

НАНОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 530.145 + 620.3

Особенности интеграции графенов в технологические процессы микроэлектроники

**И.И. Бобринецкий¹, И.А. Комаров¹, К.К. Лаврентьев¹, Д.Д. Левин¹,
М.М. Симуний¹, В.К. Неволин¹, Л.Д. Квачева², С.П. Червонобродов³,
А. Бурлан⁴, Л. Хавелек⁵, Н. Возница⁴**

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

³ООО «Карбонлайн» (г. Москва)

⁴Институт физики им. А. Чижевского, Университет Силезии (Польша)

Разработаны методики формирования интегрированных графеновых структур на поверхности кремниевых пластин на основе методов механического, химического расщепления и химического осаждения из газовой фазы. Проведены исследования с использованием атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифрактометрии дефектности полученных структур. Выявлена закономерность в уменьшении размера графеновых пластин при увеличении давления в аэрозольном методе нанесения механически расщепленного графита. Продемонстрирована корреляция топографических дефектов графенового материала и структурных дефектов, наблюдавшихся на дифрактограммах.

Ключевые слова: графен, атомно-силовая микроскопия, механическое расщепление графита, химическое осаждение паров этанола, аэрозольный метод, рентгеновская дифрактометрия.

В последнее десятилетие проводятся активные исследования, направленные на формирование свойств объектов на уровне отдельных наноразмерных элементов в процессе их химического синтеза. Это позволит разработать интегральные наносистемы нового поколения, функционал которых будет заложен в процессе синтеза [1]. Все более усиливается интерес к графену как перспективному материалу электроники, созданному по технологии «снизу вверх» [2]. Активно разрабатываются эффективные способы массового производства графена и мультиграфеновых пакетов.

Среди методов, позволяющих формировать графен, можно выделить несколько наиболее широко развивающихся направлений. В первую очередь это микромеханическое расщепление графита [3]. Метод позволяет получать пленки графена, имеющие высокую степень кристаллографического совершенства и минимальную толщину. Однако низкая воспроизводимость как латеральных параметров, так и свойств синтезируемых пленок графена не позволяет говорить на данном этапе о массовом применении метода микромеханического расщепления для создания функциональных электронных устройств [4].

Химическое расщепление графита, например различными кислотами, является еще одним методом формирования пленок графена [5, 6]. В методе используется характерная особенность слоистых кристаллов (например, графита) – сильная анизотропия свойств, в частности резкое различие энергии связи атомов, принадлежащих одному слою, и атомов различных слоев. Это обстоятельство обуславливает возможность различным атомам и молекулам внедряться внутрь кристалла, заполняя межслоевые пространства. При внедрении атомов или молекул в межплоскостное пространство расстояние между соседними слоями увеличивается в несколько раз и происходит их расслоение. Данный метод позволяет получать графен в больших количествах, однако воздействие кислот может ухудшить функциональные свойства получаемого материала.

Другой перспективный метод, позволяющий синтезировать качественные графеновые слои в большом количестве, – химическое осаждение из газовой фазы (CVD) [7, 8]. Суть метода в том, что газообразный источник углерода подвергается термическому воздействию в потоке инертного газа для того, чтобы расщепить молекулу на реакционно-активный атомарный углерод, а затем он осаждается на тонкопленочный металлический катализатор. В дальнейшем происходит контролируемое формирование пленки графена. Наиболее часто в качестве источников углеродсодержащей смеси используются CH_4 и $(\eta^5\text{-C}_5\text{H}_5)_2\text{Fe}$. Метод CVD не требует высоких температур и сверхвысокого вакуума, что позволяет говорить о возможности технологического внедрения его в процессы микрозелектроники. Помимо этого, метод позволяет точно контролировать свойства и качество синтезируемого материала вплоть до нескольких слоев. К недостаткам метода CVD можно отнести необходимость использования относительно высоких температур при синтезе графена.

Таким образом, чтобы выбрать наиболее оптимальный метод, обеспечивающий формирование функциональных устройств электроники на основе графена, необходимо провести сравнительный анализ качества методов получения графена и свойств полученного материала. В настоящей работе рассматривается несколько методов интеграции графенов в традиционные процессы микрозелектроники:

- механическое расщепление высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ);
- химическое расслабивание графита в процессе окисления;
- химическое осаждение из газовой фазы паров этанола.

