

зованием связей с атомами матрицы. Отжиг дополнительно облученных образцов приводит к восстановлению ФЛ, причем результирующая интенсивность существенно зависит от типа ионов и дозы облучения. Из кривых видно, что отжиг уже при 700 °С приводит к заметному восстановлению ФЛ для образцов, облученных всеми видами ионов. Отжиг при температуре синтеза нанокристаллов (900 °С) приводит к тому, что интенсивность ФЛ становится близкой к интенсивности исходного образца. Однако, на зависимостях наблюдаются особенности, связанные как с типом ионов, так и с их дозами. Заметно выделяются результаты, полученные при дозе ионов 0.1 *dpa* – интенсивность ФЛ превышает таковую для исходного образца для всех ионов, за исключением более тяжелых ионов аргона. Данный факт может свидетельствовать о том, что облучение при такой дозе может вызывать частичный распад нанокристаллов (в том числе тех, которые не участвовали в процессе излучательной рекомбинации) с образованием зародышей новой фазы, и последующий отжиг может приводить как к восстановлению структуры, так и к формированию новых нанокристаллов оксида галлия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение фотолюминесценции ионно-синтезированных нанокристаллов Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> продемонстрировало наличие полосы с максимумом при ~ 480 нм, интенсивность которой существенно зависит от режимов синтеза. Установлена возможность гибко регулировать светоизлучающие свойства структур путем вариации условий дополнительного ионного облучения и отжига.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования РФ.

### ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОК ГРАФЕНА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ CVD

**В. К. Ксеневи<sup>1</sup>, В. А. Доросинец<sup>1</sup>, В. П. Романов<sup>1</sup>  
Д. В. Смовж<sup>2</sup>, Д. В. Сорокин<sup>2</sup>**

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: ksenevich@bsu.by*

<sup>2)</sup> *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, пр. Лаврентьева, 1, 630090, Новосибирск, Россия, e-mail: smovzh@itp.nsc.ru*

Исследованы магниторезистивные свойства мозаичных пленок графена (с толщиной, варьирующейся от 1 до 6 слоев) в температурном интервале 2–300 К и в магнитных полях до 8 Тл. В температурном интервале 2–50 К обнаружен переход от отрицательного к положительному магнитосопротивлению (МС) при повышении величины индукции магнитного поля. При температурах выше 50 К во всем диапазоне магнитных полей 0–8 Тл наблюдалось только положительное магнитосопротивление без тенденции к насыщению по величине. Значение положительного магнитосопротивления  $\Delta R/R_0$  увеличивалось с повышением температуры. Максимальное значение  $\Delta R/R_0 \sim 0,25$  зарегистрировано при 300 К в магнитном поле  $B = 8$  Тл. Отри-

цательное магнитосопротивление обусловлено проявлением эффекта слабой локализации. Обнаружена зависимость величины магнитосопротивления от полярности магнитного поля, что объясняется неинвариантностью путей протекания тока при противоположных направлениях магнитного поля в системах с размерами неоднородностей, превышающих длину свободного пробега носителей заряда.

**Ключевые слова:** графен; магнитосопротивление; слабая локализация, электрон-электронное взаимодействие; неоднородность; правило Колера.

## FEATURES OF MAGNETORESISTANCE OF DISORDERED CVD GROWN GRAPHEN FILMS

V. K. Ksenevich<sup>1</sup>, V. A. Dorosinets<sup>1</sup>, V. P. Romanov<sup>1</sup>  
D. V. Smovzh<sup>2</sup>, D. V. Sorokin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institute of Thermophysics named after S. S. Kutateladze SB RAS, Lavrentiev av. 1, 630090 Novosibirsk, Russia

Corresponding author: V. K. Ksenevich (ksenevich@bsu.by)

Magnetotransport properties of mosaic-like graphen films (with thickness varied from 1 to 6 layers) has been studied in the temperature range of 2–300 K and in the magnetic field up to 8 T. A crossover from negative to positive magnetoresistance (MR) in the samples has been observed in the temperature range of 2–50 K with an increase of the magnetic field. Only positive MR without tendency to saturation in fields up to 8 T has been observed at the temperatures above 50 K. The value of positive magnetoresistance  $\Delta R/R_0$  increased with increasing temperature. Maximum value of MR  $\Delta R/R_0 \sim 0,25$  was registered at 300 K in magnetic field  $B = 8$  T. Negative magnetoresistance is explained by the weak localization effect. A dependence of magnetoresistance on the polarity of the magnetic field has been found. Such MR behavior is explained by the non-invariance of the current flow paths when magnetic field of opposite directions is applied to the systems with inhomogeneity sizes exceeding the free path of charge carriers.

**Key words:** graphene; magnetoresistance; weak localization; electron-electron interaction; inhomogeneity; Kohler's rule.

### ВВЕДЕНИЕ

Материалы, характеризующиеся линейной зависимостью сопротивления от индукции магнитного поля  $R(B)$  без насыщения величины  $R$  в сильных магнитных полях, перспективны для разработки магниторезистивных устройств, таких как магнитные датчики и переключатели. Однако для типичных немагнитных полупроводников наблюдается квадратичная зависимость сопротивления от магнитного поля  $R(B) \sim B^2$  в области слабых магнитных полей, величина магнитосопротивления (МС)  $\Delta R/R_0 \equiv (R(B) - R(0))/R(0)$  незначительна и обычно достигает насыщения в магнитных полях величиной до 1 Тл [1]. Интенсивный поиск позволил обнаружить линейное МС (в ряде случаев наблюдавшееся даже при комнатной температуре) в таких разнообразных проводниках, как трехмерные халькогениды серебра, разупорядоченные полупроводники, топологические изоляторы, одно-, двух- и многослойные графеновые пленки. Так, например, для нестехиометрических соединений типа  $Ag_2Se$  и  $Ag_2Te$  в широком температурном интервале обнаружено положительное магнитосо-

противление без насыщения в магнитном поле до 60 Тл из-за образования кластеров ионов Ag на дефектах решетки и границах кристаллитов [1]. Однако в большинстве случаев величина положительного МС уменьшается с ростом температуры, что делает их непригодными для создания на их основе магниторезистивных устройств, функционирующих в области комнатной температуры. Актуальной задачей является поиск материалов, обладающих протяженным участком линейного МС при высоких температурах или же проведение модификации имеющихся материалов с приданием им требуемых свойств с последующим выяснением механизмов такого поведения. Установлено, что наблюдение положительного МС, увеличивающегося при повышении температуры, характерно для различного рода разупорядоченных материалов. Наличие еще и линейной зависимости сопротивления от магнитного поля  $R(B)$  в таких материалах значительно улучшает их функциональные возможности при создании магниторезистивных устройств.

В настоящей работе в качестве разупорядоченного материала для исследования магниторезистивных свойств использовались слои графена с варьируемой толщиной.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез слоев графена проводился методом химического осаждения из газовой фазы в Лаборатории синтеза новых материалов Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск). Синтез проводился на медных подложках при температуре 1000 °С в смеси Ar (90,9%), H<sub>2</sub> (9%) и CH<sub>4</sub> (0,1%). Для переноса слоев графена на стеклянные подложки использовалась стандартная методика [2].

Для характеристики структурных свойств полученных пленок графена были проведены измерения спектров комбинационного рассеяния света (КРС) с использованием спектрально-аналитического комплекса на основе сканирующего конфокального микроскопа Nanofinder High End (Lotis ТП). В спектрах КРС, измеренных в различных точках образцов, наряду с линиями 2D и G (с соотношением между их интенсивностями  $I_{2D}/I_G$ , варьируемой в диапазоне ~3,37–1,98) обнаружено наличие пиков D, D', и D + D', при этом пик D отличался большой интенсивностью, что в совокупности указывает на неоднородность пленок по толщине и высокую концентрацию дефектов в образцах. Была проведена оценка концентрации дефектов и количества слоёв в плёнках с использованием методики, описанной в работе [3]. Согласно оценке, учитывающей соотношение между интенсивностями  $I_{2D}/I_G$  и полуширину пика 2D, концентрация дефектов изменяется в пределах  $1,8\text{--}3,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , а толщина пленок варьировалась от 1 до 6 слоев. Таким образом, полученные пленки отличались высокой дефектностью, необходимой для проявления линейной зависимости сопротивления от магнитного поля в широком температурном интервале [1].

