

ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ ГРАФИТА И ГРАФЕНО-ПОДОБНЫХ СТРУКТУР

Анализируются результаты исследований методами электронной спектроскопии взаимодействий графеновых структур. Рассмотрена возможность определения существования взаимодействия графеновых листов, приводящего к расщеплению π -зоны на основе изменения формы $C KVV$ оже-спектров.

информационная глубина, межслойное взаимодействие, нанотрубки, плотность занятых состояний, $C KVV$ оже-спектр, электронная спектроскопия.

Получение и исследование монослойного графита или графена и взаимодействие между графенами привлекает внимание ученых в течение длительного времени [1; 3; 23; 27; 31; 34; 39; 43; 48; 55]. Открытие уникальных свойств графена [35] привело к заметному росту публикаций, в которых рассматривается зависимость электронной структуры образцов от числа графеновых слоев, а также от взаимодействия различных графеновых структур, к которым можно отнести безопорные и находящиеся на подложках монослой графита, одностенные и многостенные углеродные нанотрубки (ОУНТ и МСУНТ), углеродные нановолокна и луковичи [6; 17; 20; 29; 36; 37; 41; 45; 47]. Существенные отличия электронных свойств графена и графита привели к многочисленным публикациям, рассматривающим влияние взаимодействия между графеновыми слоями, отличающимися как по форме, так и по размерам. Совокупность этих свойств подробно рассмотрена и проанализирована в статьях [7; 44].

Взаимодействие между графенами определяет электронные свойства приготовленных объектов, которые могут быть использованы при создании уникальных электронных устройств. Важное место при исследовании графеноподобных структур занимают такие методы, как рентгеновская и ультрафиолетовая спектроскопия (РФЭС и УФЭС) с применением как традиционных источников рентгеновского излучения ($Mg K\alpha$, $Al K\alpha$, $He I$ и $He II$), так и синхротронного излучения с различными энергиями рентгеновских квантов [7; 8; 18; 36; 37; 47]: оже-электронная спектроскопия (ОЭС) с различными источниками возбуждения (электроны, фотоны и ионы) [13; 25; 28; 32; 42; 54], спектроскопия характеристических потерь энергии электронов [46], спектроскопия комбинационного рассеяния (СКР) [30] дифракция медленных электронов [22; 51], а также туннельная микроскопия [4; 40].

По числу опубликованных работ, в которых исследовалось взаимодействие между графеновыми слоями, приоритет среди этих методов, несомненно,

принадлежит УФЭС, которая позволяет получать распределение плотности состояний в валентной зоне и СКР. Однако, ввиду большего распространения ОЭС в нашей стране, в данной статье основной акцент сделан на возможности применения этого метода для исследования графеновых структур.

Хорошо известно, что плотность и число состояний в валентной зоне зависят от числа слоев. Если валентная зона монослойного графита может быть описана в виде совокупности π - и σ -зон, то с увеличением числа слоев (n) и появлением взаимодействия между ними происходит расщепление π -зоны на несколько подзон, число которых равно числу слоев. При $n = 10$ свойства приготовленной структуры совпадают со свойствами объемного графита, π -зона которого может быть представлена в виде двух состояний, одно из которых вызвано межслойным взаимодействием, располагается вблизи уровня Ферми и обуславливает проводимость графита. Однако при анализе С KVV оже-спектров графита этот факт, как правило, опускается и для согласования теоретического и экспериментального спектров вводятся дополнительные состояния, связанные, по мнению авторов, с другими физическими явлениями.

В качестве реперных оже-спектров структур, в которых не предполагается взаимодействие между графенами, будут использованы оже-спектры одностенных углеродных нанотрубок и C_{60} фуллеренов [12; 13; 42]. Однако взаимодействие отдельных фуллеренов или нанотрубок в проведенных экспериментах нельзя исключить полностью, но, исходя из геометрии, можно предположить, что оно намного меньше, чем в случае взаимодействия между плоскими графеновыми листами.

Сопоставляя опубликованные данные, полученные методами УФЭС и ОЭС, следует подчеркнуть, что в первом случае непосредственно регистрируются спектры валентной зоны, тогда как во втором случае С KVV оже-спектр в первом приближении является самосверткой плотности состояний валентной зоны.

Из общих положений следует, что расщепление π -зоны должно зависеть от взаимного расположения графеновых листов и расстояния между ними. Влияние изменения относительного расположения шестиугольников в двухслойном графене продемонстрировано в работах [39; 48]. Эффективно ОЭС используется для определения числа графеновых слоев, выращенных или осажденных на различных подложках. Определение числа слоев основано на изменении интенсивности оже-сигнала в зависимости от времени осаждения или отношении интенсивностей оже-сигналов от графенового слоя и от подложки [39; 48].

Как правило, оже-спектры используются в форме dN/dE . Однако в этих работах отсутствует анализ формы спектральных линий, что не позволяет определить ни существование взаимодействия между графеновым слоем и подложкой, ни степень этого взаимодействия при его присутствии. В то же время, как это будет показано ниже, $N(E)$ С KVV спектры прямо указывают на существование взаимодействия между графеновыми слоями. В работе [54] оже-спектры регистрировались в зависимости от числа слоев и, по мнению авторов, обнаружена зависимость интенсивности пика с энергией около 240 эВ от n , но ввиду малой величины отношения «сигнал – шум» такой вывод является преждевре-

менным. В то же время C_{KVV} спектры, представленные в работах [12; 42], демонстрируют существенные отличия в спектрах однослойных и многослойных структур или, другими словами, чувствительность оже-спектроскопии к взаимодействию графеновых слоев. На рисунке 1 представлены C_{KVV} оже-спектры фуллерена C_{60} , ВОПГ и МСУНТ [37]. Более детально область высоких кинетических энергий представлена на рисунке 1б. Как видно из рисунка 1, только спектр ВОПГ имеет выраженную структуру в правой части спектра, тогда как в спектре МСУНТ она выражена слабо и полностью отсутствует в спектре C_{60} , спектр ОСУНТ практически полностью совпадает со спектром C_{60} .

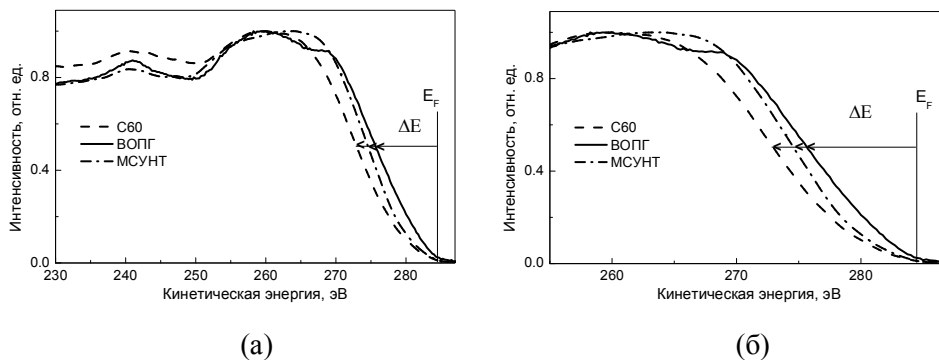


Рис. 1. C_{KVV} спектры фуллерена C_{60} , ВОПГ и МСУНТ. Спектры аналогичны спектрам, представленным в [12]

Спектры однослойных структур принципиально отличаются от спектров многослойных структур. Отличие проявляется в области высоких кинетических энергий и в основном выражается в различном положении высокоэнергетического края относительно уровня Ферми, которое может быть выбрано в качестве меры, характеризующей плотность состояний вблизи уровня Ферми. На рисунке 1 в качестве такой меры принят интервал на половине высоты между E_F и высокоэнергетическим краем ΔE . Из определения параметра ΔE следует, что он связан с величиной расщепления π -зоны, которая, в частности, зависит от расстояния между графеновыми слоями, взаимного расположения одного слоя относительно другого и их формы. Использование параметра ΔE позволит оценить проявление межслойного взаимодействия для большого многообразия графеновых структур, а также проводимость образцов.

Для дальнейшего рассмотрения C_{KVV} оже-спектров и различий в их интерпретации в случае ВОПГ будет использована формула, полученная в рамках одноэлектронного приближения, согласно которой форма спектральной C_{KVV} оже-линии является самосверткой плотности занятых состояний (ПЗС) [26]. Поскольку ПЗС графита представляет собой сумму σ - и π -зон, то интенсивность оже-сигнала будет пропорциональна $(\sigma + \pi)^*(\sigma + \pi)$, где символ (*) обозначает

операцию самосвертки, и выражение для кинетической энергии оже-электронов (E_K) может быть представлено в виде

$$E_K = E_b(CIs) - (\sigma + \pi) * (\sigma + \pi) - U, \quad (1)$$

где U – энергия взаимодействия дырок в конечном состоянии. Поскольку π -зона располагается ближе к E_F , чем σ -зона, то высокоэнергетическая область спектра в основном будет определяться членом $\pi^*\pi$. Следует подчеркнуть, что основные расхождения между теоретическими и экспериментальными спектрами, как правило, наблюдаются в области высоких энергий, то есть связаны с теоретическим описанием π -зоны. Для их согласования использованы сдвиг спектра [32], введение нового состояния, вызванного, по мнению авторов [19], влиянием динамического экранирования (образование экситона, связанного с основным уровнем) и величиной U [42]. Следует отметить, что спектры ВОПГ, зарегистрированные по нормали к поверхности и под скользящим углом, существенно различаются именно в области высоких кинетических энергий [12], при этом последний по форме близок к спектру ОУНТ. Другими словами, введенное дополнительное состояние должно исчезать при регистрации спектров под скользящими углами, что противоречит природе этого состояния. Для объяснения существенных различий в спектрах ВОПГ и ОУНТ в области высоких кинетических энергий величина U для ОУНТ была увеличена в два раза по сравнению с ВОПГ [42]. Но эта подгонка, как и в предыдущем случае, не позволяет объяснить подобие спектра ВОПГ, зарегистрированного под скользящим углом, и спектра ОУНТ [12].

На основании измерений формы спектральной линии от угла регистрации [12] сделан вывод о том, что фактором, определяющим интенсивность сигнала в C_{KVV} спектре ВОПГ, является взаимодействие между графеновыми листами, которое, как следует из вышеизложенного, изменяет плотность состояний вблизи E_F . Известно, что зависимость информационной глубины оже-электронов от угла регистрации α примерно пропорциональна $3 \lambda \sin \alpha$, где λ – длина свободного пробега электронов без неупругих столкновений, а α отсчитывается относительно поверхности образца. С учетом небольшой величины λ ($6,7 \text{ \AA}$) [49] для C_{KVV} электронов и величины межплоскостного расстояния d в ВОПГ ($3,44 \text{ \AA}$) при малых величинах α могут быть реализованы условия, когда информационная глубина не превышает d и когда эмиссия оже-электронов происходит преимущественно из верхнего слоя. Ввиду своего положения внешний слой является особым, так как взаимодействует только с одним (вторым) слоем, тогда как последующие слои взаимодействуют с двумя соседними. Эти результаты позволяют объяснить различие в спектрах ВОПГ и МСУНТ, что в первую очередь вызвано изменением взаимного расположения шестиугольников в соседних трубках из-за их кривизны и их кривизной. Исходя из этого, следует ожидать отличия в спектрах наноконусов и нанолуковиц относительно спектра ВОПГ. Однако, следует отметить, что спектры фуллерена C_{60} и ОУНТ практически совпадают, несмотря на различие их геометрических структур и ПЗС [10; 12; 16].

Исходя из опубликованных данных, спектры графено-подобных структур могут быть разделены на два класса с точки зрения взаимодействия между слоями на спектры однослойных и многослойных структур, или, другими словами, с присутствием или отсутствием расщепления π -зоны, которое является результатом взаимодействия графеновых структур и должно учитываться при интерпретации оже-спектров. Согласно многочисленным теоретическим и экспериментальным данным [2; 5; 9; 11; 15; 21; 30; 37; 50; 53], π -зона ВОПГ расщепляется на две подзоны. Экспериментально расщепление было обнаружено с помощью таких методов, как УФЭС, СКР, СТМ, ионно-электронная эмиссия. В соответствии с этим выражение (1) преобразуется в уравнение

$$E_K = E_b(C1s) - (\sigma + \pi_s + \pi_{int}) * (\sigma + \pi_s + \pi_{int}) - U, \quad (2)$$

где π_{int} обозначает π -подзону, находящуюся ближе к E_F , чем π_s .

В выражении (2) два члена ответственны за поведение правого края спектра, а именно π_{int} и U . Первый член отсутствует в выражении (1) для однослойных структур, тогда как U присутствует в обоих выражениях. Можно предположить и зависимость U от π_{int} . Ввиду отсутствия, по нашим сведениям, экспериментальных и вычисленных из первых принципов величин U для графита и ОУНТ вместо них будут использованы экспериментальные данные, полученные для фуллерена C_{60} в газовой фазе и фуллерита, разность между которыми отражает проявление взаимодействия между фуллеренами в фуллерите, которые равны 1,6 и 0,23 эВ [24]. Обе эти величины меньше использованных для подгонки теоретических спектров ВОПГ и ОСУНТ, которые равны 2,1 и 4,6 эВ соответственно [42], из чего следует, что величина U не может быть определяющей при описании высокоэнергетической части спектра.

Для структуры, состоящей из графеновых листов с числом n , не превышающим 10, в выражение (2) необходимо ввести 10 членов, отражающих различные состояния π -зоны. Сумма членов $2\sigma * \pi_{int} + 2\pi_s * \pi_{int} + \pi_{int} * \pi_{int}$ описывает спектр в области высоких энергий и влияние расщепления π -зоны на С KVV оже-спектр. В отличие от спектров УФЭС, в которых можно отчетливо наблюдать величину энергетического интервала между наиболее характерными особенностями π_s и π_{int} подзон в оже-спектрах, это становится невозможным, однако изменения положения высокоэнергетического края в оже-спектрах при модификации поверхности могут быть более заметными, чем в спектрах УФЭС, что отмечалось выше.

Из вышеизложенного следует чувствительность оже-спектров к взаимодействию графеновых листов, что может быть использовано как для определения взаимодействия, так и числа графеновых слоев в структуре. Во втором случае, однако, требуется получение опорных спектров от графеновых структур с известным числом слоев. В некоторых случаях модификации поверхности изменения в положении оже-спектра могут быть более чувствительными, чем в спектрах УФЭС, поскольку характерные энергетические интервалы, характеризующие валентную зону (E_V), в оже-спектрах удваиваются, что следует из приближенного выражения для энергии оже-электронов

$$E_{CKVV} \approx E_K - 2E_V.$$

В отличие от УФЭС оже-спектры косвенно характеризуют валентную зону, так как являются самосверткой плотности состояний в валентной зоны.

Выводы

В результате проведенных по данной работе исследований установлено, что метод ОЭС позволяет определять существование взаимодействия между графеновыми структурами на основе вызванного им расщепления π -зоны на несколько подзон. Поскольку расщепление зависит от взаимного расположения графеновых листов и их формы, то это будет проявляться в оже-спектрах. По интенсивности оже-сигнала вблизи E_F можно осуществлять упорядочение образцов по их проводящим свойствам. Ввиду малости информационной глубины оже-электронов и возможностью ее уменьшения до одного монослоя при регистрации спектров под скользящими углами, метод ОЭС может стать уникальным при исследовании процессов модификации верхних слоев многослойных графитовых структур, в частности, при их функционализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонтегоде, А.Я. Интеркалирование атомами двумерной графитовой пленки на металлах [Текст] / А.Я. Тонтегоде, Е.В. Рутков // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – № 11. – С. 57.
2. Ahuja, R. Electronic structure of graphite: Effect of hydrostatic pressure [Text] / R. Ahuja [et al] // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 51. – P. 4813.
3. Aizawa, T. Bond softening in monolayer graphite formed on transition-metal carbide surfaces [Text] / T. Aizawa [et al] // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42. – P. 11469.
4. Banerjee, S. Enhanced conductivity in graphene layers and their edges [Text] / S. Banerjee [et al] // Appl. Phys. Lett. – 2006 – Vol. 88. – P. 06211.
5. Bianconi, A. Photoemission studies of graphite high-energy conduction-band and valence-band states using soft-x-ray synchrotron radiation excitation [Text] / A. Bianconi, S.B.M. Hagström, R.Z. Bachrach // Phys. Rev. B. – 1977. – Vol. 16. – P. 5543.
6. Bichoutskaia, E. Interwall interaction and elastic properties of carbon nanotubes [Text] / E. Bichoutskaia [et al] // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73. – P. 045435.
7. Bostwick, A. Experimental studies of the electronic structure of graphene [Text] / A. Bostwick [et al] // Progr. Surf. Sci. – 2009. – Vol. 84. – P. 380.
8. Bruhwiler, P. A. Synchrotron studies of carbon surfaces [Text] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2001. – Vol. 13. – P. 11229.
9. Charlier, J.-C. First-principles study of the electronic properties of graphite [Text] / J.-C. Charlier, X. Gonze, J.-P. Michenaud // Phys. Rev. B. – 1991. – Vol. 43. – P. 4579.
10. Christ, K.V. Energy dispersion in graphene and carbon nanotubes and molecular encapsulation in nanotubes [Text] / K.V. Christ, H.R. Sadeghpour // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – P. 195418.
11. Chung, D.D.L. Graphite [Text] // J. Mater. Sci. – 2002. – Vol. 37. – P. 1475.

12. Dementjev, A. P. Relationship between the C KVV Auger line shape and layered structure of graphite [Text] / A.P. Dementjev, K.I. Maslakov, A.V. Naumkin // Appl. Surf. Sci. – 2005. – Vol. 245. – P. 128.
13. Endo, K. Analysis of Electron Spectra of Carbon Allotropes (Diamond, Graphite, Fullerene) by Density Functional Theory Calculations Using the Model Molecules [Text] / K. Endo [et al] // J. Phys. Chem. A. – 2003. – Vol. 107. – P. 9403.
14. Ferralis, N. Evidence of Structural Strain in Epitaxial Graphene Layers on 6H-SiC(0001) [Text] / N. Ferralis, R. Maboudian, C. Carraro // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 101. – P. 156801.
15. Feuerbacher, B. Splitting of the π Bands in Graphite [Text] / B. Feuerbacher, B. Fitton // Phys. Rev. Lett. – 1971. – Vol. 26. – P. 840.
16. Golden, M.S. The electronic structure of fullerenes and fullerenes compounds from high-energy spectroscopy [Text] / M.S. Golden [et al] // J. Phys. : Cond. Matter. – 1995. – Vol. 7. – P. 8219.
17. Grimme, S. Noncovalent interactions between graphene sheets and in multishell (hyper)fullerenes [Text] / S. Grimme, C. Muck-Lichtenfeld, J. Antony // J. Phys. Chem. C. – 2007. – Vol. 111. – P. 11199.
18. Grüneis, A. Tunable hybridization between electronic states of graphene and a metal surface [Text] / A. Grüneis, D. V. Vyalikh // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – P. 193401.
19. Houston, J.E. Relationship between the Auger line shape and the electronic properties of graphite [Text] / J.E. Houston [et al] // Phys. Rev. B. – 1986. – Vol. 34. – P. 1215.
20. Kis, A. Interlayer forces and ultralow sliding friction in multiwalled carbon nanotubes [Text] / A. Kis [et al] // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol. 97. – P. 025501.
21. Klusek, Z. Investigations of splitting of the π bands in graphite by scanning tunneling spectroscopy [Text] // Appl. Surf. Sci. – 1999. – Vol. 151. – P. 251.
22. Knox, K.R. Spectromicroscopy of single and multilayer graphene supported by a weakly interacting substrate [Text] / K.R. Knox [et al] // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 78. – P. 201408(R).
23. Kobayashi, K. Electronic structure of monolayer graphite on a TiC(111) surface [Text] / K. Kobayashi, M. Tsukada // Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 49. – P. 7660.
24. Krummacher, S. Close similarity of the electronic structure and electron correlation in gas-phase and solid C₆₀ [Text] / S. Krummacher [et al] // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48. – P. 8424.
25. Kudo, H. Carbon KVV Auger electron emission from highly oriented pyrolytic graphite bombarded by fast protons [Text] / H. Kudo [et al] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 2002. – Vol. 190. – P. 160.
26. Lander, J.J. Auger Peaks in the Energy spectra of secondary electrons from various materials [Text] // Phys. Rev. B. – 1953. – Vol. 91. – P. 1382.
27. Lang, B. A LEED study of the deposition of carbon on platinum crystal surfaces [Text] // Surf. Sci. – 1975. – Vol. 53. – P. 317.
28. Larachi, F. X-ray Photoelectron Spectroscopy, Photoelectron Energy Loss Spectroscopy, X-ray Excited Auger Electron Spectroscopy, and Time-of-Flight-Secondary Ion Mass Spectroscopy Studies of Asphaltenes from Doba-Chad Heavy Crude Hydrovisbreaking [Text] / F. Larachi [et al] // Energy and Fuels. – 2004. – Vol. 18. – P. 1744.
29. Latil, S. Charge carriers in few-layer graphene films [Text] / S. Latil, L. Henrard // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol. 97. – P. 036803.
30. Mallard, L.M. Raman spectroscopy in graphene [Text] / L.M. Mallard [et al] // Phys. Rep. – 2009. – Vol. 473. – P. 51.

31. Marinopoulos, A.G. Anisotropy and interplane interactions in the dielectric response of graphite [Text] / A. G. Marinopoulos [et al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2002 – Vol. 89. – P. 076402.
32. Moliver, S.S. Auger-Spectroscopic Appearance of Electron Correlation at the Fermi Surface of Graphite [Text] // *Phys. Sol. State.* – 2004. – Vol. 46. – P. 1583.
33. Murday, J.S. Carbon KVV Auger line shapes of graphite and stage-one cesium and lithium intercalated graphite [Text] / J.S. Murday [et al] // *Phys. Rev. B.* – 1981. – Vol. 24. – P. 4764.
34. Nagashima, A. Electronic structure of monolayer graphite on some transition metal carbide surfaces [Text] / A. Nagashima [et al] // *Surf. Sci.* – 1993. – Vol. 287–288. – P. 609.
35. Novoselov, K.S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [Text] / K.S. Novoselov [et al] // *Science.* – 2004. – Vol. 306. – P. 666.
36. Ohta, T. Controlling the electronic structure of bilayer graphene [Text] / T. Ohta [et al] // *Science.* – 2006. – Vol. 313. – P. 951.
37. Ohta, T. Interlayer Interaction and Electronic Screening in Multilayer Graphene Investigated with Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy [Text] / T. Ohta [et al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 98. – P. 206802.
38. Painter, G.S. Electronic Band Structure and Optical Properties of Graphite from a Variational Approach [Text] / G.S. Painter, D.E. Ellis // *Phys. Rev. B.* – 1970. – Vol. 1. – P. 4747.
39. Palser, A. H. R. Interlayer interactions in graphite and carbon nanotubes [Text] // *Phys. Chem.* – 1999. – Vol. 1. – P. 4459.
40. Pandey, D. Scanning probe microscopy study of exfoliated oxidized graphene sheets [Text] / D. Pandey, R. Reifengerger, R. Piner // *Surf. Sci.* – 2008. – Vol. 602. – P. 1607.
41. Park, C.-H. Electron-Phonon Interactions in graphene, bilayer graphene, and graphite [Text] / C.-H. Park [et al] // *Nano Lett.* – 2008. – Vol. 8. – P. 4229.
42. Perfetto, E. Electronic correlations in graphite and carbon nanotubes from Auger spectroscopy [Text] / E. Perfetto [et al] // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol. 76. – P. 233408.
43. Ruuska, H. Ab initio study of interlayer interaction of graphite: benzene-coronene and coronene-dimer two-layer model [Text] / H. Ruuska, T. A. Pakkanen // *J. Phys. Chem. B.* – 2001. – Vol. 105. – P. 9541.
44. Soldano, K. Production, properties and potential of graphene [Text] / K. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin // *Carbon.* – 2010. – Vol. 48. – P. 2127.
45. Song, W. Electronic structures of semiconducting double-walled carbon nanotubes: Important effect of interlayer interaction [Text] / W. Song [et al] // *Chem. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 414. – P. 429.
46. Suenaga, K. Electron-energy loss spectroscopy of electron states in isolated carbon nanostructures [Text] / K. Suenaga [et al] // *Phys. Rev. B.* – 2001. – Vol. 63. – P. 165408.
47. Sutter, P. Electronic Structure of Few-Layer Epitaxial Graphene on Ru (0001) [Text] / P. Sutter [et al] // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9. – P. 2654.
48. Tanaka, K. Interlayer interaction of two graphene sheets as a model of double-layer carbon nanotubes [Text] / K. Tanaka [et al] // *Carbon.* – 1997. – Vol. 35. – P. 121.
49. Tanuma, S. Calculations of electron inelastic mean free paths. VIII. Data for 15 elemental solids over the 50–2000 eV range [Text] / S. Tanuma, C.J. Powell, D.R. Penn // *Surf. Int. Anal.* – 2005. – Vol. 37. – P. 1.
50. Tatar, R.C. Electronic properties of graphite: A unified theoretical study [Text] / R.C. Tatar, S. Rabii // *Phys. Rev. B.* – 1982. – Vol. 25. – P. 4126.

51. Ueta, H. Highly oriented monolayer graphite formation on Pt(111) by a supersonic methane beam [Text] / H. Ueta [et al] // Surf. Sci. – 2004. – Vol. 560. – P. 183.
52. Walt, A. Epitaxial Graphene [Text] / A. Walt [et al] // Solid State Comm. – 2007. – Vol. 143. – P. 92.
53. Willis, R.F. Experimental Investigation of the Band Structure of Graphite [Text] / R.F. Willis, B. Feuerbacher, B. Fitton // Phys. Rev. B. – 1971. – Vol. 4. – P. 2441.
54. Xu, M. Auger Electron Spectroscopy: A Rational Method for Determining Thickness of Graphene Films [Text] / M. Xu [et al] // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4. – P. 2937.
55. Zi-Pu, H. LEED theory for incommensurate overlayers: Application to graphite on Pt(111) [Text] / H. Zi-Pu [et al] // Surf. Sci. – 1987. – Vol. 180. – P. 433.

A.V. Naumkin

AUGER-SPECTROSCOPY OF GRAPHENE AND GRAPHENE-LIKE STRUCTURES

The paper analyzes the interactions between graphene structures investigated by electron spectroscopy methods. The paper dwells on the possibility of observing the interaction between graphene sheets inducing π -band splitting on the basis of the C KVV Auger-line analysis.

sampling depth, interlayer interaction, nanotubes, density of occupied states, C KVV Auger spectrum, electron spectroscopy.