Получение графена при механическом расщеплении графита. Метод совмещает массовость получения и преимущество механического метода расщепления в отношении толщины. С помощью ультразвуковой обработки ВОПГ расщепляется и стабилизируется в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ). Затем мультиграфеновые пленки осаждаются на подложку аэрозольным методом с использованием аэробрафа при давлении выше атмосферного [9–12].

Для исследования возможностей данного метода в раствор цетилtrimетиламмония бромида $\text{C}_{10}\text{H}_{23}\text{BrN}$ (2 мл, концентрация 0,5 масс. %) добавлялись сколы ВОПГ (0,01 мкг). Далее в течение нескольких часов происходила ультразвуковая обработка полученного раствора. На поверхность полированной кремниевой подложки, предварительно отмытой водой и 2-пропанолом, с помощью аэробрафа двойного действия (Infinity, Harder&Steenbeck, Германия), обеспечивающего возможность контроля количества подаваемого воздуха и раствора, наносился раствор. Аэробраф устанавливался на небольшом расстоянии от подложки под углом $\sim 45^\circ$, использовалось сопло диаметром 0,4 мм. В результате подготовлено несколько серий образцов при давлениях воздуха в аэробрафе 2, 4 и 6 атм. Далее подложки отжигаются на воздухе при температуре 350 °C в течение 5 мин.

Исследование полученных пленок проводилось методами оптического контроля и атомно-силовой микроскопии с использованием АСМ, Сольвер-Про и промышленных полуконтактных кантителеверов серии NSG-11 (ЗАО «Нанотехнологии-МДТ», Россия). Графит после ультразвукового расщепления разделяется на нанопластинки. При этом прослеживается общая характерная зависимость для микромеханических расщепленных сколов графита: уменьшение размеров нанопластин происходит во всех направлениях. Так, если для нанопластины графита толщиной 10 нм характерны латеральные размеры до нескольких микрометров (рис.1,а), то для графена толщиной 0,8 нм (двухслойный) латеральный размер составляет доли микрометра (несколько сотен нанометров) (рис.1,б).

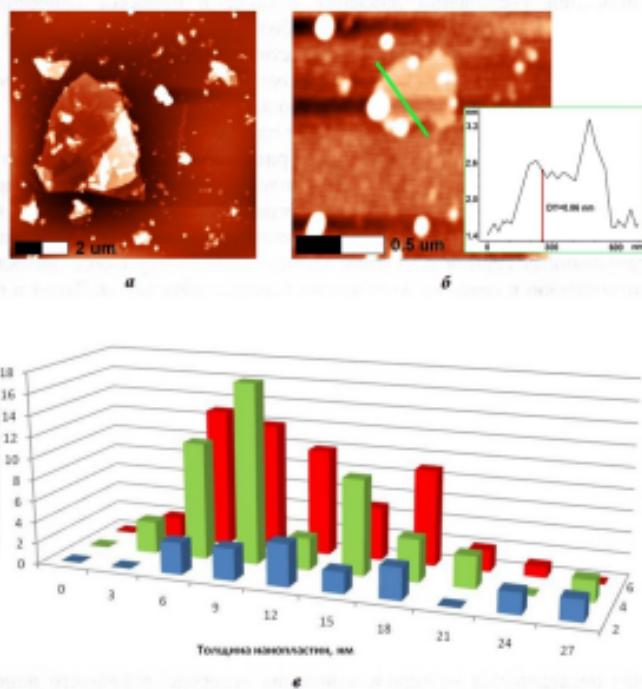


Рис. 1. АСМ-изображение графена, полученного при ультразвуковом расщеплении ВОПГ в водном растворе ПАВ (а – нанопластины, нанесенные при давлении 6 атм; б – двухслойный графен толщиной 0,86 нм, нанесенный при давлении 4 атм) и гистограмма распределения толщины нанопластиин в зависимости от давления в аэрографе (в). На вставке – профиль сечения нанопластины

Выявлена закономерность увеличения количества материала с увеличением давления: осаждение при низком давлении производит к формированию одиночных нанопластин с малой степенью перекрытия, тогда как увеличение давления ведет к уплотнению нанопластиин на поверхности. При этом толщина слоев уменьшается с незначительным увеличением средней площади каждой пластинки. Результаты измерения плотности графитовых нанопластиин и их размеров приведены в таблице.

Параметры нанопластин при различном давлении в аэробрафе

Давление в аэробрафе, атм	Средняя толщина нанопластин, нм	Плотность нанопластин, мкм ⁻²	Средняя площадь одной нанопластины, мкм ²
2	45±32	0,03±0,007	0,45±0,31
4	11±6	0,043±0,016	0,45±0,25
6	13±7,4	0,07±0,03	0,83±0,55

Уменьшение средней толщины нанопластин с увеличением давления (рис.1,а) определяется низкой энергией их связи с поверхностью и удалением более толстых образований при увеличении давления воздуха в процессе нанесения. При этом увеличивается количество задержавшихся более тонких нанопластин за счет высокой скорости удаления жидкой фазы с поверхности кремния.

По сравнению с «классическим» микромеханическим расщеплением, совмещение ультразвукового расщепления с аэрозольным нанесением при повышенном атмосферном давлении дает низкий процент одиночных слоев графена.

Получение графена при химическом расщеплении графита. Материал графена, полученный в процессе химического расщепления графита по модифицированному методу Хаммерса [13], представляет собой восстановленную окись графена (ВОГ).

Исходный порошок графита при перемешивании и охлаждении добавляли в смесь концентрированных серной и азотной кислот. Далее в эту смесь добавляли трехкратное, по отношению к графиту, количество перманганата калия. Затем в нее осторожно вводили раствор перекиси водорода и через 1 ч разбавляли утроенным количеством дистиллированной воды. После отстаивания в течение нескольких часов верхний прозрачный слой деканттировали. Взвешенный осадок фильтровали, промывали дистиллированной водой и сушили при комнатной температуре до установления постоянного веса. В результате получена сухая порошкообразная окись графита, которую восстанавливали посредством быстрого нагрева. В момент восстановления происходило расложение материала с многократным увеличением его объема (экспандиция). Для нанесения на подложку материал подвергали диспергированию в двух типах растворителей: в 2-пропаноле и в хлороформе. В водном растворе ПАВ ВОГ не образовывал коллоидного раствора.

При осаждении из спиртового раствора обнаружены два типа геометрических образований: большие листы с латеральными размерами до десяти микрон и тонкие образования толщиной до 0,4 нм (рис.2). В первом случае структуры оказались сложенные и с перегибами (рис.2,а). Для расправления графеновых нанопластин проведены исследования методики нанесения углеродсодержащего наноматериала на подложку SiO₂, основанной на методе Лэнгмюра–Блоджетт [14]. В чашку Петри заливалась дистиллированная вода с образованием мениска на краях чашки. В воду капали раствор графена в хлороформе так, чтобы раствор образовывал на поверхности воды пленку. Исходный раствор графена в хлороформе предварительно обрабатывали при помощи ультразвука в течение 1–2 ч. За время пока на поверхности воды капли раствора образовывает пленку, хлороформ успевает испариться, тем самым оставляя на поверхности моносвой графеновых нанопластин. Таким образом, можно предположить, что графеновые пластины выстраиваются горизонтально по поверхности и происходит их расслаивание [15]. На рис.3 приведены АСМ-изображения осажденных таким методом нанопластин. Наряду с достаточно ровными пластинами, имеющими тем не менее складки и сгибы (рис.3,а), наблюдаются относительно расправлённые пластины, имеющие поры (рис.3,б). Предположительно,

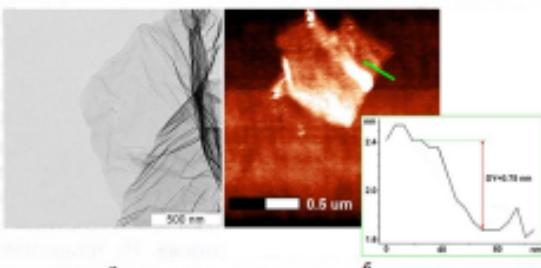


Рис.2. Пленки графена, полученные химическим расщеплением графита: а – ПЭМ-изображение нескольких слоев графена; б – АСМ-изображение графена на поверхности SiO_2 . На вставке – профиль сечения двухслойного графена толщиной 0,75 нм

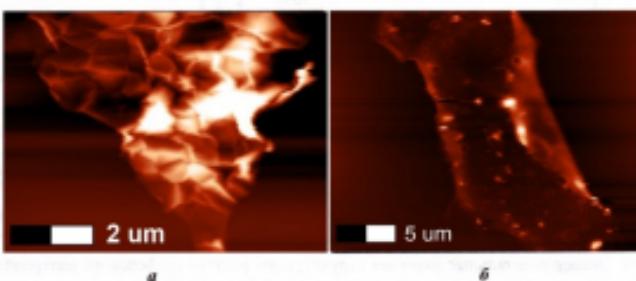


Рис.3. АСМ-изображения материала, полученного химическим расщеплением графита: а – скопления графеновых нанопластин средней толщиной 10 нм; б – невосстановленная окись графена толщиной 10 нм

данные образования являются невосстановленной окисью графена. Нанопластины оксида графена могут иметь морфологию «мягкого одеяла» из-за остаточных молекул воды, а также гидроксильных и карбоксильных групп, присоединенных к поверхности окиси графена [16], что согласуется с результатами, представленными на рис.3,б. Более того, отдельные нанопластины окиси графена могут укладываться в более плотные упаковки за счет сохранения упаковки графита. Однако восстановленный графен приобретает вид «скомканной бумаги», для которого характерно образование складок в виде правильных геометрических фигур с несколькими линиями изгиба [17, 18], что согласуется с результатами, представленными на рис.3,а.

С целью оценки размерных и структурных характеристик материала, полученного методом химического расслоения графита, использовалась широкоугловая дифрактометрия. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре D/MAX-RAPID II с детектором в виде изогнутой пластины изображения и вращающимся серебряным анодом (Rigaku Corporation, Япония). Дифракционные измерения осуществлялись до максимального значения вектора рассеяния $K_{\max} = 22 \text{ \AA}^{-1}$, (где $K = 4\pi \sin \theta / \lambda$; 2θ – угол рассеяния; λ – длина волн). Полученные результаты дифракции представлены посредством фурье-преобразования в координатах реального пространства в форме парной корреляционной функции, которая позволяет сделать ряд

заключений о строении объекта [19]. Экспериментально измеренные структурный фактор материала (отношение интенсивности сигнала к квадрату атомного фактора рассеяния углерода) и парная корреляционная функция представлены на рис.4. Полученный структурный фактор соответствует типичному турбостратному графиту, который определяется наличием двух графитовых пиков ((002)) и ($hk0$) [20, 21]. Первый пик графита ((002)), появляющийся для значения вектора рассеяния $\sim 1,8 \text{ \AA}^{-1}$, соответствует межслоевым корреляциям графита, амплитуда которых зависит от количества уложенных графитовых слоев, и указывает на упаковку, состоящую преимущественно из 2–3 графеновых слоев. Пик ($hk0$) соответствует двумерной организации углеродных атомов в монослое графена. Их интенсивность зависит от степени разориентации отдельных слоев. Отсутствие пика ($hk1$) свидетельствует об отсутствии характерной для графита АВАВ… межслойной структуры.

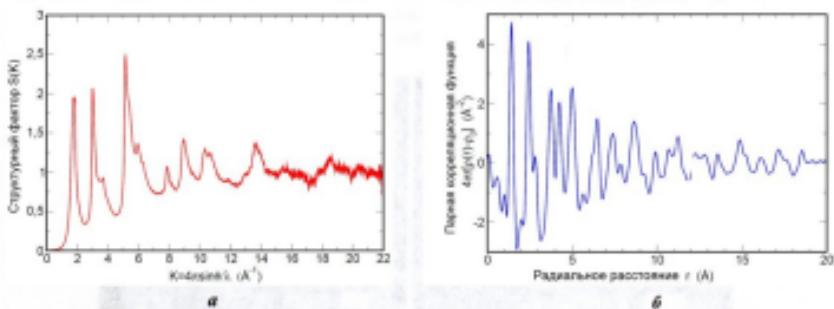


Рис. 4. Экспериментальные значения структурного фактора графенового материала (а) и парной корреляционной функции (б)

Полученные результаты показывают, что исследуемый материал состоит из смеси двух- и трехслойных частично разориентированных графеновых слоев. С применением модели парной корреляционной функции оценена область упорядоченной части, которая составила около 2 нм, что говорит о высокой дефектности материала и согласуется с данными, полученными с помощью ACM-измерений.

Получение графена при катализитическом пиролизе паров этанола. Синтез пленок графена в процессе катализитического пиролиза паров этанола осуществляется на установке CVDomna (ООО «РНСЛ», Россия) для получения различного углеродного наноматериала на заранее сформированных металлических пленках произвольной формы, выполняющих роль катализатора. Установка представляет собой вертикальную керамическую реакционную камеру диаметром 180 мм и высотой 150 мм. Нагрев осуществляется с помощью никромового муфельного нагревателя, находящегося с внешней стороны керамического реактора. Парогазовая смесь подается в реакционную камеру с помощью испарительной ячейки. По своей сути процесс роста близок к процессу химического осаждения из газовой фазы при получении углеродных нанотрубок [22].

Технологический процесс на установке организуется следующим образом. На кремниевую подложку наносится пленка никеля толщиной 150–200 нм методом магнетронного напыления в установке Emitech K575X (Quorum Technologies, Великобритания). Никелевый катализатор выбран из-за высокой растворимости в нем углерода ($\geq 1:3$ ат. % при $1,000^\circ\text{C}$) [23]. Реактор откачивается до давления 40 мбар

форвакуумным насосом и затем нагревается со скоростью 10 °C/мин. Экспериментальным путем установлено, что данная скорость нагрева обеспечивает максимально плавный и регулируемый выход на рабочую точку температурной выдержки с отсутствием видимого переходного процесса. После выхода на рабочую температуру ~ 750–950 °C в реактор подается парогазовая смесь (ПГС), в качестве которой используются пары этанола. Варырование временем реакции от 30 с до 5 мин позволило определить оптимальную величину временного воздействия парогазовой смеси на никелевый катализатор – 2 мин. После окончания процесса выпуск ПГС отключают и происходит форсированное охлаждение образца с помощью продувки азотом. Именно быстрое охлаждение, а также точный контроль над напуском парогазовой смеси позволяют получать ультратонкие графитовые структуры на никелевых катализаторах [24].

Катализатор является необходимым компонентом в производстве мультиграфеновых структур, именно он обуславливает структурирование углерода, образованного в результате реакции, в виде пленки графена. При пиролизе ПГС происходит обогащение пленки катализатора углеродом, получающимся при разложении парогазовой смеси этанола, и образование твердого раствора металла–углерод. Такой процесс роста углеродного наноматериала характерен для толстого катализатора (100 нм и более), при нагреве которого не происходит диспергирования пленки металла в капли. При достижении критического содержания углерода начинается процесс его выделения в виде монослоев подобных пленке. Охлаждение реакционной камеры приводит к ускорению выхода углерода, а также к прекращению роста монослоев графена. Следовательно, чем большая температура реакции, тем больше углерода прореагирует с катализатором, а чем быстрее будет охлаждаться реакционная камера, тем меньше углерода выйдет из катализатора, формируя слой графеновой плоскости.

Полученный материал исследовался методами рентгенофазового анализа на многозадачном рентгеновском дифрактометре Empyrean (PANalytical, Нидерланды), а также методами атомно-силовой микроскопии (рис.5). Дифрактометрия показала наличие кристаллической фазы никеля. При этом преимущественной кристаллографической ориентации зерен металла не наблюдалось: положение и соотношение интенсивностей дифракционных пиков соответствует картине дифракции на разориентированных зернах. Также на дифрактограмме присутствовал слабо выраженный пик (002) от графитовой

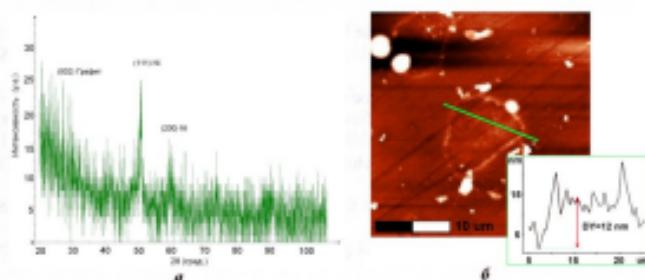


Рис.5. Исследование пленки никеля на SiO_2 с выращенным слоем графена:
а – рентгенофазовая структура; б – АСМ-изображение поверхности.
На вставке – профиль сечения.

плоскости. Однако низкое отношение сигнал-шум не позволило сделать заключение об объеме и толщине полученной графеновой или графитовой пленки. Подтверждение данного вывода получено в результате АСМ-исследований. Выявлено наличие сколов плоскостей на равномерном покрытии никелевой поверхности, что связано с сильной деформацией слоя графена при взаимодействии углерода с подложкой [25]. Толщина данных сколов составляет ~10 нм, что может указывать на формирование графитовых нанопластин на поверхности никелевой пленки (~20-30 графеновых слоев) [26]. Тем не менее получен положительный результат роста ультратонких графитовых пленок на пластинах размером до 5 мм.

В результате сравнительного изучения методов позиционирования графеновых структур на кремниевых подложках с использованием АСМ и дополнительных методик на основе рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии можно сделать следующие выводы. Нанесение графена из раствора при повышенном давлении позволяет регулировать плотность и размер формируемых на поверхности подложки нанопластин. Метод может использоваться при нанесении мультиграфеновых пленок, полученных как микромеханическим расщеплением, так и химическим расслоением. В обоих случаях получаются нанопластины графита толщиной несколько нанометров, латеральные размеры которых не превышают 10 мкм. Доля мультиграфеновых слоев достаточно мала и их латеральный размер не превышает нескольких сотен нанометров. Поэтому данный метод может применяться в лабораторных исследованиях. Более предпочтителен для интеграции технологический процесс – метод химического осаждения из газовой фазы углеродсодержащих соединений на катализитических подложках. Этот метод позволяет получать пленки графитизированного материала толщиной до нескольких нанометров на площадях до нескольких миллиметров.

Авторы выражают благодарность Смирнову Д.И. за обсуждение результатов дифрактометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Грант Президента РФ № 16.120.11.2514-МД и соглашение № 14.B37.21.0064) на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» на базе Национального исследовательского университета «МИЭТ» (ГК № 16.552.11.7061).

Литература

1. Lu W., Lieber C.M. Nanoelectronics from the bottom up // Nature. – 2007. – № 6. – Р. 841–850.
2. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al. // Nature. – 2005. – № 438. – Р. 197–200.
3. Geim K., Novoselov K.S. The rise of graphene // Nature Materials. – 2007. – № 6. – Р. 183–191.
4. Subrahmanyam K.S., Vivekchand S.R.C., Govindaraj A., Rao C.N.R. A study of graphenes prepared by different methods: characterization, properties and solubilization // J. Mater. Chem. – 2008. – № 18. – Р. 1517–1523.
5. Loh K.P., Bao Q., Ang P.K., Yang J. The chemistry of graphene // J. Mater. Chem. – 2010. – № 20. – Р. 2277–2289.
6. Park S., Ruoff R.S. Chemical methods for the production of graphenes // Nature Nanotechnology. – 2009. – № 4. – Р. 217–219.
7. Sutter P. W., Flege J.-L., Sutter E. A. Epitaxial graphene on ruthenium // Nature Materials. – 2008. – № 7. – Р. 406–411.
8. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes / S. Bae, H. Kim, Y. Lee et al. // Nature Nanotechnology. – 2010. – № 5. – Р. 574–578.
9. Liquid phase production of graphene by exfoliation of graphite in surfactant/water solutions / M. Lotya, Y. Hernandez, P.J. King et al. // J. Am. Chem. Soc. – 2009. – № 131. – Р. 3611.

