

Теоретичні та експериментальні дослідження електронних, магнітних і оптичних властивостей нанорозмірних вуглецевмістких матеріалів

Теоретические и экспериментальные исследования электронных, магнитных и оптических свойств наноразмерных углеродосодержащих материалов

Theoretical and experimental investigations of electronic, magnetic and optical properties of nanosized carbon-containing materials

1. Номер державної реєстрації теми - 0116U003763

2. Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. Горшков В.М., Горшков В.Н., Gorshkov V.N.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Люмінофори "білого світла" є важливим компонентом світлодіодів "білого світла", велика частина яких складається з джерел УФ світла (звичайно світловипромінююча гетероструктура на базі InGaN) та люмінофора, який трансформує УФ в широкий спектр "білого світла". Наразі основною складовою люмінофорів є рідкоземельні і важкі метали, що значно ускладнює їх утилізацію і здорожує виготовлення. Крім того, спектральна характеристика сучасних промислових люмінофорів не відповідає спектральній характеристиці сонячного випромінювання. Отримання люмінофорів з високою ефективністю світловипромінювання є дуже актуальною задачею, проте без знання фізичних механізмів світлоутворення неможливо отримати ефективний люмінофор з необхідним спектром випромінювання. Водночас актуальним і перспективним завданням є отримання швидкодіючих і компактних фотоприймачів на базі графенових шарів, що з фізичної точки зору пов'язано з світловипромінюванням таких матеріалів і властивостей омічних контактів до них.

В роботі розроблено технологічні методи синтезу та виготовлено плівки $a\text{-SiO}_2\text{:C/Si}$, $a\text{-SiOC:H/Si}$, та нанопорошки $\text{SiO}_2\text{:C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ із різною термічною обробкою. Встановлено взаємозв'язок між збільшенням вмісту ізольованого вуглецю (C) та зростанням широкої смуги видимої фотолюмінесценції (ФЛ) у $a\text{-SiOC:H}$ плівках та нанопорошках $\text{SiO}_2\text{:C}$. Доведено, що ФЛ випромінювання виникає від C наноточок, розподілених по поверхні $\text{SiO}_2\text{:C}$. Встановлено, що зростання інтенсивності ФЛ у нанопорошках $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ відбувається завдяки формуванню $\text{SiO}_2\text{:C}$ на поверхні Al_2O_3 частинок. Досліджено транспорт носіїв заряду в графенових шарах на SiO_2 . Встановлено, що розсіяння носіїв заряду в графені за підвищених температур визначається фононою складовою. Отримано робочу формулу для ємності контакту метал-графенова плівка. Розроблено простий метод синтезу графенових флейків із твердого прекурсору. Вперше спостережено нові C структури у вигляді графенових бульбашок, багат шарових C трубок та «зірок», які формуються після гамма-опромінення. Виявлено та пояснено значне зменшення питомого опору оксиду графена під час термічного відпалу за низьких температур. Розроблено кінетичний метод Монте-Карло для вивчення процесів вирощування та випаровування наночастинок на/з нанотрубок, а також нестабільності нанодротів, яка призводить до їх перетворення на впорядковані ланцюжки нанокластерів.

(рос.)

Люминофоры «белого света» являются важным компонентом светодиодов «белого света», большая часть которых состоит из источников УФ света (обычно светоизлучающая структура на базе InGaN) и люминофора, трансформирующего УФ в широкий спектр «белого света». На данный момент основной составляющей люминофоров являются редкоземельные и тяжелые металлы, что значительно усложняет их утилизацию и увеличивает стоимость изготовления. Кроме того, спектральная характеристика современных промышленных люминофоров не соответствует спектральной характеристике солнечного излучения. Получение люминофоров с высокой эффективностью светоизлучения является актуальнейшей задачей, но без знания физических механизмов светообразования невозможно получить эффективный люминофор с необходимым спектром излучения. В то же время актуальным и перспективным заданием является получение быстродействующих и компактных фотоприемников на базе графеновых

слоев, что с физической точки зрения связано со светоизлучением таких материалов и свойствами омических контактов к ним.

