

Физика

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 6, Number 304 (2015), 5 – 11

PRODUCTION OF CARBON FILMS, INCOMING GRAPHENE AND NANOTUBE BY MAGNETRON SPUTTERING IN THE VAPORS OF NAPHTHALENE

Baitimbetova B.A.¹, Ryabikin Yu.A.², Mansurov Z.A.³

¹ K.I.Satpayev Kazakh national technical university, Almaty, Kazakhstan

² Institute of physics and technology, Almaty, Kazakhstan

³ Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

baitim@physics.kz

Keywords: graphene, an aromatic hydrocarbon, carbon nanotubes and the line width.

Abstract. The article shows the procedure for the preparation of graphene and carbon nanotubes included in the carbon films formed in simple, organic, reactive magnetron sputtering of graphite in an atmosphere of sublime vapor aromatic hydrocarbons including naphthalene. The film structures were investigated by atomic force microscopy, X-ray and electron paramagnetic spectroscopy. Raman spectroscopy method detected peaks of graphene with the vibrational mode (2D-zone) at a frequency of $\sim 2728 \text{ cm}^{-1}$. The results of studies are confirmed formation of graphene and carbon nanotubes using atomic force microscopy. This investigation has shown that when studying the spectrum of the carbon film has a contribution to the EPR line from the nanotubes and graphene. This paper gives that the results of investigation obtained samples by this technique and discuss them.

УДК 539.216; 539.2; 538.91-405

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ВХОДЯЩИХ ГРАФЕНА И НАНОТРУБОК МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В ПАРАХ НАФТАЛИНА

Байтимбетова Б.А.¹, Рябикин Ю.А.², Мансуров З.А.³

¹ Казахский национальный технический университет им. К.И.Сатпаева, Алматы, Казахстан

² Физико-технический институт, Алматы, Казахстан

³ Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: графен, ароматический углеводород, углеродные нанотрубки и ширина линии.

Аннотация. В статье приведена методика получения графена и углеродных нанотрубок входящих в состав углеродных пленок, образующихся при простейшим, экологическим чистом, реактивном магнетронном распылении графита в атмосфере возгоняемых паров ароматических углеводородов, включая нафталин. Полученные пленочные структуры исследовались методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновской и электронно параметрической спектроскопии. Методом рамановской спектроскопии наблюдается пики графена с колебательной модой (2D-зона) при частоте $\sim 2728 \text{ см}^{-1}$. Результаты исследований с помощью атомно-силовой микроскопии, подтверждают образование графена и углеродных нанотрубок. При изучении спектра ЭПР углеродной пленки имеется вклад в ЭПР линии от нанотрубок и графена. Приводятся результаты исследований полученных образцов по этой методике и их обсуждения.

Введение. Нанотехнологии подарили человечеству новый взгляд на привычные материалы, основным из которых стал углерод. Уменьшение размеров элементов в микросхемах вызвало новый интерес к углеродным и углеводородным материалам со стороны электронной промышленности [1-3]. Графен самый прочный, легкий и электропроводящий материал углеродного соединения, позволяющих рассматривать его как

потенциально перспективный материал для наноэлектроники, оптоэлектроники и некоторых других применений [4-8].

Целью настоящей работы является получение графеновых структур в возгоняемых парах ароматических углеводородов и изучение их структурных особенностей методами электронной микроскопии и рамановской и электронной парамагнитной спектроскопии.

Изготовление образцов. Графеновых структуры, входящих в состав углеродных пленок получены при магнетронном распылении воздействие на возгоняемые пары ароматических углеводородов [9-10]. Особенностью предлагаемого метода получения графеновых структур является использование твердых ароматических углеводородов, например нафталина с близким сродством структур к графену. При наличии на дне камеры нескольких граммов нафталина давление в камере составляло $5 \cdot 10^{-3}$ Торр, после напуска аргона давление уменьшалось до $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. При этих условиях возбуждался магнетронный разряд при напряжении 200-300В и токе 150mA. В качестве подложек использовались стекло, кварц, алюминиевая пластина, нержавеющая сталь X18H10T и др. Напыление проводилось от 30 минут до трех часов. В результате формировались углеродные пленки, содержащие графеновые структуры, нанотрубки и др.