10. *Green A.A., Hersam M.C.* Solution phase production of graphene with controlled thickness via density differentiation // *Nano Lett.* – 2009. – № 9. – P. 4031–4036.
11. *Liang Y., Wu D., Feng X.* Dispersion of Graphene Sheets in Organic Solvent Supported by Ionic Interactions // *Adv. Mater.* – 2009. – № 21. – P. 1679–1683.
12. High-concentration, surfactant-stabilized graphene dispersions / *M. Lotya, P.J. King, U. Khan et al.* // *ACS Nano*. – 2010. – № 4. – P. 3155–3162.
13. *Hummers W., Offeman R.* Preparation of graphitic oxide // *J. Am. Chem. Soc.* – 1958. – № 80. – P. 1339.
14. *Philipp K., Cintia C.* Raman spectroscopy of graphene in different dielectric solvents // *PSS.* – 2010. – № 7. – P. 2735–2738.
15. Large-Yield Preparation of High-Electronic-Quality Graphene by a Langmuir–Schaefer Approach / *R.Y.N. Gengler, A. Veligura, A. Enofadis et al.* // *Small.* – 2010. – № 6. – P. 35–39.
16. *Sunag H.H., Ju H.-M., Choi S.-H.* X-ray diffraction patterns of thermally-reduced graphenes // *J. of the Korean Physical Society.* – 2010. – № 6. – P. 1649–1652.
17. Synthesis of graphene-like nanosheets and their hydrogen adsorption capacity / *G. Srinivas, Y. Zhu, R. Piner et al.* // *Carbon.* – 2010. – № 48. – С. 630–635.
18. A pulsed neutron diffraction study of the topological defects presence in carbon nanohoms / *L. Hawelek, W. Wrzalik, A. Brodka et al.* // *Chemical Physics Letters.* – 2011. – № 502. – P. 87–91.
19. Сергеев Д.И., Фейкин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. – М.: Наука, 1986. – 280 с.
20. *Warren B.E., Bodenstain P.* The diffraction pattern of fine particle carbon blacks // *Acta Cryst.* – 1965. – № 18. – P. 282–286.
21. Structural studies of activated carbons by pulsed neutron diffraction / *J.C. Dore, M. Sliwinski, A. Burian et al.* // *J. of Physics: Condensed Matter.* – 1999. – № 11. – P. 9189.
22. Бобринецкий И., Неволин В., Самулин М. Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // Химическая технология. – 2007. – № 2. – С. 58–62.
23. *Park J.-U., Nam SungWoo, Lee M.-S., Lieber M.C.* Synthesis of monolithic graphene-graphite integrated electronics // *Nature Materials.* – 2012. – № 11. – P. 120–125.
24. Low-temperature graphene growth originating at crystalline facets of catalytic metal / *Y. Yamazaki, A. Isobayashi, M. Suzuki et al.* // *Appl. Phys. Express.* – 2012. – № 5. – P. 750.
25. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition / *A. Reina X. Jia, J. Ho et al.* // *Nano Lett.* – 2009. № 9. – P. 30–35.
26. Морфология графена на поверхностях монокристалла Ni. Экспериментальное и теоретическое исследование / Д. Усачев, А. Добротворский, А. Шикки и др. // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2009. – № 5. – С. 719–722.

Статья поступила
5 октября 2012 г.

Бобринецкий Иван Иванович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» (НОЦ ЗМНТ) МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия, нанотехнология, био- и наноэлектроника.

Комаров Иван Александрович – аспирант кафедры квантовой физики и наноэлектроники (КФН) МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия, нанотехнология, наноэлектроника.

Лаврентьев Кирилл Константинович – студент МИЭТ.

Левин Денис Дмитриевич – аспирант кафедры КФН МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия, ионно-лучевое травление, нанотехнология, наноэлектроника. E-mail: skaldd@yandex.ru.

Неволин Владимир Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры КФН, руководитель НОЦ ЗМНТ МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия и нанотехнология, наноэлектроника.

Самулин Михаил Максимович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НОЦ ЗМНТ МИЭТ. Область научных интересов: химическое осаждение материалов, нанотехнология и наноэлектроника.

Квачева Лариса Дмитриевна (1955–2012) – научный сотрудник Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмиянова РАН. Область научных интересов: химическая технология, графены, нанотрубки.

Черновородов Семен Павлович – кандидат физико-математических наук, генеральный директор ООО «Карбонлайт» (г. Москва). Область научных интересов: нанотехнологии углеродных материалов.

Бурлан Анджей – профессор кафедры биофизики и молекулярной физики Университета Силезии, Институт физики им. А. Челковски (Польша). Область научных интересов: нейтронография и рентгеноструктурный анализ, углеродные наноматериалы, керамика, аморфные материалы, молекулярно-динамические методы моделирования.

Наталья Возница – аспирант кафедры биофизики и молекулярной физики Института физики им. А. Челковски, Университет Силезии (Польша). Область научных интересов: нейтронография и рентгеноструктурный анализ, углеродные наноматериалы, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Лукас Хавелек – доктор, научный сотрудник кафедры биофизики и молекулярной физики Института физики им. А. Челковски, Университет Силезии, (Польша). Область научных интересов: нейтронография и рентгеноструктурный анализ, углеродные наноматериалы, керамика, аморфные материалы, молекулярно-динамические методы моделирования.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2013 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 800 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7231.

Тел./факс: 8-499-734-62-05. E-mail: magazine@miet.ru
<http://www.miet.ru/structure/s/894/e/12152/191>