НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ / NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 3. С. 254—261.
DOI: 10.17073/1609-3577j.met202405.585

УДК 621.315

Влияние наночастиц Co—CoO на концентрацию носителей заряда в гибридной структуре на основе однослойного CVD графена

© *2024 г.* А. А. Харченко[1], А. К. Федотов[1], С. А. Воробьева[2], А. О. Конаков[2], М. Д. Малинкович[3], М. В. Чичков[3], Н. А. Казимиров[1,✉], Ю. А. Федотова[1], О. А. Ивашкевич[2]

[1] ***Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,***
ул. Бобруйская, д. 11, Минск, 220006, Республика Беларусь

[2] ***Научно–исследовательский институт физико–химических проблем Белорусского государственного университета,***
Ленинградская ул., д. 14, Минск, 220006, Республика Беларусь

[3] ***Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,***
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

✉ *Автор для переписки: kazimirov.mikita@gmail.com*

Аннотация. Изучено влияние осажденных агрегированных наночастиц Co—CoO со средним диаметром 160 нм на концентрацию носителей заряда и механизмы их транспорта в гибридных структурах Co—CoO/графен/SiO_2. Структуры получены электрохимическим осаждением наночастиц кобальта на поверхность однослойного CVD–графена в реверсивном гальваностатическом режиме из электролита, содержащего смесь $CoSO_4 \cdot 6H_2O$ (1,25 г/л) и NaCl (0,064 г/л), при катодном токе плотностью 2,5 мА/см^2 и анодном токе плотностью 1,25 мА/см^2. Показано, что осаждение наночастиц Co—CoO приводит к почти двукратному снижению проводимости структуры. Возникновение этого эффекта может быть обусловлено исключению из процесса транспорта носителей части собственных дефектов графена в изучаемой структуре.
Обнаружено сосуществование механизмов квантовых поправок (КП) к друдевской проводимости в условиях слабой локализации и обычной зонной (активационной) проводимости. Доминирование КП в проводимости как до, так и после осаждения частиц Co—CoO, а также снижение после осаждения частиц значения предэкспоненциального фактора σ_{a0}, включенного в активационный механизм, с $2{,}8 \cdot 10^{-4}$ до $3{,}1 \cdot 10^{-5}$ См.

Ключевые слова: графен, кобальт, оксид кобальта, электроперенос, эффект Холла

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро– и наноэлектроника» (2021—2025), проекты 3.2.4 (№ 20212560) и 3.2.5 (№ 20211729).

Для цитирования: Харченко А.А., Федотов А.К., Воробьева С.А., Конаков А.О., Малинкович М.Д., Чичков М.В., Казимиров Н.А., Федотова Ю.А., Ивашкевич О.А. Влияние наночастиц Co—CoO на концентрацию носителей заряда в гибридной структуре на основе однослойного CVD графена. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(3): 254—261. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.585

Effect of Co–CoO nanoparticles on the concentration of charge carriers in a hybrid structure based on single–layer CVD graphene

A. A. Kharchenko[1], A. K. Fedotov[1], S. A. Vorobyova[2], A. O. Konakov[2], V. D. Malinkovich[3], M. V. Chichkov[3], N. A. Kazimirov[1,✉], J. A. Fedotova[1], O. A. Ivashkevich[2]

[1] ***Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,***
11 Bobruiskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus

[2] ***Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University,***
14 Leningradskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus

[3] ***National University of Science and Technology "MISIS",***
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

✉ *Corresponding author: kazimirov.mikita@gmail.com*

Abstract. The effect of deposited aggregates of Co–CoO nanoparticles with an average diameter of 160 nm on the charge carrier concentration and carrier transport mechanisms in Co–CoO/graphene/SiO_2 hybrid structures has been studied. The structures were obtained by electrochemical deposition of cobalt nanoparticles onto the surface of single–layer CVD graphene in a reverse galvanostatic mode from an electrolyte containing $CoSO_4 \cdot 6H_2O$ (1.25 g/l) and NaCl (0.064 g/l) mixture at a cathodic current density of 2.5 mA/cm^2 and an anodic current density 1.25 mA/cm^2. It has been shown that deposition of Co–CoO nanoparticles results in an almost twofold decrease in conductivity of structure. We attribute this effect to the exclusion of some of the intrinsic defects of graphene from the carrier transport process in the structure under study.
The coexistence of mechanisms of quantum corrections (QC) to the Drude conductivity under conditions of weak localization and usual band (activational) conductivity was discovered. The dominance of the QC to conductivity both before and after the Co–CoO particles deposition, as well as a decrease in the value of the pre–exponential factor σ_{a0}, included in the activational mechanism, from $2.8 \cdot 10^{-4}$ S to $3.1 \cdot 10^{-5}$ S were observed after particle deposition.

Keywords: graphene, cobalt, cobalt oxide, electric transport, Hall effect

Acknowledgements: The work was carried out with financial support from the State Scientific Research Program "Photonics and Electronics for Innovation", subprogram "Micro– and Nanoelectronics" (2021—2025), projects 3.2.4 (No. 20212560) and 3.2.5 (No. 20211729).

