

УДК 543.421/424+544.18+544.16+543.42

СТРУКТУРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ *sp*-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ НА РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

© 2020 г. И. П. Иваненко^{а, *}, С. В. Краснощеков^б, А. В. Павликов^а, С. В. Дворяк^б,
А. А. Дудин^с, В. В. Хвостов^а

^аФизический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^бХимический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^сИнститут нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ivanenko@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 02.02.2020 г.

После доработки 15.03.2020 г.

Принята к публикации 20.03.2020 г.

Методами туннельной, инфракрасной, рентгеновской фотоэлектронной, оже-спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии исследованы структура и проводящие свойства углеродных пленок, синтезированных на различных металлических подложках (Al, Mo, Re, Ta, Ag, Cu и Pt). Изучено влияние материала подложки на свойства углеродной пленки. На основе неэмпирических квантово-механических расчетов проведен анализ экспериментальных колебательных спектров. Сделан вывод о зависимости работы выхода материала подложки от длины цепочечного фрагмента.

Ключевые слова: *sp*-углеродные пленки, спектроскопия комбинационного рассеяния света, полиин, кумулен, туннельная спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, оже-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, квантово-механические расчеты.

DOI: 10.31857/S1028096020120146

ВВЕДЕНИЕ

Атомы углерода могут находиться в трех гибридных состояниях — sp^1 , sp^2 и sp^3 , что позволяет создавать углеродные материалы с различной шириной запрещенной зоны. К примеру, графен с sp^2 -типом гибридизации обладает нулевой шириной запрещенной зоны и максимальной подвижностью свободных носителей в отличие от алмаза с sp^3 -типом гибридизации. Тонкие *sp*-углеродные пленки обладают уникальными свойствами, которые находят широкое применение в различных современных областях науки: в электронике, медицине и других [1, 2].

Хотя технологию синтеза углеродных пленок изучали с конца 60-х годов, идентификация структуры синтезированных пленок остается сложной задачей. В связи с тем, что углеродные материалы дают возможность создавать структуры как с высокой проводимостью (графен), так и с низкой (алмаз), технология получения подобных структур требует изменения параметров синтеза. В последнее десятилетие зафиксирован значитель-

ный прогресс в технических условиях синтеза, цель которых — создание структур с заданными свойствами. В результате был получен ряд известных углеродных материалов, таких как графен, карбин, углеродные нанотрубки. К сожалению, число исследовательских работ, направленных на изучение и анализ влияния роли материала подложки на рост углеродной пленки, явно недостаточно.

В настоящей работе в качестве объекта исследования были синтезированы углеродные пленки с *sp*-фрагментами методом импульсно-плазменного ионно-стимулированного осаждения при комнатной температуре [3, 4] на ряде металлических подложек (Al, Mo, Re, Ta, Ag, Cu и Pt) в одном технологическом цикле. Для исследования свойств этих углеродных пленок использован широкий набор методов анализа, который включает в себя туннельную спектроскопию, комбинационное рассеяние света (КР), ИК-спектроскопию, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС), оже-спектроскопию, атомно-силовую микроскопию (АСМ), просвечивающую

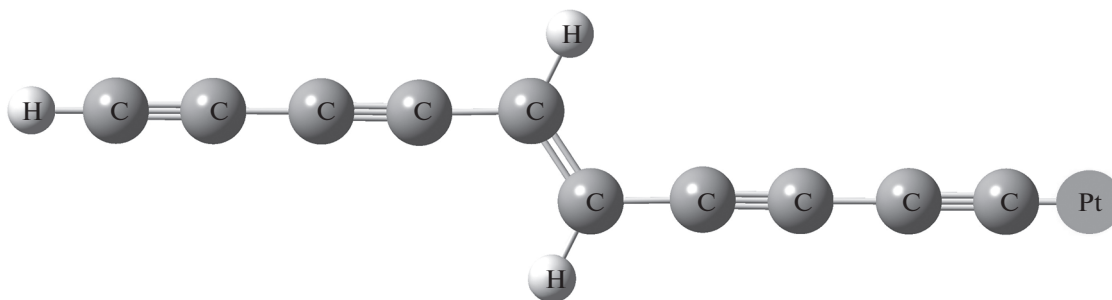


Рис. 1. Молекулярный скелет с замещенными атомами Pt.

электронную микроскопию (ПЭМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), а также теоретическое квантово-химическое моделирование колебательных спектров. Условия синтеза и стабильности исследуемых цепочечных углеродных структур, а также особенности их строения были изучены ранее [5, 6]. В настоящей работе проведена оптимизация условий синтеза с учетом материала подложки, необходимая для получения структур с заданными свойствами. В опубликованных работах на протяжении последних 40 лет уделялось мало внимания роли подложки, на которой синтезировали углеродные пленки, а также ее влиянию на процесс роста пленок. Поэтому исследование свойств пленок, полученных на металлических подложках с различной работой выхода, остается актуальной задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Углеродные пленки, содержащие *sp*-фрагменты, были синтезированы согласно методике [5, 6] на ряде металлических подложек: Al, Mo, Re, Ta, Ag, Cu и Pt. Пленки были получены в рамках одного технологического цикла. Применяемая ме-

тодика синтеза основана на использовании низкотемпературной ионно-плазменной технологии [4]: в данном процессе выявляют фазовые превращения в конденсирующихся углеродных пленках при одновременном их облучении ионами инертного газа аргона. Особенностью методики является напыление синтезируемой пленки на подложку из Pt на основе данных о формировании карбиновой цепочки в присутствии атомов Pt, что было недавно представлено Кано и соавторами [7].