Измерения зависимостей сопротивления образцов от температуры  $R(T)$  в диапазоне температур 2–300 К и от индукции магнитного поля  $R(B)$  в интервале магнитных полей от 0 до 8 Тл проводились в гелиевом криостате с замкнутым циклом охлаждения Cryogenic Ltd. Индиевые контакты к пленкам были изготовлены при помощи ультразвукового паяльника.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости  $R(T)$  исследованных мозаичных пленок графена характеризовались отрицательным температурным коэффициентом сопротивления ( $dR/dT < 0$ ), при этом сопротивление  $R$  образцов увеличивалось не более, чем в ~2,5 раза при уменьшении

температуры от 300 до 2 К. Было обнаружено, что величина электропроводности пленок  $G = 1/R$  в области низких температур (2~50 К) изменяется по логарифмическому закону ( $G \sim \ln T$ ), а в диапазоне температур ~50–300 К наблюдается линейная зависимость  $G(T)$ . Для температурного интервала, соответствующего логарифмической зависимости  $G(T)$ , для начального диапазона индукции магнитного поля  $B$  (от 0 до ~0,9-1 Тл) характерно проявление отрицательного МС  $\Delta R/R_0 \equiv (R(B) - R(0))/R(0)$ , величина которого монотонно убывает с ростом температуры и исчезает при температуре, соответствующей началу линейного участка зависимости  $G(T)$ . При дальнейшем повышении индукции магнитного поля  $B$  происходит изменение знака МС с отрицательного на положительный, причем на начальном участке зависимости  $R(B)$ , на котором  $\Delta R/R_0 > 0$ , наблюдается квадратичная зависимость сопротивления от магнитного поля  $R \sim B^2$  сменяющаяся линейной при дальнейшем повышении величины  $B$ . На рис. 1, для примера, приведены измеренные при температуре 20 К зависимости  $R(B)$  для двух полярностей магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости пленки.

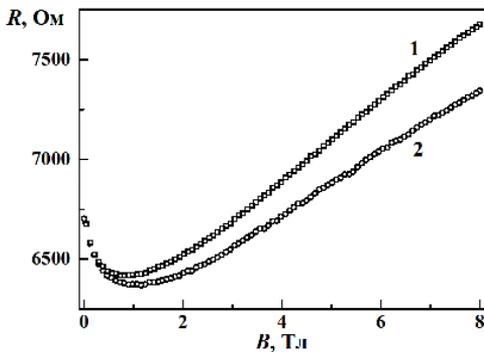


Рис. 1. Измеренные при температуре  $T = 20$  К зависимости сопротивления пленки графена  $R$  от индукции магнитного поля  $B$ , приложенного перпендикулярно к плоскости пленки для полярности (+) и (-), кривые 1 и 2 соответственно

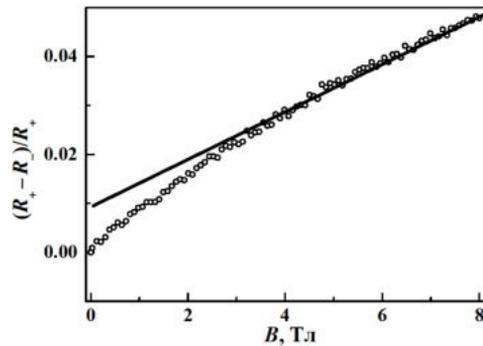


Рис 2. Зависимость относительной разности сопротивления пленки графена при  $T = 20$  К для двух полярностей приложенного магнитного поля от индукции поля:  $((R_+ - R_-)/R_+)(B)$ . Прямая линия – аппроксимация экспериментальных данных линейным законом в области высоких значений  $B$

Для температур выше 50 К наблюдается лишь положительное МС, причем его значение монотонно растет с повышением температуры, что нетипично для большинства исследованных к настоящему времени материалов. Кроме того, не наблюдается тенденция к насыщению сопротивления при увеличении индукции магнитного поля вплоть до максимального использованного в эксперименте значения  $B = 8$  Тл. Максимальное значение МС  $\Delta R/R_0 \sim 0,25$  зарегистрировано при 300 К в магнитном поле  $B = 8$  Тл, т.е. сопротивление увеличивалось на ~25 % при увеличении  $B$  от 0 до 8 Тл. В области низких температур 2–4 К сопротивление образцов изменялось лишь на ~3–4 % при увеличении  $B$  от 0 до 8 Тл.

Из рис. 1 также видно, что величина МС зависит от полярности магнитного поля. В [4] на основе расчета двумерной модели сети случайных резисторов, использующегося для моделирования макроскопического поведения проводников со сложными

границами, подтверждена возможность проявления линейной зависимости  $R(B)$  при условии, что размеры неоднородностей превышают длину свободного пробега носителей заряда из-за макроскопически искаженных путей протекания тока при измерениях в них эффекта Холла. В [1] констатировалась неинвариантность путей протекания тока относительно 180-градусного поворота подобных образцов вокруг оси поля, что эквивалентно изменению полярности магнитного поля. Зависимость положительного МС от полярности магнитного поля наблюдалась также в экспериментальной работе [5] для двухслойного графена с высокой концентрацией дислокаций.

