

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
И ДИФФУЗИЯ

УДК 546.26+ 539.216.2

ОЦЕНКА РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ  
ПЛОТНОСТИ ИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТОНКИХ  
УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ РФЭС

© 2025 г. Т. С. Картапова<sup>а</sup>, \*, Ф. З. Гильмутдинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ул. Т. Барамзиной, 34, Ижевск, 426067 Россия

\*e-mail: tskartapova@udman.ru

Поступила в редакцию 30.07.2024 г.

После доработки 20.09.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Тонкие углеродные пленки напыляли на поверхность армко-железа методом магнетронного распыления углеродной мишени в среде рабочего газа Ar<sup>+</sup>. Затем углеродные пленки подвергали имплантации ионов аргона и азота. Для уточнения содержания различным образом гибридизированных (то есть находящихся в различном химическом состоянии) атомов углерода в осажденном материале применена методика анализа спектров потерь энергии фотоэлектронов. Показано, что сателлитная структура C1s-спектров при совместном анализе с РФЭС оставного уровня C1s подтверждает формирование разупорядоченной структуры углеродной пленки и позволяет определять массовую плотность тонких углеродных пленок.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, углерод, ионная имплантация, РФЭС, массовая плотность

**DOI:** 10.31857/S0015323025020051, **EDN:** AYZBLE

ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия потерь энергии электронов является одним из наиболее информативных методов изучения электронного строения углеродных материалов. Еще в ранних работах, например [1], было показано, что сателлитная структура, сопровождающая рентгенофотоэлектронный (РФЭ) пик C1s, несет в себе важную информацию о материале. Было установлено, что пик плазмонных потерь  $\pi+\sigma$  графита на расстоянии 27 эВ от основного пика C1s позволяет определить массовую плотность графита. Учитывая связь энергии плазмона и массовой плотности вещества, было определено, что плотность фуллерена составляет 2.03 г/см<sup>3</sup>, что существенно отличается от значений, ранее полученных рентгеноструктурными методами [2]. Исследованию спектров потерь энергии электронов посвящено значительное количество работ, в том числе [3–5]. В ряде работ были получены значения энергий пиков плазмонных потерь  $E_p$  в спектрах углеродных материалов. В частности, было определено положение пиков потерь для различных форм углерода (графит, алмаз, аморфный углерод, стеклоуглерод) [6, 7], при этом часть экспериментальных данных была получена

методами EELS (Electron energy loss spectroscopy) при бомбардировке поверхностей моноэнергетическим электронным потоком. В обзорной работе [8] подробно показано, что из анализа спектров плазмонных потерь можно определить как массовую, так и атомную плотность углеродных материалов, в частности тонких пленок аморфного углерода.

Значительную информацию можно получить из анализа формы фотоэлектронных спектров оставных уровней, оже-электронных спектров и спектров валентных полос. В работе [9] еще в 1977 г. были указаны причины асимметрии РФЭС-пиков. В работах [10–13] детально обсуждена природа уширения O1s, Si2p-спектров и сделан вывод о том, что основными факторами являются фононное уширение, приводящее к температурно-зависимому симметричному гауссову размытию контура, и вибронное расщепление возбужденного состояния, впервые отмеченное в [14], которое приводит к температурно-независимому асимметричному уширению контура. Поскольку плотность заряда на атоме влияет на энергию связи электронов оставного уровня, любые изменения в химическом окружении, включая угловые координации и незначительные

изменения в межатомных расстояниях, непосредственно проявляются в РФЭ-спектре в виде химических сдвигов пиков [15, 16]. Состав, структура и свойства углеродных пленок на протяжении многих лет остаются предметом многочисленных исследований (см., например, [17, 18])

Особенностью метода РФЭС является минимальная (3–5 нм) глубина анализируемого слоя, определяемая длиной свободного пробега электронов в веществе [19, 20], поэтому этот метод может предоставлять информацию о самых верхних слоях углеродных пленок. Несмотря на длительную историю применения, проблемы интерпретации результатов РФЭС, в том числе проблемы анализа C1s-спектров и их сателлитов, остаются [21].