Для идентификации типа химической связи между атомами углерода, а также отнесения полученной пленки к полииновому или кумуленовому типу была использована КР-спектроскопия как неразрушающая методика анализа, дающая подробную информацию о синтезированной структуре. На рис. 1 представлен один из молекулярных скелетов. Весь исследованный набор состоит из фрагментов полиинового $(-C\equiv C-)_n$ (шесть и десять атомов углерода), а также кумуленового $(=C=C=)_n$ (восемь и 12 атомов углерода) типа связи. Расчет проведен с использованием одиночного изгиба между углеродными линейными фрагментами. Помимо вариации типа связи между атомами углерода меняли расположение атомов замещения, в данном случае атомов платины. Рассчитанный колебательный спектр для такой структуры представлен на рис. 2. При моделировании концевых групп рассматривали атомы водорода и платины. Влияние концевых групп на вид спектров углеродных материалов хорошо описан в [8–12].

Геометрию структуры оптимизировали с использованием программного пакета Gaussian 09 [13]. Дальнейший расчет нормальных колебаний и моделирование спектров комбинационного рассеяния проводили с помощью программы [14–18]. Расчет структуры и гармонического силового поля осуществляли квантово-механическим методом с использованием скорректированного по Беке обменного функционала и кор-

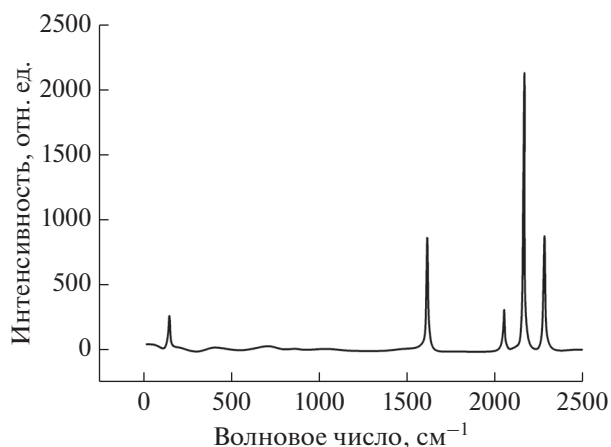


Рис. 2. Расчетный спектр молекулы с атомами Pt.

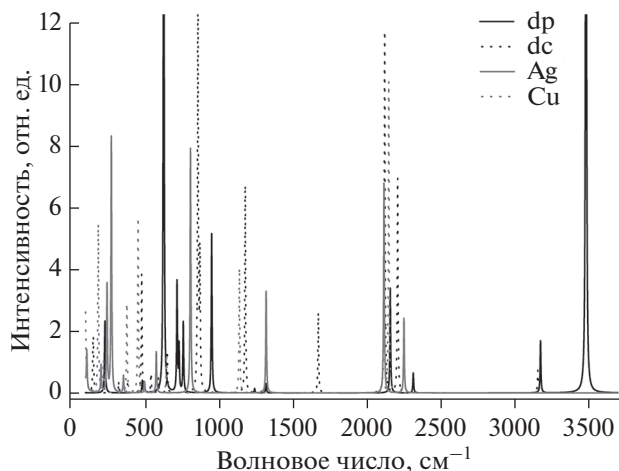


Рис. 3. Сравнительные ИК-спектры, рассчитанные с использованием атомов углерода и водорода: dp – полииновая структура с изгибом; dc – кумуленовая структура с изгибом; Ag и Cu – часть атомов замещены атомами серебра и меди соответственно.

реляционного функционала Ли–Ян–Парра с тремя параметрами (B3LYP) [19–22] и базисным набором 6-31+G(d,p) для моделирования концевых групп с водородом и платиной согласно [23]. Для идентификации примесей были рассчитаны ИК-спектры с использованием двойного гармонического приближения. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Они показали, что положения линий в рассчитанных спектрах значительно различаются в интервале $1000\text{--}1800\text{ см}^{-1}$.

Следующим этапом анализа было исследование транспортных характеристик. С этой целью были получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) с помощью туннельного микроскопа [24]

(рис. 4). Как видно из приведенных ВАХ, осцилляции проводимости наблюдаются только для структуры металл–углеродная пленка–зонд. Кроме того, следует отметить, что ВАХ пленок на подложках, например, из Pt и Al, отличаются шириной запрещенной зоны [25, 26]. Осцилляции дифференциальной проводимости в углеродных и полупроводниковых структурах также наблюдались в [27–29]. Полученные расчетные длины линейных фрагментов для всех материалов подложки согласно [25, 30] представлены в предпоследнем столбце табл. 1. При среднем расстоянии 0.132 нм между атомами углерода в кумуленовой цепочке число атомов в линейном фрагменте $N = 17$.