В работе разработаны технологические методы синтеза и получены пленки $a\text{-SiO}_2\text{:C/Si}$, $a\text{-SiOC:H/Si}$, и нанопорошки $\text{SiO}_2\text{:C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ с разной термообработкой. Установлена взаимосвязь между увеличением содержания изолированного углерода (C) и ростом широкой полосы видимой фотолюминесценции (ФЛ) в $a\text{-SiOC:H}$ пленках и нанопорошках $\text{SiO}_2\text{:C}$. Доказано, что ФЛ излучение возникает от C наноточек, распределенных по поверхности $\text{SiO}_2\text{:C}$. Установлено, что рост интенсивности ФЛ в нанопорошках $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ происходит благодаря формированию $\text{SiO}_2\text{:C}$ на поверхности Al_2O_3 частиц. Исследован транспорт носителей заряда в графеновых слоях на SiO_2 . Установлено, что рассеяние носителей заряда в графене при высоких температурах определяется фоновой составляющей. Получена рабочая формула для емкости контакта метал-графеновая пленка. Разработан простой метод синтеза графеновых флейков из твердого прекурсора. Впервые наблюдались новые C структуры в виде графеновых пузырей, многослойных C трубок и «звезд», формирующиеся после гамма-облучения. Обнаружено и объяснено значительно снижение удельного сопротивления оксида графена во время термического отжига при низких температурах. Разработан кинетический метод Монте-Карло для изучения процессов роста и испарения наночастиц на/с нанотрубок, а также нестабильности нанопроводов, которая приводит к их превращению в упорядоченные цепочки нанокластеров.

(англ.)

Luminophores of “white light” are an important part of white-light-emitting diodes, and the main part of these diodes consists from UV light sources (usually an InGaN-based light-emitting structure) and a luminophor transforming UV into a broad spectrum of white light. To date, rare earth or heavy metals are the main components of luminophors leading to its recycling complexity and increase in manufacturing costs. Moreover, the spectral characteristics of the modern commercial luminophors do not correspond to the spectral characteristics of the sunlight. The production of the luminophors with light emission of high efficiency is a task of current importance; however, without the knowledge of physical mechanisms of light emission, it is impossible to obtain an effective luminophor with an appropriate emitting spectrum. At the same time, the production of high-speed and compact photodetectors is also an actual and perspective task that is connected with the light emission of these materials and properties of ohmic contacts to them.

In current work, the technology methods of synthesis for $a\text{-SiO}_2\text{:C/Si}$ and $a\text{-SiOC:H/Si}$ thin films as well for $\text{SiO}_2\text{:C}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ nanopowders with different thermal treatment were developed and as a result the experimental samples were obtained. The relationship between the growth of isolated carbon (C) content and the rise of broad photoluminescence (PL) band intensity in $a\text{-SiOC:H}$ films and $a\text{-SiOC:H}$ nanopowders has been established. It was proved that PL emission arises from C nanodots distributed over the $\text{SiO}_2\text{:C}$ surface. The increase in PL intensity in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ nanopowders was found to be caused by the formation of $\text{SiO}_2\text{:C}$ on the Al_2O_3 particle surface. The charge carrier transport in graphene layers deposited on SiO_2 was studied. It was found that the charge carrier distribution at high temperatures in graphene is determined by phonon component. A working formula for the capacity of contact metal-graphene film was obtained. A simple method for synthesis of graphene flakes from solid precursor has been developed. The new C structures in the form of graphene bubbles, multi-layer C tubes and “stars” formed after gamma-irradiation were observed for the first time. The significant decrease of specific resistance of graphene oxide by thermal annealing at low temperatures was revealed and explained. The kinetic Monte-Carlo method for investigation of growth and evaporation processes nanoparticles to/from nanotubes as well as for the study of the nanorods non-stability leading to their transformation to ordered nanocluster chains was developed.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню. Спектральні характеристики «білого світла» у отриманих нанопорошках $\text{SiO}_2\text{:C}$ відповідають сучасним міжнародним критеріям для джерел штучного освітлення для житлових приміщень (CCT в діапазоні 4000-6000 K, CRI вище 70%), але на відміну від розробок інших авторів матеріал не має рідкісноземельних домішок (шкідливих для навколишнього середовища). Крім того, у отриманих матеріалах $\text{SiO}_2\text{:C}$ спостерігається суцільний спектр випромінювання, наближений до спектру Сонця, в той час як

у більшості робіт інших авторів «біле світло» виникає шляхом поєднання декількох спектрів (типу червоний/зелений/синій).

6. Економічна привабливість для просування на ринок.