Влияние радиационных дефектов на электронную структуру материалов по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии рассмотрено в работах [22, 23]. Сдвиги РФЭ-спектров по шкале энергий связи ( $E_{\text{св}}$ ) авторы связывают с изменением средней степени ковалентности межатомных связей и эффективных зарядов атомов, а уширение – с разупорядочением химической и радиационной природы. Имеются РФЭС-исследования радиационного повреждения ряда природных ортосиликатов, в частности оливина, в которых сообщается о радиационно-индуцированном восстановлении металлического железа [24, 25]. В целом совместное применение методов спектроскопии комбинационного рассеяния света (спектроскопии КРС) и РФЭ-спектроскопии для анализа атомной и электронной структуры радиационно-поврежденных материалов является перспективным.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является качественная оценка разупорядочения и определение массовой плотности сверхтонких поверхностных слоев магнетронно напыленных углеродных пленок на основе РФЭС-данных до и после имплантации ионов аргона и азота с энергией 30 кэВ при дозах  $D=10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Углеродные пленки толщиной  $30\pm4$  нм осаждали на поверхность армко-железа методом магнетронного напыления на установке “Катод-1М” в среде аргона при постоянном токе [26, 27]. В качестве мишени использовали графитовый лист толщиной 2 мм. По данным энергодисперсионного микроанализа на электронном микроскопе Quattro S концентрация примеси кислорода в мишени составляла  $\sim 0.3$  ат.%

Для очистки поверхности подложек от адсорбированных загрязнений и обеспечения лучшей

адгезии напыляемого покрытия температуру подложек поддерживали на уровне 200°C. Толщина пленок проверена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на зондовом микроскопе SOLVER 47 Pro в контактном режиме с использованием зонда CSG10.

Полученные углеродные пленки подвергали бомбардировке однозарядными ионами  $\text{Ar}^+$  или  $\text{N}^+$  с энергией  $E = 30$  кэВ и дозой  $D = 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> в установке ионной имплантации на базе УСУ-4 с импульсным источником ионов “ПИОН-1М”. Имплантацию проводили в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульсов 1 мс и частотой следования импульсов 100 Гц. Плотность потока ионов в импульсе составляла  $3.086 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>. Имплантация ионов проведена нормально к поверхности. Исследуемые образцы углеродных пленок располагали в центральной части пятна имплантации, что обеспечивало равномерную плотность потока ионов на пленку. Нужно отметить, что проективный пробег ионов азота в углеродном материале значительно превышает толщину магнетронно напыленной углеродной пленки.

Исследования сверхтонких (1–3 нм) поверхностных слоев углеродных пленок методом РФЭС проведены на электронном спектрометре SPECS с энергоанализатором Phoibos-150 с использованием немонохроматизированного MgK $\alpha$  излучения ( $h\nu=1253.6$  эВ). Спектры получены при постоянной энергии пропускания анализатора 15 эВ с использованием линзовой моды Large Area. Анализируемая область поверхности представляет собой пятно диаметром 5 мм, т. е. полученные результаты относятся к средней величине по этой области. Глубина анализа определяется средней длиной свободного пробега электронов и для углеродных материалов может составлять единицы нанометров. РФЭС-спектры измерены с шагом сканирования 0.2 эВ. Экспериментальные спектры обработаны с использованием программного обеспечения CasaXPS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Массовая плотность известных форм углерода на примере ранее аттестованных образцов порошков наноалмаза статического синтеза (НАСС, частицы 100 нм) [28, 29] и высокоориентированного пиролитического графита (ВО-ПГ), используемого для настройки сканирующих зондовых микроскопов типа SOLVER, была определена с использованием краткого аналитического выражения [8]:

$$\rho = 0.00312 \cdot (\varepsilon_p)^2. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_p$  равно расстоянию пика потеря  $\pi+\sigma$  от максимума основного пика C1s (в электронвольтах,