Исследование методом туннельной спектроскопии позволяет получить информацию об электронной структуре гетеропереходов. Существуют два объяснения характера ВАХ синтезированных структур согласно двум типам сопротивлений: первое связано со структурой пленки, а второе – с туннельным барьером. Таким образом, измеряемая проводимость складывается из трех компонент: проводимости на границе раздела подложка–углеродная пленка, проводимости углеродной пленки и туннельной проводимости от поверхности пленки до зонда микроскопа. Поскольку проводимость тонкой углеродной пленки велика за счет малой толщины, лимитирующими факторами являются первая или третья составляющие. На границе раздела металл–углерод возникает потенциальный барьер, который определяется работой выхода металла подложки и уровнем Ферми углеродной пленки. Следовательно, для определения преобладающего механизма эмиссии необходимо построить ВАХ в координатах Шоттки и Фаулера–Нордгейма, что и продемонстрировано на рис. 5. Указанные ВАХ

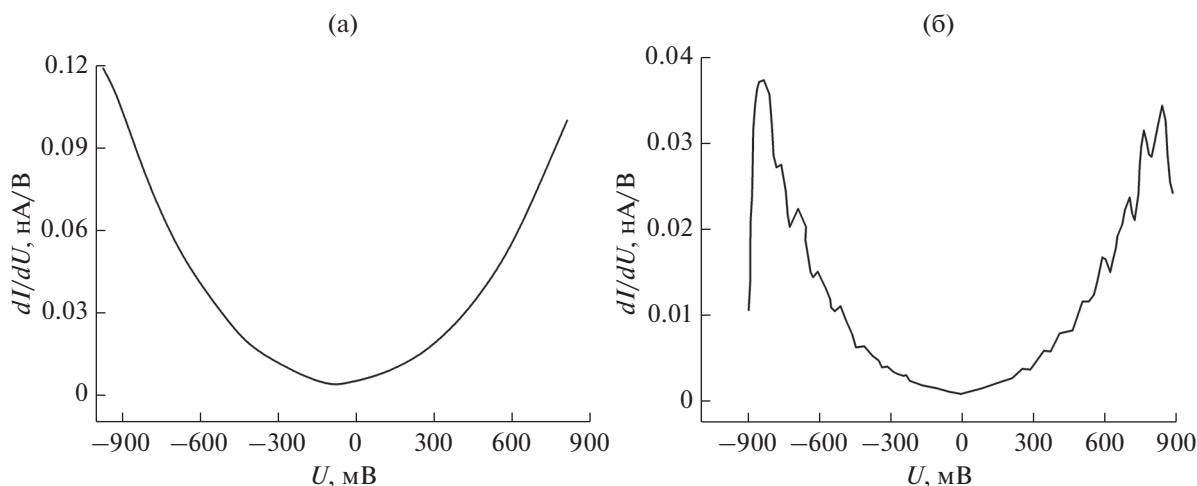


Рис. 4. Дифференциальные ВАХ: а – на участке подслоя Pt без пленки; б – пленок на подслое Pt.

Таблица 1. Расчетные параметры

Металл подложки	Средние значения периода осцилляций, В	Длина волны де Бройля λ_D , нм	Длина линейного фрагмента d , нм	Количество атомов
Pt	0.08	4.40	2.20	17

были построены для всех образцов (Al, Mo, Re, Ta, Ag, Cu) из [25, 26]. Как видно из рис. 5, во всех случаях наблюдается надбарьерная эмиссия с учетом эффекта Шоттки. Кроме того, ни на одной из подложек нет спрямления в координатах Фаулера–Нордгейма, что свидетельствует о незначительности вклада туннельного эффекта. Заметим, что все зависимости построены в одном диапазоне приложенных напряжений. Отсюда следует вывод, что для проводимости исследуемых пленок определяющим механизмом является инжекция электронов из металлической подложки. Отсутствие областей со спрямлением в координатах Фаулера–Нордгейма, т.е. областей, в которых будет оказывать влияние механизм туннельной проводимости, можно заключить, что других механизмов, влияющих на общую проводимость гетероструктуры, нет.

Единственное отличие ВАХ образцов – диапазон напряжений, в котором наблюдается четкая линейная зависимость в координатах Шоттки. Для пленок, напыленных на Al, Mo и Re, наблюдается спрямление во всем диапазоне приложенных напряжений, а для Cu – в диапазоне от 0.5 до 1.8 В, для Pt – в диапазоне от 170 до 700 мВ, для Ta –

от 320 до 1300 мВ. Одним из факторов, объясняющих данную зависимость, является образование промежуточного слоя между подложкой и углеродной пленкой. Когда толщина слоя минимальна, контакт можно рассматривать как классический идеальный, ВАХ линейна. Если же толщина переходного слоя велика, ВАХ отклоняется от линейной зависимости, что и наблюдается для трех подложек, описанных выше.

Для выяснения основных факторов, влияющих на инжекционные свойства границы металлическая подложка–углеродная пленка, необходимо проанализировать атомную и электронную структуру материалов подложки и растущей пленки. Необходимо заметить, что на границе раздела образуются химические связи между атомами металлической подложки и растущей пленки. По обзорным РФЭ-спектрам, полученным на Kratos Ultra DLD (рис. 6), был определен химический состав синтезированных пленок. Основные химические элементы, содержащиеся в пленке, – это С, О, N. Содержание углерода колебалось в пределах от 84.85 до 87.97 мас. %, кислорода – от 9.08 до 10.85 мас. %, а азота – от 1.04 до 2.95 мас. %, а азота – от 1.04 до 2.95 мас. %, а азота – от 1.04 до 2.95 мас. %.