Результаты и их обсуждение

Для детального изучения морфологии поверхности применялся метод сканирующей зондовой атомно-силовой микроскопии (АСМ). В данной части работы получены изображения поверхности нержавеющей стали и тонких слоев углерода на ней.

На стеклянной подложке плотность упаковки трубок меньше в сравнении со сталью. Более благоприятные условия для образования нанотрубок происходит на подложке из нержавеющей стали в связи с наличием железа. Железо, как известно, служит катализатором для формирования углеродных наноструктур (рис. 1а,б)..

На рисунке (2а,б) видны графеновые ленты и углеродные нанотрубки образующие в процессе напыления пленки. Отчетливо видны углеродные трубки длиной около 80нм, диаметром от 80 нм и выше. Плотность упаковки нанотрубок на поверхности образца составляет около 4-5 нанотрубок на 1 мк. Микрографические изображений представляет собой лес нанотрубок строго вертикальными к поверхности подложки.

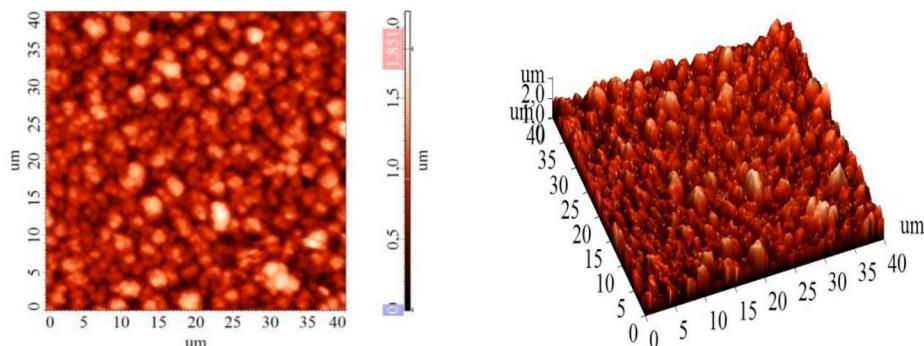


Рисунок 1- АСМ изображения поверхности углеродных пленок
на подложке из стекло

Эффективной методикой для определения наличия графеновых структур является спектроскопия комбинационного рассеяния света. Известно, что по форме и интенсивности пиков однозначно определяется количество слоев графена в образце, а также некоторые структурные его параметры [11-16].

Рамановские спектры получались с помощью MT-MDT Ntegra Spectra при комнатной температуре. Спектры возбуждались полупроводниковым лазером ($\lambda=473$ нм).

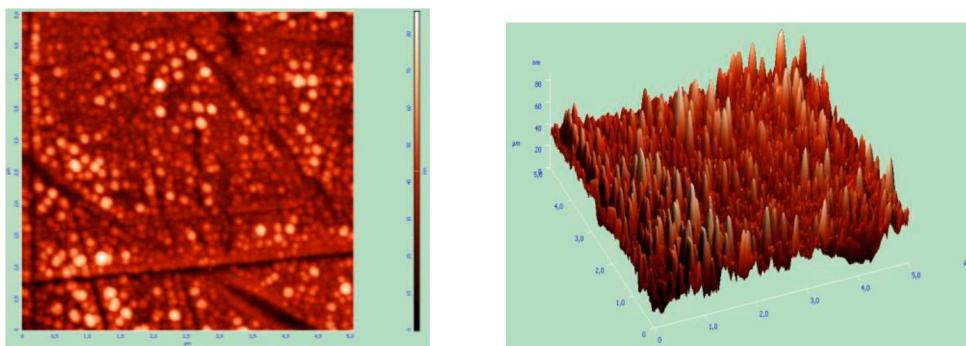


Рисунок 2- Снимок полученной в эксперименте пленки на АСМ на подложке из нержавеющей стали

Результаты рамановской спектроскопии изученных нами образцов приведены в таблице.