For citation: Kharchenko A.A., Fedotov A.K., Vorobyova S.A., Konakov A.O., Malinkovich V.D., Chichkov M.V., Kazimirov N.A., Fedotova J.A., Ivashkevich O.A. Effect of Co–CoO nanoparticles on the concentration of charge carriers in a hybrid structure based on single–layer CVD graphene. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(3): 245—261. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.585

Введение

Гибридные структуры на основе графена могут использоваться в структурах для твердотельных датчиков магнитного поля [1], фотовольтаических преобразователях [2], полевых транзисторах [3—5], средствах доставки лекарственных препаратов [6], материалах электродов для литий–ионных батарей [7], суперконденсаторах [8], оптически прозрачных полупроводниках [9], а также в электрокатали-

© 2024 National University of Science and Technology "MISIS".
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

зе [10—12]. В качестве добавляемых к графену компонентов для твердотельных магнитных датчиков и электрокаталитических приложений в основном используются металлы [13], реже полупроводниковые [1, 2] и полимерные соединения [14]. Такие композиционные структуры могут быть успешно синтезированы путем осаждения слоев или частиц различных ферромагнитных металлов (например, Co, Ni) на поверхность графена [15, 16]. Однако исследование процессов осаждения и агломерации металлических наночастиц на графене представляет собой ключевую проблему, так как требует решения вопросов формирования низкоомных электрических контактов.

На данный момент опубликовано небольшое количество теоретических и экспериментальных исследований магнитных и гальваномагнитных свойств структур, состоящих из ферромагнетиков и графена, таких как наночастицы Co или островки Co на CVD–графене [16—18]. В этих работах с помощью методов фотоэлектронной спектроскопии и магнитометрии было показано, что осаждаемые частицы кобальта часто имеют структуру «ядро Co — оболочка CoO» и характеризуются заметным поверхностным окислением.

Тем не менее, электрохимическое осаждение при определенных режимах позволяет создавать хорошие омические (безбарьерные) электрические контакты, что было продемонстрировано в [18, 19]. Исследование, проведенное в работе [20], показало также, что при электрохимическом осаждении металлические наночастицы зарождаются преимущественно в тех областях поверхности графена, где имеются какие–либо морфологические особенности, включая, например, остаточные фрагменты Cu после переноса графена с медной фольги на подложку Si/SiO_2. Таким образом, полученные ранее результаты свидетельствуют о принципиальной роли состояния границы раздела металл/графен и морфологической неоднородности (дефектности) исходного графена в комплексе низкотемпературных свойств электропереноса и магнитотранспорта в композиционных структурах ферромагнитный металл/графен. Ранее [21, 22] показано, что электрохимическое осаждение на CVD–графене частиц Co—CoO приводит к повышению сопротивления графена.

При этом принципиально важно знать, как формирование гибридной структуры влияет на коэффициент Холла, позволяющий определять тип их проводимости и концентрацию носителей заряда, что важно для практических применений.

Цель исследования — изучение влияния на параметры эффекта Холла в гибридной структуре из CVD графена и электрохимически осажденных на его поверхность наночастиц кобальта.

Методика эксперимента

Гибридные структуры Gr/SiO_2 получали химическим осаждением графена из газовой фазы (CVD–метод) на медной фольге на установке PlanarTech G2. В качестве прекурсора использовался ацетилен, разбавленный водородом в соотношении $C_2H_2 : H_2 = 1 : 4$. Температура процесса составляла 1040 °C, давление 6 Торр (1 Торр ≈ 133,32 Па). Осажденный графен переносили на оксид кремния с использованием полиметилметакриллата **(ПММА)**, в качестве промежуточной подложки. Для этого 4 % раствор ПММА в анизоле наносили на медную фольгу с графеном в центрифуге при скорости 1500 об/мин и высушивали в сушильном шкафу при температуре 150 °C. Травление меди проводили в водном растворе хлорного железа. Отмытую от металлической меди пленку ПММА с графеном дважды промывали в деионизированной воде, переносили на оксид кремния и сушили на центрифуге при скорости 3000 rpm, после чего пленку прогревали на воздухе при температуре 120 °C для устранения складок. Затем полиметилметакрилат удаляли растворением в ацетоне и получали образец графена, нанесенного на поверхность оксида кремния Gr/SiO_2.

Образцы гибридных структур Co—Gr/SiO_2 получали электрохимическим осаждением частиц кобальта на CVD графен, перенесенный на поверхность оксида кремния. Осаждение проводили из электролита, содержащего $CoSO_4 \cdot 6H_2O$ (1,25 г/л), NaCl (0,064 г/л) на потенциостате ПИ–50–1.1 в комплексе с программатором ПР–8 в реверсивном гальвано–статическом режиме при катодной плотности тока 2,5 мА/см^2 (длительность импульса 5 с) и анодной плотности тока 1,25 мА/см^2 (длительность импульса 2 с). Общее время осаждения составляло 30 с.

