

18. Sn(salen)-derived SnS nanoparticles embedded in N-doped carbon for high performance lithium-ion battery anodes / Aihua Jin [et al.] // Chem. Commun. – 2020. – V. 56. – P. 8095–8098.
19. High performance near-infrared photodetectors based on ultrathin SnS nanobelts grown via physical vapor deposition / X. Zhou [et al.] // J. Mater. Chem. C. – 2016. – V. 4. – P. 2111–2116.
20. Структурно-морфологические особенности тонких слоев SnS и $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ для солнечных элементов / Е.А. Уткина, А.А. Ходин, Е.А. Чекмарев // Междунар. научно-техн. конф. «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018». – Минск. – 2018. – Сб. науч. статей – Минск, 2018. – С. 30–33.
21. Pathan, H.M. Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method / H.M. Pathan, C.D. Lokhande // Bulletin of Materials Science. – 2004. – V. 27, №2. – P. 85–111.
22. Tin sulphides nanostructured layers for thin-film solar cells / A. Khodin [et al.] // 3rd Global Congr. Exhib. «Material Science and Engineering». – June 14–16, 2018. – Rome, Italy.

ВЛИЯНИЕ СИНТЕЗА И ПОДЛОЖКИ НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ОДНСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ

**А. К. Федотов¹, А. А. Харченко¹, В. Э. Гуменник¹, Ю. А. Федотова¹, М. В. Чичков²,
В. Д. Малинкович², М. Г. Рыбин³, Е. Д. Образцова³, В. Г. Баев¹**

¹⁾ Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета (НИИ ЯП БГУ), ул. Бобруйская,
11 220006 Минск, Беларусь, e-mail: XaaTM@mail.ru

²⁾ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»), Ленинский проспект, д. 4, 119049 Москва, РФ

³⁾ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Вавилова, ул. 38, 119991 Москва, РФ

Изучены температурные зависимости слоевого сопротивления $R_{\square}(T, B)$ поликристаллических слоев графена, полученных методом химического осаждения из газовой фазы. Исследовано влияние технологических факторов получения (особенности роста, тип прекурсоров, способ переноса с медной фольги и тип подложки) на особенности электрической проводимости графеновых образцов в диапазоне температур $2 \leq T \leq 300$ К. Показано, что, метод формирования графена влияет на величину проводимости и тип носителей заряда, при незначительном влиянии подложки.

Ключевые слова: графен; электросопротивление; химическое осаждение из газовой фазы (CVD).

INFLUENCE OF SYNTHESIS AND SUBSTRATE ON ELECTRICAL RESISTANCE IN SINGLE-LAYER GRAPHENE

**A. K. Fedotov¹, A. A. Kharchanka¹, V. E. Gumenik¹, J. A. Fedotova¹,
M. V. Chichkov², M. D. Malinkovich², M. G. Rybin³, E. D. Obratsova³, V. G. Bayev¹**

¹⁾ Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,
Bobruiskaya str. 11, Minsk, 220006, Belarus

²⁾ National University of Science and Technology MISiS, 4 Leninsky Prospekt,
Moscow 119049, Russia

³⁾ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilova Str. 38, 119991 Moscow

Corresponding author: A. A. Kharchanka (XaaTM@mail.ru)

The temperature dependences of the layer resistance $R_{\square}(T, B)$ of polycrystalline graphene layers obtained by chemical vapor deposition are studied. The influence of technological factors of preparation (features of growth, type of precursors, method of transfer from copper foil, and type of substrate) on the features of electrical conductivity of graphene samples in the temperature range $2 \leq T \leq 300$ K is investigated. It is shown that the method of graphene formation affects the conductivity and the type of charge carriers, with a slight influence of the substrate.

Key words: graphene; electrical resistance; chemical vapor deposition (CVD).

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие графен широко изучается из-за его необычных свойств. Эти особенности делают графен перспективным материалом для разработки магнито- и газочувствительных датчиков и преобразователей, устройств спинтроники, мемристоров и других нанoeлектронных устройств, а также для применения в накоплении энергии, термоэлектричестве, магнитной био-визуализации и др. Однако использование графена для практических приложений оказалось сложной задачей, что связано с различными факторами, среди которых можно выделить крупномасштабное производство материала, а также получение объектов относительно большой площади. Эти проблемы возможно решить, используя CVD синтез, однако существуют различные методики используемые при CVD синтезе, что может сказываться на свойствах графена. В частности, методика синтеза, а также тип подложки в той или иной мере могут, влиять на механизмы электропереноса, реализуемые в графене. Настоящее исследование направлено на изучение влияния методики синтеза и подложки на электротранспортные свойства однослойного CVD-графена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы 1-3 были получены методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге. При этом образцы 1 и 2, полученные от компании «Rus-Graphene» (Москва), формировались в специально разработанной установке по синтезу графена в среде углеродсодержащего газа (CH_4) [1], в которой для нагрева каталитической подложки до температур более 800°C используется резистивный метод пропускания электрического тока. Для переноса с медной фольги на диэлектрическую подложку графеновую плёнку покрывали полиметилметакрилатом (ПММА), растворённым в анизоле (концентрация 4 массовых процента). Для растворения медной фольги образцы погружались на 12 часов в раствор персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (концентрация 1 грамм на 5 мл воды). Пленки ПММА с графеном промывались в деионизированной воде и переносились на подложку (образец 1 – на стекло, образец 2 – на оксид кремния), после чего полимер удалялся растворением ацетоне в течение 20 минут. В работе [1] показано, что графен обладает характерным спектром КРС и может быть идентифицирован как монослойный.