Таблица 1. Параметры рамановских спектров углеродных пленок, полученных в магнетронном разряде с нафталином

№	Подложки	D-линия		G-линия		2D-линия		I_{2D}/I_G
		$\omega, \text{ см}^{-1}$	Ширина на полувысоте, cm^{-1}	$\omega, \text{ см}^{-1}$	Ширина на полувысоте, cm^{-1}	$\omega, \text{ см}^{-1}$	Ширина на полувысоте, cm^{-1}	
1	Стекло	1341	80	1580	32	2797	250	-
2	Алюминиевая пластина	1332	76	1579	28	2795	279	0,57
3	Нержавеющая сталь X18H10T	1363	13	1579	15	2728	50	0,68

Из таблицы видно, что на спектре наблюдаются G полосы в области 1350 и 1593 cm^{-1} , которые обусловлены углеродными нанотрубками. Полоса D в области 2500-2900 cm^{-1} обусловлена лентами графена. Как следует из рисунка 2 а, б длина графеновых лент больше 5 мк. Можно ожидать, что такие длинные ленты найдут широкое применение в наноэлектронике. Анализ рамановских спектров углеродных пленок показывает, что интенсивность линий графеновых структур существенным образом зависит от природы подложки. Спектры углеродной пленки на стекле и алюминии имеют сравнительно слабую интенсивность по сравнению с большой интенсивностью на подложке из нержавеющей стали. Это связано с тем, что в составе нержавеющей стали имеется железо, которое играет роль катализатора образования графеновых структур.

Методом рентгеноструктурного анализа исследованы кристаллическая структура и фазовый состав углеродных пленок, полученных методом магнетронного реактивного распыления графита в возгоняемых парах ароматических углеводородов на подложках стекло и нержавеющей стали. Дифракционные данные (углы (2θ), соответствующие рентгеновским линиям, интенсивности (I) линий, полуширины рентгеновского пика на высоте -FWHM (ε), рентгенометрические картотеки ASTM (American society for testing and materials), межплоскостные расстояния (d), соответствующие рентгеновской линии углеродных пленок на подложках из стекла, нержавеющей стали X18H10T и чистой подложки без пленки из нержавеющей стали X18H10T приведены в таблице 2.

На рентгенограмме от углеродной пленки на подложке из стекла наблюдается дифракционные линии соответствующие рентгеноаморфной фазе. Одно из них с максимумом в области $2\theta=25^\circ$ относится к подложке рентгеноаморфному стеклу. Большое по величине интенсивности гало, принадлежащее стеклу, получено из-за очень тонкого слоя осажденной рентгеноаморфной фазы. Два других с максимумами в области углов $2\theta=43^\circ$ и $2\theta=63^\circ$ относятся к рентгеноаморфной фазе, которая присутствует в образце в значительном количестве. При другом условии (время напыления 1 час) эксперимента на подложке стекло наблюдается две

дифракционные линии очень слабой интенсивности с межплоскостными расстояниями ($d=2,1822\text{\AA}$ и $d=2,0581\text{\AA}$), которые можно отнести к углероду гексагональной сингонии. На подложке из нержавеющей стали наблюдаются три дифракционные максимумы соответствующие структуре железа (таблица 2) приведена рентгенограмма углеродных пленок на подложке из нержавеющей стали X18H10T. На рентгенограмме отмечено появление пиков связанных со структурой осаждённой углеродной пленки в виде соединений с железом (Fe_5C_2). Углерод покрывают поверхность всего образца. Этот факт свидетельствует о содержании углеродных образований в углеродной пленке на подложке из нержавеющей стали.