На рис. 2 для определения влияния полярности магнитного поля в диапазоне 0–8 Тл построена зависимость относительной разности сопротивлений для противоположных полярностей  $(R_+ - R_-)/R_+$  от величины индукции магнитного поля  $B$ . Из рис. 2 видно, что значение  $(R_+ - R_-)/R_+$  увеличивается при повышении значения индукции магнитного поля  $B$ , причем на кривой можно выделить линейный участок, соответствующий диапазону положительного линейно зависящего от магнитного поля МС. В диапазонах индукции магнитного поля  $B$ , для которых характерно отрицательное МС и положительное квадратично зависящее от величины  $B$  МС, наблюдается отклонение от линейности, что может свидетельствовать о различных доминирующих механизмах МС на данных участках.

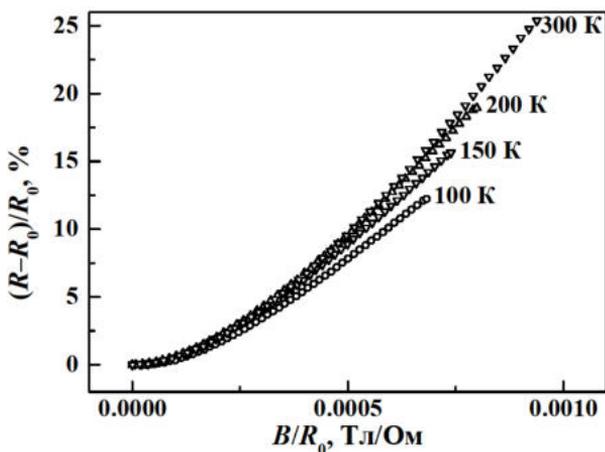


Рис. 3. Масштабирование кривых зависимостей  $R(B)$  по правилу Колера для измерений, проведенных в температурном диапазоне 100–300 К, в котором наблюдалось лишь положительное МС

из рис. 3, для наших образцов, в области сильных магнитных полей зависимости  $R(B)$ , измеренные при разных температурах, не сливаются в одну линию, указывая тем самым, что в исследованных мозаичных пленках графена существует несколько параллельных процессов рассеяния. Отклонение кривых на построенных в координатах Колера зависимостях  $R(B)$  может происходить и в случае, когда температурная зависимость сопротивления определяется не только изменением подвижности носителей заряда, но и расположением неоднородностей в образце, а также в случае, когда в образцах имеются носители заряда разного типа, характеризующиеся различным характером температурной зависимости подвижности  $\mu(T)$ .

На рис. 3 показана зависимость сопротивления от магнитного поля в координатах Колера  $\Delta R/R(0) = f(B/R(0))$ . Такое представление зависимости  $R(B)$  часто используется для понимания того, определяется ли МС процессами рассеяния одного типа [6]. Согласно правилу Колера для одного типа носителей заряда с постоянной времени рассеяния, зависящей от температуры  $T$ , зависимости  $R(B)$ , измеренные при различных значениях  $T$ , должны сливаться в одну кривую при их масштабировании в координатах  $\Delta R/R(0) = f(B/R(0))$ . Как видно

Возможно, линейная или квазилинейная зависимость  $G(T)$  за исключением низкотемпературного участка является следствием флуктуации подвижности и концентрации носителей заряда по объему образца. Линейность  $G(T)$  для ряда образцов с качественно схожими электрофизическими свойствами наблюдалась ранее, однако интерпретация такой зависимости отсутствует. Предложенный в [7] механизм одновременного проявления прыжковой проводимости и проводимости за счет делокализованных носителей заряда не может быть реализован в исследованных пленках, поскольку образцы по своим электрическим свойствам относятся к разупорядоченным металлам, характеризующимся невысоким значением отрицательного температурного коэффициента сопротивления.

