

УДК 538.9

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_52

EDN: XSSUKR

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ Co – CoO НА МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В CVD-ГРАФЕНЕ

А. А. Харченко¹, А. К. Федотов¹, Н. А. Казимиров¹, Ю. А. Федотова¹,
А. О. Конаков², М. В. Чичков³, М. Д. Малинкович³

¹Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

²«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

Белорусского государственного университета, Минск

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

EFFECT OF Co – CoO PARTICLE DEPOSITION ON CHARGE CARRIER TRANSPORT MECHANISMS IN CVD-GRAPHENE

A. A. Kharchanka¹, A. K. Fedotov¹, N. A. Kazimirov¹, J. A. Fedotova¹,
A. O. Konakov², M. V. Chichkov³, M. D. Malinkovich³

¹Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow

Аннотация. Исследованы температурные зависимости поверхностной проводимости $\sigma_{\square}(T)$ CVD-графена без и с электрохимически осаждёнными частицами Co – CoO. Для исходного CVD графена зависимость $\sigma_{\square}(T)$ описывается моделью, включающей двумерные квантовые поправки теории проводимости Друде в условиях слабой локализации, а также активационный механизм переноса заряда, обусловленный крупномасштабным потенциальным рельефом (КМПР). После осаждения наночастиц Co – CoO отмечено снижение вклада от КМПР. Однако в целом, не наблюдается существенного влияния осаждения наночастиц Co – CoO на природу механизмов транспорта носителей заряда характерных для исходных образцов графена.

Ключевые слова: CVD-графен, электропроводность, электротранспорт, квантовые поправки, крупномасштабный потенциальный рельеф.

Для цитирования: Влияние осаждения частиц Co – CoO на механизмы переноса носителей заряда в CVD-графене / А. А. Харченко, А. К. Федотов, Н. А. Казимиров, Ю. А. Федотова, А. О. Конаков, М. В. Чичков, М. Д. Малинкович // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 52–58. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_52. – EDN: XSSUKR

Abstract. The temperature dependences of the surface conductivity $\sigma_{\square}(T)$ of CVD graphene with and without electrochemically deposited Co – CoO particles were studied. For the initial CVD graphene, the $\sigma_{\square}(T)$ dependence is described by a model incorporating two-dimensional quantum corrections to the Drude conductivity theory under weak localization conditions, as well as an activated carrier transport mechanism due to the large-scale potential relief (LSPR). After deposition of Co – CoO nanoparticles, a decrease of the LSPR contribution was observed. However, overall, no significant effect of Co – CoO nanoparticles on the nature of the charge carrier transport mechanisms characteristic of the initial graphene samples was observed.

Keywords: CVD graphene, electrical conductivity, electrical transport, quantum corrections, large-scale potential relief.

For citation: Effect of Co – CoO particle deposition on charge carrier transport mechanisms in CVD-graphene / A. A. Kharchanka, A. K. Fedotov, N. A. Kazimirov, J. A. Fedotova, A. O. Konakov, M. V. Chichkov, M. D. Malinkovich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 52–58. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_52 (in Russian). – EDN: XSSUKR

Введение

Графен – одна из важнейших аллотропных модификаций углерода – привлекает пристальное внимание исследователей благодаря своим уникальным физическим свойствам. Эти свойства открывают широкие перспективы для создания разнообразных электронных устройств, в том числе магнито- и газочувствительных датчиков, различных видов преобразователей, спинтронных

устройств, мемристоров и др. [1]–[6]. Помимо этого графен может найти применение в системах хранения энергии, термоэлектрогенераторах, гибкой электронике, а также магнитной визуализации в биомедицине [1]–[6]. Однако массовое технологическое внедрение графена сдерживается рядом трудностей. Основное практическое ограничение заключается в том, что в большинстве исследований используются листы микронных

© Харченко А. А., Федотов А. К., Казимиров Н. А., Федотова Ю. А., Конаков А. О., Чичков М. В., Малинкович М. Д., 2026

размеров, получаемые методом отщепления либо разрезанием поликристаллических образцов (см., например, обзоры [1]–[3]). Как отмечено в [7], несмотря на выдающиеся электрические, механические, химические и другие характеристики таких микронных листов, их размеров недостаточно для реальных приложений в современной массовой электронике, где требуются площади порядка квадратных сантиметров и более.

