

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНА НА МЕДНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Е. А. КОЛЕСОВ<sup>1)</sup>, А. Д. ПАШИНСКИЙ<sup>1)</sup>, М. С. ТИВАНОВ<sup>1)</sup>,  
О. В. КОРОЛИК<sup>1)</sup>, О. О. КАПИТАНОВА<sup>2)</sup>, Г. Н. ПАНИН<sup>3), 4)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
ул. Ленинские горы, 1, строение 3, 119234, г. Москва, Россия

<sup>3)</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,  
ул. Институтская, 6, 142432, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

<sup>4)</sup>Академия нанотехнологических технологий, Университет Донгук,  
Пилдонг, Юнг-Гу, 3-26, 100-715, г. Сеул, Южная Корея

**Введение.** Актуальность изучения влияния подложки на свойства графена обусловлена высокой чувствительностью данного двумерного материала к самым малым воздействиям. При этом исследования, посвященные разделению влияний непосредственно подложки и последствий синтеза на свойства графена, на сегодняшний день описаны в литературных источниках недостаточно подробно.

**Материалы и методы.** В настоящей работе описаны изученные с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света и сканирующей зондовой микроскопии структурные свойства графена, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы на медной подложке, а также графена, полученного аналогично и перенесенного после синтеза на другую медную подложку.

### Образец цитирования:

Колесов ЕА, Пашинский АД, Тиванов МС, Королик ОВ, Капитанова ОО, Панин ГН. Структурные свойства графена на медных подложках. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2019;2:58–65.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-58-65>

### For citation:

Kolesov EA, Pashinskiy AD, Tivanov MS, Korolik OV, Kapitanova OO, Panin GN. Structural properties of graphene on copper substrates. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2019;2:58–65. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-58-65>

### Авторы:

**Егор Александрович Колесов** – аспирант кафедры энергифизики физического факультета. Научный руководитель – М. С. Тиванов.

**Артём Дмитриевич Пашинский** – магистрант кафедры философии и методологии науки факультета философии и социальных наук. Научный руководитель – кандидат философских наук, доцент А. И. Екадумов.

**Михаил Сергеевич Тиванов** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой энергифизики физического факультета.

**Ольга Васильевна Королик** – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией энергоэффективных материалов и технологий кафедры энергифизики физического факультета.

**Олеся Олеговна Капитанова** – кандидат химических наук; младший научный сотрудник кафедры неорганической химии химического факультета.

**Геннадий Николаевич Панин** – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории локальной диагностики полупроводниковых материалов<sup>3)</sup>, профессор физического факультета<sup>4)</sup>.

### Authors:

**Egor A. Kolesov**, postgraduate student at the department of energy physics, faculty of physics.  
[cryptic.still@gmail.com](mailto:cryptic.still@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0001-8917-8937>

**Artem D. Pashinskiy**, master's degree student at the department of philosophy and methodology of science, faculty of philosophy and social science.

[clusly@gmail.com](mailto:clusly@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0003-4457-5183>

**Mikhail S. Tivanov**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of energy physics, faculty of physics.  
[tivanov@bsu.by](mailto:tivanov@bsu.by)

<http://orcid.org/0000-0002-4243-0813>

**Olga V. Korolik**, PhD (physics and mathematics); head of the research laboratory of energy efficient materials and technologies, department of energy physics, faculty of physics.

[olga\\_zinchuk@tut.by](mailto:olga_zinchuk@tut.by)

<http://orcid.org/0000-0001-9430-4010>

**Olesya O. Kapitanova**, PhD (chemistry); junior researcher at the department of inorganic chemistry, faculty of chemistry.

[olesya.kapitanova@gmail.com](mailto:olesya.kapitanova@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0002-7384-3426>

**Gennady N. Panin**, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the laboratory of local diagnosis for semiconductor materials<sup>c</sup>, professor at the faculty of physics<sup>d</sup>.

[panin@iptm.ru](mailto:panin@iptm.ru)

<http://orcid.org/0000-0003-3658-6958>

**Результаты и их обсуждение.** С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света обнаружено, что механические напряжения для выращенного графена повышены, в то время как в перенесенном графене они пренебрежимо малы, при этом коэффициенты механического напряжения составили 0,22–0,33 и ~0 % соответственно. Методом сканирующей зондовой микроскопии показано, что данный эффект не связан с неровностями на поверхности меди: средняя шероховатость подложки, на которой графен был выращен, составляет 20,4 нм, для подложки перенесенного графена – 62,0 нм; при этом перепады высот во втором случае почти на порядок больше. Данное противоречие нами связывается с наличием остаточных эффектов синтеза в случае выращенного графена.

**Заключение.** Результаты настоящей работы важны как для уточнения методов первичной характеристики графена после синтеза, так и для практических приложений, требующих нанесения графена на рифленые и перфорированные подложки, мембраны и объекты сложной формы.