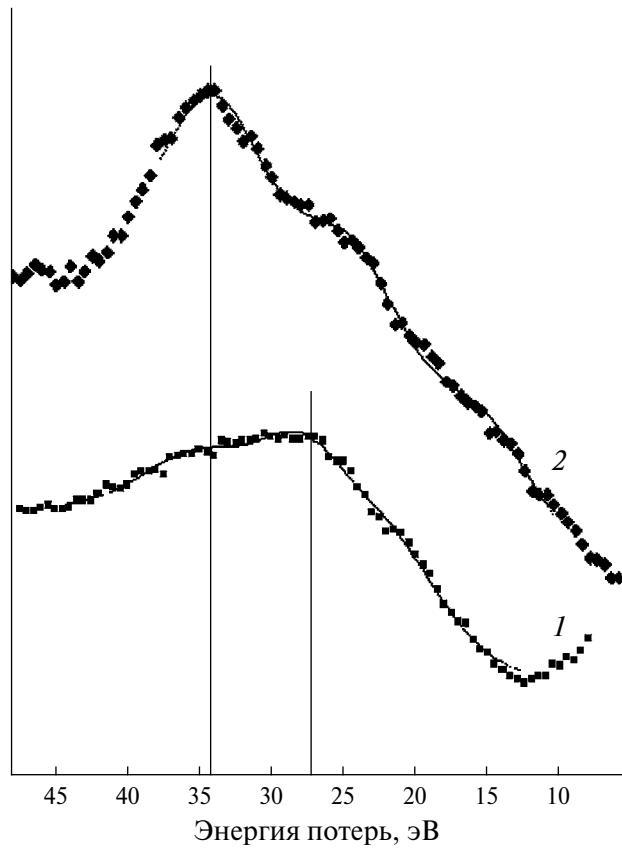


Рис. 1. Спектры потерь энергии фотоэлектронов: 1 – ВОПГ, 2 – НАСС.

рис. 1). Из данных РФЭС (рис. 2а) были получены значения массовой плотности  $3.62 \text{ г}/\text{см}^3$  ( $\epsilon_p = 34.05 \text{ эВ}$ ) для НАСС и  $2.27 \text{ г}/\text{см}^3$  ( $\epsilon_p = 27.0 \text{ эВ}$ ) для ВОПГ. Это показало удовлетворительное согласие значений массовой плотности углеродных материалов, определенных методом РФЭС, с известными справочными данными [30, 31] ( $3.513$  и  $2.26 \text{ г}/\text{см}^3$ , соответственно). Особенности спектра энергетических потерь НАСС в области меньших энергий потерь возможно связать с наличием нарушенного сверхтонкого поверхностного слоя порошинок НАСС, образующихся в процессе получения порошков и дающих вклад в общий рентгеноэлектронный спектр.

В дальнейшем эти методические результаты были использованы для характеристизации тонких ионно-модифицированных магнетронных пленок на поверхности железа.

Результаты РФЭС- и КРС-спектроскопии показывают, что магнетронно напыленные пленки, во-первых, являются сильно разупорядоченными. Об этом говорит существенное уширение с асимметризацией оставшегося РФЭС-пика  $C1s$ , в скобках указаны значения полной ширины на половине высоты (ПШПВ) (рис. 2а) и уширение

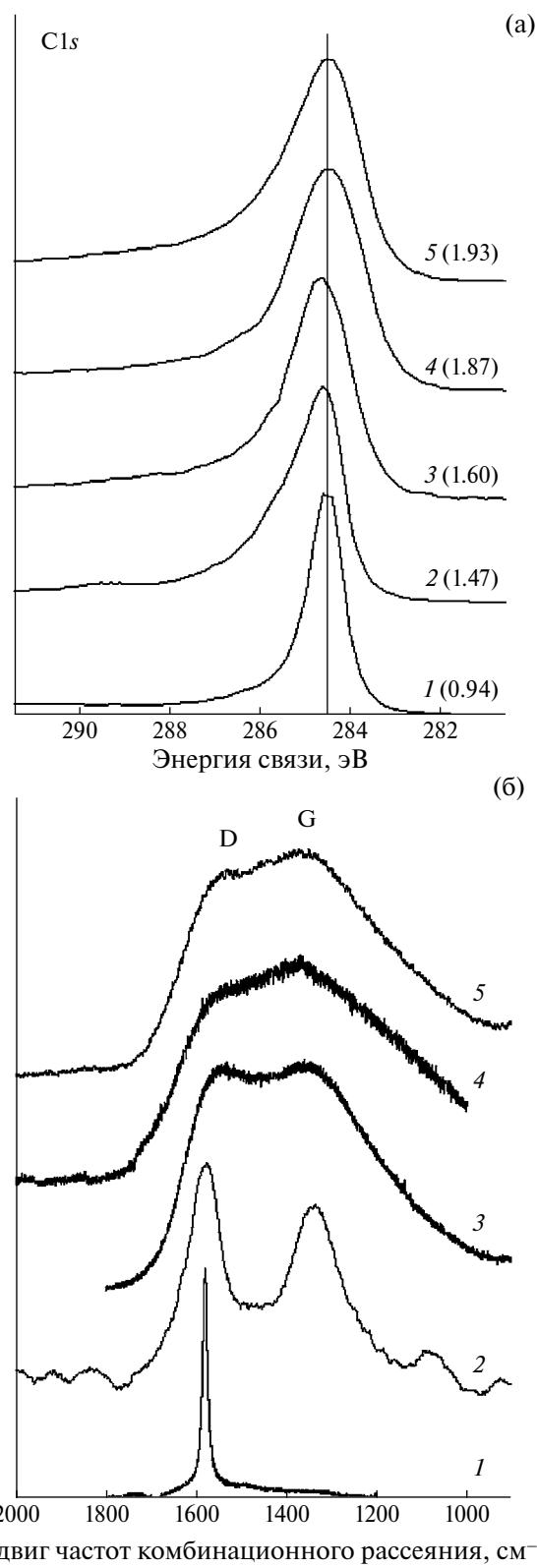


Рис. 2. РФЭ  $C1s$ -спектры (а) и спектры КРС (б): 1 – ВОПГ; 2 – поликристаллический графит (мишень); 3 – углеродная пленка на железе; 4 – углеродная пленка на железе после имплантации ионов аргона; 5 – углеродная пленка на железе после имплантации ионов азота. В скобках указаны величины ПШПВ.

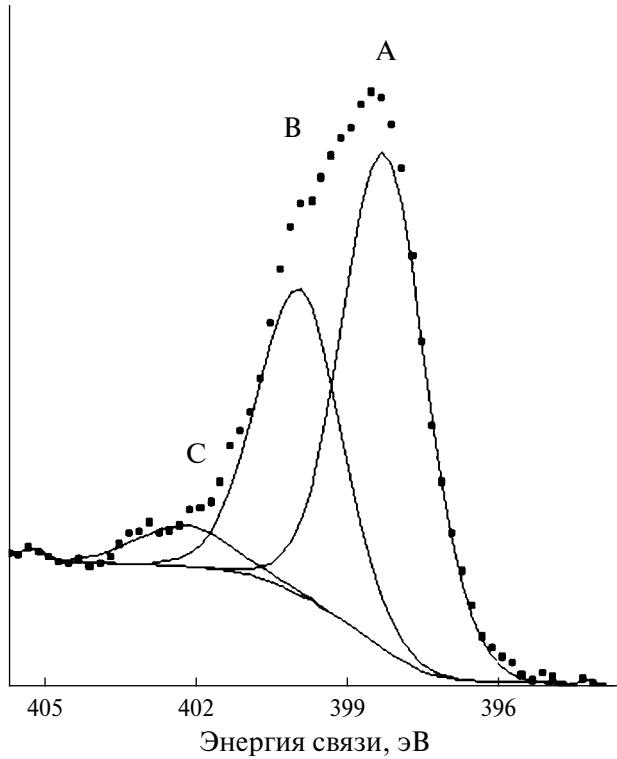


Рис. 3. N1s-спектр углеродной пленки после имплантации ионов азота.

пиков G и D в спектрах комбинационного рассеяния света (рис. 2б).

Во-вторых, магнетронные углеродные пленки до ионной бомбардировки имеют существенно меньшую массовую плотность (в среднем  $1.98 \text{ г}/\text{см}^3$ ) по сравнению с известной плотностью массивного графита ( $2.26 \text{ г}/\text{см}^3$ ), мишень из которой была использована при магнетронном напылении. Экспериментальные значения плотности были получены на основании данных  $\varepsilon_p$ , определенных относительно максимума пика оставшегося уровня C1s. Эта же методика позволила в дальнейшем показать изменения массовой плотности магнетронно напыленной тонкой углеродной пленки при импульсном облучении ионами разной массы и химической активности. Было определено, что импульсное облучение аргоном с  $E = 30 \text{ кэВ}$  вызывает дальнейшее разупорядочение тонкой пленки углеродного материала (ширеение пиков C1s на рис. 2а, спектр 4) и дальнейшее снижение его средней массовой плотности (до  $1.81 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Таким образом, средняя массовая плотность магнетронной пленки уменьшилась на 8%. При облучении ионами азота массовая плотность углеродной пленки уменьшается в меньшей степени (до  $1.86 \text{ г}/\text{см}^3$ ). При этом из РФЭС-спектра N1s видно, что основная доля атомов азота (до 89 ат. %)

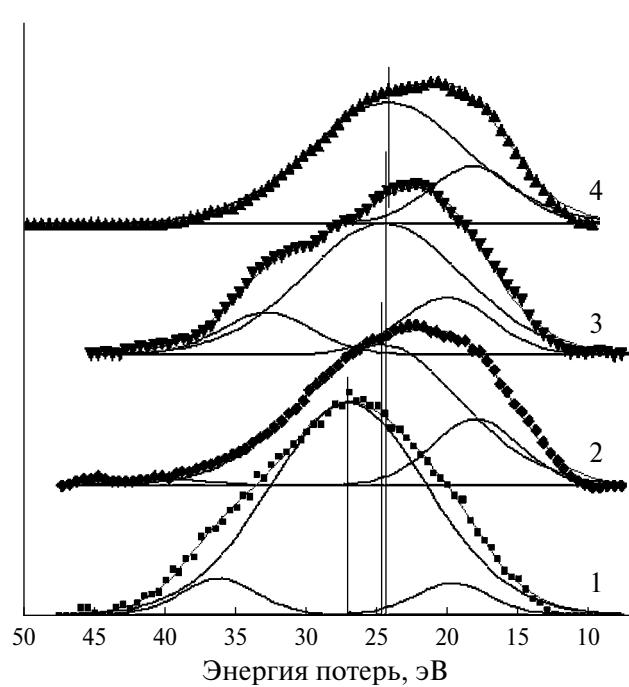


Рис. 4. Сателлиты  $\pi+\sigma$  C1s-спектров образца ВОПГ (1), углеродной пленки на армко-железе (2), углеродной пленки, подвергнутой имплантации ионов аргона с  $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $D = 10^{17} \text{ ион}/\text{см}^2$  (3), углеродной пленки, подвергнутой имплантации ионов азота с  $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $D = 10^{17} \text{ ион}/\text{см}^2$  (4).

встраивается в двух неэквивалентных позициях в структуре углеродной пленки (рис. 3). Незначительная часть азота (менее 10%) внедряется в пленку, по-видимому, без замещения атомов углерода, например в межслоевые пространства или поры. По данным ПО SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [33], доля упруго отраженных от поверхности углеродной пленки ионов азота составляет 2.8% и существенной роли не играет. Доля упруго отраженных ионов аргона от поверхности углеродного материала еще меньше и составляет 0.08%.