Одним из перспективных путей решения этой проблемы является совершенствование методов синтеза графена, в первую очередь, например, химического осаждения из газовой фазы (CVD-графен). Этот технологический подход позволяет получать поликристаллический графен площадью в сотни квадратных сантиметров (такой результат достигнут компанией «Graphenea S.A.») и монокристаллический графен с площадью порядка квадратного сантиметра [8], [9]. Помимо масштабируемости, CVD-метод обладает значительной гибкостью в управлении условиями синтеза: выбор технологических режимов роста, способов переноса и типа подложки даёт возможность целенаправленно влиять на тип (n или p) и величину проводимости получаемого материала [10].

Вместе с тем создание и исследование магнитных и магниторезистивных свойств гибридных структур на основе графена является актуальной задачей, поскольку открывает дополнительные перспективы для их применения в магнитных туннельных переходах, спиновых вентилях и фильтрах, устройствах магниторезистивной записи информации и других элементах спинтроники [11]–[13]. В более широком контексте, гибридные структуры на основе графена могут использоваться в твердотельных датчиках магнитного поля, фотовольтаических преобразователях, полевых транзисторах, средствах доставки лекарственных препаратов в нанобиомедицине, материалах электродов для литий-ионных батарей, суперконденсаторах, оптически прозрачных полупроводниках, а также в электрокатализе [14]–[25]. Подобные структуры могут быть успешно синтезированы путем осаждения на поверхность графена слоёв либо частиц различных ферромагнитных металлов (Co, Ni и т. д.) [12], [26].

Ранее было обнаружено [27], что температурная зависимость проводимости $\sigma_{\square}(T)$ исходных образцов CVD графена на диэлектрических подложках описывается моделью, включающей в формулу проводимости Друде двумерные квантовые поправки (QC) вследствие реализации условий слабой локализации (WL), доминирующей во всем исследуемом температурном диапазоне. Кроме того, обнаружен вклад активационного механизма переноса заряда. Последнее, наиболее вероятно, обусловлено короблением графена и рябью на его поверхности. С другой стороны,

в работе [28] показано, что осаждение наночастиц Co – CoO на поверхность графена приводит к уменьшению концентрации носителей заряда вследствие исключения из общей проводимости некоторой части носителей, генерированных дефектами. В то же время в этой работе не проводился анализ природы активационного механизма электропереноса. В этой связи возникает вопрос о влиянии осаждения наночастиц Co – CoO на эффекты, обусловленные активационным механизмом переноса заряда.

1 Методика

Синтез графена производился на установке PlanarTech G2 методом CVD на медной фольге с последующим переносом на диэлектрическую подложку ($\text{SiO}_2(300 \text{ nm}) / \text{Si}$) (подробно о синтезе и свойствах исследуемых образцов CVD-графена см. [10], [27], [29]). Из полученных структур вырезался прямоугольный образец с размерами 5×10 мм. Нанесение наночастиц Co – CoO на CVD-графен проводился электрохимическим осаждением (подробно см. [28], [30]). Температурные зависимости слоевой электропроводимости $\sigma_{\square}(T)$ измерялись четырёхзондовым методом на бескриогенной измерительной системе (Cryogenics Ltd, London) на базе рефрижератора замкнутого цикла в температурном диапазоне $2 < T < 40$ К (подробно см. [10], [30], [31]). Обнаружено, что вольтамперные характеристики (ВАХ), измеренные при температурах $T = 300$ К и $T = 2$ К, демонстрируют линейный характер.

2 Результаты

На рисунке 2.1 представлены температурные зависимости слоевой проводимости $\sigma_{\square}(T)$ исходного CVD-графена (Gr) и графена с осажденными наночастицами Co – CoO (Gr / Co), кривые 1 и 5 соответственно. Видно, что оба образца демонстрируют полупроводниковое поведение в виде увеличения слоевой проводимости с ростом температуры.

Ранее [27] в предположении сосуществования механизмов WL QC и активационной / прыжковой проводимости, было получено следующее равенство для температурной зависимости $\sigma_{\square}(T)$:

$$\sigma_{\square}(T) = \sigma_0 + pG_0 \text{Ln}(T) + \sigma_{h_0} \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\alpha}\right], \quad (2.1)$$

где σ_0 – компонента слабозависящая от температуры (подробно см. [27]), T – температура, $G_0 = e^2 / (2\pi^2\hbar) = 1,23 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$ – константа, e – заряд электрона, \hbar – приведённая постоянная Планка, p – параметр, определяемый механизмом рассеяния носителей заряда. Параметры модели α , σ_{h_0} и T_0 , входящие в данное выражение, определяются формой энергетического распределения

плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми, соответственно типом прыжкового транспорта (с постоянной – CRH, или с переменной – VRH длиной прыжка) и размерностью исследуемой системы. Так, в двумерном случае (включая графен) для VRH-режима двумерная модель Мотта предсказывает значение $\alpha = 1/3$, а модель Шкловского – Эфроса – $\alpha = 1/2$ [32], [33]. Для стандартной зонной модели и прыжковой проводимости типа CRH показатель α в соотношении (2.1) равен единице. Важно отметить, что в сильно неупорядоченных материалах может наблюдаться температурная зависимость $\sigma_h(T)$ с переменной энергией активации, внешне похожая на прыжковый механизм, но вызванная не VRH, а наличием крупномасштабного потенциального рельефа (КМПП). В такой ситуации величина α в формуле (2.1) не имеет строго определённого значения, однако всегда остаётся меньше 1 и снижается с повышением температуры.

Как видно из рисунка 2.1, выражение (2.1) хорошо описывает экспериментальные кривые проводимости в аппроксимируемом температурном интервале от 5 К до 40 К для любой допустимой величины параметра α . Параметры аппроксимации температурных зависимостей проводимости в данной области температур представлены в таблице 2.1. Отметим, что для всех

измерений параметр $p = 1$ во втором вкладе соотношения (2.1), что соответствует $pG_0 = G_0$. Это указывает на наличие вклада WL QC вследствие электрон-электронного механизма рассеяния носителей заряда при их движении по самопересекающимся траекториям без сбоя фазы волновых функций [34].

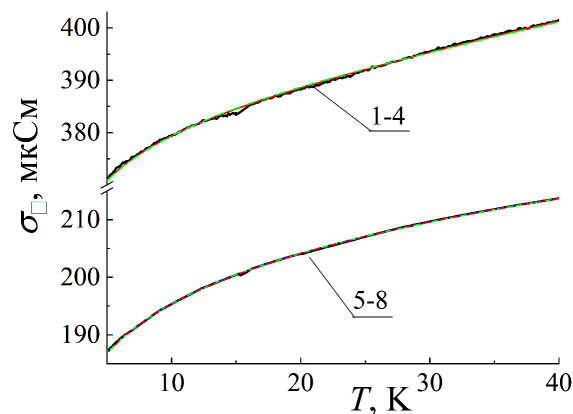


Рисунок 2.1 – Экспериментальные зависимости слоевой проводимости (σ_s) от температуры (T) (1 и 5), а также их аппроксимация формулой (2.1) при значениях показателя $\alpha = 1$ (2,6), $\alpha = 0,5$ (3,7) и $\alpha = 0,33$ (4,8) для образцов Gr (1-4) и Gr / Co (5-8)

Таблица 2.1 – Параметры, полученные из аппроксимации температурной зависимости проводимости уравнением (2.1)

Номер измерения	α	σ_0 , мкСм	σ_{h0} , мкСм	T_0 , К	R^2
Gr	1,0	351 ± 1	$38,8 \pm 1,3$	83 ± 2	0,99918
Gr	0,5	351 ± 1	330 ± 30	710 ± 30	0,99876
Gr	0,33	351 ± 1	3900 ± 600	12700 ± 900	0,99863
Gr + Co	1,0	167 ± 1	$7,0 \pm 0,3$	68 ± 5	0,99991
Gr + Co	0,5	167 ± 1	46 ± 5	510 ± 30	0,99988
Gr + Co	0,33	167 ± 1	290 ± 50	6300 ± 500	0,99987