Таблица 2 Рентгенометрические данные исследуемых образцов

№	Объект исследований	Угол 2θ , град.	Межплоскостное расстояние $d, \text{\AA}$	Интенсивность $I, \%$	Ширина на полувысоте $\epsilon, 2\theta$	Индексы Миллера	Предполагаемые фазы	Рентгенометрическая картотека ASTM
1	Стекло (а)	25					Аморфное стекло	
2		43						
3		63					Аморфная фаза	
1	Стекло (б)	41,340	2,1822	45,8	-	1 0 0	C	19-268
2		43,960	2,0581	46,8	-	0 0 2	C	19-268
1	Нержавеющая сталь X18H10T	44,694	2,02593	100	0,36	1 1 0	Fe	
2		65,065	1,43237	32,42	0,36	2 0 0	Fe	01-071-4410
3		82,368	1,16981	35,59	0,36	2 1 1	Fe	01-071-4410
1	Углеродная пленка из нержавеющей стали X18H10T	43,502	2,07865	100	0,36	0 2 1 1 0 1	Fe_5C_2 C	01-089-6158, 01-075-2078
2		44,761	2,02305	13,48	0,36	1 0 1 5 1 0	C Fe_5C_2	01-089-6158, 01-089-8487
3		50,588	1,80285	40,64	0,36	1 0 2	C Fe_5C_2	01-089-6158, 01-089-8487
4		74,385	1,27428	59,56	0,36	-4 2 3	Fe_5C_2	01-089-6158
5		110,93	0,93506	16,39	0,36	2 0 5	C	01-075-2078

Использование метода ЭПР при изучении углеродных пленок позволило идентифицировать оптимальные условия образования графеновых структур, получаемых по магнетронной технологии в атмосфере возгоняемых паров ароматических углеводородов.

В наших экспериментах при изучении интенсивности сигнала ЭПР неспаренных электронов от времени напыления наблюдается изменение интенсивности при некоторых условиях.

Здесь приведены некоторые результаты изучения углеродных пленок методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Измерения проводились при комнатной температуре в атмосфере воздуха на спектрометре ЭПР, работающем в 3-х см. диапазоне длин волн. Максимальная чувствительность спектрометра составляла $5 \cdot 10^9$ спин/образец при 100 кГц модуляции магнитного поля.

В качестве реперного образца использовались ионы Mn^{2+} в MgO . Сигнал от образца записывался между 3-й и 4-й компонентой шестилинейчатого спектра от Mn^{2+} . Образец размером 3x5 мм помещался в ампулу из специального стекла, не дающего сигнала ЭПР. При выполнении резонансных условий путем изменения магнитного поля в определенных пределах появлялся сигнал ЭПР, который детектировался и подавался для распечатки спектра ЭПР на принтер.

Изучение спектра ЭПР образца, проводилось в зависимости от угла между плоскостью подложки относительно направления магнитного поля путем вращения образца. Спектры последовательно снимались при фиксированных углах вращения: 0° , 30° , 60° и 90° . Было установлено, что ширина линии, амплитуда сигнала ЭПР и g-фактор линии меняется при этом незначительно. Это свидетельствует о том, что полученная углеродная пленка в основном имеет

аморфную природу.

Обычно углеродные пленки имеют довольно сложный структурный состав. В основном в него входят графены и графеноподобные образования, нанотрубки различных параметров, графиты разнообразной организации и их окислы.

При изучении спектра ЭПР образца было установлено, что он (рисунок 4) в основном состоит из одной довольно интенсивной линии с g-фактором равным $g=2,00414 \div 2,00416$. Такое значение g-фактора спектра ЭПР характерно для графена.

При анализе линии ЭПР было установлено, что на прямой, соединяющей экстремумы спектра имеется небольшой изгиб, обусловленный вкладом в суммарную линию линии с другим g-фактором. В зависимости от угла вращения g-фактор этой линии изменяется от 2,00214 до 2,00244. Такие величины g-фактора характерны для некоторых форм графита, а их зависимость от угла вращения свидетельствует о некоторой степени кристалличности графита, входящего в состав углеродной пленки. Количество графита в пленке не велико и составляет 7-10% от количества графена.

В углеродной пленке при небольшом времени напыления из анализа ЭПР спектра (рисунок 5) установлено, что помимо графена образуются еще углеродные нанотрубки ($g=2,0037$). Причем они образуются примерно в равных количествах с графеном. Графитовые состояния при этом составляют порядка 10% от их общего количества.