Синтез образцов типа 3 производился на установке PlanarTech G2 (MISiS, Москва). В качестве прекурсора использовался ацетилен, для разбавления в реактор добавлялся водород в соотношении $\text{C}_2\text{H}_2:\text{H}_2=1:4$. Температура процесса составляла 1040°C при давлении 6 торр. Перенос был произведён также с использованием промежуточной подложки из пленки ПММА. Жидкий полимер в виде 4% раствора ПММА в анизоле наносился на медную фольгу с графеном на центрифуге на скорости 1500 об/мин, и нагревался в сушильном шкафу при температуре 150°C . Травле-

ние меди производилось в водном растворе хлорного железа. Полученная пленка ПММА промывалась дважды в деионизированной воде и укладывалась на подложку. После сушки на центрифуге на скорости 3000 об/мин, пленка прогревалась на плитке при температуре 120 °С для устранения складок. Удаление ПММА проводилось в ацетоне. После переноса на диэлектрическую подложку (оксид кремния) графен типа 3 обладает спектром КРС характерным для монослойного (см. [2]).

Температурные зависимости электросопротивления $R(T, B)$ измерялись четырехзондовым методом на бескриогенной измерительной системе (Cryogenics Ltd) на базе рефрижератора замкнутого цикла в температурном диапазоне $2 < T < 300$ К и в поперечном магнитном поле с индукцией B до 8 Т. При исследовании зависимостей $\rho(T, B)$ ток через образец задавался и измерялся 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 была не хуже 5 %, что определялось в основном неточностью измерения геометрических размеров образцов, ширины потенциальных электрических контактов и расстояний между ними. Детали установки ранее описаны в работах [2]. Образцы при комнатной температуре ($T = 300$ К) имеют линейное поведение вольт-амперных характеристик, что указывает на «омичность контактов».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты измерений температурных зависимостей поверхностного сопротивления ($R_{\square}(T)$) разных типов образцов графена. Удельное поверхностное сопротивление для исследуемых образцов при комнатной температуре ($T = 300$ К) лежит в интервале от 0,4 до 2,3 кОм/□. Все образцы характеризуются отрицательным знаком температурного коэффициента сопротивления (ТКС) практически во всей изученной области температур, исключение составляет образец 3, который при температурах выше 250 К имеет положительный знак ТКС. Наибольшая проводимость среди всех изученных образцов наблюдается у образцов 1 и 2. При этом, при температурах ниже 85 К наиболее низкоомным является образец 1 на стекле, а при температурах выше 85 К наибольшая проводимость среди всех изученных образцов наблюдается у образца 2 на подложке из оксида кремния. При этом один из ключевых параметров транспорта – тип проводимости, в первую очередь обусловлен режимом выращивания: согласно измерению эффекта Холла, образцы 1 и 2 обладают дырочным типом проводимости, а образец 3 имеет электронный тип проводимости.

На рис. 2 показаны зависимости сопротивления, нормированные на сопротивление при температуре 250 К в полулогарифмическом масштабе. Все образцы имеют линейные участки с выходом на насыщение при низких температурах, что позволяет связать механизм проводимости с квантовыми поправками к проводимости Друде. Наблюдаемый выход кривых $R_{\square}(T)$ на насыщение может быть обусловлен приближением длины свободного пробега к размерам зерен в графене при понижении температуры [3], или уменьшением проводимости в слоях графена до ее минимального значения у разупорядоченных металлических систем (к так называемой минималь-

ной металлической проводимости σ_{\min}) при стремлении температуры к абсолютному нулю [4].

Вопреки ожиданию, ближайшее поведение нормированного сопротивления (рис. 2) к образцу 3, где графен нанесен на оксид кремния, демонстрирует не образец 2, также нанесенный на оксид кремния, а образец 1, где графен нанесен на стекло.