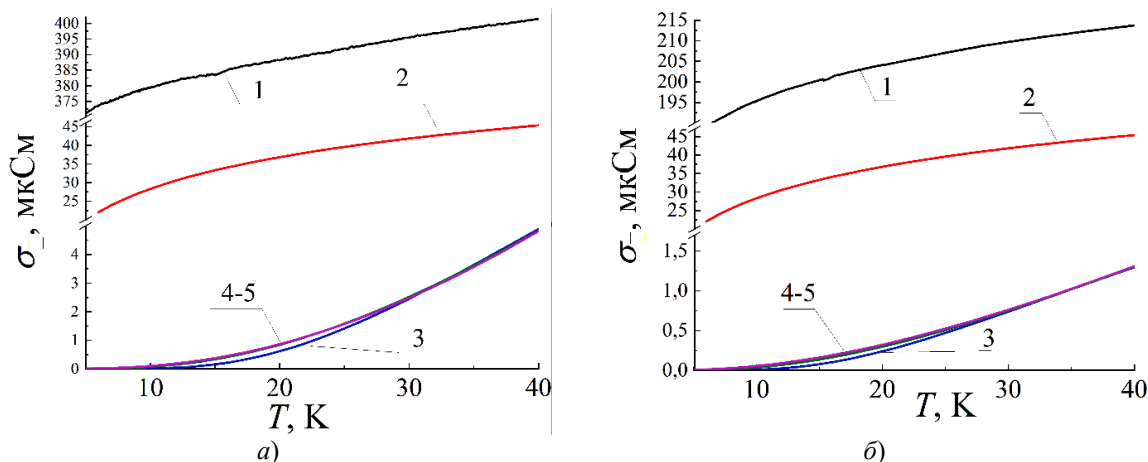


Рисунок 2.2 – Температурные зависимости вкладов в слоевую проводимость в выражении (2.1) для образцов Gr (а) и Gr / Co (б): 1 – экспериментальная кривая, 2 – вклад от второго слагаемого, 4-6 – вклад от третьего слагаемого при $\alpha = 1$ (4), $\alpha = 0,5$ (5) и $\alpha = 0,33$ (6)

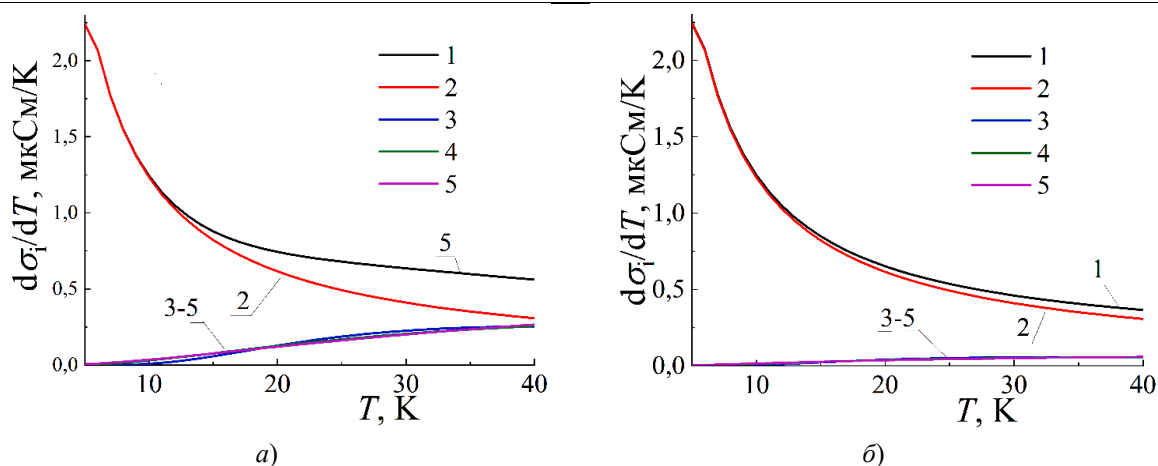


Рисунок 2.3 – Температурные зависимости производной проводимости по температуре ($d\sigma_i/dT$) слагаемых выражения (2.1) для образцов Gr (а) и Gr / Co (б). Производные: 1 – суммы всех слагаемых, 2 – вклада от второго слагаемого, 3 – 5 – вклада от третьего слагаемого при $\alpha = 1$ (3), $\alpha = 0,5$ (4) и $\alpha = 0,33$ (5)