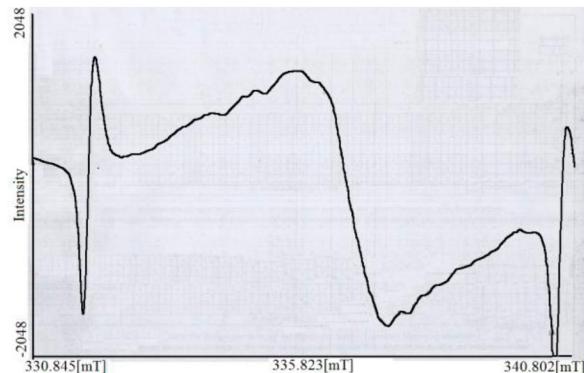


Рисунок 4 – Спектр ЭПР углеродных пленок, полученных в магнетронном разряде с нафталином на подложке из стекла.
Время напыления 2 часа 40 минут

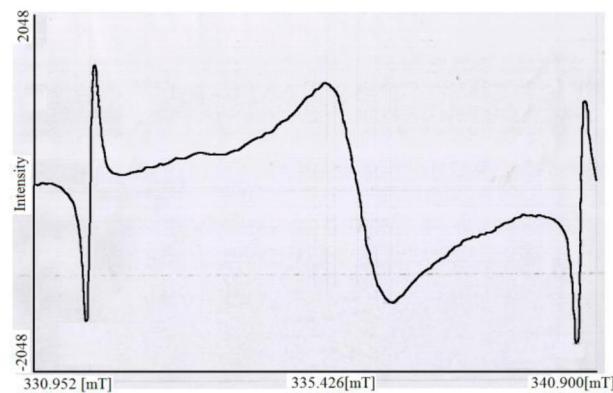


Рисунок 5 – Спектр ЭПР углеродных пленок, полученных в магнетронном разряде с нафталином на подложке из стекла.
Время напыления 2 часа

Ширина линии ЭПР углеродной пленки на стекле в этом случае получается больше ($\Delta H=16,4\text{Э}$), чем в первом случае приготовления углеродной пленки. Возможно, это уширение объясняется диполь-дипольным взаимодействием между графенами и нанотрубками. Амплитуда сигнала от углеродной пленки, нанесенной на алюминий, в 3 раза меньше чем на стекле, а ширина линии составляет 8 и 3Э. На спектре наблюдаются изгибы, позволяющие выделить вклады в суммарную линию от графенов, нанотрубок и графитов в соотношении 2:3:1,4. Спектр ЭПР от

углеродной пленки на подложке из никеля обнаружить не удалось на фоне сильного сигнала ферромагнитного резонанса (ФМР) от никеля.