Температурные и магнитополевые зависимости электросопротивления и эффект Холла полученных пленок графена с электросажденными наночастицами кобальта измеряли четырехзондовым методом на безкриогенной измерительной системе (Cryogenics Ltd) на базе рефрижератора замкнутого цикла в температурном диапазоне от 2 до 10 К и в поперечном магнитном поле с индукцией B от 1 до 8 Тл. При измерении ток через образец задавали и измеряли с помощью прибора Keithley 6430, который позволял измерять электрическое сопротивление образцов в диапазоне от 100 мкОм до 10 ГОм с точностью не хуже 0,1 %. Температуру образцов контролировали термодиодами LakeShore, откалиброванными с точностью 0,0005 К и имеющими воспроизводимость 0,001 К, что позволило стабилизировать и измерить температуру с помощью контроллера LakeShore 331. Точность измерения удельного сопротивления и постоянной Холла

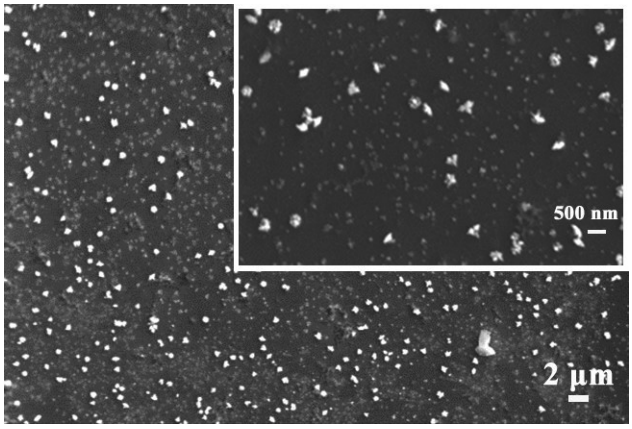
не превышала 5 %, что определялось в основном неточностью измерения геометрических размеров образцов, ширины потенциальных электрических контактов и расстояний между ними.

Морфология и элементный состав электроосажденных частиц кобальта изучали методом сканирующей электронной микроскопии **(СЭМ)** на приборе LEO 1455VP с приставкой для проведения энергодисперсионного рентгеновского анализа **(ЭДРА)**.

Результаты эксперимента

Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности образцов Co–Gr/SiO_2 представлены на рис. 1. Видно, что наночастицы кобальта осаждаются в виде агрегированных наночастиц, средний диаметр которых составляет 160 нм. По данным EDX содержание кобальта в полученных образцах составляет 1,6 % (вес.).

Коэффициент Холла для всех изученных образцов и использованных условий измерения (плотность тока, диапазон температур и индукции магнитного поля) имеет отрицательное значение, что указывает на доминирование электронной проводимости. Это наблюдается как для образца CVD–графена на кремниевой подложке (Gr/SiO_2) (рис. 2, *а*), так и для образца с осажденными частицами Co—CoO (Co—Gr/SiO_2) (рис. 2, *б*). Модуль коэффициента Холла уменьшается с увеличением температуры, что может свидетельствовать о наличии активационного механизма проводимости. Интересно, что модуль коэффициента Холла для образца Co—Gr/SiO_2 превышает более чем в 4 раза его значения для образца Gr/SiO_2. Для последнего образца наблюдается практически линейное увеличение модуля коэффициента Холла с ростом магнитного поля при всех исследованных температурах (рис. 2, *а*). Это, вероятно, указывает на наличие нескольких сортов носителей заряда с разной подвижностью. В случае образца Co—Gr/SiO_2 при температурах от 2 до 10 К модуль коэффициента Холла практически не изменяется от магнитного поля (рис. 2, *б*). Это может указывать на то, что в образце Co—Gr/SiO_2 либо один тип носителей заряда, либо на присутствие разных сортов носителей заряда, но с близкой по величине подвижностью, то есть происходит выравнивание подвижностей разных сортов носителей заряда, что на наш взгляд что представляется маловероятным, на что указывает поведение проводимости и подвижности образцов.



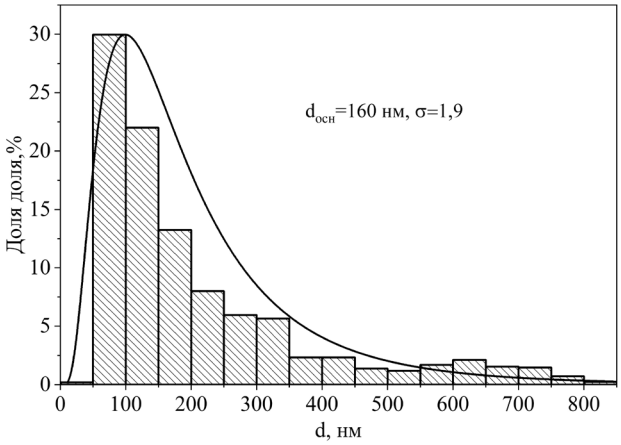


Рис. 1. Микрофотография СЭМ (а) и гистограмма распределения (б) по размерам наночастиц кобальта в образцах Co—Gr/SiO_2

Fig. 1. SEM micrograph (*a*) and histogram of the size distribution (*б*) of cobalt nanoparticles in Co–Gr/SiO_2 samples

Наблюдаемое поведение наиболее естественно объяснить предположением о наличии нескольких сортов носителей заряда в исходном графене. Часть из них обусловлена собственными носителями графена с концентрацией n_I и подвижностью μ_I, а другая часть — носителями, генерируемыми дефектами в структуре графена. В этом случае проводимость σ можно задать уравнением:

$$\sigma = e\left(n_I\mu_I + \sum_i n_i\mu_i\right), \qquad (1)$$

где n_i и μ_i — концентрация и подвижность i–го сорта носителей заряда.