На рисунках 2.2, а, б показаны температурные зависимости, отвечающие отдельным слагаемым уравнения (2.1), которые описывают различные механизмы проводимости. Можно заметить, что в обоих образцах доминирующий вклад вносят квантовые поправки WL QC к друдевской проводимости в режиме слабой локализации, которым соответствуют первые два члена в выражении (2.1). Значение вклада от активационного механизма при $T = 40$ К составило величину не более 1,2% и 0,6% для образцов Gr и Gr / Co соответственно. Видно, что после осаждения наночастиц Co – CoO вклад активационного механизма снизился в ≈ 2 раза, но не пропал полностью.

Для более детального анализа влияния различных механизмов на температурную зависимость проводимости удобно рассматривать производные $d\sigma_i/dT$ (рисунок 2.3). Видно, что независимо от образца, поведение проводимости при температурах ниже 10 К полностью определяется вкладом от слабой локализации ($d\sigma_2/dT$, кривая 2). При этом, для образца Gr (рисунок 2.3, а) при $T > 30$ К вклад активационного механизма ($d\sigma_3/dT$, кривые 3–5) становится сопоставим с вкладом WL ($d\sigma_2/dT$, кривая 2). Таким образом, несмотря на малость активационной составляющей (менее 2%) в проводимости графена, она существенно влияет на характер изменения $\sigma_{\square}(T)$. Для образцов же Gr / Co (рисунок 2.3, б) вклад от активационного механизма ($d\sigma_3/dT$, кривые 3–5) хоть и заметен, но не так силен по сравнению с вкладом от слабой локализации ($d\sigma_2/dT$, кривая 2), как для образца Gr.

Как следует из таблицы 2.1, для случая $\alpha = 0,33$ рассчитанный параметр фитирования T_0 для образцов Gr (а) и Gr / Co составил $\approx 1,27 \cdot 10^4$ К и $\approx 2,5 \cdot 10^4$ К соответственно, что отвечает энергиям $\approx 1,1$ эВ и $\approx 0,55$ эВ. Последние значения заметно превышают большинство известных

величин энергетической щели в графене (см. работу [35] и ссылки в ней), но близки к ширине запрещенной зоны в оксиде графена (1,15–2,7 эВ). Наблюдаемые высокие температуры T_0 представляются маловероятными, поскольку при таких параметрах должен был бы проявляться не только зонный, но и прыжковый механизм проводимости. При $\alpha = 0,5$ величины T_0 физически приемлемы, однако в этом случае экспоненциальный вклад в проводимость был бы заметен и при $T > 250$ К, что не наблюдалось в эксперименте [30]. Таким образом, на наш взгляд, для образцов Gr (а) и Gr / Co более предпочтительна аппроксимация показателя α в третьем вкладе в соотношении (2.1) значением $\alpha = 1$, что соответствует стандартной зонной модели или прыжковой проводимости типа CRH; в пользу этого говорит и коэффициент детерминации R^2 , который для $\alpha = 1$ выше, чем для $\alpha = 0,33$ и 0,5 (см. таблицу 2.1).

С другой стороны, предэкспоненциальный множитель $\sigma_{\mu 0}$, как известно, зависит от температуры [36]. Эту зависимость при низких температурах измерения $T \ll T_0$ часто не учитывают, поскольку она пренебрежимо мала по сравнению с экспоненциальным членом. Однако в настоящем эксперименте температурный диапазон измерений сопоставим с T_0 , что в совокупности с малостью вкладов активационной компоненты $\sigma_{\square}(T)$ и $d\sigma/dT$ указывает на относительную условность определения α .