**Ключевые слова:** графен; механические напряжения; спектроскопия комбинационного рассеяния света; сканирующая зондовая микроскопия; СЗМ; подложка.

**Благодарность.** Работа была выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-33-60229.

## STRUCTURAL PROPERTIES OF GRAPHENE ON COPPER SUBSTRATES

*E. A. KOLESOV<sup>a</sup>, A. D. PASHINSKIY<sup>a</sup>, M. S. TIVANOV<sup>a</sup>,  
O. V. KOROLIK<sup>a</sup>, O. O. KAPITANOVA<sup>b</sup>, G. N. PANIN<sup>c, d</sup>*

<sup>a</sup>*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory Street, building 3, Moscow 119234, Russia*

<sup>c</sup>*Institute for Microelectronics Technology and High Purity Materials,*

*Russian Academy of Sciences, 6 Institutskaya Street, Chernogolovka 142432, Moscow region, Russia*

<sup>d</sup>*Nano-Information Technology Academy, Dongguk University, 3-26 Pildong, Junggu, Seoul 100-715, South Korea*

*Corresponding author: E. A. Kolesov (cryptic.still@gmail.com)*

**Introduction.** Studies of the substrate influence on graphene properties are relevant due to the high sensitivity of this two-dimensional material to the smallest effects. At the same time, studies dedicated to the separation of direct substrate influence and residual synthesis effects on graphene properties are not described in the literature in sufficient detail.

**Materials and methods.** This paper presents the results of a study of the structural properties of as-grown and transferred graphene on copper substrates by Raman spectroscopy and atomic force microscopy.

**Results and discussion.** Using Raman spectroscopy, we found that the mechanical strain in the as-grown graphene is increased, while negligibly small in transferred graphene, the strain coefficients being of 0.22–0.33 and ~0 %, respectively. Using atomic force microscopy, we showed that this effect does not relate to the copper surface irregularities: the average roughness of the substrate surface for as-grown graphene was of 20.4 nm, while for the transferred graphene it was of 62.0 nm, the height difference being of almost an order of magnitude greater for the latter. This contradiction was explained in terms of residual synthesis effects present in case of as-grown graphene.

**Conclusion.** Taking into account the analyzed substrate effects is important both for the refinement of methods for the initial characterization of as-grown graphene, and for practical applications requiring graphene transfer to corrugated and perforated substrates, membranes and objects of complex shape.

**Keywords:** graphene; mechanical strain; Raman spectroscopy; AFM; substrate.

**Acknowledgements.** This work was supported by Belarusian State Program for Research «Photonics, opto- and microelectronics» and Russian Foundation of Basic Researches grant No. 16-33-60229.

## Введение

Графен – двумерный углеродный кристалл с гексагональной решеткой толщиной в один атомарный слой графита. Благодаря своим уникальным свойствам он привлекает к себе огромное внимание как материал, эффективный для целого ряда различных приложений. Высокие значения теплопроводности ( $\sim 5 \cdot 10^3$  Вт · м<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup> [1]), механической жесткости ( $\sim 1$  ТПа [2]), а также подвижности носителей заряда (до  $2 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup> · В<sup>-1</sup> · с<sup>-1</sup> [3]) делают графен одним из самых перспективных объектов исследования среди наноматериалов.

В то же время, как следует из литературных источников, свойства графена в значительной мере могут зависеть от подложки; при этом металлические подложки (Ni, Cu) влияют наиболее выражено в связи с сильным взаимодействием графен – металл [4]. В частности, воздействие подложки может проявляться в возникновении механических напряжений в графеновой решетке [5; 6]. В связи с тем что наиболее часто в экспериментальных работах встречается синтез графена химическим осаждением из газовой фазы (CVD) на медных подложках, разделение влияния последствий синтеза и непосредственного воздействия подложки на свойства графенового слоя представляется актуальной задачей как для уточнения методов первичной характеристики графена после синтеза, так и для практических приложений, налагающих жесткие требования на свойства монослоя. В частности, для некоторых применений необходимы образцы графена не только на гладких и сплошных подложках ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , кварц, SiC и др.), но и на шероховатых, таких как рифленые кварцевые подложки [7], перфорированные подложки (металлические сетки для просвечивающей электронной микроскопии [8]), подложки-мембраны для измерений рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии при изучении интерфейсов твердое тело/жидкость, жидкость/газ в условиях вакуума [9]), а также объекты сложной формы, например кантилеверы для сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) [10; 11].

Вследствие универсальности и чувствительности к целому ряду свойств материала спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является популярным неразрушающим методом характеристики углеродных наноматериалов [12]. СЗМ – классический метод получения данных о топографии поверхности исследуемых материалов.

Цель работы – установление структурных свойств графена, выращенного на медных подложках или перенесенного на них, методами спектроскопии КРС и СЗМ.