У разі реалізації таких функціональних властивостей світловипромінюючого матеріалу $\text{SiO}_2\text{:C}$, як стабільність спектрів випромінювання і квантового виходу не нижче 60%, тобто на рівні комерційної потреби, світловипромінюючий нанопорошок $\text{SiO}_2\text{:C}$ матиме дуже високу конкурентоспроможність у зв'язку з малою вартістю вихідних матеріалів та відносною простоти та низької енергоємності технологічного процесу в сукупності з відсутністю небезпеки для людини і навколишнього середовища. Основний структурний елемент - пірогенний кремнезем з питомою поверхнею $295 \text{ м}^2/\text{г}$ виробляється в Україні (ДП «Калуський дослідно-експериментальний завод ІХП НАН України»).

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Наступні організації НАН України зацікавлені в розробці технології виготовлення матеріалів для світловипромінювання і ІЧ техніки: Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України; Інститут фізики НАН України, Інститут матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. В проведенні досліджень з розвитку світловипромінюючих матеріалів білого світла, які не містять важких металів, зацікавлені наступні підприємства України: ПАТ "Искра" м. Львів; ООО "ОСП корпорація ВАТРА" м. Тернопіль. Фотоприймачі ІЧ світла також необхідні для оборонної промисловості України. Можливими користувачами у світі можуть бути такі світові лідери з виготовлення світлотехніки, як: OSRAM (Німеччина), The LED Co (США), LUMILEDS (США) та ін.

8. Стан готовності розробки.

Виготовлено тестові лабораторні зразки люмінофорів з високими спектральними характеристиками штучного білого світла, але матеріал потребує подальшої оптимізації в напрямку підвищення квантового виходу і покращення стабільності випромінювання, що може бути досягнуто інкорпорування гетероатомів в С кластери, наприклад атомів азоту.

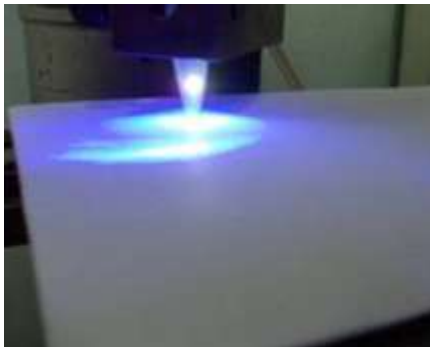
9. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи апробовано у вигляді 20 доповідей на міжнародних конференціях. Результати впроваджено у навчальний процес кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла КПІ ім. Ігоря Сікорського.

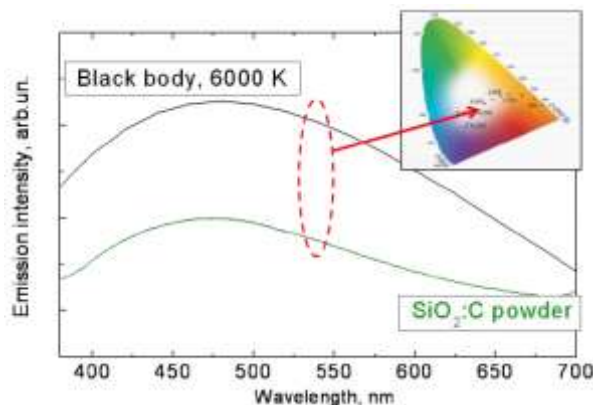
10. Назва організації, телефон, e-mail

КПІ ім. Ігоря Сікорського, фізико-математичний факультет, кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла, (044)-204-81-24, vn.gorshkov@gmail.com

11. Фото розробки



Типове зображення світіння відпаленого феніл-кремнезему при збудженні LED ($\lambda=408$ нм, потужність 40 мВт)



Порівняння спектру ФЛ порошку $\text{SiO}_2\text{:C}$ та спектру випромінювання абсолютно чорного тіла в видимому діапазоні. На вставці зображено положення спектральної характеристики на стандартній хроматичній діаграмі CIE1931.

