

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ ПОРИСТОГО КРЕМНІЮ

Запорізька державна інженерна академія

Проведен анализ информационных источников, посвященных исследованию вопросов технологии получения многокомпонентных композиций на основе пористого кремния. Показано, что условия синтеза позволяют получать композиты заданной структуры с желаемыми физико-химическими характеристиками, которые могут найти применение в области фото- и наноэлектроники.

Проведений аналіз інформаційних джерел, присвячених дослідженню питань технології одержання багатокомпонентних композицій на основі пористого кремнію. Показано, що умови синтезу дозволяють одержувати композити заданої структури з бажаними фізико-хімічними характеристиками, які можуть знайти застосування в області фото- та наноелектроніки.

The analysis of informative sources devoted to research of technology questions for multicomponent compositions on the basis of porous silicon has been carried out. It is shown that synthesis conditions allow to receive composites of the set structure with the desirable physical and chemical characteristics which can find application for photo- and nanoelectronics.

Вступ. Важливою проблемою сучасної електроніки є підвищення якості напівпровідників, що пов'язано з широким розвитком наноструктурного матеріалознавства. Одним з напрямків наноструктурного матеріалознавства є багатокомпонентні композиції, які сполучають у своєму складі мікро- та наночастки різних сполук та матеріали, що мають розвинену поверхню. До останніх відносяться пористий кремній (ПК), пористий алюміній, аерогель, пористі матриці цеоліту та опалу, з яких найбільше розповсюдження в електроніці набув пористий кремній. Оскільки кремній електронної якості використовують у 90 % приладів електронної техніки, то актуальним завданням напівпровідникового виробництва є розробка технологій багатокомпонентних композицій на основі пористого кремнію, які можуть бути інтегровані в сучасний технологічний процес електронного приладобудування без значного його змінювання.

Останнім часом увага дослідників зосереджена на так званих нанокompозитах, які є одним з видів багатокомпонентних електронних приладових композицій на основі пористого кремнію. В таких структурах одна з фаз має розміри менше 100 нм і періодично повторюється між іншими фазами, що складають матеріал. Проте у багатьох випадках або матеріал матриці або матеріал-наповнювач характеризуються більшими розмірами та мають досить не впорядковану структуру (ізотропне орієнтування). Тому нанокompозитом називають виключно впорядковану, орієнтовану структуру з розмірами до 100 нм для всіх складових речовин.

Також інтереси дослідників пов'язуються, по-перше, зі стабілізацією властивостей ПК, що в плінні часу піддаються окисненню, по-друге, з формуванням нових люмінісцентних властивостей одержаних шарів, по-третє, з поліпшенням виходу ефективної електролюмінісценції таких структур. Четвертою причиною створення таких шарів називають реалізацію нових властивостей не притаманним ПК. Кількість і тип

речовини, що вводиться у пори може варіюватися в широких межах і створювати нові можливості до використання в багатокомпонентних композиціях різних галузей застосування. Всі вищеперелічені фактори підкреслюють актуальність удосконалення існуючих технологій створення багатокомпонентних електронних приладових композицій (БЕПК) на основі пористого кремнію.

Мета роботи полягає в узагальненні відомих наукових праць, присвячених розвитку технологій формування багатокомпонентних композицій на основі пористого кремнію.

Основний матеріал і результати дослідження. Як відомо, у сучасній нанотехнології існують два основні підходи для створення БЕПК. Перша технологія «зверху – вниз» («*top – down*») полягає у видаленні непотрібного матеріалу масивної заготовки методами селективного хімічного травлення, пульверизації, «золь-гель» процесами, гідротермальним синтезом, методами літографії й одержанні як результат об'єктів з розмірами, заданими в нанометровому діапазоні. Друга технологія «знизу – верх» («*bottom – up*») – створення нанорозмірних структур з атомів і молекул: самоорганізація наноструктур, фізичні методи осадження [Physical Vapor Deposition (PVD)] і хімічні методи осадження [Chemical Vapor Deposition (CVD)], епітаксія, супрамолекулярний дизайн, хімічний і біохімічний синтез, атомні маніпуляції та дизайн [1-3].

Реалізація технологічних режимів створення БЕПК сполучає комбінацію підходів «зверху – вниз» і «знизу – верх». На першому етапі формується ПК-матриця – основа майбутнього БЕПК. На другому етапі у канали пор ПК осаджують розчин або твердий матеріал за різними методиками, дослідження яких показало, що найкраще проникнення матеріалів у ПК забезпечують «вологі» методи – плівкові технології: фізичні методи осадження (PVD) та хімічні методи осадження (CVD), електроосадження, «золь-гель» процеси та методи пульверизації.

Існує багато робіт, де було досліджено структури БЕПК на основі пористого кремнію. Тому такі композиції необхідно класифікувати за компонентом – наповнювачем на металічні, органічні, вуглецеві й оксидні БЕПК.

Л.Т. Кенхем [4,5] був першим, хто здійснив просочення в пори ПК різних органічних барвників (розчинів етанолу з кумарином, ксантеном і оксозином). Він вперше спостерігав люмінесценцію таких структур і виявив, що дослідження оптичних властивостей (показники відбиття) показують достатню дифузію молекул органічних барвників у матрицю ПК. Зразки було просочено розчином родаміна 6G та далі висушено за температури 60 °C. Також у роботі [5] відзначається, що молекула родаміна 6G має довжину меншу за 1 нм. Тому просочення в пори пористого кремнію p-типу провідності відбувається в глибину ПК на 3 нм, а для p⁺-типу провідності – на 10 нм.

В роботі [6] представлено результати проникнення полімерів (поліаміду, полістіролу, ПММА, ПВХ) у ПК з наступною полімеризацією мономеру. Під час дослідження характеристик композицій ПК/поліамід підтверджено підвищення твердості на 42 % і теплопровідності – 24 %.

Для створення електродів у мікрофлюїдних пристроях використовується багатокомпонентні композиції ПК/поліпірролу, які одержано електроосадженням поліпіролу в ПК за гальваностатичним режимом за постійної густини струму 2,5 мА/см² з електроліту, який складається з ацетонітрилу, мономеру, піролу і р-толуенсульфонові кислотою [7].

Відома публікація [8], де розглянуто питання заповнення пор ПК полярними рідкими кристалами (РК) 4-п-октил-4-ціанобіфеніл (8CB), діелектричні властивості

якого добре вивчені. Заповнення пор здійснювалося з ізотропної фази РК за температури 50 °С у плинні однієї години. Було встановлено, що РК у порах перебуває в частково впорядкованому стані з напрямком орієнтування молекул паралельно стінкам пор. Поворотом орієнтування молекул РК можна керувати за допомогою електричного поля.

В роботі [9] методом структурування мікрокапель утворені композитні шари ПК/полімер на фотонних кремнійових кристалах, які мали добрі спектральні властивості ПК і покращені механічні характеристики. Полімерні мікрокраплі діють як маска травлення, а також потрібні для стабілізації ПК. Дана технологія осадження є похідною від методів, що засновано на струйному друку та методі пульверизації (розпилення), які було використано для контролю розмірів крапель осадженого матеріалу.

Одним з основних критеріїв якості БЕПК метал/ПК є глибина проникнення часток металу в пористий шар. Дослідження останніх років показали, що краще проникнення металів у ПК забезпечують «вологі» методи осадження. Серед цих методів особливою увагою дослідників користується метод хімічного заміщення [10]. Даний метод полягає у витримці ПК у розчині для осадження, де протікають окислювально – відновлювальні реакції між кремнієвим кістяком та іонами металу з розчину. Як результат відбувається відновлення металу до атомарної форми, сполучене з розчиненням кістяка ПК. Осадження міді здійснювали з водяного розчину 0,025 М $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ + 2 об. % HF (45 %) + 4 об. % C_3H_7OH . Час осадження варіювали від 4 до 180 с.

За допомогою «золь-гель» технології та методу Печіні (методу органічних попередників) з солей металів таких, як $PtCl_4$, $HAuCl_4$, $Au(NO_3)_3$ і $PdCl_2$, відповідно з додаванням HCl (32 %), що було розчинено в етиловому спирті, виготовлено БЕПК з платиною, золотом і паладієм як матеріала-наповнювача [11]. За такими ж методиками з розчинів $Si(OC_2H_5)_4$ (TEOS) і Fe (III) були виготовлені структури БЕПК Fe_2O_3 [12,13].

Магнітні матеріали $CoNi(P)$, $Fe(P)$, $FeNi(P)$ [14,15] осаджувалися у пори циліндричної форми як результат гетерогенної реакції відновлення іонів металу з водяного розчину відповідних солей з відновлювачем гіпофосфітом натрію (NaH_2PO_2). Температура розчину становила 80 °С. Також було виготовлено реперні плівки осадженням з того ж розчину на поліровану поверхню монокристалічного кремнію, що дало можливість провести порівняння особливостей магнітних відгуків.

Так як наночастинки 3d-металів та їх оксидів (Fe, Co, Ni), що дисперговані в діелектричну матрицю ПК, мають підвищені значення коерцитивної сили, магнітного моменту, зсування петлі «гістерезіса» та деякі магнітооптичні властивості [11]. Наприклад, у роботі [16] магнітні наночастинки нікелю кількістю $10^{17} \dots 10^{18}$ атомів на 1 см^2 видимої поверхні ПК, сформовано на стінках пор ПК шляхом електрохімічного осадження. При цьому розмір часток становить від 2 до 6 нм. Також у даній статті наведено результати осадження монодисперсних наночастинок оксиду заліза у матрицю ПК, розмір яких становить 5 і 8 нм відповідно.

Серед технологічних особливостей формування БЕПК на основі магнітних матеріалів треба зауважити те, що виготовлення магнітних ізольованих наночастинок досить важко сягати у зв'язку через їх легке окислювання бо мають велику площу поверхні по відношенню до обсягу, внаслідок, квантово-розмірного ефекту. Окрім того, слід зазначити їх властивість створювати агломерати через магнітні монодисперсні

взаємодії. Тому включення металевих наночастинок у діелектричну матрицю ПК призводить до різкого змінювання притаманних властивостей об'ємного матеріалу.

Особливий інтерес дослідників привернуто до формування магнітних наночастинок на основі феромагнітних матеріалів групи заліза в діелектричній матриці ПК. Такі дослідження базуються на технології електролітичного анодування за гальваностатичним режимом. Осадження проводять з водного розчину сульфата заліза ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$), кобальта ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$) або суміші цих розчинників за підкисленням сірчаною кислотою. Також відома технологія синтезу феромагнітних наночастинок за умов високої температури прекурсорів у присутності олеїнової кислоти [17,18], де авторами встановлено, що залізо формується у вигляді суцільного шару та покриває всю поверхню в той час як кобальт суттєво просочується в глиб ПК. Також за водних розчинів солей зв'язки $Si - H$ у розчинах можуть заміщатись зв'язками $Si - Fe$.

В роботі [19] формування структури БЕПК платина на пористому кремнії ($Pt/ПК$) і паладій на пористому кремнії ($Pd/ПК$) здійснювали у двох режимах – «*in-situ*» та «*ex-situ*». За «*in-situ*» режимом γ -випромінювання проводили у розчині в присутності зразків ПК; за «*ex-situ*» режимом спочатку проводили γ -випромінювання розчина без ПК, а потім здійснювали адсорбцію наночастинок з розчину на ПК.

Як електрокаталізатори водно-повітряних хімічних джерел струму використовуються наночастки платини, паладію та срібла, що внесено в ПК [18,19,20].

Групою О.М. Віноградова було досліджено магнітооптичні та магнітні властивості композицій $Co/ПК$ [21], де мікрогранули металу вносилися у поруватий шар електрохімічним методом зі спиртового розчину $CoCl_2$.

Включення провідних і прозорих матеріалів у пори ПК здається привабливим підходом до реалізації ефективних пристроїв електролюмінесценції. Було опробовано різні матеріали, такі, як SnO_2 , CdS , ZnS , ZnO [5,22-27].

В роботі [13] за «золь-гель» технологією сформовано багатокомпонентні композиції $SiO_2-Fe_xO_y$, де основою для диспергування металевих та оксидних наночастинок є аморфний діоксид кремнію SiO_2 . Такі структури мали у своєму складі суміш кристалічних модифікацій $\gamma-Fe_xO_y$ та $\alpha-Fe_xO_y$. За тією ж технологією виготовлено БЕПК $ПК/ZnO$ із розчину цинк ацетату [9].

За технологіями хімічного парофазового осадження, молекулярного нашарування та магнетронного розпилення створено нанокомпозит $ПК/SnO_2$ [25,27], в якому за результатами атомно-силової мікроскопії спостерігали виникнення провідного перколяційного кластера за вмістом SnO_2 більше 50 % [26].

До ряду вуглецевих багатокомпонентних електронних приладових композицій відносяться структури $ПК/C60$ [28], де внесення фулерена $C60$ у ПК виконувалося у розчині тетрахлориду вуглецю з концентрацією $\sim 10^{-4}$ моль/л і наступних підсушуванням на повітрі. В таких композиціях спостерігається ефект взаємовпливу двох нанорозмірних систем ($ПК$ і фулерену $C60$) на фотопроекти, тобто фотозбудження композиції у середовищі нормального (триплетного) молекулярного кисню призводить до самоізоляції кремнійових нанокристалітів за рахунок окиснення синглетним киснем, що генерується збудженою фулереновою підсистемою.

У роботі [29] ПК був модифікований ультрадисперсним алмазом детонаційного синтезу. Для формування алмазоподібних плівок використовували електрофоретичний спосіб, що реалізує просте осадження ультрадисперсного алмазу із суспензій.

Відомі роботи [30], в яких показана можливість створення композиційного шару $Si-SiO_2$ шляхом термічного окиснення ПК протягом 15 хвилин за температури 1223 К. Одержані при цьому композиції склалися з оксиду кремнію з включеннями кристалічної фази кремнію у вигляді округлих часток з розмірами в інтервалі 5...30 нм і ниткоподібною мережевою структурою з товщиною ниток порядку декількох нанометрів [31]. При цьому спостерігали змінювання оптичних та електрофізичних властивостей, до яких відноситься збільшення ширини забороненої зони та типу провідності напівпровідника. Окрім того, на міжфазній межі нанокластера та навколишнього діелектрика з'являються з енергією активації, що збільшують ширину забороненої зони монокристалічного напівпровідника [31].

Серед значного різноманіття робіт необхідно ввести критерії вибору наповнювачів:

- енергія для створення вільних носіїв заряду не повинна бути більшою за 2 еВ для органічних матеріалів і більшою за 3,5 еВ - для оксидних матеріалів;
- рухливість носіїв заряду повинна визначатися власними властивостями матеріалу, а не складом неконтрольованих хімічних домішок або дефектів;
- створення вільних носіїв заряду не повинно бути пов'язано із домішковими станами;
- загальна провідність повинна бути в інтервалі $10^{-7} \dots 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}$ (для органічних матеріалів).

Головними критеріями вибору пористого кремнію для виготовлення БЕПК треба назвати: кристалографічну орієнтацію (100, 110) вихідних пластин; відсутність на поверхні ПК домішок, вологи та залишків електрохімічного травлення HF , SiF_2 ; формування БЕПК на неокисленому ПК для кращого контакту з матеріалом-наповнювачем.

Висновки. Таким чином основними технологіями одержання БЕПК є: електрохімічний метод, «золь-гель» процес, метод Печіні, метод структурування мікрокрапель, змішування дисперсії часток наповнювача в матриці ПК з наступним випаровуванням розчинника або з наступною полімеризацією полімера, окиснення ПК, метод друку. Також розширені уявлення про класифікацію БЕПК на основі пористого кремнію. Представлено критерії вибору наповнювачів та ПК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнику [Текст] / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение, 2007. – 496 с. – Библиогр. : с. – . – ISBN
2. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы [Текст]: учеб. пособие / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с. Библиогр. : с. – . – ISBN
3. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию [Текст]: пер. с японського. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с. Библиогр. : с. – . – ISBN
4. Canham, L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [Text] / L. T. Canham // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 57, № 10. – P. 1046- 1049.
5. Elhouichet, H. Photoluminescence properties of porous silicon nanocomposites [Text] / H. Elhouichet, M. Oueslati // