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, *Proc. Int. Sci. Conf. Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures*, September 16–20, 2013, Minsk / Ed. by G.I. Mikhasev, H. Altenbach (BSU, Minsk, 2013) P. 105–108.
- [31] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, О.Н. Поклонская и др., *Журн. прикл. спектр.* **80**, 379–384 (2013).
- [32] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева и др., *ФТТ* **54**, 305–312 (2012).
- [33] А.Л. Бучаченко, *УФН* **184**, 101–108 (2014).
- [34] А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова, Т.А. Василенко, *УФН* **175**, 1217–1232 (2005).

Полупроводниковые источники излучения для ИК области спектра

И.И. Засавицкий

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Инфракрасная (ИК) область спектра (1–1000 мкм) представляет большой интерес, так как в ней расположены основные атмосферные окна пропускания атмосферы и вращательно-колебательные линии поглощения большинства молекул. Спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела относительно невелика и падает с увеличением длины волны излучения. Однако она велика для лазеров, и даже для полупроводниковых лазеров она на много порядков величины превышает соответствующее значение для абсолютно черного тела. Исторически такими ИК лазерами являются диодные лазеры на основе твердых растворов типа A^4B^6 ($PbSSe$, $PbSnSe$, $PbSnTe$ и др.). Длина волны излучения лазеров может перестраиваться от 3 до 40 мкм путем изменения состава и внешних воздействий [1]. Путем комбинации полупроводников типа A^4B^6 с Eu , Sr и другими элементами [2] для области спектра 3–10 мкм создаются [3] одномодовые лазеры с вертикальным выводом излучения (VCSEL). Однако основными недостатками всех этих лазеров