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Savchenko D., Kassiba A. *Frontiers in Magnetic Resonance (Volume 1): Electron paramagnetic resonance in modern carbon-based nanomaterials.* – Volume 1. – Sharjah, UAE: Bentham Science Publishers. – 2018. – 288 p. – ISBN 978-1-68108-694-1.
2. Vasin A., Verovsky I., Tyortych V., Bolbukh Y., Kisel D., Rudko G., Gule Y., Piryatinsky Y., Starik S., Nazarov A., Lysenko V., The Effect of Incorporation of Hydrocarbon Groups on Visible Photoluminescence of Thermally Treated Fumed Silica // *Journal of Nano Research.* – 2016. – Vol. 39. – P. 80-88.
3. Gorshkov V.N., Yaish Y.E., Privman V., Kinetics Modeling of Nanoparticle Growth on and Evaporation off Nanotubes // *Journal of Applied Physics.* – 2017. – Vol. 121, № 1. – P. 014301-1-014301-8.
4. Vasin A.V., Rusavsky A.V., Kysil D.V., Prucnal S., Piryatinsky Yu.P., Starik S.P., Nasieka Iu., Strelchuk V.V., Lysenko V.S., Nazarov A.N., The effect of deposition processing on structural and luminescent properties of $\alpha\text{-SiOC:H}$ thin films fabricated by RF-magnetron sputtering // *Journal of Luminescence.* – 2017. – Vol. 191B. – P. 102-106.
5. S.I. Tiagulskyi, A.V. Vasin, P.M. Lytvyn, A.S. Nikolenko, V.V. Strelchuk, Yu.Yu. Stubrov, Yu.Yu. Gomeniuk, O.M. Slobodian, V.S. Lysenko, V.N. Poroshin, V. Povarchuk, A.N. Nazarov, Transformation of graphene flakes into carbon nanostructures by γ -irradiation // *Mater. Res. Express.* – 2017. – Vol. 4, № 4. – P. 045602.
6. G.P. Berman, V.N. Gorshkov, V.I. Tsifrinvich, Magnetic resonance force microscopy with a paramagnetic probe // *Phys. Lett. A.* – 2017. – Vol. 381, № 16. – P. 1445-1448.
7. D.V. Savchenko, V. Vorliček, E.N. Kalabukhova, A.A. Sitnikov, A.V. Vasin, D.V. Kisel, S.V. Sevostianov, J. Lančok, A.N. Nazarov, V.S. Lysenko, Infrared, Raman and magnetic resonance spectroscopic study of $\text{SiO}_2\text{:C}$ nanopowders // *Nanoscale Res. Lett.* – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 292-1-292-12.
8. A.V. Vasin, M. Adlung, V.A. Tertykh, D. Kysil, S. Gallis, A.N. Nazarov, V.S. Lysenko, Broad band (UV–VIS) photoluminescence from carbonized fumed silica: Emission, excitation and kinetic properties // *J. Lumin.* – 2017. – Vol. 190. – P. 141-147.
9. D.V. Kysil, A.V. Vasin, S.V. Sevostianov, V.Ya. Degoda, V.V. Strelchuk, V.M. Naseka, Yu.P. Piryatinski, V.A. Tertykh, A.N. Nazarov, V.S. Lysenko, Formation and Luminescent Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:SiOC}$ Nanocomposites on the Base of Alumina Nanoparticles Modified by Phenyltrimethoxysilane // *Nanoscale Res. Lett.* – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 477-1-477-5.
10. V. Gorshkov, V. Privman, Kinetic Monte Carlo Model of Breakup of Nanowires into Chains of Nanoparticles // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 122, № 20. – P. 204301-1-204301-10.
11. D. Savchenko, A. Vasin, S. Muto, E. Kalabukhova, A. Nazarov, EPR study of porous Si:C and $\text{SiO}_2\text{:C}$ layers // *Phys. Status Solidi B.* – 2018. – Vol. 255, № 6. – P. 1700559.
12. Slobodian, O., Lytvyn, P., Nikolenko, A., Naseka, V., Khyzhun, O., Vasin, A., Sevostianov, S., Nazarov, A. Low-Temperature Reduction of Graphene Oxide: Electrical Conductance and