### Материалы и методы

Перед синтезом графена медная фольга (99,999 %,  $10 \times 30$  см, толщина 25 мкм) предварительно отжигалась при  $1060^\circ\text{C}$  с расходом водорода  $300\text{ см}^3$  и аргона  $2000\text{ см}^3$  при давлении ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. в течение 1–2 ч. Для минимизации окисления подложки до роста графена синтез последнего производился непосредственно после отжига (образец оставался в камере) при температуре  $1020^\circ\text{C}$  методом CVD с использованием смеси  $\text{CH}_4$  ( $40\text{ см}^3$ ) и  $\text{H}_2$  ( $10\text{ см}^3$ ). После окончания процесса роста графена образец охлаждался до комнатной температуры.

Один из полученных образцов графена оставлен на медной фольге, на которой был выращен (*as-grown* – в первоначальном виде после синтеза). Второй перенесен на другую медную подложку с использованием ПММА [13]. Последний (молекулярная масса 996 000) был растворен в анизоле и нанесен на графен при помощи спин-коутинга ( $3000\text{ об/мин}$ , 1 мин). Для травления меди использован 0,1 моль/л водный раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , в то время как промывка графена от продуктов травления производилась при помощи смеси воды и изопропилового спирта [14]. Затем ПММА удалялся путем погружения образца в особо чистую ледяную уксусную кислоту на 4 ч [15].

Спектры КРС регистрировали с использованием конфокального спектрометра Nanofinder HE (*LOTIS III*, Беларусь – Япония) со спектральным разрешением не хуже  $3\text{ см}^{-1}$  ( $1,0\text{ см}^{-1}$  для линии 2D и  $2,3\text{ см}^{-1}$  для линии G). Применялся непрерывный твердотельный лазер (длина волны 473 нм, мощность излучения 2400 мВт), диаметр лазерного пятна составлял 0,6 мкм.

Изображения СЗМ получали с помощью микроскопа SolverNano в полуконтактном режиме, диаметр закругления зонда составлял 10 нм, резонансная частота колебаний 229 кГц.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены экспериментальные спектры КРС для графена, выращенного на медной подложке, и графена, перенесенного на таковую. В данных спектрах в интервале  $1000\text{--}3000\text{ см}^{-1}$  присутствуют характерные для графена линии G ( $\sim 1580\text{ см}^{-1}$ , процесс КРС в центре зоны Бриллюэна в углеродных  $sp^2$ - и  $sp^3$ -решетках), 2D ( $\sim 2700\text{ см}^{-1}$ , процесс КРС на краю зоны Бриллюэна в графитоподобных материалах), D ( $\sim 1350\text{ см}^{-1}$ , процесс КРС на краю зоны Бриллюэна, происходящий с участием дефекта, вследствие чего интенсивность данной линии чувствительна к концентрации всех КРС-активных дефектов в области лазерного пятна, таких как вакансии, границы зерен,  $sp^3$ -кластеры и др.) [12]. Для выращенного графена соотношение интенсивностей линий 2D и G составляет  $\sim 1$  – это первичный фактор наличия монослоя [16]. В случае перенесенного графена указанное соотношение превышает 1, что также соответствует однослойному графену. На вкладки рис. 1 приведены аппроксимации линии 2D одиночной функцией Лоренца. Из рисунка видно, что функция достаточно хорошо соответствует экспериментальному спектру; данный факт подтверждает наличие монослоя графена [16]. Кроме того, значения полной ширины на полувысоте FWHM(2D) для данных образцов составляют  $\sim 30\text{ см}^{-1}$ , что также характерно для монослоя [17].

