

**Т. М. Пінчук-Ругаль¹, О. П. Дмитренко¹, М. П. Куліш¹, Л. А. Булавін¹, О. С. Ничипоренко¹,
Ю. Є. Грабовський¹, О. Г. Ругаль¹, М. А. Заболотний¹, М. М. Білий¹,
В. В. Шлапацька², С. В. Лізунова³**

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

² Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Київ

³ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

ДЕСТРУКЦІЯ БАГАТОСТІННИХ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ПРИ РАДІАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕННЯХ ЕЛЕКТРОННИМ ОПРОМІНЕННЯМ

Вивчено поведінку рентгенівської дифракції та коливних спектрів із застосуванням комбінаційного розсіювання світла (КРС) багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ) при високоенергетичному електронному опроміненні ($E_e = 1,8 \text{ MeV}$) з великими дозами поглинання до 10 МГр. З ростом дози поглинання до 10,0 МГр міжшарова кореляція в розміщенні окремих графенових сіток нанотрубок не тільки зберігається, а навіть покращується. Дефектні смуги D, D' і смуга G зі збільшенням дози поглинання зазнають значних перетворень, що свідчить про зростання радіаційних пошкоджень БВНТ. Деструкція нанотрубок при електронному опроміненні супроводжується підвищенням упорядкування в розташуванні окремих нанотрубок за рахунок міжшарових зшивок за участю міжвузлових атомів. Ступінь проявів деградації БВНТ і зшивок залежить від величини дози поглинання електронів.

Ключові слова: багатостінні вуглецеві нанотрубки, рентгенівська дифракція, комбінаційне розсіяння світла, електронне опромінення, радіаційні пошкодження, деструкція.

**Т. Н. Пинчук-Ругаль¹, О. П. Дмитренко¹, Н. П. Кулиш¹, Л. А. Булавин¹, О. С. Ничипоренко¹,
Ю. Е. Грабовский¹, А. Г. Ругаль¹, М. А. Заболотный¹, Н. М. Белый¹,
В. В. Шлапацкая², С. В. Лизунова³**

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

² Институт физической химии им. Л. В. Писаржевского НАН Украины, Киев

³ Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев

ДЕСТРУКЦІЯ МНОГОСТЕННИХ УГЛЕРОДНИХ НАНОТРУБОК ПРИ РАДІАЦІЙНИХ ПОВРЕЖДЕННЯХ ЕЛЕКТРОННИМ ОБЛУЧЕННЯМ

Изучено поведение рентгеновской дифракции и колебательных спектров с применением комбинационного рассеяния света (КРС) многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) при высокоэнергетическом электронном облучении ($E_e = 1,8 \text{ MeV}$) с большими дозами поглощения до 10 МГр. С ростом дозы поглощения до 10,0 МГр межслойная корреляция в размещении отдельных графеновых сетей нанотрубок не только сохраняется, но даже улучшается. Дефектные полосы D, D' и полоса G с увеличением дозы поглощения испытывают значительные преобразования, которые свидетельствуют о росте радиационных повреждений МУНТ. Деструкция нанотрубок при электронном облучении сопровождается повышением упорядочения в расположении отдельных нанотрубок за счет межслойных сшивок с участием межвузельных атомов. Степень проявлений деградации МУНТ и сшивок зависит от величины дозы поглощения электронов.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, рентгеновская дифракция, комбинационное рассеяние света, электронное облучение, радиационные повреждения, деструкция.

**T. M. Pinchuk-Rugal¹, O. P. Dmytrenko¹, M. P. Kulish¹, L. A. Bulavin¹, O. S. Nychyporenko¹,
Yu. Ye. Grabovskyy¹, A. G. Rugal¹, M. A. Zabolotnyy¹, M. M. Bilyy¹,
V. V. Shlapatskaya², S. V. Lizunova³**

¹ Kyiv National Taras Shevchenko University, Kyiv

² L. V. Pisarzhevsky Institute of Physical Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³ G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

MULTIWALLED CARBON NANOTUBE DESTRUCTION IN THE RADIATION DAMAGES TO ELECTRON IRRADIATION

Behavior of the X-ray diffraction and vibrational Raman spectra of multiwalled carbon nanotubes (MWCNT) under high-energy electron irradiation ($E_e = 1.8 \text{ MeV}$) with large doses of absorption to 10 MGy were studied. With increasing dose uptake to 10.0 MGy the interlayer correlation in the distribution of the individual graphene nanotubes nets not only maintained, and even improved. Defective bands D, D' and G band with increasing dose absorption are significant transformation, which show that radiation damages of MWCNT. The destruction of nanotubes under electronic irradiation is accompanied by increased regulation in the arrangement of individual nanotubes by interlayer cross-links involving interstitial atoms. The severity of degradation and cross-linking of MWCNT depends on the absorption dose of electrons.

Keywords: multi-walled carbon nanotubes, X-ray diffraction, Raman scattering, electron irradiation, radiation damages, destruction.