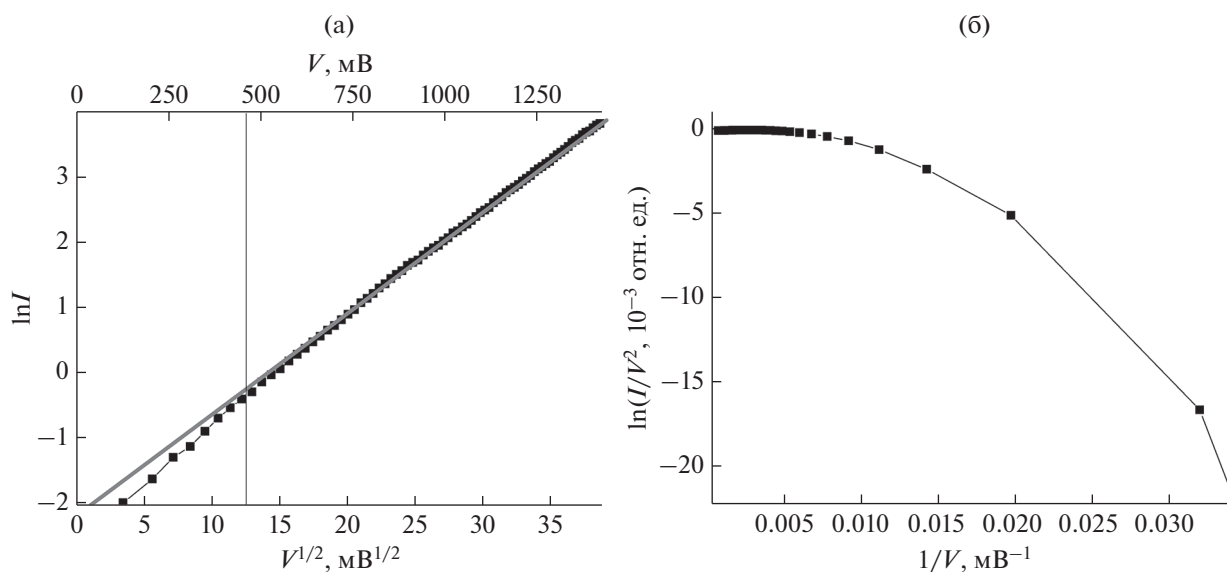


Рис. 5. ВАХ, построенные в координатах: а – Шоттки; б – Фаулера–Нордгейма на Re подложке.

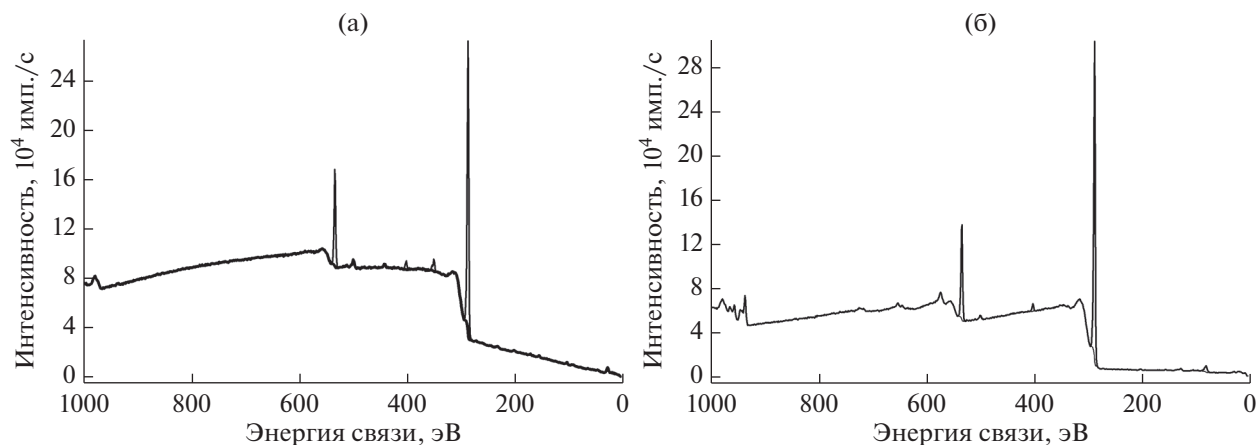


Рис. 6. Обзорные РФЭ-спектры пленок толщиной 100 нм, полученных на подложке: а – Та; б – Си.

что более наглядно представлено в виде графика на рис. 7.