Поскольку осаждение кобальтовых частиц, в первую очередь, происходит на дефектах в структуре графена [20], это может приводить к перераспределению заряда между дефектами и частицами кобальта. В результате носители заряда, связанные с дефектами, исключаются из общей проводимости системы, что проявляется в увеличение модуля коэффициента Холла, а также в исчезновении зависимости коэффициента Холла от магнитного поля.

Параллельность кривых зависимости коэффициента Холла от магнитного поля оси абсцисс (рис. 2, *б*) в образце Co—Gr/SiO_2 позволяет оценить концентрацию носителей заряда как $1/(eR_h/d)$. Наблюдаемое увеличение концентрации носителей заряда с ростом температуры, что проявляется в уменьшении коэффициента Холла, может ука-

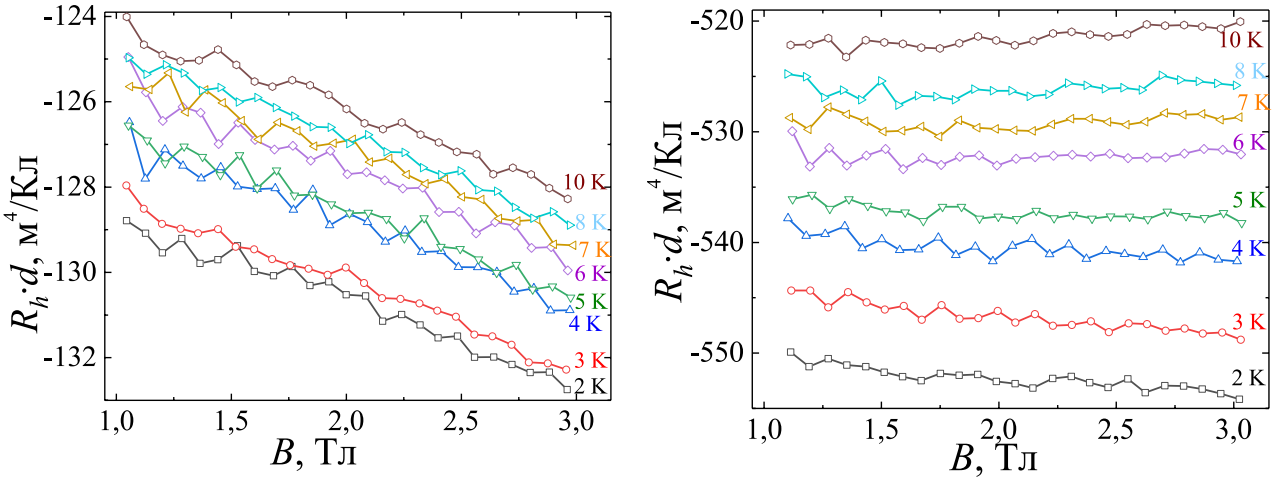


Рис. 2. Зависимость коэффициента Холла ($R_h d$) от магнитного поля B при различных температурах для образцов Gr/SiO_2 (*а*) и Co—Gr/SiO_2 (*б*)

Fig. 2. Dependence of the Hall coefficient ($R_h d$) on the magnetic field B at different temperatures for Gr/SiO_2 (*a*) and Co–Gr/SiO_2 (*б*) samples

зывать на наличие активационного механизма генерации носителей. Однако анализ температурной зависимости концентрации носителей заряда $1/(eR_h/d)$ с помощью выражения, учитывающего только активационный механизм электропереноса, не позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию. Удовлетворительная аппроксимация может быть получена с помощью выражения, учитывающей дополнительный вклад в концентрацию носителей заряда (N_1), слабо зависящий от температуры:

$$\frac{1}{eR_h} = N_1 + Ae^{\frac{\Delta E}{2k_B T}}, \qquad (2)$$

где ΔE — ширина энергетической щели; k_B — постоянная Больцмана; T — температура. Такое поведение является еще одним указанием на наличие более чем одного сорта носителей заряда в изученных структурах. Наличие активационного механизма, может свидетельствовать о сохранении вклада части дефектов в концентрацию носителей заряда после осаждения частиц Co—CoO.

Предположение об исключении части носителей заряда из проводимости при осаждении частиц Co—CoO подтверждается также наблюдаемым почти двукратным уменьшением проводимости при осаждении кобальтовых частиц (рис. 3, *б*). Как видно, на рис. 3, *б* у обоих образцов наблюдается увеличение слоевой проводимости с ростом температуры, что указывает на активационный механизм проводимости. Отметим, однако, что ранее в работе [1] было обнаружено доминирование проводимости, обусловленной вкладом квантовых поправок к проводимости Друде в условиях слабой локализации (WL) [23]. Более детальный анализ указывает на сосуществование механизмов квантовых поправок к проводимости Друде (первое и второе слагаемое в формуле (2)) и активационной

