

# Электрические характеристики пленок мультиграфена на подложках высокоомного карбида кремния

© А.А. Лебедев<sup>¶</sup>, А.М. Стрельчук, Д.В. Шамшур, Г.А. Оганесян,  
С.П. Лебедев, М.Г. Мынбаева, А.В. Садохин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 марта 2010 г. Принята к печати 22 марта 2010 г.)

Проведено исследование мультиграфеновых пленок, полученных сублимацией в вакууме поверхности полуизолирующих подложек  $6H$ -SiC. Обнаружено, что пленки имеют полупроводниковый характер проводимости. Сделан вывод, что данный характер проводимости, предположительно, определяется дефектами между отдельными кристаллами графена, составляющими исследованные углеродные слои.

## 1. Введение

В последние годы усилился интерес к получению планарных наноуглеродных слоев (слоев графена). Данные слои обладают металлической проводимостью, стабильны при комнатной температуре на воздухе и могут быть использованы для создания нанотранзисторов [1,2]. Фирма INTEL рассматривает графен как одну из возможных основ микроэлектроники будущего [3]. В предыдущих работах [4,5] нами была показана возможность формирования наноуглеродных пленок на поверхности как проводящих, так и полуизолирующих подложек SiC методом сублимации в вакууме [6]. Исследования, проведенные с использованием методов рамановской спектроскопии и дифракции быстрых электронов (ДБЭ), показали, что полученные слои представляют собой пленки толщиной около 5 (или более) монослоев графита (мультиграфен) со структурой, образованной отдельными фрагментами графена в плоскости подложки с линейными размерами  $\sim (15-50)$  нм [5].

Задачами настоящей работы было исследование электрофизических свойств сформированных пленок с использованием вольт-амперных и гальваномангнитных измерений, выполненных в широком диапазоне температур.

## 2. Образцы

Исследованные пленки мультиграфера были получены сублимацией поверхности высокоомной подложки  $6H$ -SiC. Максимальная площадь образцов составляла  $1.3 \times 1.3$  см<sup>2</sup>. Для подготовки полученных пленок графена к проведению электрофизических измерений на поверхности образцов формировались тестовые структуры в геометрии холловского моста (Hall-bar) методами фотолитографии и травления аргоновым пучком при использовании фоторезистивной маски. Электрические контакты формировались с использованием методом термического испарения в вакууме. Топология тестовой структуры представлена на рис. 1.

Подготовка поверхности пленок графена перед проведением технологических операций по формированию тестовых структур проводилась кипячением в сверхчистой (деионизованной) воде с целью удаления осевших на поверхность микрочастиц. Удаление воды с поверхности осуществлялось центрифугированием образцов. Финишная обработка проводилась при использовании комплексобразующего соединения (метилового спирта). Для контроля качества подготовки поверхности был использован метод оже-спектроскопии. Контактные площадки формировались методом взрывной фотолитографии. При формировании контактных площадок холловских структур использовалась двуслойная металлизация Ti/Au. Подслой Ti толщиной  $20 \text{ \AA}$  напылялся с целью повышения адгезии основного металлического покрытия (Au), толщина которого составляла 300 нм.

## 3. Вольт-амперные характеристики

Проведены исследования вольт-амперных характеристик  $I(V)$  графеноподобных пленок на двух подложках карбида кремния в диапазоне температур  $T = 77-300$  К. Прикладываемое напряжение не превышало  $\pm 5$  В. Вольт-амперные характеристики в указанном диапазоне напряжений и температур практически линейны (рис. 2).

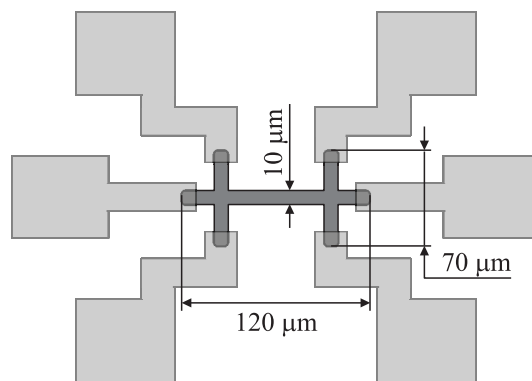
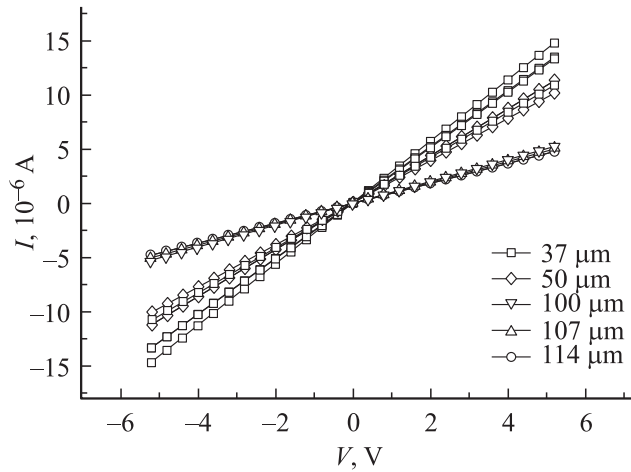