Для обработки и интерпретации экспериментальных спектров был использован программный пакет CasaXPS [31], с помощью которого была проведена обработка данных, включающая в себя удаление фона неупругих потерь методом Ширли [32] и разложение на возможные гауссовы составляющие $1s$ -линии углерода с дальнейшей модификацией под контур экспериментального спектра. Такой подход дает возможность заняться интерпретацией полученных особенностей РФЭ-спектров (рис. 8). Разложение $1s$ -линии углерода в методе РФЭС связано с наличием химических связей С–О, С–N, С–Н и со структурой углеродного материала. Химические связи и структурные эффекты приводят к смещению $1s$ -пика как в сторону больших, так и меньших значений энергии. Минимальный сдвиг по энергии связан с изменением типа гибридизации sp^2 , sp^3 , что дает отличие на долю электронвольта [33, 34]. Следующий сдвиг связан с наличием водорода – наблюдается смещение на 0.4–0.6 эВ [35]. Поскольку в пленке присутствуют N и O, необходимо исследовать смещение положения пика, связанное с ними (рис. 9). Видно, что концентрация кислорода не изменяется, следовательно, его концентрация не может влиять на структуру пленки. На рис. 10 изображена зависимость площадей под пиками, отнесенными к sp^1 -, sp^2 - и sp^3 -типу гибридизации, и взято их соотношение.

На следующем этапе был проведен анализ оже-спектров (рис. 11). Спектры были нормированы по площади, что позволяет судить о количестве электронов в выбранном энергетическом диапазоне. Данные о высокоориентированном пиролитическом графите (ВОПГ) и синтетиче-

ском алмазе были получены на том же спектрометре, что и спектры синтезированных пленок, что дает возможность исключить приборные ошибки. Диапазону энергии от 0 до 20 эВ соответствует π -подзона в графитоподобных структурах. Из рис. 11 видно, что углеродная пленка, напыленная на Та поверхность, в указанной области значений энергии не имеет никаких особенностей. Этот результат хорошо соответствует данным РФЭС (рис. 6). Отсутствие π -состояний в диапазоне до 20 эВ можно объяснить либо их отсутствием (π -связей для sp^3 -формы углерода), либо их наличием в линейной структуре, для которой π -подзона смещается в область высоких энергий [36].

Синтезированные пленки на всех подложках отличаются от графита отсутствием π -подзоны в области до 20 эВ. Низкоэнергетический край

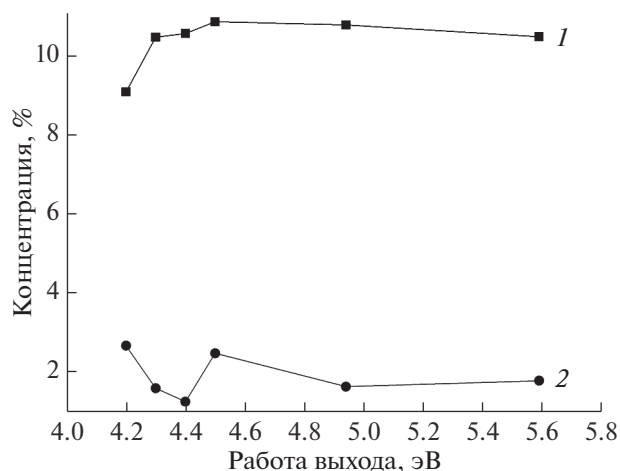


Рис. 7. Зависимость концентрации азота (1) и кислорода (2) от работы выхода материала подложки для пленок толщиной 100 нм.

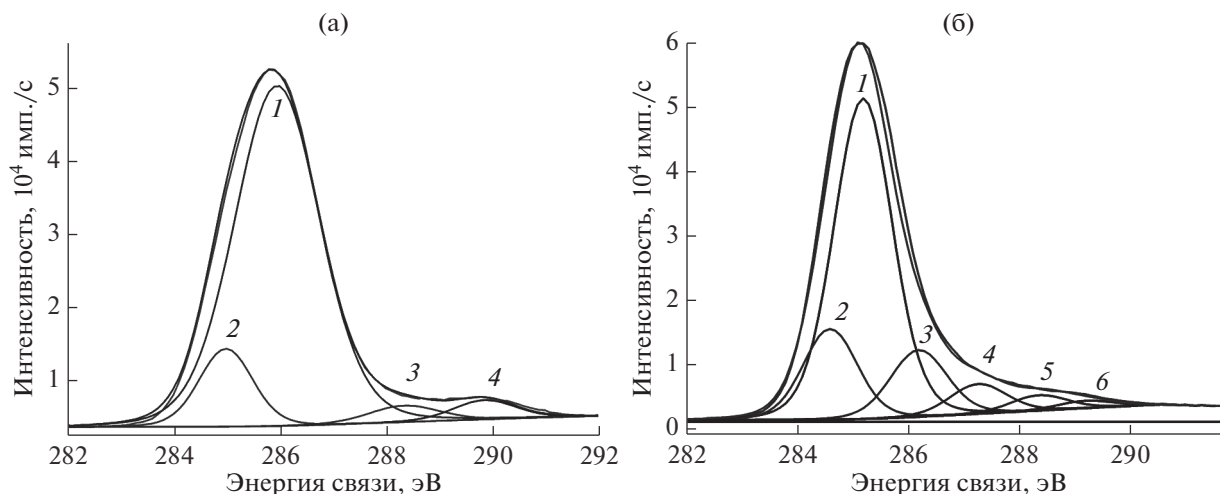


Рис. 8. Разложение на гауссовы составляющие C1s-пика для пленок, напыленных на подложки Ta (а) и Mo (б) с различной работой выхода: а – 5.0; б – 4.2 эВ.