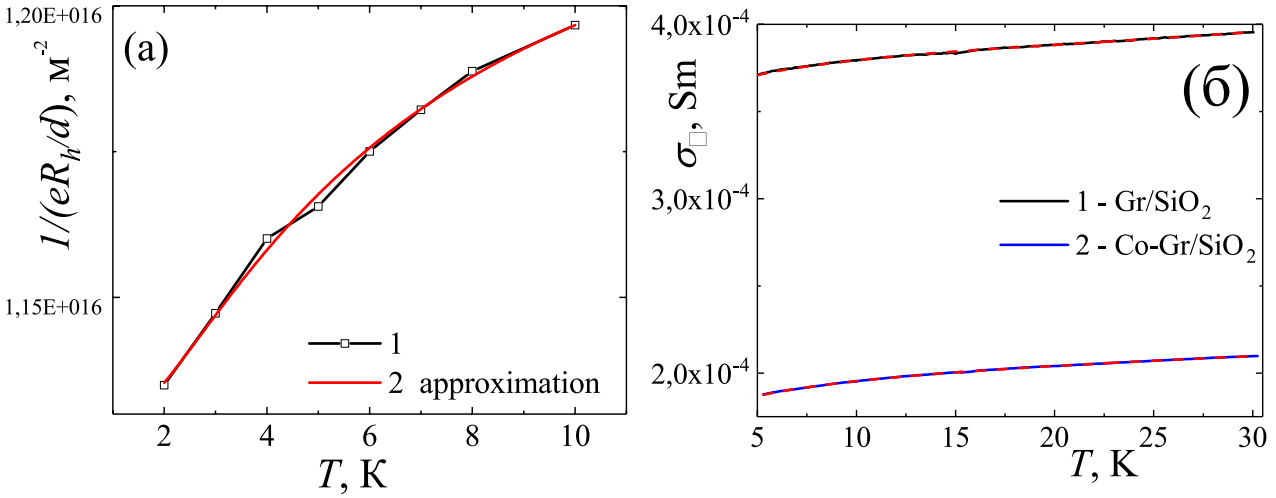


Рис. 3. Температурная зависимость $1/(eR_h/d)$ и ее аппроксимация выражением (2) (*а*); зависимости поверхностной проводимости ($\sigma_\square$) от температуры для образцов Gr/SiO_2 и Co—Gr/SiO_2 и их аппроксимация (красная линия) уравнением (3) (*б*)

Fig. 3. Temperature dependence of $1/(eR_h/d)$ and its approximation by expression (2) (*a*). Surface conductivity ($\sigma_\square$) dependences on temperature for Gr/SiO_2 and Co–Gr/SiO_2 samples and their approximation (red line) by equation (3) (*б*)

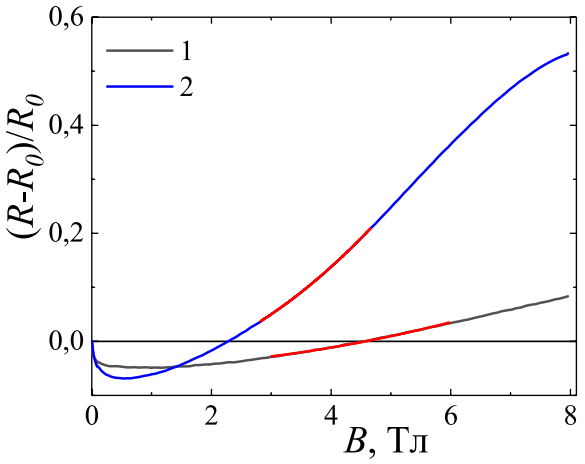


Рис. 4. Зависимость относительного магнетосопротивления MR при T = 5 K для образцов Gr/SiO_2 и Co—Gr/SiO_2 и их аппроксимация (красная линия) уравнением (4)

Fig. 4. Dependence of the relative magnetoresistance MR at T = 5 K for Gr/SiO_2 and Co–Gr/SiO_2 samples and their approximation (red line) by Eq. (4)

проводимости (третье слагаемое в формуле (2)), что позволяет температурную зависимость $\sigma(T)$ выразить соотношением

$$\sigma(T)=\sigma_0+G_0\mathrm{Ln}(T)+\sigma_{a0}\exp\left[-\frac{T_0}{T}\right], \qquad (3)$$

где T — температура; $G_0 = e^2/(2\pi^2\hbar) = 1{,}23\cdot10^{-5}$ См; e — заряд электрона; $\hbar$ — приведенная постоянная Планка. Параметр $T_0 = \Delta E/k_B$ в экспоненциальном вкладе характеризует энергию активации проводимости ΔE, где k_B — постоянная Больцмана. Как видно из рис. 3, *б* выражение (3) хорошо описывает экспериментальные кривые $\sigma(T)$. При этом наблюдается снижение предэкспоненциального множителя σ_{a0} с $2{,}8\cdot10^{-4}$ до $3{,}1\cdot10^{-5}$ См после осаждения частиц Co—CoO, что указывает на уменьшение вклада активационной составляющей в общую проводимость с одной стороны и может свидетельствовать о значительном снижении концентрации носителей заряда для данного механизма электропереноса.

Анализ магнитополевых зависимостей сопротивления **(MR)** в области квадратичной зависимости MR от поля B позволяет по положительной компоненте MR, обусловленной влиянием механизма Лоренца на движение носителей заряда, оценить подвижность носителей заряда μ [24, 25]

$$\mathrm{MR}(\hat{A}) = \frac{R(B)-R_0}{R_0} = \mu^2B^2, \qquad (4)$$

где R_0 — сопротивление образца в нулевом магнитном поле; $R(B)$ — сопротивление образца в магнитном поле B. Для образца Co—Gr/SiO_2 рассчитанное значение $\mu = 0{,}11$ м^2/(В·с).

В тоже время для образца Gr/SiO_2 такой расчет, из–за присутствия нескольких сортов носителей заряда, является грубой оценкой позволяющий лишь оценить некую эффективную подвижность ($\mu = 0{,}05$ м^2/(В·с)).

В предположении что N_1 в формуле (1) для образца Co—Gr/SiO_2 соответствует концентрации носителей заряда для проводимости Друде (σ_D) следует $\sigma' = eN_1\mu \approx 0{,}0002$ См, что сопоставимо с проводимостью образца Co—Gr/SiO_2, где $\sigma_0 \approx 0{,}00016$ См. Несколько меньшее значение σ_0 по сравнению с σ' связано с тем, что в σ_0 присутствует не только проводимость σ_D, но также и вклад от WL. Таким образом близость значений σ_D и σ' указывает на корректность высказанных ранее предположений и оценок подвижности и концентрации носителей заряда в образце Co—Gr/SiO_2.

Анализ отрицательной компоненты магнитополевых зависимостей MR для образцов Gr/SiO_2 и Co—Gr/SiO_2 поле приведен ранее в статье [21].

Заключение

В результате проведенного исследования показано, что осаждение наночастиц кобальта на поверхность графена приводит к уменьшению концентрации носителей заряда вследствие исключения из общей проводимости носителей заряда, связанных с дефектами. Это проявляется в увеличение модуля коэффициента Холла, исчезновении зависимости коэффициента Холла от магнитного поля и уменьшении проводимости.

Библиографический список / References

1. Wehrfritz P., Seyller T. The Hall coefficient: a tool for characterizing graphene field effect transistors. *2D Materials*. 2014; 1(3): 035004. https://doi.org/10.1088/2053-1583/1/3/035004

2. Brus V.V., Lang F., Fengler St., Dittrich Th., Rappich J., Nickel N.H. Doping effects and charge–transfer dynamics at hybrid perovskite/graphene interfaces. *Advanced Materials Interfaces*. 2018; 5(20): 1800826. https://doi.org/10.1002/admi.201800826

3. Moon J.S., Curtis D., Ddd D., Wong D., McGuire C., Campbell P.M., Jernigan G., Tedesco J.L., VanMil B.L., Myers R.L., Eddy C.Jr., Gaskill D.K. Epitaxial–graphene RF field–effect transistors on Si–face 6H–SiC substrates. *IEEE Electron Device Letters*. 2009; 30(6): 650—652. https://doi.org/10.1109/LED.2009.2020699

4. Lin Y.–M., Dimitrakopoulos Ch., Jenkins K.A., Farmer D.B., Chiu Hs.–Y., Grill A., Avouris Ph. 100–GHz transistors from wafer–scale epitaxial grapheme. *Science*. 2010; 327(5966): 662—662. https://doi.org/10.1126/science.1184289

5. Guo Z., Dong R., Chakraborty P.S., Lourenco N., Palmer J., Hu Y., Ruan M., Hankinson J., Kunc J., Cressler J.D., Berger Cl., de Heer W.A. Record maximum oscillation frequency in C–face epitaxial graphene transistors. *Nano Letters*. 2013; 13(3): 942—947. https://doi.org/10.1021/nl303587r

6. Yang X., Zhang X., Ma Y., Huang Y., Wang Y., Chen Y. Superparamagnetic graphene oxide–Fe_3O_4 nanoparticles hybrid for controlled targeted drug carriers.

Journal of Materials Chemistry. 2009; 19(18): 2710—2714. https://doi.org/10.1039/B821416F

7. Wang D., Kou R., Choi D., Yang Zh., Nie Z., Li J., Saraf L., Hu D., Zhang J.T., Graff G.L., Liu W.J., Pope M.A., Aksay I.A Ternary self–assembly of ordered metal oxide–graphene nanocomposites for electrochemical energy storage. *ACS Nano*. 2010; 4(3): 1587—1595. https://doi.org/10.1021/nn901819n

8. Li F., Song J., Yang H., Gan Sh., Zhang Q., Han D., Ivaska A., Niu L. One–step synthesis of graphene/SnO_2 nanocomposites and its application in electrochemical supercapacitors. *Nanotechnology*. 2009; 20(45): 455602. http://doi.org/10.1088/0957-4484/20/45/455602

9. Watcharotone S., Dikin D.A., Stankovich S., Piner R., Jung I., Dommett G.H.B., Evmenenko G., Wu Sh.–E., Chen Sh.–F., Liu Ch.–P., Nguyen S., Ruoff R. Graphene–silica composite thin films as transparent conductors. *Nano Letters*. 2007; 7(7): 1888—1892. https://doi.org/10.1021/nl070477

10. Rengaraj A., Haldorai Y., Cheol B., Kwak H., Ahn S., Jeon K.–J., Park S.H., Han Y.–K., Huh Y.S. Electrodeposition of flower–like nickel oxide on CVD–grown graphene to develop an electrochemical non–enzymatic biosensor. *Journal of Materials Chemistry B*. 2015; 3(30): 6301—6309. https://doi.org/10.1039/C5TB00908A