Участок логарифмической зависимости электропроводности от температуры  $G(T)$  обусловлен квантовыми эффектами, связанными с интерференцией волновых функций носителей заряда в 2D системах. Наблюдение этих эффектов в исследованных пленках служит подтверждением того, что по своим электрическим свойствам они относятся к разупорядоченным металлам, несмотря на характерный для полупроводников и диэлектриков отрицательный температурный коэффициент сопротивления ( $dR/dT < 0$ ). Однако для таких разупорядоченных 2D систем логарифмическая зависимость  $G(T)$  характерна как для механизма слабой локализации (СЛ), так и для механизма электрон-электронного взаимодействия (ЭЭВ). Отрицательное МС в 2D материалах также может быть вызвано как механизмом СЛ, так и ЭЭВ, однако эффекты СЛ подавляются в относительно слабых магнитных полях в отличие от механизма ЭЭВ [8]. Нами установлено, что для наших образцов в магнитном поле с индукцией 8 Тл характерно сохранение логарифмического участка на зависимостях  $G(T)$  при низких температурах, что указывает на проявление механизма ЭЭВ. При сравнении зависимостей  $G(T)$  для неупорядоченных мозаичных пленок графена, измеренных в отсутствие магнитного поля и при приложении магнитного поля с величиной индукции  $B = 8$  Тл, обнаружено, что отношение  $G(8 \text{ Тл})/G(0 \text{ Тл})$  увеличивается при повышении температуры, что также свидетельствует о вкладе как эффектов СЛ, так и ЭЭВ в МС образцов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что зависимости сопротивления от магнитного поля  $R(B)$  пленок графена, имеющих мозаичную структуру, представляющую комбинацию участков с толщиной от 1 до 6 слоев, характеризуются наличием положительного МС без тенденции к насыщению, которое наблюдается во всем температурном интервале 2–300 К в магнитном поле с индукцией до 8 Тл. Увеличение значения положительного МС  $\Delta R(B)/R(0)$  с повышением температуры сопровождается уменьшением сопротивления пленок, при этом образцы по своим электрическим свойствам относятся к разупорядоченным металлам, о чем свидетельствует наблюдение эффекта слабой локализации и связанного с ним отрицательного магнитосопротивления при температурах ниже 50 К. Зависимость расположения путей протекания носителей заряда от направления магнитного поля в силу неоднородности образцов приводит к зависимости МС от полярности поля. Обнаруженная линейная зависимость положительного МС в совокупности с линейной зависимостью электропроводности исследованных мозаичных пленок графена от температуры  $G(T)$  в широком интервале температур (включая комнатную) делает их перспективными для разработки различных магниторезистивных устройств.

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ 2.14 (НИР 3) «Материаловедение, новые материалы и технологии».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Hu, J. Nonsaturating magnetoresistance of inhomogeneous conductors: Comparison of experiment and simulation / J. Hu, M. M. Parish, T. F. Rosenbaum // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol. 75, № 21. – P. 214203 (1–10).
2. Control of graphene adhesion to substrate during transfer through liquid / V. A. Andryushchenko [et al.] // *Journal of Molecular Liquids.* – 2024. – V. 395, № 1. – P. 123827.
3. Raman spectra of epitaxial graphene on SiC and of epitaxial graphene transferred to SiO<sub>2</sub> / D. S. Lee [et al.] // *Nano letters.* – 2008. – Vol. 8. – №. 12. – P. 4320–4325.
4. Parish, M. Non-saturating magnetoresistance in heavily disordered semiconductors / M. Parish, P. Littlewood // *Nature.* – 2003. – Vol. 426. – P. 162-165.
5. Linear magnetoresistance in mosaic-like bilayer graphene / F. Kisslinger [et al.] // *Nature Phys.* – 2015. – Vol. 11. – P. 650–653.
6. Unconventional large linear magnetoresistance in Cu<sub>2-x</sub>Te / A. A. Sirusi [et al.] // *AIP Adv.* – 2018. – Vol. 8, №.5. – P. 4320-4325 (1-5).
7. Mobility controlled linear magnetoresistance with 3D anisotropy in a layered graphene pallet / Q. Zhang [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 49, №.42 – P. 425005 (1–9).
8. Weak localization and electron-electron interaction in percolating Nickel films / M. Aprili [et al.] // *Solid State Comm.* – 1997. – Vol. 102, № 1 – P. 41–46.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДВУХЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ХАТТРИ-ФОКА

**Е. А. Левчук**

---

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,  
e-mail: liauchuk.alena@gmail.com*

Проведен расчет двухэлектронных состояний в системе пары доноров и электрически индуцированных квантовых точек, находящихся под действием внешнего однородного магнитного поля, с помощью метода Хаттри-Фока на основе вариационного метода. Рассматривались различные вариационные пробные функции для учета обменного взаимодействия. На основе сравнения с асимптотическим приближением для обменной энергии пары доноров, установлен оптимальный вид пробных функций, учитывающих влияние обменного взаимодействия. Получены зависимости обменной энергии электрически индуцированных квантовых точек от величины магнитного поля. Показано влияние фазового множителя для учета влияния магнитного поля на обменную энергию пары электрически индуцированных квантовых точек.

**Ключевые слова:** электрически индуцированная квантовая точка; обменная энергия; магнитное поле; метод Хаттри-Фока; вариационный метод.