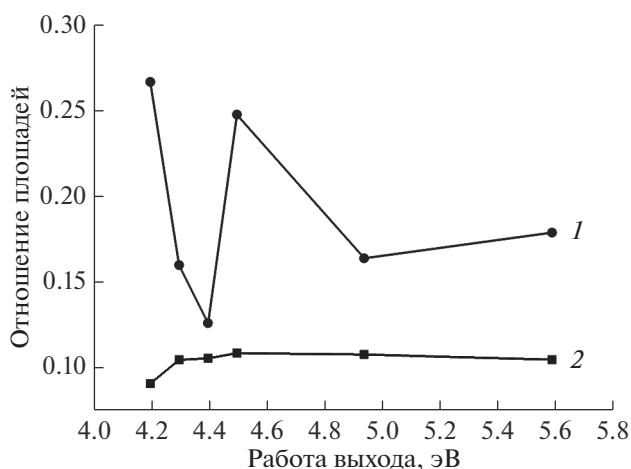


Рис. 9. Отношение концентрации азота (1) и кислорода (2) к концентрации углерода.

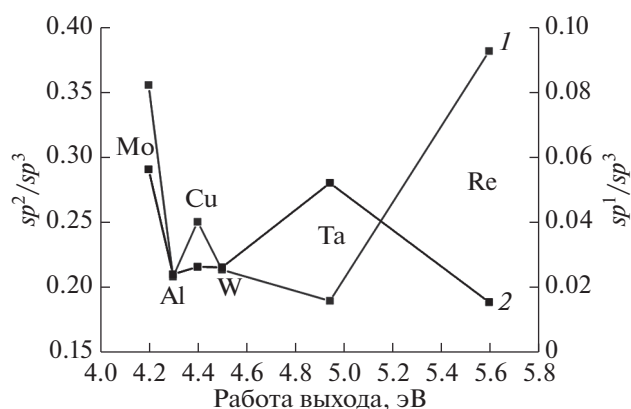


Рис. 10. Зависимость отношения площадей под пиками sp^1 (1), sp^2 (2) к площади под пиком sp^3 -фазы углерода для подложек с разной работой выхода.

оже-спектров пленок совпадает с оже-спектром синтетического алмаза. Данный факт указывает на то, что в полученных пленках π -подзона, связанная с sp^2 -связями электронов, отсутствует. Это может быть объяснено либо отсутствием π -электронов в полученных пленках (алмазоподобные пленки), либо наличием одномерной структуры, в которой π -подзона совпадает с σ -зоной с sp^2 - и sp^3 -связями. Анализ рис. 11 показывает, что второй вариант предпочтительнее.

Для интерпретации оже-спектров [37] было проведено их разбиение на π - и σ -электронные состояния. Все спектры построены относительно уровня вакуума. Смещение положения π -электронной подзоны в область более высоких энергий (табл. 2) означает образование sp -гибридизированных состояний [38]. Пики оже-спектров нельзя однозначно соотнести с типом гибридизации, но положение π -подзоны может дать информацию о структуре связи в синтезированном материале. Смещение π -подзоны в область высоких энергий может означать для цепочечных фрагментов, что π -подзона для тройных связей более жесткая, что и обуславливает это смещение. Указанное смещение связано с уменьшением длины связи между атомами углерода, что дает смещение в высокоэнергетическую область.

Данные РСА были собраны при пошаговом сканировании с использованием дифрактометра Rigaku D/MAX-RC, оснащенного графитовым анализатором кристалла и сцинтилляционным счетчиком (θ - 2θ -сканирование, геометрия Брэгга-Брентано, CuK_{α} -излучение, диапазон 2θ 15° – 110°) (рис. 12). Из рисунка видно, что на Ta подложке не наблюдаются пики в области идентифи-

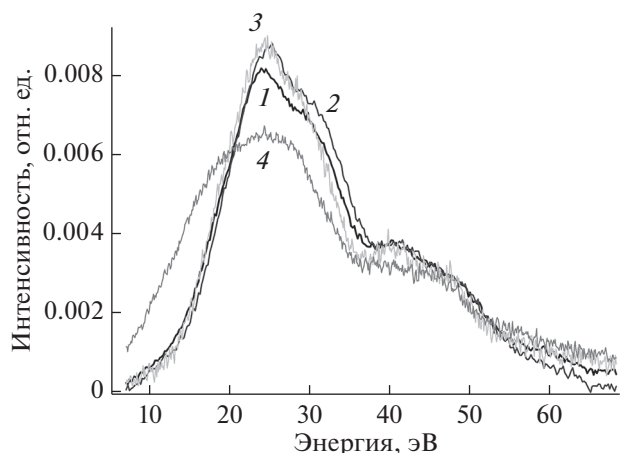


Рис. 11. Оже-спектр углеродной пленки на подложках: Cu (1); Ta (2); синтетического алмаза (3); ВОПГ (4).

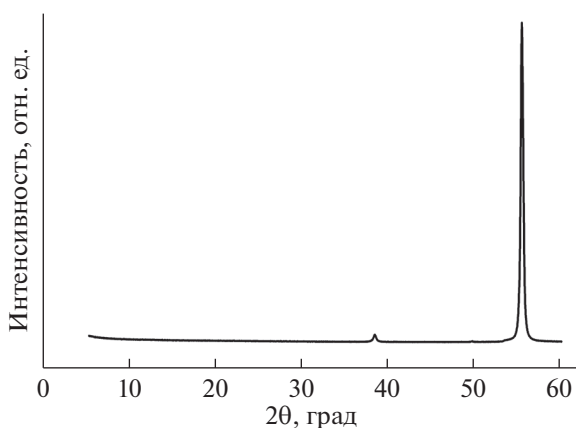


Рис. 12. Дифрактограмма пленки, полученной на Ta подложке.