- Scanning Kelvin Probe Force Microscopy // *Nanoscale Res. Lett.* – 2018. – Vol. 13, № 1. – P. 139.
13. A.V. Vasin, D.V. Kysil, L. Lajaunie, G.Yu. Rudko, V.S. Lysenko, S.V. Sevostianov, V.A. Tertykh, Yu. P. Piryatinski, M. Cannas, L. Vaccaro, R. Arenal, A.N. Nazarov, Multiband light emission and nanoscale chemical analyses of carbonized fumed silica // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 124, № 3. – P. 105108.
 14. O.M. Slobodian, S.I. Tiagulskiy, A.S. Nikolenko, Yu. Stubrov, Y.V. Gomeniuk, P.M. Lytvyn, A.N. Nazarov, Micro-Raman spectroscopy and electrical conductivity of graphene layer on SiO₂ dielectric subjected to electron beam irradiation // *Mater. Res. Express.* – 2018. – Vol. 5, № 11. – P. 116405.
 15. A. Vasin, D. Kysil, O. Isaieva, G. Rudko, D. Virnyi, S. Sevostianov, V. Tertykh, Y. Piryatinski, S. Starik, L. Vaccaro, M. Cannas, V. Lysenko, A. Nazarov, Effect of hydration procedure of fumed silica precursor on the formation of luminescent carbon centers in SiO₂:C nanocomposites. // *Phys. Status Solidi (a)* – 2019. – Submitted after revision.
 16. V. Gorshkov, V. Tereshchuk, Kinetic Monte Carlo Model of Dynamics of Nanowires of Carbon-Group Materials: I. Restructuring and Breakup into Nanoparticles // *CrystEngComm* – 2019. – Submitted.
 17. Васін А. В. Структурно-морфологічні, електронні та оптичні властивості аморфних нанокompatитних матеріалів на основі сполук SiOC: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.07 "Фізика твердого тіла" / Васін Андрій Володимирович – НАН України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова. – Київ, 2016. – 34 с.
 18. Slobodyan A.M., Tiagulskiy S.I., Gomeniuk Yu.V., Nazarov A.N., Metal-graphene contact capacitance // 2016 Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS 2016). – IEEE, 2016. – P. 254-256.
 19. Slobodyan A.M., Tiagulskiy S.I., Gomeniuk Yu.V., Nazarov A.N., Metal-graphene contact capacitance // Abstracts of 2016 Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS 2016), Vienna, Austria, 25-27 January, 2016. – Vienna, 2016. – P. 193-194.
 20. Savchenko D.V., Rodionov V.N., Prokhorov A.A., Uzhva V.I., Kalabukhova E.N., ESR and photoconductivity studies of n- and p-type polycrystalline 3C SiC // Proc. of 45th "Jaszowiec" International School & Conference on the Physics of Semiconductors, Szczyrk, Poland, 18-24 June 2016. – Szczyrk, 2016. – P. 107.
 21. Vasin A.V., Rusavsky A.V., Kisel D.V., Rudko G.Ya., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Piryatinsky Yu.P., Starik S.P., The effect deposition processing on short-order structural homogeneity and luminescent properties of a-SiOC:H thin films deposit // Proc. of 2016 E-MRS Spring Meeting, Lille, France, 2-6 May, 2016. – Lille, 2016. – P. M.P1.10.
 22. Gorshkov V.N., Savchenko D.V., Transport of atoms in the near-surface region under sublimation and sintering in the system of nanoparticles // Тези четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2016), 24-27 серпня 2016, Україна, Львів. – Львів, 2016. – С. 316.
 23. Savchenko D.V., Kalabukhova E.N., Vasin A.V., Kisel D.V., Sevostianov S.V., Nazarov A.N., Lysenko V.S., Pulsed EPR and ENDOR study of SiO₂:C nanopowders // Тези четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2016), 24-27 серпня 2016, Україна, Львів. – Львів, 2016. – С. 561.
 24. Vasin A.V., Kysil D.V., Rudko G.Ya., Gule E.G., Degoda V.Ya., Tertykh V.A., Sevostianov S.V., Starik S.P., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Light emission in SiO₂:C and Al₂O₃:C nanocomposites // Тези четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2016), 24-27 серпня 2016, Україна, Львів. – Львів, 2016. – С. 263.
 25. Slobodyan A, Tiagulskiy S.I., Gomeniuk Yu.V., Stubrov Yu.Yu., Nikolenko A.S., Nazarov A.N., Electrophysical properties of the graphene/SiO₂ structures subjected to the electron beam irradiation // Тези четвертої міжнародної науково-практичної конференції

