

УДК 544.723; 547.022.1/4
PACS 65.80.Ck, 66.10.C-

Температурные зависимости транспортных характеристик углеродных наночастиц

С. А. Судоргин¹, Н. Г. Лебедев²

¹ Волгоградский государственный аграрный университет
400002, Волгоград, пр. Университетский, 26.
email: sersud@mail.ru

² Волгоградский государственный университет
400062, Волгоград, пр. Университетский, 100.
email: lebedev.ng@mail.ru

Предложена методика расчета температурных зависимостей транспортных характеристик различных углеродных наночастиц: однослойных нанотрубок, графена, двухслойного графена во внешнем постоянном электрическом поле. Получены аналитически и проанализированы численно соотношения для удельной электропроводности и коэффициента диффузии электронов в углеродных наноструктурах. Показано, что удельная электропроводность однослойных и двухслойных углеродных наноструктур уменьшается с ростом температуры. Электропроводность углеродных наночастиц нелинейно зависит от амплитуды внешнего постоянного электрического поля для различных температур. При повышении температуры коэффициент удельной электропроводности уменьшается. Коэффициент диффузии электронов не зависит от температуры как для однослойных так и для двухслойных наночастиц. Показана нелинейная зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности внешнего постоянного электрического поля. Предложено физическое обоснование полученных зависимостей.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; двухслойный графен; электропроводность; диффузия электронов

Поступила в редакцию 16.03.2020; принята к опубликованию 02.05.2020

Temperature dependence of carbon nanoparticles transport characteristics

S. A. Sudorgin¹, N. G. Lebedev²

¹ Volgograd State Agricultural University, University Av. 100, 400002, Volgograd
email: sersud@mail.ru

² Volgograd State University, University Av. 100, 400062, Volgograd
email: lebedev.ng@mail.ru

Technique for calculating the temperature dependences of transport characteristics of different carbon nanoparticles: single-walled nanotubes, graphene, bilayer graphene in a constant external electric field is proposed. Formulas for conductivity and the diffusion coefficient of electrons in carbon nanostructures obtained analytically and analyzed numerically. Conductivity in single-walled and bilayer carbon nanostructures decreases with increasing temperature. The electrical conductivity of carbon nanoparticles depends nonlinearly on the amplitude of the external constant electric field for various temperatures. With increasing temperature, the coefficient of conductivity decreases. The diffusion coefficient of electrons is independent of temperature for both single-layer and bilayer na-

particles. A nonlinear dependence of the electron diffusion coefficient on the strength of an external constant electric field is shown. Physical justification of the obtained dependences is proposed.

Keywords: carbon nanotubes; graphene; bilayer graphene; conductivity; diffusion of electrons.

Received 16.03.2020; accepted 02.05.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-24-30

1. Введение

Углерод характеризуется многообразием форм существования, являясь одним из важнейших и наиболее часто встречающихся элементов в природе. Уникальность углерода состоит в том, что он может одновременно существовать в различных кристаллических модификациях: алмаз, квазидвумерный графен, квазиодномерные углеродные и квазинульмерные фуллерены. Ряд модификаций углерода открыт сравнительно недавно.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой протяжённые цилиндрические низкоразмерные структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров [1], состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферической головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена.

Графен является низкоразмерной углеродной структурой, состоящей из одного атомарного слоя графита, имеет в своей основе гексагональную сетку sp^2 -гибридизованных атомов углерода [2]. Графен интересен как с точки зрения возможных практических приложений, так и с фундаментальной точки зрения, поскольку обладает уникальными электронными свойствами. Электроны в графене вблизи уровня Ферми обладают линейной дисперсией, при этом энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости отсутствует [3–5].

Низкоразмерные углеродные наночастицы обладают необычным сочетанием различных свойств, вследствие чего они могут применяться в качестве составляющих различных приборов и устройств, например, диодов, транзисторов, логических элементов, переключателей, электродов, сенсоров, зондов атомно-силовых и туннельных микроскопов [6].

В настоящее время, вследствие широких перспектив внедрения в различные отрасли промышленности углеродных наночастиц, существует необходимость изучения электрофизических свойств данных материалов, имеющих большие перспективы практического применения в различных областях промышленности, химии, современной медицины и биотехнологий [7]. В данной работе сделан акцент на изучение зависимости электротранспортных свойств квазиодномерных и

квазидвумерных модификаций углерода: однослойных углеродных нанотрубок и двухслойных графеновых лент от температуры.

2. Модель электротранспортных характеристик и основные уравнения

2.1. Форматы

Большое число работ посвящено исследованию электронной структуры УНТ и отклику УНТ на внешнее электромагнитное поле [7–10]. Модель, учитывающая только π -электроны ближайших соседних атомов, позволяет получить правильное описание основных электронных свойств УНТ. Для данной модели известен закон дисперсии, описывающий электронные свойства графена [7–10]:

$$E(\mathbf{p}) = \pm \gamma \sqrt{1 + \cos ap_x \cos \frac{ap_y}{3} + 4 \cos^2 \frac{ap_y}{3}}, \quad (2.1)$$

$$a = \frac{3b}{2},$$

где $b = 0.142$ нм – расстояние между соседними атомами углерода в графене, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$, $\gamma = 2.7$ эВ – интеграл перескока электронов между соседними узлами кристаллической решетки. Разные знаки в законе дисперсии относятся к зоне проводимости и валентной зоне соответственно. Получить закон дисперсии УНТ можно из зонной структуры графена, если учесть способ сворачивания графенового листа в цилиндр и наложить условия квантования квазиимпульса \mathbf{p} вдоль окружности УНТ. В качестве квазиодномерной углеродной наноструктуры рассмотрим однослойные УНТ $(n, 0)$ типа «zig-zag», обладающие полупроводниковыми свойствами [10]. Геометрия задачи показана на рис. 1.

Для УНТ $(n, 0)$ типа «zig-zag» дисперсионное соотношение имеет вид [7]

$$E(\mathbf{p}) = \pm \gamma \sqrt{1 + \cos ap_x \cos \frac{\pi s}{n} + 4 \cos^2 \frac{\pi s}{n}}, \quad (2.2)$$

где $\mathbf{p} = (p_x, s)$ – квазиимпульс электронов углеродной нанотрубки, p_x – параллельная оси нанотрубки компонента квазиимпульса, $s = 1, 2, \dots, n$ – номерует квантование компоненты импульса вдоль окружности нанотрубки.

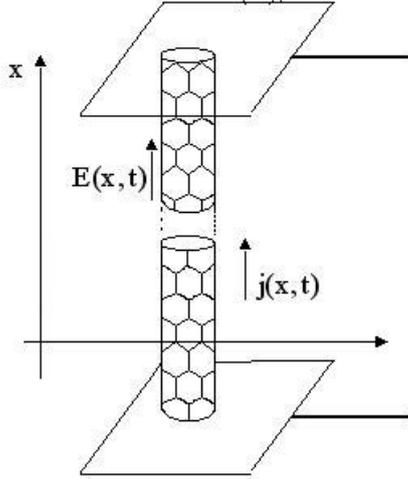


Рис. 1. Геометрия задачи: УНТ типа «zig-zag» во внешнем электрическом поле. Вектор напряженности поля E направлен вдоль оси УНТ

Методика расчета транспортных коэффициентов электронов в углеродных нанотрубках достаточно подробно описана в работах [11–13]. Эволюция электронной системы моделируется с использованием квазиклассического приближения времени релаксации. Функция распределения электронов в состоянии с импульсом $\mathbf{p} = (p_x, s)$ находится из кинетического уравнения Больцмана в τ -приближении [14]:

$$\frac{\partial f_s(\mathbf{p}, \mathbf{r})}{\partial t} + \mathbf{F} \frac{\partial f_s(\mathbf{p}, \mathbf{r})}{\partial t} = \frac{\partial f_s(\mathbf{p}, \mathbf{r}) - \partial f_{0s}(\mathbf{p}, \mathbf{r})}{\tau}, \quad (2.3)$$

где $f_s(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ – функция распределения Ферми, $\mathbf{F} = e\mathbf{E}$ – действующая на частицу постоянная электростатическая сила.

Для определения зависимости транспортных характеристик УНТ от внешнего электрического поля используем методику, изложенную в работе [15]. Продольная компонента плотности тока $j = j_x$ имеет следующий вид:

$$j(x) = \sigma(\mathbf{E})\mathbf{E} + D(\mathbf{E}) \frac{\nabla_x n}{n}. \quad (2.4)$$

Для случая однородного распределения температуры $T(\mathbf{r}) = \text{const}$ в линейном приближении по величине $\nabla_x n$ в работе [11] получены выражения для транспортных коэффициентов однослойных УНТ: удельной электропроводности и коэффициента диффузии электронов. Электропроводность УНТ типа «zig-zag» задается следующим выражением [11]:

$$\sigma(E) = \sum_s \sum_m \int_{-\pi}^{\pi} dp_x A_{ms} m f_{0s}(p_x, x) \times \frac{E}{E^2 m^2 + 1} (\sin mp_x + Em \cos mp_x). \quad (2.5)$$

Выражение для коэффициента диффузии электронов в УНТ типа «zig-zag» имеет вид [11]:

$$D(E) = \sum_s \sum_m \sum_{m'} \int_{-\pi}^{\pi} dp_x f_{0s}(p_x, x) A_{ms} m A_{m's} m' \times \left(\frac{(E^2(m^2 + m'^2) + 1)(EmR + M)}{K} + \frac{(E^3(m'^3 - 2m^2 m') + Em')T}{K} \right) + \sum_s \sum_m \sum_{m'} \int_{-\pi}^{\pi} dp_x f_{0s}(p_x, x) A_{ms} m A_{m's} m' \frac{F}{P}, \quad (2.6)$$

где введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} K &= (E^4(m^4 + m'^4 - 2m^2 m'^2) + \\ &\quad + 2E^2(m^2 + m'^2) + 1)(E^2 m^2 + 1), \\ P &= (E^2 m^2 + 1)^2 (E^2 m'^2 + 1), \\ R &= \cos mp_x \sin m'p_x + \cos mp_x \cos m'p_x - \\ &\quad - \sin mp_x \sin m'p_x, \\ M &= \sin mp_x \sin m'p_x + \sin mp_x \cos m'p_x + \\ &\quad + \cos mp_x \sin m'p_x, \\ T &= \cos mp_x \cos m'p_x - Em \sin mp_x \cos m'p_x, \\ F &= (\sin m'p_x + Em \cos m'p_x) \times \\ &\quad \times (\sin mp_x + 2Em \cos mp_x - E^2 m^2 \sin mp_x), \end{aligned}$$

где A_{ms} и $A_{m's}$ – коэффициенты разложения в ряд Фурье дисперсионного соотношения электронов в УНТ, m и m' – порядок разложения в ряд Фурье. Для удобства визуализации и качественного анализа произведена процедура обезразмеривания и выбрана следующая относительная единица измерения напряженности электрического поля $E_0 = 4.7 \cdot 10^6$ В/м.

Также были изучены зависимости от температуры транспортных характеристик двухслойных графеновых нанолент в присутствии внешнего электрического поля $\mathbf{E}(x, t)$, приложенного по оси x , направленной вдоль поверхности ленты. Геометрическая конфигурация двухслойной графеновой ленты, помещенной во внешнее постоянное электрическое поле, представлена на рис. 2. Рассматриваемая лента состоит из двух слоев с гексагональной структурой, упакованных по типу АВ-АВ. Система рассматривается в модели Хаббарда [16], учитывающей только энергию π -электронов в приближении ближайших соседей. Между слоями графена приложен электростатический потенциал U . Зонная структура, полученная в приближении сильной связи, позволяет записать закон дисперсии для двухслойной графеновой ленты в виде [17]

$$E_p^{\pm\pm}(U) = \pm \sqrt{\varepsilon_p^2 + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{U^4}{4} \pm \sqrt{\frac{\gamma^4}{4} + (\gamma^2 + U^2)\varepsilon_p^2}}, \quad (2.7)$$

где дисперсионное соотношение однослойного графена ε_p определяется формулой [7]

$$\varepsilon_p = \pm t_0 \sqrt{1 + 4 \cos a p_x \cos \frac{\pi s}{n} + 4 \cos^2 \frac{\pi s}{n}}, \quad (2.8)$$

где $t_0 \approx 2.7$ эВ – интеграл перескока электронов между соседними узлами кристаллической решетки, $\gamma \approx 0.4$ эВ – интеграл перескока между слоями, $a = 3b/2\hbar$, $b = 0.142$ нм – расстояние между соседними атомами углерода, $\mathbf{p} = (p_x, s)$ – квазиимпульс электронов в графене, p_x – параллельная листу графена компонента квазиимпульса, $s = 1, 2, \dots, n$ – номерует квантование компоненты импульса по ширине графенового листа.

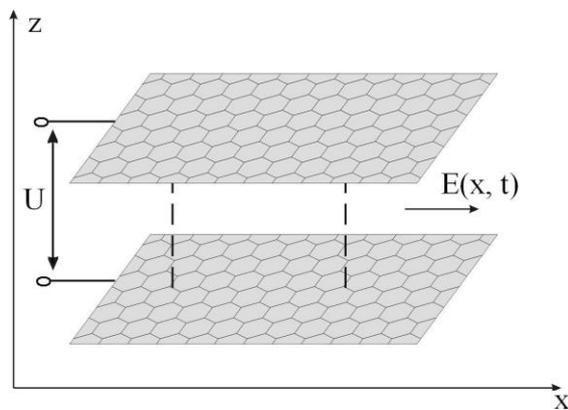


Рис. 2. Геометрия задачи: двухслойная графеновая лента во внешнем электрическом поле. Вектор напряженности поля E направлен вдоль ленты

Разные знаки в законе дисперсии относятся к зоне проводимости и валентной зоне соответственно. Выражения для удельной электропроводности и коэффициента диффузии электронов для двухслойных графеновых лент имеют аналогичный вид, как и для однослойных углеродных нанотрубок. В следующем разделе представлены графически полученные результаты зависимостей транспортных характеристик от температуры для рассмотренных типов углеродных наночастиц.

3. Обсуждение результатов

Зависимости от температуры транспортных характеристик углеродных наночастиц представлены на примере двух типов наноструктур: однослойных углеродных нанотрубок типа «zig-zag» и двухслойных графеновых лент. Время релаксации электронов принято равным $1.4 \cdot 10^{-12}$ с в соответствии с литературными данными [8]. Для численного анализа температурных зависимостей рас-

смотрены полупроводниковые УНТ типа (10,0) и двухслойные графеновые ленты.

Зависимость электропроводности однослойных углеродных нанотрубок типа «zig-zag» и двухслойных графеновых лент от величины напряженности внешнего постоянного электрического поля имеет вид, характерный для полупроводниковых структур: при увеличении амплитуды внешнего поля вначале стремится к насыщению, а затем монотонно уменьшается с увеличением напряженности, что согласуется с данными, полученными авторами в работе [11]. Данное явление объясняется увеличением заполнения электронами всех возможных состояний зоны проводимости. Следует отметить, что подобный характер изменения электрической проводимости под действием внешнего электрического поля является типичным для полупроводниковых структур, обладающих периодическим и ограниченным законом дисперсии [18].

На рис. 3 показаны зависимости удельной электропроводности $\sigma(E)$ от величины напряженности E внешнего постоянного электрического поля для полупроводниковых УНТ типа (10,0) при различных температурах: 1 – для $T = 10$ К, 2 – для $T = 50$ К, 3 – для $T = 100$ К, 4 – для $T = 300$ К. Графики построены на основе результатов расчетов электропроводности по формуле (2.5). Для удобства визуализации и количественной оценки использованы безразмерные единицы. Единица безразмерной величины напряженности внешнего электрического поля E , отложенная по оси x , равна $4.7 \cdot 10^6$ В/м, а единица безразмерной величины электропроводности $\sigma(E)$, отложенная по оси y , равна $1.9 \cdot 10^3$ См/м.

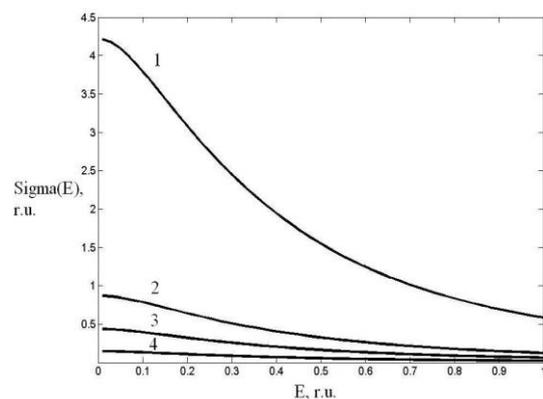


Рис. 3. Зависимости электропроводности $\sigma(E)$ от величины напряженности E внешнего электрического поля для УНТ типа (10,0) при разных температурах: 1 – для $T = 10$ К, 2 – для $T = 50$ К, 3 – для $T = 100$ К, 4 – для $T = 300$ К

Полученные зависимости объясняются тем, что с ростом температуры, согласно распределению Ферми–Дирака, увеличивается концентрация носителей свободных зарядов в зоне проводимости,

которая обеспечивает проводящие свойства вещества. Энергетические состояния в зоне проводимости являются дважды вырожденными, поэтому рост температуры способствует заполнению, прежде всего, низкоэнергетических квантовых состояний. Полностью заполненные состояния не дают вклада в проводимость вещества, поэтому с ростом температуры проявляется уменьшение коэффициента электропроводности. Следует также учесть, что в рамках рассматриваемой модели энергетическая щель в электронном спектре достаточно узкая, что также обеспечивает проводящие свойства.

Аналогичный характер зависимости удельной электропроводности $\sigma(E)$ от величины напряженности E внешнего постоянного электрического поля наблюдается и для двухслойных углеродных нанолент, как показано на рис. 4.

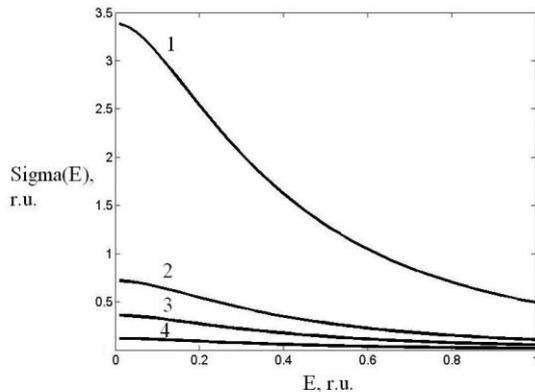


Рис. 4. Зависимости электропроводности $\sigma(E)$ от величины напряженности E внешнего электрического поля для двухслойных графеновых лент типа (10,0) при разных температурах: 1 – для $T = 10$ К, 2 – для $T = 50$ К, 3 – для $T = 100$ К, 4 – для $T = 300$ К

При повышении температуры коэффициент удельной электропроводности уменьшается, что объясняется причинами, описанными выше. Стоит отметить, что удельная электропроводность однослойных углеродных нанотрубок типа «zig-zag» количественно выше, чем для двухслойных углеродных нанолент, содержащих такое же количество элементарных ячеек в поперечном сечении, что является следствием приложения электростатического потенциала и учета перескока электронов между слоями ленты. Как показано авторами в работе [13] увеличение постоянного напряжения между слоями ленты обуславливает понижение электропроводности, что объясняется сдвигом уровня Ферми, приводящим к увеличению локализованных (вырожденных) состояний электронного спектра. Для зависимостей, показанных на рис. 4, значение поперечного напряжения между слоями графена равно 1 В.

Коэффициент диффузии электронов $D(E)$ не зависит от температуры как для однослойных УНТ типа «zig-zag» так и для двухслойных графеновых лент, что наглядно видно на рис. 5–6. Графики построены на основе результатов расчетов коэффициента диффузии электронов по формуле (2.6). Единица безразмерной величины коэффициента диффузии электронов $D(E)$, отложенной по оси y , равна соответствует $3.5 \cdot 10^2$ А/м. Это объясняется тем, что коэффициент диффузии характеризует поток электронов, который является постоянной величиной, так как градиент концентрации не зависит от температуры в рамках данной модели.

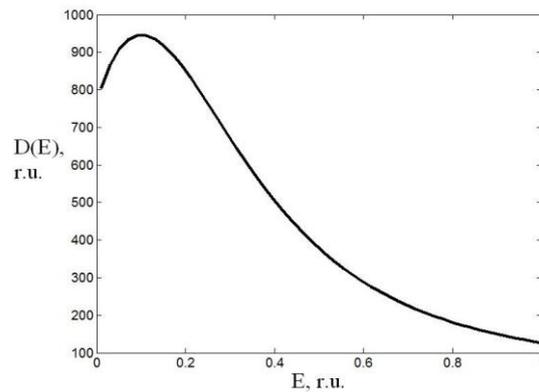


Рис. 5. Зависимость коэффициента диффузии электронов $D(E)$ от величины напряженности E внешнего электрического поля для УНТ типа (10,0)

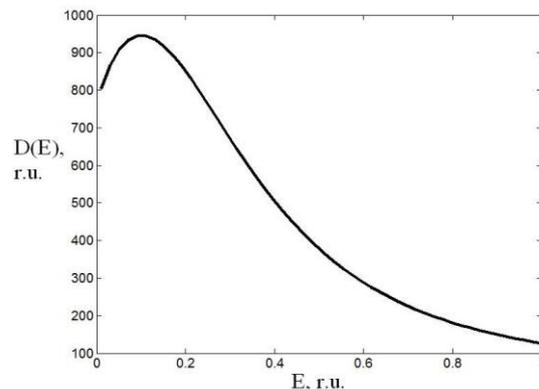


Рис. 6. Зависимость коэффициента диффузии электронов $D(E)$ от величины напряженности E внешнего электрического поля для двухслойных графеновых лент типа (10,0)

Коэффициент диффузии электронов $D(E)$ нелинейно зависит от напряженности внешнего постоянного электрического поля как в однослойных, так и в двухслойных углеродных наноструктурах. Увеличение поля сначала приводит к его росту, а затем к убыванию до стационарного значения. Описанное явление характерно для всех систем с

периодическим и ограниченным законом дисперсии электронов [18].

Полученные результаты могут быть полезны для создания углеродных наночастиц и композитов на их основе с заранее определенными транспортными характеристиками и для разработки компонентов нано- и микроэлектроники на основе углеродных наночастиц.

4. Заключение

В заключение кратко сформулируем основные результаты и выводы проведенного теоретического исследования.

1. В работе проведено теоретическое исследование транспортных характеристик квазиодномерных (однослойные углеродные нанотрубки) и квазидвумерных (двухслойные графеновые наноленты) углеродных наночастиц.

2. Показано, что электропроводность углеродных наночастиц нелинейно зависит от амплитуды внешнего постоянного электрического поля для различных температур. При повышении температуры коэффициент удельной электропроводности уменьшается.

3. Коэффициент диффузии электронов не зависит от температуры как для однослойных, так и для двухслойных наночастиц. Показана нелинейная зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности внешнего постоянного электрического поля. Дано физическое обоснование наблюдаемым зависимостям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-42-343001.

Список литературы

1. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 233–274.
2. Чернозатонский Л. А., Сорокин П. Б., Артюх А. А. Новые наноструктуры на основе графена: физико-химические свойства и приложения // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 3. С. 251–279.
3. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // УФН. 2011. Т. 181. № 3. С. 233–268.
4. Морозов С. В., Новоселов К. С., Гейм А. К. Электронный транспорт в графене // УФН. 2008. Т. 178. № 7. С. 776–780.
5. Лозовик Ю. Е., Меркулова С. П., Соколик А. А. Коллективные электронные явления в графене // УФН. 2008. Т. 178. № 7. С. 757–776.
6. Раков Э. Г. Углеродные нанотрубки в новых материалах // Успехи химии. 2013. Т. 82. № 1. С. 27–47.
7. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
8. Maksimenko S. A., Slepuyan G. Ya. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structure / In: Handbook of nanotechnology. Nanometer structure: theory, modeling, and simulation. Bellingham: SPIE, 2004, 576 p.
9. Елецкий А. В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок // УФН. 2009. Т. 179. № 3. С. 225–242.
10. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ, 2006. 293 с.
11. Белоненко М. Б., Лебедев Н. Г., Судоргин С. А. Коэффициенты диффузии и проводимости полупроводниковых углеродных нанотрубок во внешнем электрическом поле // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 1841–1844.
12. Белоненко М. Б., Лебедев Н. Г., Судоргин С. А. Электропроводность и коэффициент диффузии электронов в бислое графена // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 7. С. 129–133.
13. Sudorgin S. A., Belonenko M. B., Lebedev N. G. Effect of electric field on the transport and diffusion properties of bilayer graphene ribbons // Physica Scripta. 2013. V. 87. № 1, 015602.
14. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Физическая кинетика. М.: Физматлит, 1979. 528 с.
15. Булыгин А. С., Шмелев Г. М., Маглеванный И. И. Дифференциальная термоЭДС сверхрешетки в сильном электрическом поле // ФТТ. 1999. Т. 41. С. 1314–1316.
16. Изюмов Ю. А., Чащин И. И., Алексеев Д. С. Теория сильно коррелированных систем. Метод производящего функционала. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 384 с.
17. Ohta T., Bostwick A., Seyller T., Horn K., Rotenberg E. Controlling the electronic structure of bilayer graphene. Science, 2006, v. 313, pp. 951–954.
18. Дыкман И. М., Томчук П. М. Явления переноса и флуктуации в полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1981. 320 с.

References

1. Eletsii A. V. Mechanical properties of carbon nanostructures and related materials. *Physics Uspekhi*, 2007, vol. 50, pp. 225–261.
2. Chernozatonskii L. A., Sorokin P. B., Artyukh A. A. New nanostructures based on graphene: physico-chemical properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2014, vol. 83, no. 3, pp. 251–279.
3. Eletsii A. V., Iskandarova I. M., Bookman A. A., Krassikov D. N. Graphene: fabrication methods and thermophysical properties. *Physics Uspekhi*, 2011, vol. 54, pp. 227–258.

4. Morozov S. V., Novoselov K. S., Geim A. K. Electronic transport in graphene. *Physics Uspekhi*, 2008, vol. 51, pp. 744–748.
5. Lozovik Yu., Merkulov S., Sokolik A.A. Collective electron phenomena in graphene. *Physics Uspekhi*, 2008, vol. 51, pp. 727–744.
6. Rakov E.G. Carbon nanotubes in new materials. *Russian Chemical Reviews*, 2013, vol. 82, no. 1, pp. 27–47.
7. Harris P. *Carbon nanotubes and related structures. New Materials of the XXI century*. Moscow: Technosphere, 2003. 336 p. (In Russian).
8. Maksimenko S. A., Slepyan G. Ya. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structure. In: *Handbook of nanotechnology. Nanometer structure: theory, modeling, and simulation*. Bellingham: SPIE, 2004. 576 p.
9. Eletsii A.V. Transport properties of carbon nanotubes. *Physics Uspekhi*, 2009, vol. 52, pp. 209–224.
10. Diachkov P. N. *Carbon nanotubes: structure, properties, applications*. Moscow: BINOM, 2006. 293 p. (In Russian)
11. Belonenko M. B., Lebedev N. G., Sudorgin S. A. coefficients of diffusion and conductivity of semiconductor carbon nanotubes in an external electric field. *Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, no. 9, pp. 1943–1946.
12. Belonenko M. B., Lebedev N. G., Sudorgin S. A. Electrical conductivity and diffusion coefficient of electrons in a graphene bilayer. *Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 7, pp. 1025–1029.
13. Sudorgin S. A., Belonenko M. B., Lebedev N. G. Effect of electric field on the transport and diffusion properties of bilayer graphene ribbons. *Physica Scripta*, 2013, vol. 87, no. 1, 015602.
14. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Physical kinetics*. Moscow: Fizmatlit, 1979. 528 p. (In Russian)
15. Buligin A. S., Shmelev G. M., Maglevanny I. I. Differential thermopower superlattice in a strong electric field. *Physics of the Solid State*, 1999, vol. 41, pp. 1314–1316. (In Russian)
16. Izyumov Y. A., Chashchin I. I., Alekseev D. S. *Theory of strongly correlated systems. Generating functional method*. Moscow–Izhevsk: Regular and Chaotic Dynamics, 2006. 384 p. (In Russian)
17. Ohta T., Bostwick A., Seyller T., Horn K., Rotenberg E. Controlling the electronic structure of bilayer graphene. *Science*, 2006, vol. 313, pp. 951–954.
18. Dykman I. M., Tomchuk P. M. *Fluctuations and transport phenomena in semiconductors*. Kiev, Naykova Dumka, 1981. 320 p. (In Russian)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Судоргин С. А., Лебедев Н. Г. Температурные зависимости транспортных характеристик углеродных наночастиц // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 24–30. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-24-30

Please cite this article in English as:

Sudorgin S. A., Lebedev N. G. Temperature dependence of carbon nanoparticles transport characteristics. Bulletin of Perm University. Physics, 2020, vol. 3. pp. 24–30. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-24-30