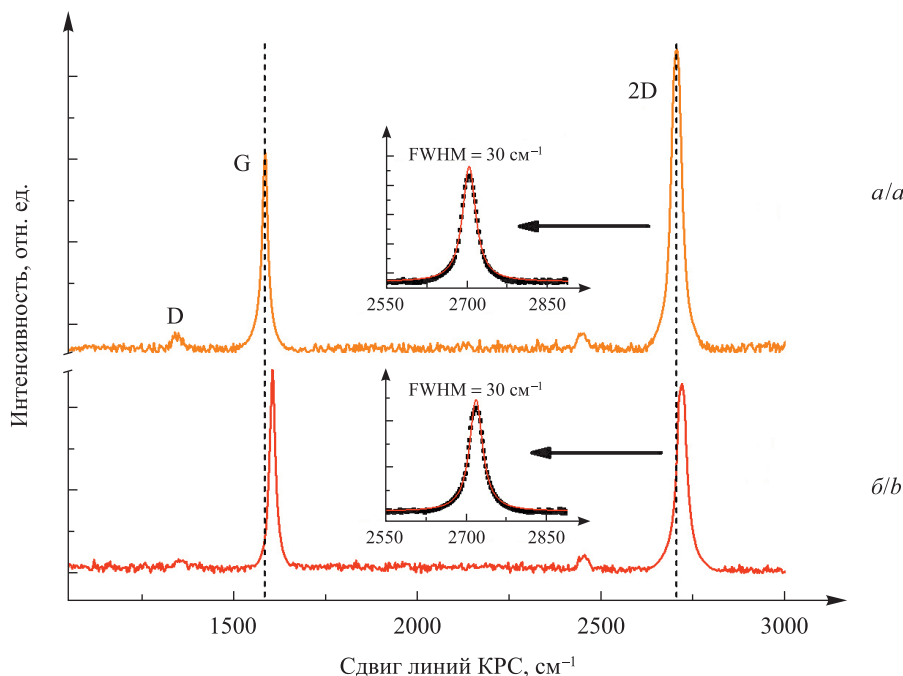


Рис. 1. Характерные спектры КРС экспериментальных образцов графена, выращенного на медной подложке (б) и перенесенного на медную подложку (а).  
На вкладках: аппроксимации линии 2D одиночной функцией Лоренца

Fig. 1. Typical Raman spectra of as-grown (b) and transferred graphene (a) on copper substrates.  
Insets: 2D peak single Lorentz approximation

Малая относительная интенсивность линии D на рис. 1 свидетельствует о низкой дефектности графена в образцах [12]. Увеличение относительной интенсивности данной линии после переноса связано с внедрением дефектов в структуру материала при травлении меди и в процессе переноса [18]. Кроме того, из рисунка видно, что после переноса графена происходит смещение линий G и 2D в область меньших значений положения. Это может быть связано с высвобождением механических напряжений [5; 6].

Изображения экспериментальных образцов графена, полученные с помощью оптической микроскопии, представлены на рис. 2, из которого видно, что поверхность выращенного образца равномерна и однородна, при этом на ней присутствуют отдельные черные точки, которые можно связать с дефектными областями, а также слабо выраженные складки. Их образование, согласно известным литературным данным [17; 19], свидетельствует о локальном высвобождении присутствовавших в графене встроенных механических напряжений.

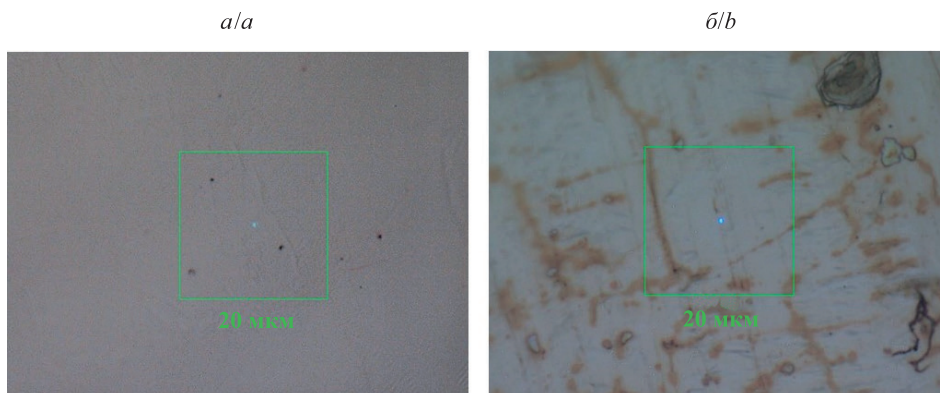


Рис. 2. Изображение образцов графена, выращенного на медной подложке (а) и перенесенного на медную подложку (б), полученное с помощью оптической микроскопии (увеличение  $\times 100$ ). Зеленый квадрат указывает размер области КРС-картирования ( $20 \times 20$  мкм)

Fig. 2. Optical microscopy images ( $\times 100$ ) of as-grown (a) and transferred graphene (b) on copper substrates.  
Green squares indicate Raman mapping areas of  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$



На изображении графена, перенесенного на медь, также наблюдаются черные точки; при этом оно отличается выраженными неоднородностями в виде темно-серых областей, бесцветных борозд, а также линий медного цвета. Происхождение таких особенностей может быть связано, во-первых, со следами шлифовки подложки, во-вторых, с образованием дефектов в процессе переноса пленки, в-третьих, с попаданием кислорода между пленкой графена и медью, что приводит к окислению последней.

Из представленных на рис. 3 карт видно, что положение G в случае с перенесенным графеном достаточно близко к литературным данным ( $1580\text{ см}^{-1}$ ), в то время как для графена, выращенного на медной подложке, данная линия смещена в сторону больших значений положения (в среднем около  $1600\text{ см}^{-1}$ ) [17]. Аналогичный эффект наблюдается и для линии 2D: положение для перенесенного графена имеет значение, близкое к литературным данным ( $2688\text{ см}^{-1}$ ), при этом значение положения для выращенного графена повышено (в среднем  $2720\text{ см}^{-1}$ ) [17]. Большие значения положений линий G и 2D для выращенного графена свидетельствуют об увеличенных локальных механических напряжениях [20], которые, в свою очередь, могут быть вызваны высокой шероховатостью поверхности подложки либо наличием остаточных эффектов синтеза [4].