Заключение. Впервые получены графеновые структуры методом реактивного магнетронного распыления в парах ароматического твердого углеводорода нафталина. Методом рамановской спектроскопии наблюдаются пики графена с колебательной модой (2D-зона) при частоте $\sim 2728 \text{ cm}^{-1}$ на подложке из нержавеющей стали. Методом рентгенофазовой спектроскопии показано о содержании углеродных образований в углеродной пленке на подложке нержавеющей стали. Результаты исследований с помощью атомно-силовой микроскопии подтверждают образование графеновых структур и углеродных нанотрубок. При изучении спектра ЭПР углеродной пленки на подложке из стекла было установлено, что пленка состоит из одной довольно интенсивной линии с g -фактором равным $g=2,00414 \div 2,00416$, характерным для графена и имеется ЭПР линии от нанотрубок. Методом рентгенофазового анализа отмечено появление пиков связанных со структурой осаждённой углеродной пленки в виде соединений с железом (Fe_5C_2).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. -2001.-Т.70. -№10. -С. 934-973.
- [2] Kroto H. W. Symmetry, space, starts and C_{60} (Nobel lecture) // Rev. Mod. Phys. -1997. -V. 69. -P.703-730.
- [3] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. - 1991. - V.319. -P. 354-356.
- [4] Ткачев С.В., Буслеева Е.Ю., Губин С.П. Графен – новый углеродный наноматериал //Неорганические материалы, 2011, том 47, № 1, с. 5–14
- [5] Елецкий А.В., Искандирова И.М., Книжник А.А. Графен: методы получения и теплофизические свойства // УФН, - 2011, -№3, Т.181, - С.233-268
- [6] Пат.2355625 Российской Федерации, МПК⁵¹ B8 2B 3/00, C23C. Получение углеродных нанотрубок методом магнетронного распыления на постоянном токе Антоненко С.В. и Мальцев С.Н.;- №2007127228/02; опубл. 16.07.2007. 5
- [7] Каптанов П.В., Смирнов Б.М., Хипpler Р. Магнетронная плазма и нанотехнология //Успехи физических наук. - 2007. -Т.177,-№5. -С.473-510. №2.
- [8] Сорокин П.Б., Чернозатонский Л.А. Полупроводниковыеnanoструктуры на основе графена //УФН, -2013.
- [9] Байтимбетова Б.А., Верменичев Б.М. Способ получения углеродных nanoструктур путем магнетронного реактивного распыления графита в возгоняемых парах ароматических углеводородов //Патент 2013/0803.1
- [10] Байтимбетова Б.А., Верменичев Б.М., Абдикасова А. Особенности формирования углеродных nanoструктур в атмосфере ароматических углеводородов методом магнетронного распыления графита. Вестник КазНТУ. -2013. - №5(99) -С.94-102.
- [11] Liu Yu., Pan C., Wang J. Raman spectra of carbon nanotubes and nanofibers prepared by ethanol flames //J. of Materials Science. -2004. -№39. -P.1091-1094.
- [12] Eklund P.C., Holden J.M., Jishi R.A. Vibrational modes of carbon nanotubes; spectroscopy and theory // Carbon. -1995. №33. -P.959-972.
- [13] Nemanich R.J., Solin S.A. First- and second-order Raman scattering from finite-size crystals of graphite // Phys. Rev. - 1979. -B20. V2. -P. 392-401.
- [14] Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects // Solid State Communications. -2007. -V.143.-P.47-57.
- [15] Ni Zh., Wang Y., Yu T., Shen Z. Raman Spectroscopy and Imaging of Graphene //Nano Res. -2008. -№1. -P.273-291.
- [16] Mohiuddin T.M.G., Lombardo A., Nair, R.R., Bonett, A., Savini G., Jalil, R., Bonini, N., Basko D.M., Gallois C. Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation // Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics), -2009. -Vol. 79, № 20, -P 205433.
- [17] Ferrari A. C., J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri and et. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers // Physical review letters. -2006. -V.97, 187401-4.

REFERENCES

- [1] Rakov E.G. Khimia i primenie uglerodnykh nanotrubok // Uspekhi khimi -2001.-T.70. -№10. -S 934-973.
- [2] Kroto H. W. Symmetry, space, starts and C_{60} (Nobel lecture) // Rev. Mod. Phys. -1997. -V. 69. -P.703-730.
- [3] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. - 1991. - V.319. -P. 354-356.
- [4] Tkachev C.V., Buslaeva E.Yu., Gubin S.P. Graphene- – novyi uglerodi nanomaterial //Neorganicheskie materialy, 2011, - Tom 47, № 1, -S. 5–14
- [5] Eletskii A. V. Iskandirova I.M., Knijnik A. A. Graphene:metody poluchenya I teplofizicheskie svoistva //UFN, -2011, - №3, Т.181, - С.233-268
- [6] Antonenko C.V., Maltzev C.N. Poluchenie uglerodnih nanotrubok methodom magnetronnogo raspilenya na postoyannom toke //Pribiri i tekhnika eksperimenta. -2005.
- [7] Kashtanov P.V., Smirnov B.M., Xippler R. Magnetronnaya plasma i nanotecnologiya //Uspexi physischeskix nauk. -

2007. -Т.177,-№5. -S.473-510

[8] Sorokyn P.B., Chernosatonskii L.A. Poluprovodnykovye nanostructury na osnove graphena //UFN, -2013.- .№2. C.150-152.