- «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2016), 24-27 серпня 2016, Україна, Львів. – Львів, 2016. – С. 565.
26. A. Slobodyan, A. Vasin, D. Savchenko, V. Gorshkov, S. Tiagulskyi, Y. Stubrov, P. Lytvyn, O. Nazarov, Effect of Electron Beam Irradiation on Structural and Electrical Properties of Graphene-SiO₂-Si Structures // Proc. of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017. – Kyiv, 2017. – P. 659-662.
 27. D.V. Kysil, A.V. Vasin, S.V. Sevastianov, Yu.P. Piryatinsky, S.P. Starik, V.A. Tertykh, A.N. Nazarov, V.S. Lysenko «Light Emission and Structural Properties of Al₂O₃:SiOC Nanocomposites» // International Conference on Physics, Chemistry and Application of Nanostructures "Nanomeeting-2017" Minsk, Belarus, 30 May-2 June 2017. – Minsk, 2017. P. 122-125.
 28. A. Nazarov, A. Slobodyan, A. Nikolenko, Y. Stubrov, Yu.V. Gomeniuk, A. Vasin, D. Savchenko, V. Gorshkov, Electrical Conductivity and micro-Raman Spectroscopy of Graphene Layer Deposited on SiO₂ Dielectric and Subjected to Electron Beam Irradiation // Abstracts&Poster Book of International Conference "Trends in Nanotechnology", Dresden, Germany, 05-09 June 2017. – Dresden, 2017. – P. 92.
 29. V.N. Gorshkov, D.V. Savchenko Numerical Modeling the Rayleigh Instability of Ultrathin Metal Nanorods // Abstract book of V International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2017), Chernivtsi, Ukraine, 23-26 August 2017. – Chernivtsi, 2017. – P. 483.
 30. A. Slobodyan, A. Vasin, V. Naseka, A. Nikolenko, P. Lytvyn, T. Nazarova, S. Sevastianov, A. Nazarov, Low-temperature reduction of Graphene Oxide, // Abstract book of V International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2017), Chernivtsi, Ukraine, 23-26 August 2017. – Chernivtsi, 2017. – P. 225.
 31. V. Gorshkov, V. Tereshchuk, Kinetics model of breakup of nanowires and nanocones into chains of nanoparticles. // Proc. of XIII International Scientific Conference "Electronics and Applied Physics", Kyiv, Ukraine, 24-27 October 2017. – Kyiv, 2017. – P. 99.
 32. Tereshchuk V., Gorshkov V. Restructuring and breakup into nanoparticles of nanowires of carbon-group materials // Proc. of 8 International Scientific and Technical Conference "Sensor Electronics and Microsystem Technologies" (SEMST-8), Odessa, Ukraine, May 28 - June 1 2018. – Odessa, 2018. – P. II-1.
 33. D. Savchenko, A. Vasin, S. Muto, E. Kalabukhova, A. Nazarov Characterization of porous Si:C and SiO₂:C layers by EPR technique // Proc. of 2018 E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, France, 18-22 June 2018. – Strasbourg, 2018. – P. L.12.2.
 34. A.N. Nazarov, A.V. Vasin, D.V. Kysil, L. Lajaunie, L. Vaccaro, G.Yu. Rudko, S.V. Sevastianov, V.A. Tertykh, Yu. P. Piryatinski, R. Arenal, M. Cannas, V.S. Lysenko, Fumed Silica as Morphological Template for the Synthesis of Luminescent Carbon Nanodots // Abstract book of "SiO₂ 2018" Conference, Bari, Italy, 11-13 June 2018. – Bari, 2018. – P. 46-47.
 35. Slobodian O., Lytvyn P., Sevastianov S., Vasin A., Nazarov A. Sensor properties of low-temperature reduced graphene oxide // Abstract book of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018) Kyiv, Ukraine, 27-30 August 2018. – Kyiv, 2018. – P. 190.
 36. Slobodian O., Rusavsky A., Gomeniuk Yu.V., Vasin A., Kysil D., Gudymenko O., Lytvyn P., Sevastianov S., Nazarov A. Graphitic carbon film formation from nanoporous carbon: Structural, electrical and sensor properties // Abstract book of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018) Kyiv, Ukraine, 27-30 August 2018. – Kyiv, 2018. – P. 431.
 37. V. Gorshkov, V. Tereschuk, Monte Carlo Modeling of crystal growth of periodic shells on one-dimension substrates // Abstract book of International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018) Kyiv, Ukraine, 27-30 August 2018. – Kyiv, 2018. – P.

13. Надати ключові слова до розробки

Вуглецеві наноточки, фотолюмінесценція, графен, карбосил, оксид алюмінію, ЕПР.