На рис. 4 представлены сателлиты  $\pi+\sigma$  C1s-спектров исследованных образцов после вычитания фоновой составляющей методом Ширли [32]. Спектр 1 соответствует сателлиту  $\pi+\sigma$  спектра C1s, полученного с ВОПГ в направлении нормали к графеновой плоскости. Сателлит  $\pi+\sigma$  соответствует по основным параметрам энергии потерь ( $\sim 27.15 \text{ эВ}$ ) сателлиту графита. Слабоинтенсивная линия слева  $35-36 \text{ эВ}$  может быть приписана углероду в областях с нарушенной структурой. Пик справа – сателлит от поверхностного слоя углеродного материала, например взаимодействующего с адсорбированным кислородом или азотом.

Спектр 2 соответствует сателлиту  $\pi+\sigma$  спектра C1s магнетронной пленки углерода. Углеродная

пленка, полученная методом магнетронного напыления, менее плотная. Энергия потерь  $\epsilon_p = 25.22$  эВ. Основа пленки – разупорядоченный углерод с  $sp^2$ -гибризацией.

Спектр 3 – сателлит  $\pi^+\sigma$  спектра C1s углеродной пленки после облучения ионами аргона с  $E = 30$  кэВ,  $D = 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Плотность графитовой составляющей уменьшается. Положение максимума пика незначительно смещается в сторону меньших энергий потерь  $\epsilon_p$ , а сама пленка является неоднородной, так как на спектре потерь возникает явная компонента с  $\epsilon_p$  вблизи 33 эВ, которую возможно связать с наличием областей с тетрагональной координацией атомов углерода.

Спектр 4 соответствует сателлиту  $\pi^+\sigma$  спектра C1s углеродной пленки после облучения ионами азота с  $E = 30$  кэВ,  $D = 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Сателлит потерь  $\pi^+\sigma$  очень похож на спектр сателлита исходной магнетронной пленки, но можно отметить незначительное повышение плотности исходной пленки и наличие следов компоненты на  $\epsilon_p = 32$  эВ.

Главным отличием магнетронно-напыленных и ионно-модифицированных тонких углеродных пленок является отсутствие в спектрах потерь сателлита shake-up ( $\epsilon_p = 7$  эВ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ C1s-спектров и спектров потерь  $\pi^+\sigma$  от C1s-пика позволяет оценить разупорядоченность, однородность и массовую плотность магнетронной углеродной пленки.

Показано, что магнетронно напыленная тонкая ( $30 \pm 4$  нм) углеродная пленка изначально является разупорядоченной со средней массовой плотностью меньше плотности графитовой мишени, а имплантация ионов аргона и азота приводит к дальнейшему разупорядочению пленки. Бомбардировка ионами аргона и азота не приводит к существенному изменению средней массовой плотности “графитовой” составляющей магнетронно напыленной углеродной пленки. В то же время бомбардировка ионами аргона с энергией 30 кэВ до дозы  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к неоднородности пленки по структуре, в которой есть доля тетраэдрически координированного (алмазоподобного) углерода в областях с большей массовой плотностью. Главным отличием магнетронно-напыленных и ионно-модифицированных тонких углеродных пленок является отсутствие в спектрах потерь в области shake-up  $\pi -$  пиков ( $\epsilon_p = 7$  эВ).

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП “Центр физических и

физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий” УдмФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 1022040600207-2, при поддержке Минобрнауки России (договор № 075-15-2021-1351) в части развития методологии рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Авторы выражают благодарность А.А. Колотову (УдмФИЦ УрО РАН), В.Ф. Кобзиеву (УдГУ) за помощь в получении экспериментальных образцов, а также К.Г. Михееву за получение КР-спектров.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульга Ю.М., Моравский А.П., Лобач А.С., Рубцов В.И. Спектр потерь энергии электронов фуллерена C60, сопровождающий фотоэлектронный пик C1s // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. Вып. 2. С. 137–140.
2. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C60: a new form of carbon // Nature. 1990. V. 347. P. 354–358.
3. Байтингер Е.М., Бржезинская М.М., Шнитов В.В. Плазмоны в графите // Химич. физика и мезоскопия. 2002. Т. 4. № 2. С. 178–187.
4. Байтингер Е.М., Бржезинская М.М., Шнитов В.В. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами углеродных нанотрубок // Химич. физика и мезоскопия. 2003. Т. 5. № 1. С. 5–19.
5. Brzhezinskaya M.M., Vinogradov A.S., Krestinin A.V., Zvereva G.I., Kharitonov A.P. Electronic structure of fluorinated single-walled carbon nanotubes studied by X-Ray absorption and photoelectron spectroscopy // Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2010. V. 18. P. 590–594.
6. Hoffman S. Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Materials Science. Springer Berlin Heidelberg. 2012. P. 528.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-27381-0>
7. Афанасьев В.П., Попов А.И., Баринов А.Д., Бодиско Ю.Н., Бочаров Г.С., Грязев А.С., Елецкий А.В., Капля И.Н., Мирошникова О.Ю., Ридзель П.С. Анализ углеродных и углеродосодержащих материалов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 1. С. 50–57.
8. Schultrich B. Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films I. Basics, Structure and Preparation // Springer Series in Materials Science. 2018. V. 263. P. 769.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55927-7>
9. Немошканенко В.В., Алексин В.Г. Электронная спектроскопия кристаллов. Киев: Наукова думка, 1976. 326 с.