[9] Baitimbetova B.A., Vermenichev B.M. Sposob polucheniya uglerodnih nanostructur putem magnetronnogo reaktivnogo raspileniya graphite v vozdgonyaiemih parah uglevodorodov //Patent. 2013/0803.1

[10] Байтимбетова Б.А., Верменичев Б.М., Абдикасова А. Особенности формирования углеродных наноструктур в атмосфере ароматических углеводородов методом магнетронного распыления графита. Вестник КазНТУ. –2013. - №5(99) –С.94-102.

[11] Liu Yu., Pan C., Wang J. Raman spectra of carbon nanotubes and nanofibers prepared by ethanol flames //J. of Materials Science. -2004. -№39. -P.1091-1094.

[12] Eklud P.C., Holden J.M., Jishi R.A. Vibrational modes of carbon nanotubes; spectroscopy and theory // Carbon. -1995. №33. -P.959-972.

[13] Nemanich R.J., Solin S.A. First- and second-order Raman scattering from finite-size crystals of graphite // Phys. Rev. - 1979. -B20. V2. -P. 392-401.

[14] Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects // Solid State Communications. -2007. -V.143.-P.47-57.

[15] Ni Zh., Wang Y., Yu T., Shen Z. Raman Spectroscopy and Imaging of Graphene //Nano Res. -2008. -№1. -P.273-291.

[16] Mohiuddin T.M.G., Lombardo A., Nair, R.R., Bonett, A., Savini G., Jalil, R., Bonini, N., Basko D.M., Gallois C. Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation // Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics), -2009, -Vol. 79, № 20, -P 205433.

[17] Ferrari A. C., J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri and et. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers // Physical review letters. -2006. -V.97, 187401-4.

НАФТАЛИН БҮЙНДА МАГНЕТРОНДЫ ТОЗАНДАНДЫРУ ӘДІСІМЕН ГРАФЕНИ МЕН НАНОТУТІКШЕСІ БАР ҚӨМІРТЕКІ ПЛЕНКАЛАРДЫ АЛУ

Байтімбетова Б.А.¹, Рябикин Ю.А² , Мансуров З.А.³

¹К.И.Сәтбаев атындағы ұлттық техникалық университет, Алматы, Казахстан

²Физика-техникалық институт, Алматы, Казахстан

³Жану проблемалары институты, Алматы, Казахстан

Тірек сөздер: - графен, ароматикалық қемірсүтектер, қеміртекті нанотутікше, графен және еннің қалындығы.

Аннотация. Жұмыста ароматикалық қемірсүтектер буымен айналдыру кезіндегі магнетронды реактивті графитті тозандану жолымен қеміртекті наноқұрылымдарды алу тәсілімен қеміртекті пленкалар (қабыршақты) құрылым, яғни қеміртекті нанотутікше мен графен құрылымдарын алу әдісі қарастырылған. Алғынан пленкалар құрылым Раман, электронды параметрлік резонанс, рентгенфазды спектроскоптарымен және атомдық-құштік микромокпымен зерттелінді. Графенде алу әдісі мен оның құрылымдық ерекшеліктерінің зерттеу корытындысы жарықтың комбинациялық шашырау әдісі, атомдық күштік микроскоп және электронды параметрлік резонанс спектроскопымен зерттелген. Раман спектроскопы әдісімен графеннің тербелмелі модасы (2D-зона) ~2728 см⁻¹ жүлпігінде байқалды. Атомдық құштік микроскоп қемегімен графен мен қеміртекті нанотутікшениң түзілгені дәлелденді. ЭПР спектрін зерттеу барысында үлгіде графен мен қеміртекті нанотутікшениң бар екені анықталды. Осы әдістермен алыған зерттеу нәтижелері мен оларды талқылау берілді.

Поступила 27.10.2015 г.