Также на основании рис. 3 можно сделать вывод, что механические напряжения распределены по поверхности пленки относительно равномерно, за исключением отдельных областей. Данные области соответствуют складкам графена, наблюдаемым на изображении оптической микроскопии, что дополнительно подтверждает связь сдвига линий после переноса с высвобождением механических напряжений [4].

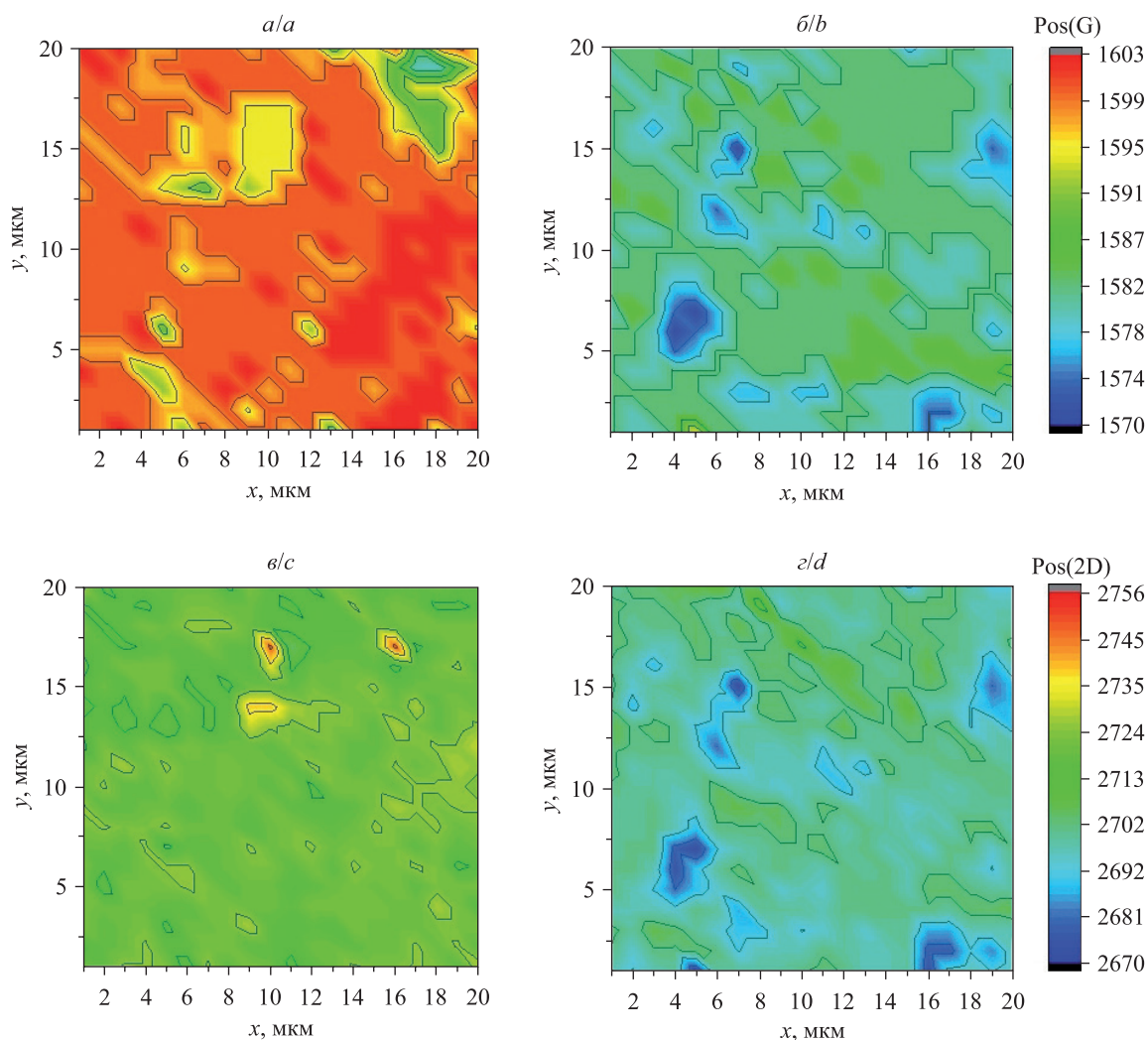


Рис. 3. Карты КРС ( $20 \times 20\text{ }\mu\text{m}$ , шаг сканирования  $1\text{ }\mu\text{m}$ ) положения линий G и 2D (Pos(G) и Pos(2D) соответственно) для образцов графена, выращенного на медной подложке (a, c) и перенесенного на медную подложку (b, d)

Fig. 3. Raman maps ( $20 \times 20\text{ }\mu\text{m}$ , scanning step of  $1\text{ }\mu\text{m}$ ) of G and 2D peak positions for as-grown (a, c) and transferred graphene (b, d) on copper substrates

Механические напряжения, вносимые подложкой в графен, можно рассчитать по формуле [21]

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\omega_{G,2D}}{2\omega_{G,2D}^0\gamma_{G,D}},$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент механического напряжения;  $\Delta\omega_{G,2D}$  – сдвиг линий КРС относительно нормального положения;  $\omega_{G,2D}^0$  – нормальные положения линий КРС;  $\gamma_{G,D}$  – параметр Грюнайзена для оптических фононов (использовались значения  $\gamma_G = 1,8$  и  $\gamma_D = 2,7$  для линий G и 2D соответственно [20]).

С помощью указанной формулы рассчитаны значения  $\varepsilon$ , усредненные по картам КРС (400 спектров на образец). Результаты расчета приведены в табл. 1, из которой видно, что после переноса образца на другую подложку в графене произошло высвобождение напряжений от 0,22–0,33 до  $\sim 0$  %. Как уже отмечалось, данный результат может быть обусловлен различной шероховатостью поверхности подложек либо присутствием в случае выращенного графена остаточных эффектов синтеза – локальных химических связей между графеном и медью или механических напряжений, образованных в процессе охлаждения образца после синтеза и связанных с разными коэффициентами теплового расширения графена и меди [4; 22]. Данные эффекты удаляются при переносе и, соответственно, прекращают влиять на повышение механических напряжений.

Таблица 1

Рассчитанные из карт КРС по положению линий G и 2D  
средние значения коэффициента механического  
напряжения для образцов графена, %

Table 1

Average values of mechanical strain coefficient  
calculated from Raman mapping data on G and 2D peak positions, %

Образец графена	$\varepsilon$ (G)	$\varepsilon$ (2D)
Выращенный на меди	0,33	0,22
Выращенный на меди и перенесенный на медь	0,03	0,07

В целях определения связи напряжений в графене с шероховатостью поверхности подложки производилось картирование СЗМ. На изображении СЗМ для образца графена, выращенного на меди (рис. 4), наблюдаются монотонные участки с малыми перепадами высоты, а также островки высотой более 200 нм. Последние можно связать со следами неравномерно вытравленной в ходе предварительного отжига меди или островками углерода, которые образовались во время синтеза вблизи дефектов подложки (эти дефекты могут становиться центрами зарождения таких островков; на них вместо графена,

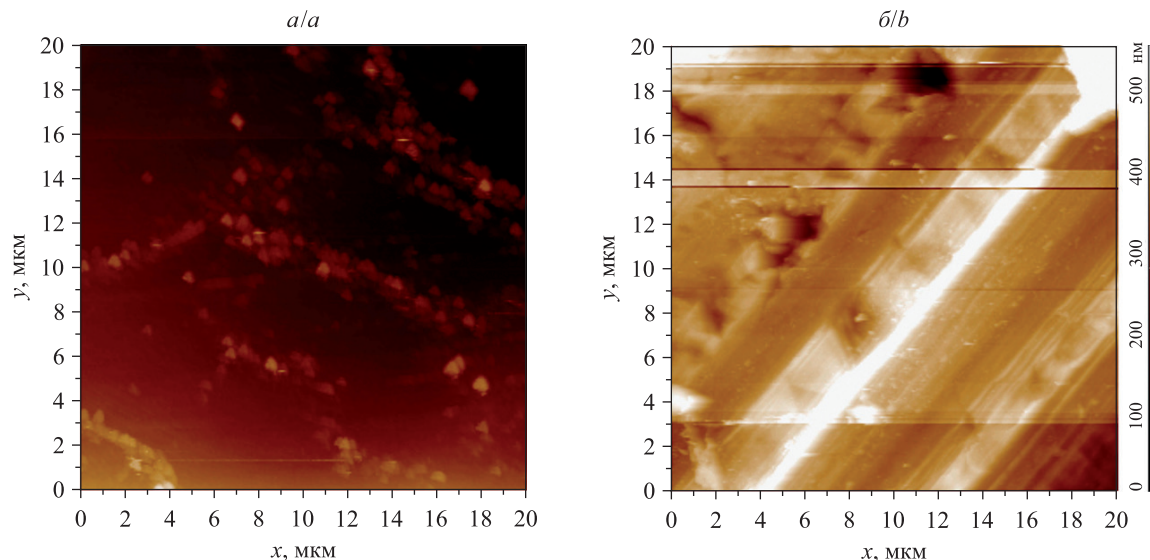


Рис. 4. Изображение СЗМ ( $20 \times 20$  мкм,  $256 \times 256$  точек) для образцов графена, выращенного на медной подложке (а) и перенесенного на медную подложку (б)

Fig. 4. AFM images ( $20 \times 20 \mu\text{m}$ ,  $256 \times 256$  points) for as-grown (a) and transferred grapheme (b) on copper substrates

как правило, образуется многослойный графитоподобный углерод [4]). Результаты спектроскопии КРС свидетельствуют о том, что в масштабах порядка  $20 \times 20$  мкм наблюдаются отдельные островки многослойного графена (спектры в данных точках находятся на переходной стадии между графеном и графитом), подтверждая второе предположение.