11. Zhang C., Lee B.–J., Li H., Samdani J.Sh., Kang T.–H., Yu J.–S. Catalytic mechanism of graphene–nickel interface dipole layer for binder free electrochemical sensor applications. *Communications Chemistry*. 2018; 1(1): 94. https://doi.org/10.1038/s42004-018-0088-x

12. Qin X., Ola O., Zhao J., Yang Z., Tiwari S.K., Wang N., Zhu Y. Recent progress in graphene–based electrocatalysts for hydrogen evo–lution reaction. *Nanomaterials*. 2022; 12(11): 1806. https://doi.org/10.3390/nano12111806

13. Yang M., Liu Y., Fan T., Zhang D. Metal–graphene interfaces in epitaxial and bulk systems: A review. *Progress in Materials Science*. 2020; 110: 100652. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100652

14. Rajyalakshmi T., Pasha A., Khasim S., Lakshmi M., Imran M. Synthesis, characterization and Hall–effect studies of highly conductive polyaniline/graphene nanocomposites. *SN Applied Sciences*. 2020; 2(4): 1—11. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2349-4

15. Asshoff P.U., Sambricio J.L., Rooney A., Slizovskiy S., Mishchenko A., Rakowski A.M., Hill E., Geim A.K., Haigh S.J., Fal'ko V.I., Vera–Marun I.J., Grigorieva I.V. Magnetoresistance of vertical Co–graphene–NiFe junctions controlled by charge transfer and proximity–induced spin splitting in grapheme. *2D Materials*. 2017; 4(3): 031004. https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa7452

16. Franco V.C.D., Castro G.M.B., González J.T.C., Mendes D., Schmidt J.E. In–situ magnetization measurements and ex–situ morphological analysis of electrodeposited cobalt onto chemical vapor deposition graphene/SiO_2/Si. *Carbon Letters*. 2017; 21(1): 16—22. https://doi.org/10.5714/CL.2017.21.016

17. Zhidkov I.S., Skorikov N., Korolev A., Kukharenko A.I., Kurmaev E., Fedorov V.E., Cholakh S.O. Electronic structure and magnetic properties of graphene/Co composite. *Carbon*. 2015; 91: 298—303. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.04.086

18. Bayev V.G., Fedotova J., Kasiuk J., Vorobyova S., Sohor A., Komissarov I., Kovalchuk N., Prischepa S.L., Kargin N.I., Andrulevičius M., Przewoznik J., Kapusta Cz., Ivashkevich O.A., Tyutyunnikov S.I., Kolobylina N., Guryeva P.V. CVD graphene sheets electrochemically decorated with "core–shell" Co/CoO nanoparticles. *Applied Surface Science*. 2018; 440; 1252—1260. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.245

19. Федотов А.К., Прищепа С.Л., Федотов А.С., Гуменник В.Э., Комиссаров И.В., Конаков А.О., Воробьева С.А., Ивашкевич О.А., Харченко А.А. Влияние осаждения частиц кобальта на квантовые поправки к проводимости Друде в твистированном CVD графене. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2019; 22(2): 73—83. https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-2-73-83

Fedotov A.K., Prischepa S.L., Fedotov A.S., Gumiennik V.E., Komissarov I.V., Konakov A.O., Vorobyova S.A., Ivashkevich O.A., Kharchenko A.A. Influence of deposition of cobalt particles on quantum corrections to Droude conductivity in twisted CVD graphene. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2019; 22(2): 73—83. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-2-73-83

20. So H.M., Mun J.–H., Bang G.–S., Kim T.–Y., Cho B.–J., Ahn Ch.W. Identifying and quantitating defects on chemical vapor deposition grown graphene layers by selected electrochemical deposition of Au nanoparticles. *Carbon Letters*. 2012; 13(1): 56—59. http://doi.org/10.5714/CL.2012.13.1.056

21. Федотова Ю.А., Харченко А.А., Федотов А.К., Чичков М.В., Малинкович М.Д., Конаков А.О., Воробьева С.А., Касюк Ю.В., Гуменник В.Э., Kula–Maximenko M., Mitura–Nowak M., Максименко А., Przewoznik J., Kapusta Cz. Влияние магнитных частиц Co–CoO на свойства электропереноса в однослойном графене. *Физика твердого тела*. 2020; 62(2): 316—325. https://doi.org/10.1134/S1063783420020134

Fedotova Yu.A., Kharchenko A.A., Fedotov A.K., Chichkov M.V., Malinkovich M.D., Konakov A.O., Vorobyova S.A., Kasyuk Yu.V., Gumennik V. .E., Kula–Maximenko M., Mitura–Nowak M., Maksimenko A., Przewoznik J., Kapusta Cz. Influence of magnetic Co–CoO particles on electrical transport properties in single–layer grapheme. *Physics of the Solid State*. 2020; 62(2): 316—325. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1063783420020134

22. Федотова Ю.А., Харченко А.А., Федотов А.К., Чичков М.В., Малинкович В.Д., Конаков А.О., Воробьева С.А. Магнитотранспортные свойства однослойного CVD–графена с наночастицами Co–CoO в поперечном электрическом поле. В кн.: *Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах*. Минск: Институт тепло– и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; 2023. С. 342—348.