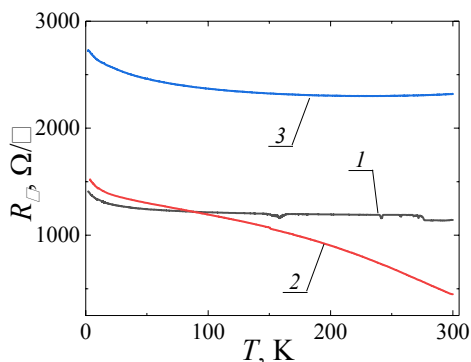


Рисунок 1. – Температурные зависимости продольного слоевого сопротивления $R_{\square}(T)$ исследованных образцов графена. Нумерация кривых соответствует номеру образца

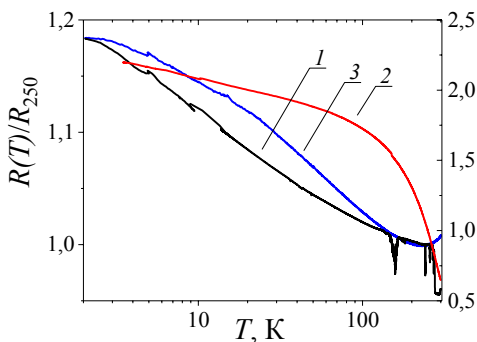


Рисунок 2. – Нормированные температурные зависимости продольного слоевого сопротивления $R_{\square}(T)$ исследованных образцов графена в полулогарифмическом масштабе. Нумерация кривых соответствует номеру образца

Так отклонение между кривыми сопротивления образца 1 и образца 3 составляет не более 3%. А в области температур от 140 К до 270 К отклонение не превышает 0,2%. В тоже время образец 2 демонстрирует иное поведение, демонстрируя более сильное (по сравнению с образцами 1 и 3) увеличение сопротивления при понижении температуры, так $R_{3,5}/R_{250}=2,197$ (при $T=3,5$ К), а при $R_{300}/R_{250}=0,647$ (для остальных образцов: $0,95 < R_{300}/R_{250} < 1,008$). В то же время поведение зависимостей сопротивления от температуры для образцов 1 и 3 (полученных разными технологиями и на разных подложках) схоже между собой, что может указывать на схожесть механизмов, отвечающих за температурную зависимость сопротивления, а также на слабое влияние подложки на механизмы переноса, при этом образец 2, имеющий общую технологию с образцом 1 и одинаковую подложку с образцом 3, демонстрирует поведение при температурах выше 50 К отличное от образцов 1 и 3 (рис. 2), что, вероятно, связано с образованием дефектов при переносе образца на подложку, тем самым демонстрируя, что влияние переноса значительно существеннее по сравнению с влиянием подложки. Можно предположить, что на механизмы, отвечающие за температурную зависимость сопротивления, влияние подложки либо отсутствует, либо мало по сравнению с влиянием переноса образца на подложку. Однако стоит учитывать, что влияние подложки может сказываться на концентрации носителей заряда, что требует отдельных исследований. Также можно предположить, что процесс переноса графена на подложку является наиболее нестабильной частью технологии формирования образцов, обладающий значительным влиянием на свойства образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всех образцов, независимо от подложки и метода синтеза, температурное поведение сопротивления при низких температурах, наиболее вероятно, связано с квантовыми поправками к проводимости Друде. При этом влияние методики синтеза проявляется в величине проводимости образцов, а также в типе носителей заряда. В тоже время не выявлено заметного влияния типа подложки на свойства образцов, что предположительно связано со слабым влиянием подложки на свойства образца по сравнению с влиянием синтеза и переноса на подложку графена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Modification of graphene electronic properties via controllable gas-phase doping with copper chloride / M. G. Rybin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2018. – V. 112. – P. 033107.
2. Влияние магнитных частиц Co - CoO на свойства электропереноса в однослойном графене / Ю.А. Федотова [и др.] // ФТТ. – 2020. – вып. 2. – С. 316-325.
3. Weak Localization in Graphene Flakes / F. V. Tikhonenko [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 100. – P. 056802.
4. Pudalov, V. M. Metallic conduction, apparent metal-insulator transition and related phenomena in two-dimensional electron liquid / V. M. Pudalov // Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi". – 2004. – V. 157. – 2008. – P. 335

ПЛАЗМОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГРАФЕНОВОЙ НАНОСТРУКТУРЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. В. Фельшерук, А. Л. Данилюк

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: felsheruk1994@gmail.com*

Представлены результаты моделирования коэффициентов распространения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) при различных химических потенциалах в однослойном графене в зависимости от приложенного перпендикулярно к плоскости графена магнитного поля в терагерцевом частотном диапазоне. Полученные частотные зависимости показали, что управлять коэффициентами распространения и поглощения ЭМИ графена можно путем изменения значения величины индукции магнитного поля.

Ключевые слова: графен; терагерцевый диапазон; плазмон; электромагнитное излучение.

PLASMONIC EFFECTS IN A GRAPHENE NANOSTRUCTURE IN A MAGNETIC FIELD

A. V. Felsharuk, A. L. Danilyuk

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki, 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. V. Felsharuk (felsheruk1994@gmail.com)*

The results of modeling the coefficients of propagation and absorption of electromagnetic radiation (EMR) at various chemical potentials in single-layer graphene are presented,