На изображении СЗМ образца перенесенного графена присутствуют диагональные линии, соответствующие следам шлифовки подложки. Перепады высоты имеют масштабы более 1 мкм. В табл. 2 приведено сравнение рассчитанных из карт СЗМ параметров, описывающих шероховатость поверхности образцов. Из табл. 2 и рис. 4 следует, что поверхность подложки, на которую графен был перенесен, более шероховатая по сравнению с той, на которой он был выращен, при этом перепады высоты отличаются приблизительно на порядок. Данное наблюдение свидетельствует о том, что неровности поверхности подложки в рамках нашего эксперимента вносят малый вклад в образование механических напряжений в графене.

Таблица 2

Рассчитанные из карт СЗМ значения  
параметров шероховатости поверхности для образцов графена,  
выращенного на медной подложке и перенесенного на медную подложку

Table 2

Mean surface roughness and standard deviation of height, calculated from the AFM maps  
for as-grown and transferred graphene on copper substrates

Образец графена	Область сканирования, мкм	Средняя шероховатость поверхности, нм	Среднеквадратичное отклонение высоты, нм
Выращенный на меди	$20 \times 20$	20,4	30,1
Выращенный на меди и перенесенный на медь	$20 \times 20$	62,0	86,3
Выращенный на меди	$2 \times 2$	1,7	2,1

В целях получения более подробной информации о параметрах поверхности подложки, на которой графен синтезирован, в областях малого контраста на рис. 4 производилось дополнительное СЗМ-картирование в масштабах  $2 \times 2$  мкм, результаты которого представлены на рис. 5.

Малые перепады высоты (порядка 10 нм) (см. рис. 5), а также малые значения параметров шероховатости поверхности (см. табл. 2) в микрометровом масштабе подтверждают успешный отжиг поверхности меди при подготовке к росту графенового слоя, а также дополнительно свидетельствуют о том, что в случае графена, оставленного на первоначальной подложке, повышенные механические напряжения обусловлены не грубостью поверхности подложки, а остаточными эффектами синтеза.

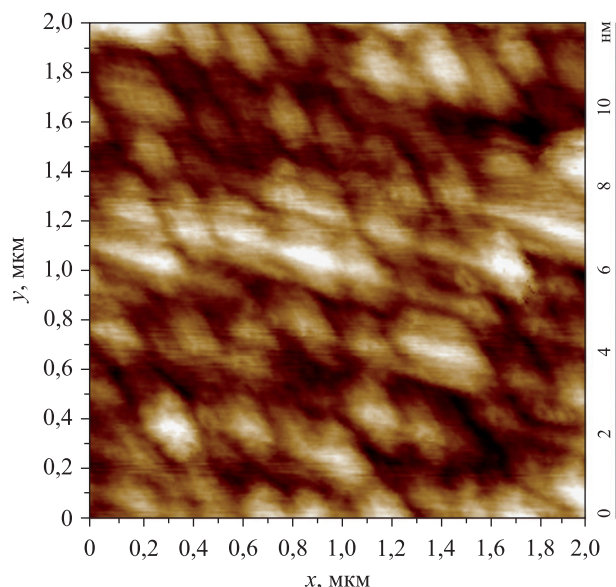


Рис. 5. Изображение СЗМ ( $2 \times 2$  мкм,  $256 \times 256$  точек) гладкой области для образца графена, выращенного на медной подложке

Fig. 5. AFM image ( $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ,  $256 \times 256$  points) of a smooth area for as-grown graphene on copper



## Заключение

В спектрах КРС образцов графена обнаружено, что положения линий G и 2D сдвинуты в сторону больших значений в выращенном графене на меди ( $1600\text{ см}^{-1}$  для линии G и  $2720\text{ см}^{-1}$  для 2D), в то время как после его переноса на медную подложку линии принимают положения, соответствующие литературным данным ( $1580$  и  $2688\text{ см}^{-1}$  для линий G и 2D соответственно).

С использованием известного метода определения механических напряжений из положений линий G и 2D установлено, что коэффициент механического напряжения для образца с выращенным графеном имеет значения  $0,22\text{--}0,33\%$ , для перенесенного графена – около  $0\%$ . Путем измерений СЗМ показано, что данный эффект не связан с шероховатостью поверхности меди: перепады высот поверхности подложки с выращенным графеном на порядок меньше, поскольку использовался предварительный отжиг непосредственно перед синтезом, при этом ее средняя шероховатость приблизительно в 3 раза меньше. Полученный результат объясняется наличием остаточных эффектов синтеза для графена, выращенного на медной подложке.

## Библиографические ссылки / References

1. Balandin AA. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*. 2008;8(3):902–907. DOI: 10.1021/nl0731872.
2. Bunch S, van der Zande AM, Verbridge SS, Frank IW, Tanenbaum DM, Parpia JM, et al. Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*. 2007;315(5811):490–493. DOI: 10.1126/science.1136836.
3. Bolotin KI, Sikes KJ, Jiang Z, Klima M, Fudenberg G, Hone J, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*. 2008;146(9–10):351–355. DOI: 10.1016/j.ssc.2008.02.024.
4. Shin H, Yoon S-M, Choi WM, Park S, Lee D, Song IY, et al. Influence of Cu crystallographic orientation on electron transport in graphene. *Applied Physics Letters*. 2013;102:163102. DOI: 10.1063/1.4802719.
5. Frank O, Vejpravova J, Holy V, Kavan L, Kalba M. Interaction between graphene and copper substrate: The role of lattice orientation. *Carbon*. 2014;68:440–451. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.11.020.
6. He R, Zhao L, Petrone N, Kim KS, Roth M, Hone J, et al. Large Physisorption Strain in Chemical Vapor Deposition of Graphene on Copper Substrates. *Nano Letters*. 2012;12(5):2408–2413. DOI: 10.1021/nl300397v.
7. Guo L, Zhang Z, Sun H, Dai D, Cui J, Liad M, et al. Direct formation of wafer-scale single-layer graphene films on the rough surface substrate by PECVD. *Carbon*. 2018;129:456–461. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.12.023.
8. Regan W, Alem N, Alemán B, Geng B, Girit Ç, Maserati L, et al. A direct transfer of layer-area graphene. *Applied Physics Letters*. 2010;96:113102. DOI: 10.1063/1.3337091.
9. Nemšák S, Strelcov E, Guo H, Hoskins BD, Duchoň T, Mueller DN, et al. In aqua electrochemistry probed by XPEEM: experimental setup, examples, and challenges. 2018. ArXiv:1802.02545.
10. Hui F, Porti M, Nafria M, Duan H, Lanza M. Fabrication of graphene MEMS by standard transfer: High performance atomic force microscope tips. In: *10<sup>th</sup> Spanish Conference on Electron Devices (CDE); 2015 February 11–13; Madrid, Spain*. Madrid: IEEE; 2015. 978-1-4799-8108-3/151. DOI: 10.1109/CDE.2015.7087444.
11. Martin-Olmos C, Rasool HI, Weiller BH, Gimzewski JK. Graphene MEMS: AFM Probe Performance Improvement. *ACS Nano*. 2013;7(5):4164–4170. DOI: 10.1021/nn400557b.
12. Ferrari AC, Basko DM. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature Nanotechnology*. 2013;8(4):235–246. DOI: 10.1038/nnano.2013.46.
13. Liang X, Sperling BA, Calizo I, Cheng G, Hacker CA, Zhang Q, et al. Toward Clean and Crackless Transfer of Graphene. *ACS Nano*. 2011;5(11):9144–9153. DOI: 10.1021/nn203377t.
14. Gao L, Ni G-X, Liu Y, Liu B, Neto AHC, Loh KP. Face-to-face transfer of wafer-scale graphene films. *Nature*. 2014;505(7482):190–194. DOI: 10.1038/nature12763.
15. Her M, Beams R, Novotny L. Graphene transfer with reduced residue. *Physics Letters A*. 2013;377(21–22):1455–1458. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.04.015.
16. Ferrari AC, Meyer JC, Scardaci V, Casiraghi C, Lazzeri M, Mauri F, et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical Review Letters*. 2006;97(18):187401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
17. Hao Y, Wang Y, Wang L, Ni Z, Wang Z, Wang R, et al. Probing Layer Number and Stacking Order of Few-Layer Graphene by Raman Spectroscopy. *Small*. 2010;6:195–200. DOI: 10.1002/sml.200901173.
18. Cançado LG, Jorio A, Ferreira EHM, Stavale F, Achete CA, Capaz RB, et al. Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano Letters*. 2011;11(8):3190–3196. DOI: 10.1021/nl201432g.
19. Tivanov MS, Kolesov EA, Praneuski AG, Korolik OV, Saad AM, Komissarov IV, et al. Significant G peak temperature shift in Raman spectra of graphene on copper. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2016;27(9):8879–8883. DOI: 10.1007/s10854-016-4913-7.
20. Mohiuddin TMG, Lombardo A, Nair RR, Bonetti A, Savini G, Jalil R, et al. Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation. *Physical Review B*. 2009;79:205433. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.205433.
21. Ferralis N. Probing mechanical properties of graphene with Raman spectroscopy. *Journal of Materials Science*. 2010;45(19):5135–5149. DOI: 10.1007/s10853-010-4673-3.
22. Zhang Y, Gao T, Gao Y, Xie S, Ji Q, Yan K, et al. Defect-like Structures of Graphene on Copper Foils for Strain Relief Investigated by High-Resolution Scanning Tunneling Microscopy. *ACS Nano*. 2011;5(5):4014–4022. DOI: 10.1021/nn200573v.

Статья поступила в редакцию 09.11.2018.  
Received by editorial board 09.11.2018.