Также отметим, что ширина запрещенной зоны, реализуемая в графене [35], [37], обычно на порядок превышает значения, наблюдавшиеся в настоящей работе ($\approx 7,2$ и $\approx 5,9$ эВ для образцов Gr (а) и Gr / Co соответственно). С другой стороны, графен, как двумерный кристалл, может обладать микроскопической рябью, возникающей при его переносе с медной фольги на диэлектрическую подложку. Согласно работам

[38]–[41], наличие такой ряби оказывает существенное влияние на электронные свойства графена, вызывая деформации кристаллической решётки. Последняя, в свою очередь, приводит к локальному перераспределению электростатического потенциала, то есть к формированию (или модификации) потенциального рельефа, характеристические энергии которого лежат в широком интервале значений [40], [41].

Таким образом, наблюдаемый в эксперименте рост проводимости с повышением температуры при низких энергиях активации скорее можно связать с возникновением крупномасштабного потенциального рельефа (КМПР), обусловленного деформацией графена за счёт микроскопической ряби, а α не имеет строго определённого значения. При этом существенного влияния осаждения наночастиц Co – CoO на природу активационного механизма не обнаружено. Однако обоснование и подтверждение сделанной гипотезы требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

Температурная зависимость проводимости $\sigma_{\square}(T)$ поликристаллических образцов CVD-графена (Gr) и CVD-графена с электрохимическим осажденными частицами Co – CoO (Gr / Co) описывается моделью, включают два механизма переноса заряда: (1) двумерные квантовые поправки (вследствие слабой локализации) в формуле проводимости Друде, доминирующей во всем исследуемом температурном диапазоне, и (2) активационный вклад предположительно обусловленный короблением графена и рябью на его поверхности, что вызывает возникновение крупномасштабного потенциального рельефа (КМПР). Осаждение частиц кобальта приводит к снижению слоевой проводимости за счет обнаруженного в работе [28] уменьшения концентрации носителей заряда. Кроме того, отмечается снижение вклада от КМПР при отсутствии влияния осаждения наночастиц Co – CoO на природу механизмов транспорта носителей заряда, характерных для исходных образцов графена.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems* / A. C. Ferrari, F. Bonaccors, V. Fal'ko [et al.] // *Nanoscale*. – 2015. – Vol. 7, № 11. – P. 4598–4810. – DOI: <https://doi.org/10.1039/C4NR01600A>.
2. *Temperature dependence of the electrical transport properties in few-layer grapheme interconnects* / Y. Liu, Z. Liu, W. S. Lew [et al.] // *Nanoscale research letters*. – 2013. – Vol. 8, № 1. – P. 335. – DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-335>.

3. *The electronic properties of graphene* / A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. Peres [et al.] // *Reviews of modern physics*. – 2009. – Vol. 81, № 1. – P. 109–162. – DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>.

4. *Novel nano-materials and nano-fabrication techniques for flexible electronic systems* / K. Kang, Y. Cho, K. J. Yu // *Micromachines*. – 2018. – Vol. 9, № 6. – P. 263. – DOI: <https://doi.org/10.3390/mi9060263>.

5. *Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications* / M. Sang, J. Shin, K. Kim [et al.] // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9, № 3. – P. 374. – DOI: <https://doi.org/10.3390/nano9030374>.

6. *Изучение динамики высыхающих капель графеновым датчиком* / В. А. Андрущенко, И. А. Бетке, А. И. Богомолова [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2025. – Т. 95, № 2. – С. 247–257. – DOI: <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.02.59715.301-24>.

7. *The integration of graphene into microelectronic devices* / G. Ruhl, S. Wittmann, M. Koenig [et al.] // *Beilstein journal of nanotechnology*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 1056–1064. – DOI: <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.107>.

8. *Surface engineering of copper foils for growing centimeter-sized single-crystalline graphene* / L. Lin, J. Li, H. Ren [et al.] // *ACS nano*. – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 2922–2929. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b00041>.

9. *Growth of centimeter-scale single-crystal graphene on polycrystalline copper foil for ultrahigh sensitive sweat sensors* / X. Zhang, Y. Ding, Z. Su [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 497. – P. 154716. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154716>.

10. *Sheet resistance and magnetoresistance in polycrystalline CVD graphenes* / A. K. Fedotov, A. A. Kharchanka, U. E. Gumienik [et al.]. – 2022. – Vol. 64. – P. 876. – DOI: <https://doi.org/10.21883/PSS.2022.07.54598.321>.