кации цепочечных структур [39], что связано с образованием самых коротких линейных фрагментов при синтезе. Данные фрагменты не могут дать вклад в дифрактограмму. На остальных же

дифрактограммах наблюдаются рефлексы в области образования цепочечных структур.

Наиболее отличающаяся структура пленки, полученной на Cu подложке, была дополнительно проанализирована методом ПЭМ (микроскоп JEM 2100F фирмы JEOL, 200 кВ, диаметр селективной апертуры 100 мкм). Для этого с использованием двулучевого микроскопа FEI Gelios G4X была подготовлена ламель (рис. 13), которую поместили на медную сетку для ПЭМ. Далее было получено изображение по толщине среза синтезированной структуры. На ПЭМ-изображении (рис. 14, вставка) отчетливо видны цепочки атомов углерода, образовавшиеся вблизи граничного слоя подложка–углеродная пленка. Высота этого слоя составляет порядка 5–10 нм, после слоя наблюдается рост аморфной структуры, что соответствует данным [6]. Расстояние между углеродными цепочками по толщине среза ~282 пм. Это может быть связано с образованием гексагональной структуры [6], расстояние между соседними цепочками составляет ~4 Å. По данным электронной спектроскопии структуру поверхностного слоя полученных пленок наилучшим образом можно описать с использованием кластерной модели с sp^1 -связями между кластерами.

ВЫВОДЫ

Из результатов измерений и расчетов можно сделать ряд выводов. Напыление в условиях ионной стимуляции ведет к образованию цепочечных структур в пленках. Исследование методами КР и электронной спектроскопии показали, что материал подложки влияет на структуру растущей пленки. Обнаружено, что медная подложка обеспечивает наибольшую длину линейного фрагмента. Максимальное содержание sp -связей получено в случае танталовой подложки. Рост цепочечных

Таблица 2. Данные, полученные из анализа оже-спектров

Образец	Положение				Площадь			
	Основной	1	2	3	Основной	1	2	3
Ta	33.96	26.90	41.31	50.28	10.46	1.39	2.64	5.35
W	32.06	24.70	39.41	47.20	11.70	1.46	2.05	6.65
Mo	32.82	24.99	41.63	48.97	13.68	1.03	2.51	2.57
Cu	32.98	25.64	40.49	48.48	10.57	1.10	3.33	4.84
Re	33.15	25.30	40.90	48.50	13.60	0.96	2.41	3.70
Al	33.50	24.20	42.30	49.30	14.70	0.70	1.90	2.52
Алмаз	33.55	26.11	41.48	50.00	10.34	1.70	3.70	3.40
ВОПГ	34.14	23.40	50.00	56.50	20.00	2.60	2.50	2.92



Рис. 13. Изображение подготовленной ламели до перенесения на сетку для ПЭМ.

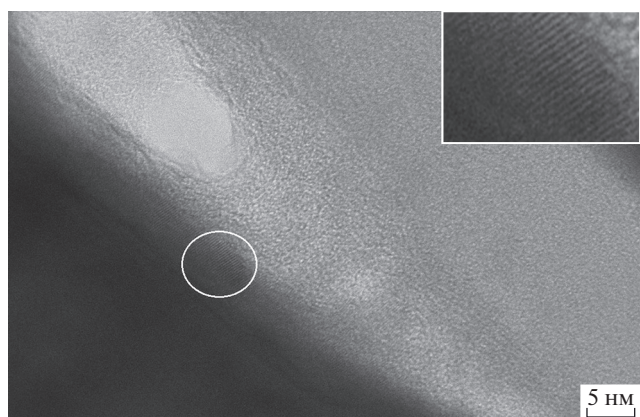


Рис. 14. ПЭМ-изображение синтезированной углеродной пленки. На вставке – увеличенное изображение выделенной области.

ческой структуры происходит в граничной области металл-углеродная пленка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доценту Гайнуллину И.К. и научному сотруднику Левину Э.Е. за участие в анализе и обсуждении результатов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.Ф., Гусева М.Б., Корнеева Ю.В. и др. // Новые углеродные материалы: получение, исследование, перспективы применения. М.: Наука, 2013. С. 5.
2. Александров А.Ф., Гусева М.Б., Новиков Н.Д. и др. // Новые углеродные материалы: получение, исследование,

перспективы применения. М.: Наука, 2013. С. 10.