10. *Nesbitt H.W., Bancroft G.M., Davidson R., McIntyre N.S., Pratt A.R.* Minimum XPS core-level line widths of insulators, including silicate minerals // *Am. Mineral.* 2004. V. 89. P. 878–882.
11. *Zakaznova-Herzog V.P., Nesbitt H.W., Bancroft G.M., Tse J.S.* High resolution core and valence band XPS spectra of nonconductor pyroxenes // *Surf. Sci.* 2006. V. 600. P. 3175–3186.
12. *Zakaznova-Herzog V.P., Nesbitt H.W., Bancroft G.M., Tse J.S., Gao X., Skinner W.* High-resolution valence-band XPS spectra of the nonconductors quartz and olivine // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 72. P. 205113.
13. *Bancroft G.M., Nesbitt H.W., Ho R., Shaw D.M., Tse J.S., Biesinger M.C.* Toward a comprehensive understanding of solid-state core-level XPS linewidths: Experimental and theoretical studies on the Si2p and O1s linewidths in silicates // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 80. P. 075405.
14. *Siegbahn K.* Electron spectroscopy—an outlook // *Electron Spectroscopy and Related Phenomena.* 1974. V. 5. Iss. 1. P. 3–97.
15. *Sokolowski E., Nordling C., Siegbahn K.* Chemical Shift Effect in Inner Electronic Levels of Cu Due to Oxidation // *Phys. Rev.* 1958. V. 110. P. 776.
16. *Fahlman A., Hamrin K., Hedman J., Nordberg R., Nordling C., Siegbahn K.* Revision of Electron Binding Energies in Light Elements // *Nature.* 1966. V. 210. P. 4–8.
17. *Fukue H., Nakatani T., Takabayashi S., Okano T., Kuroiwa M., Kunitsugu Sh., Oota H., Yonezawa K.* Raman spectroscopy analysis of the chemical structure of diamond-like carbon films deposited via high-frequency inclusion high-power impulse magnetron sputtering // *Diamond Related Mater.* 2024. V. 142. P. 110768.  
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110768>
18. *Moseenkov S.I., Kuznetsov V.L., Zolotarev N.A., Kolesov B.A., Prosvirin I.P., Ishchenko A.V., Zavorin A.V.* Investigation of Amorphous Carbon in Nanostructured Carbon Materials (A Comparative Study by TEM, XPS, Raman Spectroscopy and XRD) // *Materials.* 2023. V. 16(3). P. 1112.  
<https://doi.org/10.3390/ma16031112>
19. *Gengenbach T.R., Major G.H., Linford M.R., Easton C.D.* Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2021. V. 39. Iss. 1. P. 023207.
20. *Гомоюнова М.В.* Электронная спектроскопия поверхности твердого тела // Успехи физ. наук. 1982. Т. 136. № 1. С. 105–148.
21. *Pinder J., Major G., Baer D., Terry J., Whitten J., Cechal J., Crossman J., Lizarbe A., Jafari S., Easton Ch., Baltrusaitis J., van Spronsen M., Linford M.* Avoiding common errors in X-ray photoelectron spectroscopy data collection and analysis, and properly reporting instrument parameters // *Appl. Surface Sci. Advances.* 2024. V. 19. P. 100534.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100534>
22. *Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Кузнецов М.В., Ивановский А.Л.* Влияние радиационных дефектов на электронную структуру циркона по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // *ЖСХ.* 2010. Т. 51. № 4. С. 687–692.
23. *Щапова Ю.В., Замятин Д.А., Вотяков С.Л., Жидков И.С., Кухаренко А.И., Чолах С.О.* Атомная и электронная структура радиационно-поврежденного монацита: совместный анализ данных рamanовской и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы XI Всероссийской молодежной научной конференции (Екатеринбург, 25–28 мая, 2020). Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2020. С. 328–330.
24. *Dukes C.A., Baragiola R.A., McFadden L.A.* Surface modification of olivine by H<sup>+</sup> and He<sup>+</sup> bombardment // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1999. V. 104 (E1). P. 1865–1872.
25. *Loeffler M.J., Dukes C.A., Baragiola R.A.* Irradiation of olivine by 4 keV He<sup>+</sup>: Simulation of space weathering by the solar wind // *Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. E03003.
26. *Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др.* Электронная спектроскопия / Пер. с англ. Под ред. И.Б. Боровского. М.: Мир, 1971. 493 с.
27. *Карманова Т.С., Бакиева О.Р., Воробьев В.Л., Колотов А.А., Немцова О.М., Сурнин Д.В., Михеев Г.М., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я.* Характеризация тонких углеродных пленок на поверхности железа, сформированных магнетронным напылением с ионно-лучевым перемешиванием // *ФТТ.* 2017. Т. 59. № 3. С. 594–600.
28. *Михеев К.Г., Шендерова О.А., Когай В.Я., Могилева Т.Н., Михеев Г.М.* Раман-спектры наноалмазов детонационного и статического синтеза и влияние лазерного воздействия на их спектры люминесценции // Химич. физика и мезоскопия. 2017. Т. 19. № 3. С. 396–408.
29. *Mikheev K.G., Mogileva T.N., Fateev A.E., Nunn Nicholas A., Shenderova O.A., Mikheev G.M.* Low-Power Laser Graphitization of High Pressure–High Temperature Nanodiamond Films // *Applied Sciences.* 2020. V. 10. No. 9. P. 3329.
30. *Новиков Н.В., Кочержинский Ю.А., Шульман Л.А. и др.* Физические свойства алмаза: Справочник / Под ред. Н.В. Новикова. Киев: Наукова думка, 1987. 188 с.
31. *Васильев Л.А., Белых З.П.* Алмазы, их свойства и применение. М.: Недра, 1983. 101 с.
32. *Shirley D.A.* High-Resolution X-Ray Photoemission Spectrum of the Valence Bands of Gold // *Phys. Rev. B.* 1972. V. 5. No. 12. P. 4709–4714.
33. <http://www.srim.org>

## EVALUATION OF DISORDER AND DETERMINATION OF MASS DENSITY OF ION-MODIFIED THIN CARBON FILMS BY XPS

T. S. Kartapova<sup>1,\*</sup> and F. Z. Gil'mutdinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, 426067 Russia*

\*e-mail: tskartapova@udman.ru

In this work, thin carbon films were deposited on the surface of armco-iron using magnetron sputtering of a carbon target in an Ar<sup>+</sup> working gas environment. Then the carbon films were implanted with argon and nitrogen ions. In order to clarify the content of differently hybridized (i. e., in different chemical states) carbon atoms in the deposited material, the method of analyzing the photoelectron energy loss spectra was used in this work. It is shown that the satellite structure of C1s spectra, when analyzed jointly with XPS of the C1s core level, confirms the formation of a disordered structure of the carbon film and allows one to determine the mass density of thin carbon films.

*Keywords:* thin films, carbon, ion implantation, XPS, mass density