11. *Electronic structure and magnetic properties of grapheme / Co composite* / I. S. Zhidkov, N. A. Skorikov, A. V. Korolev [et al.] // *Carbon*. – 2015. – Vol. 91. – P. 298–303.

12. *Magnetoresistance of vertical Co-graphene-NiFe junctions controlled by charge transfer and proximity-induced spin splitting in graphene* / P. U. Asshoff, J. L. Sambricio, A. P. Rooney [et al.] // *2D Materials*. – 2017. – Vol. 4, № 3. – P. 031004.

13. *Spin valve effect of NiFe / graphene / NiFe junctions* / M. Z. Iqbal, M. W. Iqbal, J. H. Lee [et al.] // *Nano Research*. – 2013. – Vol. 6, № 5. – P. 373–380.

14. *Wehrfritz, P. The Hall coefficient: a tool for characterizing graphene field effect transistors* / P. Wehrfritz, T. Seyller // *2D Materials*. – 2014. – Vol. 1, № 3. – P. 035004. – DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1583/1/3/035004>.

15. *Doping Effects and Charge-Transfer Dynamics at Hybrid Perovskite / Graphene Interfaces* / V. V. Brus, F. Lang, S. Fengler [et al.] // *Advanced Materials Interfaces*. – 2018. – Vol. 5, № 20. – P. 1800826. – DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.201800826>.
16. *CVD graphene sheets electrochemically decorated with “core-shell” Co / CoO nanoparticles* / V. G. Bayev, J. A. Fedotova, J. V. Kasiuk [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 440. – P. 1252–1260. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.245>.
17. *100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene* / Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins [et al.] // *Science*. – 2010. – Vol. 327, № 5966. – P. 662. – DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1184289>.
18. *Record maximum oscillation frequency in C-face epitaxial graphene transistors* / Z. Guo, R. Dong, P. S. Chakraborty [et al.] // *Nano letters*. – 2013. – Vol. 13, № 3. – P. 942–947. – DOI: <https://doi.org/10.1021/nl303587r>.
19. *Superparamagnetic graphene oxide – Fe₃O₄ nanoparticles hybrid for controlled targeted drug carriers* / X. Yang, X. Zhang, Y. Ma [et al.] // *Journal of materials chemistry*. – 2009. – Vol. 19, № 18. – P. 2710–2714. – DOI: <https://doi.org/10.1039/B821416F>.
20. *Ternary self-assembly of ordered metal oxide – graphene nanocomposites for electrochemical energy storage* / D. Wang, R. Kou, D. Choi [et al.] // *ACS nano*. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 1587–1595. – DOI: <https://doi.org/10.1021/nn901819n>.
21. *One-step synthesis of graphene / SnO₂ nanocomposites and its application in electrochemical supercapacitors* / F. Li, J. Song, H. Yang [et al.] // *Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 20, № 45. – P. 455602. – DOI: <http://doi.org/10.1088/0957-4484/20/45/455602>
22. *Graphene – silica composite thin films as transparent conductors* / S. Watcharotone, D. A. Dikin, S. Stankovich [et al.] // *Nano letters*. – 2007. – Vol. 7, № 7. – P. 1888–1892. – DOI: <https://doi.org/10.1021/nl070477>
23. *Electrodeposition of flower-like nickel oxide on CVD-grown graphene to develop an electrochemical non-enzymatic biosensor* / A. Rengaraj, Y. Haldorai, C. H. Kwak [et al.] // *Journal of Materials Chemistry B*. – 2015. – Vol. 3, № 30. – P. 6301–6309. – DOI: <https://doi.org/10.1039/C5TB00908A>
24. *Catalytic mechanism of graphene-nickel interface dipole layer for binder free electrochemical sensor applications* / C. Zhang, B. J. Lee, H. Li [et al.] // *Communications Chemistry*. – 2018. – Vol. 1, № 1. – P. 94. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s42004-018-0088-x>
25. *Recent Progress in Graphene-Based Electrocatalysts for Hydrogen Evolution Reaction* / X. Qin, O. Ola, J. Zhao [et al.] // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12. – P. 1806. – DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12111806>.
26. *In-situ magnetization measurements and ex-situ morphological analysis of electrodeposited cobalt onto chemical vapor deposition graphene / SiO₂ / Si* / V. C. De Franco, G. M. Castro, J. Corredor [et al.] // *Carbon Lett*. – 2017. – Vol. 21. – P. 16–22.
27. *Долговременная релаксация электропроводности CVD-графена* / А. А. Харченко, А. К. Федотов, Ю. А. Федотова [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 33–38.
28. *Влияние наночастиц Co – CoO на концентрацию носителей заряда в гибридной структуре на основе однослойного CVD графена* / А. А. Харченко, А. К. Федотов, С. А. Воробьева [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 254–261. – DOI: <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.585>.
29. *Spin-resolved negative magnetoresistance in polycrystalline CVD graphene* / А. А. Kharchanka, А. К. Fedotov, J. A. Fedotova [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2025. – P. 113158. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.113158>.
30. *Влияние магнитных частиц Co – CoO на свойства электропереноса в однослойном графене* / Ю. А. Федотова, А. А. Харченко, А. К. Федотов [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2020. – Т. 62, № 2. – С. 316–325. – DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.02.48885.587>.
31. *Kharchanka, A.A. Carrier transport and induced magnetism in nanostructured carbon-based material manufactured by PECVD method* / А. А. Kharchanka, А. К. Fedotov, J. A. Fedotova // *Next Materials*. – 2025. – Vol. 9. – P. 101081. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101081>.
32. *Mott, N. F. Electronic processes in non-crystalline materials* / N. F. Mott, E. A. Davis – 2nd ed. – Clarendon press, 2012. – 608 p.
33. *Shklovskii, B. I. Electronic Properties of Doped Semiconductors* / B. I. Shklovskii, A. L. Efros. – Springer – Berlin – Heidelberg; 1984. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02403-4>.
34. *Altshuler, B. L. Effects of electron-electron collisions with small energy transfers on quantum localisation* / B. L. Altshuler, A. G. Aronov, D. E. Khmel'nitsky // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1982. – Vol. 15, № 36. – P. 7367–7386. – DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3719/15/36/018>.
35. *Band gap formation of 2D material in graphene: Future prospect and challenges* / R. Nandee, M. A. Chowdhury, A. Shahid [et al.] // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 15. – P. 100474. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100474>.
36. *Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников* / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, Главная

редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с.

37. *Adsorption and diffusion of water on graphene from first principles* / J. Ma, A. Michaelides, D. Alfe [et al.] // *Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics*. – 2011. – Vol. 84, № 3. – P. 033402. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.033402>.

38. *Wrinkled, rippled and crumpled graphene: an overview of formation mechanism, electronic properties, and applications* / S. Deng, V. Berry // *Materials Today*. – 2016. – Vol. 19, № 4. – P. 197–212. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.002>.

39. *Observation of wrinkle induced potential drops in biased chemically derived graphene thin film networks* / S. Ladak, J. M. Ball, D. Moseley [et al.] // *Carbon*. – 2013. – Vol. 64. – P. 35–44. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.06.051>.

40. *Fan, X. Effect of charge puddles and ripples on the chemical reactivity of single layer graphene supported by SiO₂/Si substrate* / X. Fan,

R. Nouchi, K. Tanigaki // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2011. – Vol. 115, № 26. – P. 12960–12964. – DOI: <https://doi.org/10.1021/jp202273a>.

41. *Guinea, F. Energy gaps and a zero-field quantum Hall effect in graphene by strain engineering* / F. Guinea, M. I. Katsnelson, A. K. Geim // *Nature Physics*. – 2010. – Vol. 6, № 1. – P. 30–33. – DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys1420>.

Поступила в редакцию 22.04.2026.

Информация об авторах

Харченко Андрей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент
Федотов Александр Кириллович – д.ф.-м.н., профессор
Казимиров Никита Андреевич – мл. научный сотрудник
Федотова Юлия Александровна – д.ф.-м.н., профессор
Конаков Артём Олегович – научный сотрудник
Чичков Максим Владимирович – инженер
Малинкович Михаил Давыдович – к.ф.-м.н., доцент