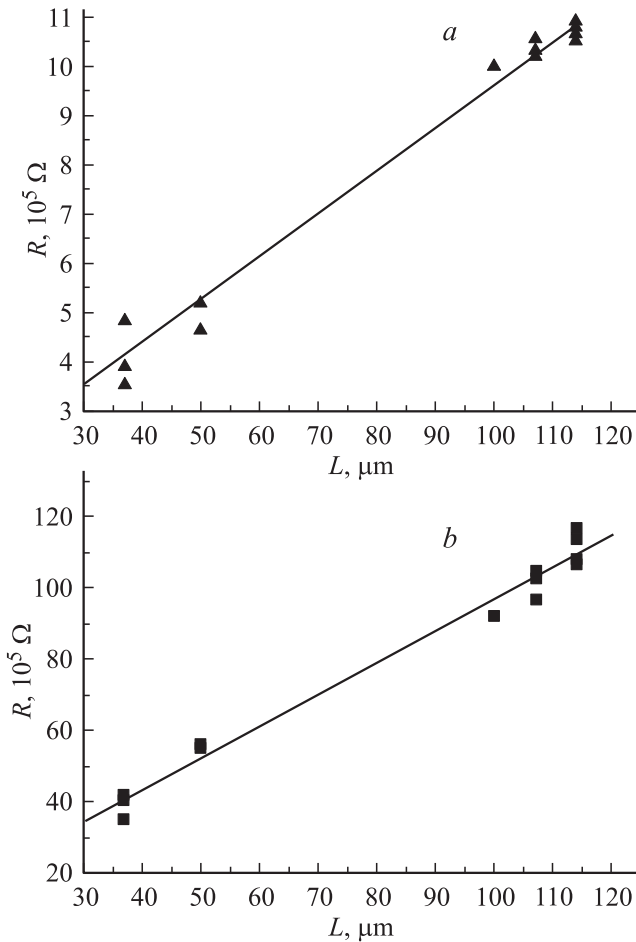
Рис. 1. Топология тестовой структуры для исследования эффекта Холла и вольт-амперных характеристик пленок.

<sup>¶</sup> E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

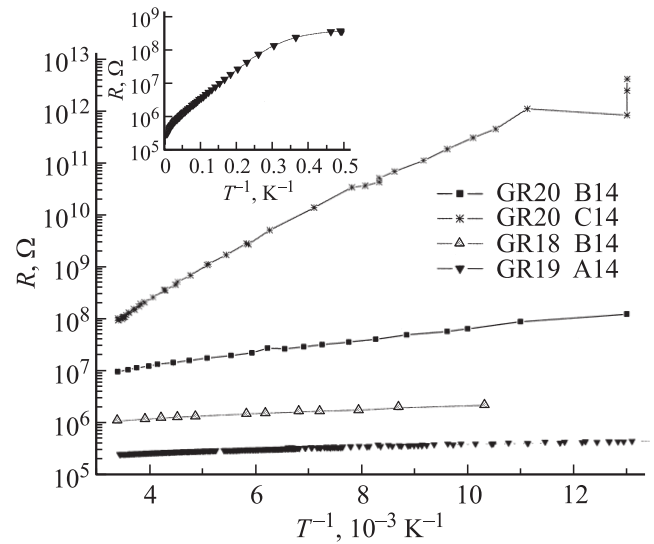
Сопротивление структур  $R$  зависит от длины полоска, которая могла меняться в пределах  $L = 37\text{--}114\text{ мкм}$ , и различно для пленок на разных подложках. Так, при комнатной температуре сопротивление пленок лежит в



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики структур разной длины (длины указаны) на подложке карбида кремния GR18 при комнатной температуре.



**Рис. 3.** Зависимость сопротивления ( $R$ ) структур от длины на подложках GR18 ( $a$ ) и GR20 ( $b$ ) при комнатной температуре.



**Рис. 4.** Зависимость сопротивления ( $R$ ) четырех структур от обратной температуры на подложках карбида кремния GR18, GR19, GR20 в диапазоне температур  $77\text{--}300\text{ К}$  и структуры на подложке GR19 (вставка) в диапазоне температур  $2\text{--}300\text{ К}$ . Длина структур  $100\text{ мкм}$ .