3. Babaev V.G., Guseva M.B., Novikov N.D. et al. // Polyynes: Synthesis, Properties, and Applications / Cataldo F. Ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. P. 219.
4. Patent US6355350B1 (USA). Tetracarbon / Tetra Consult Ltd. Guseva M.B., Novikov N.D., Babaev V.G. et al. // 12.03.2002. 14 p.
5. Бабаев В.Г., Гусева М.Б., Савченко Н.Ф. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2004. № 3. С. 16.
6. Khvostov V.V., Ivanenko I.P., Streletskiy O.A. et al. // JETP Lett. 2013. V. 97. P. 231. <https://doi.org/10.1134/S0021364013040097>
7. Kano E., Takeguchi M., Fujita J., Hashimoto A. // Carbon. 2014. V. 80. P. 382.
8. Milani A., Tommasini M., Russo V. et al. // Beilstein J. Nanotechnol. 2015. V. 6. P. 480. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.49>
9. Korobova J.G., Bazhanov D.I. // JETP Lett. 2011. V. 93. P. 652. <https://doi.org/10.1134/S0021364011110063>
10. Мельниченко В.М., Сладков А.М., Никулин Ж.Н. // Успехи химии. 1982. № 5. С. 736.
11. Casari C.S., Russo V., Li Bassi A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 013111. <https://doi.org/10.1063/1.2430676>
12. Tarakeshwar P., Buseck P.R., Kroto H.W. // J. Phys. Chem. Lett. 2016. V. 7. P. 1675. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.6b00671>
13. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian'03, Revision B.03. Pittsburgh, 2003.
14. Краснощекоев С.В., Степанов Н.Ф. // Ж. Физ. химии. 2008. Т. 82. № 4. С. 690701.
15. Krasnoshchekov S.V., Isayeva E.V., Stepanov N.F. // J. Phys. Chem. A. 2012. V. 116. № 14. P. 3691.
16. Krasnoshchekov S.V., Craig N.C., Voopalachandran P. et al. // J. Phys. Chem. 2015. V. 119. № 43. P. 10706.
17. Panchenko Y.N., Krasnoshchiokov Y.N., Bock C.W. // J. Comput. Chem. 1988. V. 9. № 5. P. 443.
18. Краснощекоев С.В., Нечаев В.В., Исаева Е.В., Степанов Н.Ф. // Вестн. МГУ. Сер. Химия. 2010. Т. 51. №1. С. 27.
19. Becke A.D. // J. Chem. Phys. 1993. V. 98. P. 5648.
20. Lee C., Yang W., Parr R.G. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. P. 785.
21. Neese F. // WIREs Comput. Mol. Sci. 2012. V. 2. P. 73.
22. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian 09, revision A.1, Gaussian, Inc.: Wallingford, CT, 2009.
23. <https://bse.pnl.gov/bse/portal>.
24. <http://www.nanoscopy.ru>.
25. Иваненко И.П., Краснощекоев С.В., Павликов А.В. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 6. С. 768.
26. Иваненко И.П., Краснощекоев С.В., Павликов А.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 7. С. 54.

27. Maslova N.S., Oreshkin S.I., Panov V.I., Savinov S.V. // JETP Lett. 1998. V. 67. № 2. P. 146.
28. Maslova N.S., Moiseev Yu.N., Savinov S.V. // Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1993. V. 58. № 7. P. 524.
29. Звонарева Т.К., Иванов-Омский В.И., Розанов В.В., Шаронова Л.В. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 12. С. 1460.
30. Хвостов В.В., Иваненко И.П., Стрелецкий О.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 4. С. 231.
31. <http://www.casaxps.com>.
32. Shirley D.A. // Phys. Rev. B. 1972. V. 5. P. 4709.
33. Titantah J.T., Lamoen D. // Carbon. 2005. V. 43. P. 1311.
34. Haerle R., Riedo E., Pasquarello A., Baldereschi A. // Phys. Rev. B. 2001. V. 65. P. 045101.
35. Dementjev A.P., de Graaf A., van de Sanden M.C.M. et al. // Diamond Related Mater. 2000. V. 9. P. 1904.
36. Kudryavtsev Yu.P., Evsyukov S.E., Guseva M.B. et al. // Russ. Chem. Bull. 1993. V. 42. № 3. P. 399.
37. Remarker D.E. Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy / Briggs D., Grant J.T. Ed. Chichester–Manchester: IMPublications–SurfaceSpectra, 2003. 900 p.
38. Korshak V.V., Kudryavtsev Yu.P., Khvostov V.V. et al. // Carbon. 1987. V. 25. Iss. 6. P. 735.
39. Wang M.F.K., Lu H., Yanga Y., Nuttb S. // J. Mater. Chem. 2009. V. 19. P. 7098.

Structural and Transport Features of *sp*-Carbon Films Synthesized by an Impulse Plasma Deposition on Various Metal Substrates

I. P. Ivanenko^{1,*}, S. V. Krasnoshekov², A. V. Pavlikov¹, S. V. Dvoryak², A. A. Dudin³, V. V. Khvostov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, 119991 Russia

³Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: ivanenko@physics.msu.ru

Using the methods of tunneling, infrared, X-ray photoelectron, Auger spectroscopies, Raman spectroscopy, X-ray diffraction, transmission electron microscopy, we studied the structure and conductive properties of carbon films synthesized on various metal substrates (Al, Mo, Re, Ta, Ag, Cu and Pt). The effect of the substrate material on the properties of the carbon film was studied. Based on non-empirical quantum-mechanical calculations, an analysis of experimental vibrational spectra is carried out. The work function of the substrate material was concluded to depend on the length of the chain fragment.

Keywords: *sp*-carbon films, Raman spectroscopy, polyine, cumulen, tunneling spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, Auger spectroscopy, X-ray diffraction analysis, transmission electron microscopy, quantum-mechanical calculations.