Fedotova Yu.A., Kharchenko A.A., Fedotov A.K., Chichkov M.V., Malinkovich V.D., Konakov A.O., Vorobyeva S.A. Magnetotransport properties of single–layer CVD graphene with Co–CoO nanoparticles in a transverse electric field. In: *Fullerenes and nanostructures in condensed matter*. Minsk: Institut teplo– i massoobmena im. A. V. Lykova NAN Belarusi; 2023. P. 342—348. (In Russ.)

23. Полянская Т.А., Шмарцев Ю.В. Квантовые поправки к проводимости в полупроводниках с двумерным и трехмерным электронным газом. Эксперимент. *Физика и техника полупроводников*. 1989; 23(1): 3—32.

Polyanskaya T.A., Shmartsev Yu.V. Quantum corrections to conductivity in semiconductors with two–dimensional and three–dimensional electron gas. Experiment. *Physics of the Solid State*. 1989; 23(1): 3—32. (In Russ.)

24. Харченко А.А., Федотова Ю.А., Слабухо В.Ю., Федотов А.К., Пашкевич А.В., Свито И.А., Бушинский М.В. Электрические и гальваномагнитные свойства монокристаллов черного фосфора. *Известия высших*

учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022; 25(1): 5—22. https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-1-5-22

Kharchenko A.A., Fedotova J.A., Slabukho V.Yu., Fedotov A.K., Pashkevich A.V., Svito I.A., Bushinsky M.V. Electrical and galvanomagnetic properties of black phosphorus single crystals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2022; 25(1): 5—22. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-1-5-22

25. Pippard A.B. Magnetoresistance in metals. UK: Cambridge University Press; 1989. Vol. 2. 253 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Харченко Андрей Андреевич — канд. физ.–мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики перспективных материалов, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, д. 11, Минск, 220006, Республика Беларусь; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7274-1380; e–mail: XaaTM@mail.ru

Andrei A. Kharchanko — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Advanced Materials Physics, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, 11 Bobruiskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7274-1380; e–mail: XaaTM@mail.ru

Федотов Александр Кириллович — доктор физ.–мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики перспективных материалов, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, д. 11, Минск, 220006, Республика Беларусь; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7008-847X; e–mail: akf1942@gmail.com

Alexander K. Fedotov — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Advanced Materials Physics, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, 11 Bobruiskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7008-847X; e–mail: akf1942@gmail.com

Воробьева Светлана Александровна — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии конденсированных сред, Научно–исследовательский институт физико–химических проблем Белорусского государственного университета, Ленинградская ул., д. 14, Минск, 220006, Республика Беларусь; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2221-909X; e–mail: vorobyova@bsu.by

Svetlana A. Vorobyova — Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Laboratory for Chemistry of Condensed Systems, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, 14 Leningradskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2221-909X; e–mail: vorobyova@bsu.by

Конаков Артем Олегович — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии конденсированных сред, Научно–исследовательский институт физико–химических проблем Белорусского государственного университета, Ленинградская ул., д. 14, Минск, 220006, Республика Беларусь; e–mail: artjom7777@gmail.com

Artem O. Konakov — Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Laboratory for Chemistry of Condensed Systems, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, 14 Leningradskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; e–mail: artjom7777@gmail.com

Малинкович Михаил Давыдовыч — канд. физ.–мат. наук, доцент, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e–mail: malinkovich@yandex.ru

Mikhail D. Malinkovich — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e–mail: malinkovich@yandex.ru

Чичков Максим Владимирович — аспирант, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, инженер, лаборатория функциональных низкоразмерных структуры; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e–mail: maxim.chichkov@gmail.com

Maxim V. Chichkov — Postgraduate Student, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e–mail: maxim.chichkov@gmail.com

Казимиров Никита Андреевич — младший научный сотрудник, лаборатория физики перспективных материалов, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, д. 11, Минск, 220006, Республика Беларусь; e–mail: kazimirov.mikita@gmail.com

Nikita A. Kazimirov — Researcher, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, 11 Bobruiskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; e–mail: kazimirov.mikita@gmail.com

Федотова Юлия Александровна — доктор физ.–мат. наук, профессор, заместитель директора; Научно–исследовательский институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, д. 11, Минск, 220006, Беларусь; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4471-0552; e–mail: Julia@hep.by

Julia A. Fedotova — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Deputy Director, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, 11 Bobruiskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4471-0552; e–mail: Julia@hep.by

Ивашкевич Олег Анатольевич — академик НАН Беларуси, доктор хим. наук, главный научный сотрудник лаборатории химии конденсированных сред, Научно–исследовательский институт физико–химических проблем Белорусского государственного университета, Ленинградская ул., д. 14, Минск, 220006, Республика Беларусь; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5006-2715; e–mail: ivashkevicho@bsu.by

Oleg A. Ivashkevich — Academician of the NASB, Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Laboratory for Chemistry of Condensed Systems; Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, 14 Leningradskaya Str., Minsk 220006, Republic of Belarus; ORCID: https://orcid.org/0000–0002–5006–2715; e–mail: ivashkevicho@bsu.by

Поступила в редакцию 16.05.2024; поступила после доработки 06.09.2024; принята к публикации 26.09.2024
Received 16 May 2024; Revised 12 September 2024; Accepted 26 September 2024