пределах  $0.3\text{--}1.1\text{ МОм}$  для структур на подложке GR18 (рис. 3,  $a$ ), в пределах  $3\text{--}12\text{ МОм}$  на подложке GR20 (рис. 3,  $b$ ) и изменяется пропорционально длине полоска. Измерение вольт-амперных характеристик структур в диапазоне температур  $77\text{--}300\text{ К}$  показало, что сопротивление структур уменьшается с ростом температуры (рис. 4). Вид функциональной зависимости сопротивления от температуры определяется не очень четко. Зависимость близка к степенной с показателями степени от  $-0.6$  до  $-(2\text{--}8)$ . Если предполагать температурную зависимость сопротивления термоактивационной, то энергии активации сопротивления лежат в диапазоне от  $-(7\text{--}10)$  до  $-(20\text{--}100)\text{ мэВ}$ .

На одной из пленок (GR19) измерения проведены в диапазоне температур  $2\text{--}300\text{ К}$ . Сопротивление пленки увеличивалось с понижением температуры во всем диапазоне температур (см. вставку на рис. 4).

#### 4. Эффект Холла

Измерения эффекта Холла проводились в диапазоне температур  $T = 2\text{--}300\text{ К}$ . При температуре  $\sim 77\text{ К}$  в области слабых магнитных полей ( $\leq 0.8\text{ Тл}$ ) наблюдалось отрицательное магнетосопротивление. При гелиевых температурах ВАХ становилась нелинейной. Различные образцы проявляли как электронную, так и дырочную проводимость. Разброс величины холловской подвижности для лучшего образца составил  $\sim (300\text{--}1000)\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при комнатной температуре.

## 5. Обсуждение результатов

Как величина удельного сопротивления пленок (рассчитываемое удельное сопротивление пленки примерно равно  $0.03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  для образца на подложке GR18 и  $0.3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  для образца на подложке GR20 при комнатной температуре в предположении толщины пленки 3 нм), так и характер температурной зависимости сопротивления (уменьшение сопротивления с ростом температуры) могли бы свидетельствовать о близости структуры полученных пленок к структуре объемного графита, так как известно, что подобными особенностями обладает графит при его характеристике в направлении, перпендикулярном углеродным слоям. Однако в нашем случае установлено (методом ДБЭ), что пленка имеет поликристаллическую структуру с ориентацией кристаллитов в плоскости подложки. Таким образом, наблюдаемые эффекты (высокое сопротивление с отрицательной температурной зависимостью), предположительно, могут быть обусловлены особенностями транспорта носителей через границы кристаллитов, составляющих исследованные слои. Эти особенности могут быть связаны с наличием большого числа структурных дефектов на границах отдельных фрагментов графена. В частности, уже отмечалось, что наличие дефектов типа „armchair“ приводит к полупроводниковому характеру проводимости графеновой пленки [1].

Данная работа поддержана программой президенту-ма РАН „Квантовая физика конденсированных сред“ и ФАНИ (контракт № 02.740.11.0108 от 15.06.2009).

## Список литературы

- [1] J. Hass, W.A. de Heer, E.H. Conrad. *J. Phys.: Condens. Matter*, **20**, 323 202 (2008).
- [2] С.В. Морозов, К.С. Новоселов, А.К. Гейм. *УФН*, **178**, 776 (2008).
- [3] G. Liang, N. Neophytou, M.S. Lundstrom, D.E. Nikonov. *J. Appl. Phys.*, **102**, 054 307 (2007).
- [4] А.А. Лебедев, И.С. Котоусова, А.А. Лаврентьев, С.П. Лебедев, И.В. Макаренко, В.Н. Петров, А.Н. Титков. *ФТТ*, **51**, 783 (2009).
- [5] А.А. Лебедев, И.С. Котоусова, А.А. Лаврентьев, С.П. Лебедев, И.В. Макаренко, В.Н. Петров, А.Н. Титков. *ФТТ*, **52**, 799 (2010).
- [6] N.S. Savkina, A.A. Lebedev, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, A.S. Tregubova, C. Raynaud, J.-P. Chante, M.-L. Locatelli, D. Planson, J. Milan, P. Godignon, F.J. Campos, N. Mestres, J. Pascual, G. Brezeanu, M. Badila. *Mater. Sci. Eng. B*, **77**, 50 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

## Electrical characteristics of multi-graphene films grown on high-resistivity silicon carbide substrates

A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, D.V. Shamshur, G.A. Oganesyanyan, S.P. Lebedev, M.G. Mynbaeva, A.V. Sadokhin

loffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The investigation of multi-graphene films obtained by vacuum sublimation of insulating 6H-SiC substrate surface were done. It was found that these films have semiconductor character of conductivity. It is concluded that the nature of conductivity is determined by defects between the crystals of graphene of carbon layers investigated.