REFERENCES

1. *Eletskij A.V.* // UFN. - 1997. - Vol. 167, No. 9. - P. 945 - 972. (Rus)
2. *Eletskij A.V.* // UFN. - 2002. - Vol. 172, No. 4. - P. 401 - 438. (Rus)
3. *Eletskij A.V.* // UFN. - 2004. - Vol. 174, No. 11. - P. 1191 - 1231. (Rus)
4. *Eletskij A.V.* // UFN. - 2009. - Vol. 179, No. 3. - P. 225 - 242. (Rus)
5. *Eletskij A.V.* // UFN. - 2010. - Vol. 180, No. 9. - P. 897 - 930. (Rus)
6. *Rakov E.G.* // Zhurnal neorganicheskoy khimii. - 1999. - Vol. 44, No. 11. - P. 1827 - 1840. (Rus)
7. *Rakov E.G.* // Uspekhi khimii. - 2000. - Vol. 69, No. 1. - P. 41 - 59. (Rus)
8. *Rakov E.G.* // Uspekhi khimii. - 2001. - Vol. 70, No. 10. - P. 934 - 973. (Rus)
9. *Vorob'eva A.I.* // UFN. - 2010. - Vol. 180, No. 3. - P. 265 - 288. (Rus)
10. *Baughman R. H., Zakhidov A. A., de Heer W.A.* Carbon nanotubes - the route toward applications // Science. - 2002. - Vol. 297. - P. 782 - 792.
11. *Yu M.F., Files B.S., Arepalli S. et al.* Tensile loading of ropes single wall carbon nanotubes and their mechanical properties // Phys. Rev. Lett. - 2000. - Vol. 84, No. 24. - P. 5553 - 5555.
12. *Zolotukhin I.V., Golev I.M., Markova A.E. et al.* // Pis'ma v ZhTF. - 2005. - Vol. 31, Iss. 4. - P. 54 - 57. (Rus)
13. *Bichoutskaaya E., Ershova O.V., Lozovik Yu.E. et al.* // Pis'ma v ZhTF. - 2009. - Vol. 35, Iss. 14. - P. 59 - 66. (Rus)
14. *Krashenninikov A.V., Nordlund K.* Signatures of irradiation-induced defects in scanning-tunneling microscopy images of carbon nanotubes // FTT. - 2002. - Vol. 44, Iss. 3. - P. 452 - 454.
15. *Schwan J., Ulrich S., Batori V. et al.* Raman spectroscopy amorphous carbon films // J. Appl. Phys. - 1996. - Vol. 80, No. 1. - P. 440 - 447.
16. *Ivanov-Omskij V.I., Lodychkin A.B., Yastrebov S.G.* // FTP. - 2000. - Vol. 34, Iss. 12. - P. 1409 - 1416. (Rus)
17. *Ivanov-Omskij V.I., Kolobov A.V., Lodychkin A.B. et al.* // FTP. - 2004. - Vol. 38, Iss. 12. - P. 1463 - 1465. (Rus)
18. *Benueu F., Huillier C.I., Salvetat J.-P. et al.* Modification of multiwall carbon nanotubes by electron irradiation: An ESR study // Phys. Rev. B. - 1999. - Vol. 59, No. 8. - P. 5945 - 5949.
19. *Reznik D., Olk H.C., Neumann D.A. et al.* X-Ray powder diffraction from carbon nanotubes and nanoparticles // Phys. Rev. B. - 1995. - Vol. 52, No. 1. - P. 116 - 124.
20. *Zhou O., Fleming R.M., Murphy D.W. et al.* Defects in carbon nanostructures // Science. - 1994. - Vol. 263, No. 51. - P. 1744 - 1748.
21. *Sanchez-Bajo F., Ortiz A.L., Cumbreira F.L.* Novel analytical model for the determination of grain size distributions in nanocrystalline materials with low lattice microstrains by X-ray diffractometry // Acta Mater. - 2006. - Vol. 54. - P. 1 - 10.
22. *Zhao X., Ando Y., Qin L.C. et al.* Characteristic Raman spectra of multi-walled carbon nanotubes // Physica. B. - 2002. - Vol. 323. - P. 265 - 266.
23. *Hulman M., Skakalova V., Roth S. et al.* Raman spectroscopy of single-wall carbon nanotubes and graphite irradiated by γ -rays // J. Appl. Phys. - 2005. - Vol. 98. - P. 024311.
24. *Ritter U., Sharff P., Siegmund C. et al.* Radiation damage to multi-walled carbon nanotubes and their Raman vibrational modes // Carbon. - 2006. - Vol. 44. - P. 2694 - 2700.
25. *Tamor M.A., Vassell W.C.* Raman "fingerprinting" of amorphous carbon films // J. Appl. Phys. - 1994. - Vol. 76, No. 6. - P. 3823 - 3830.
26. *Danishevskij A.M., Smorgonskaya E.A., Gordeev S.K. et al.* // FTT. - 2001. - Vol. 43, Iss. 1. - P. 132 - 139. (Rus)
27. *Fajzrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Zhikharev V.A. et al.* // FTP. - 2001. - Vol. 35, Iss. 5. - P. 612 - 618. (Rus)
28. *Fajzrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Kurbatova N.V. et al.* // FTP. - 2003. - Vol. 37, Iss. 2. - P. 230 - 234. (Rus)
29. *Fajzrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Stepanov A.L. et al.* // FTP. - 2003. - Vol. 37, Iss. 6. - P. 748 - 752. (Rus)

Надійшла 02.03.2015
Received 02.03.2015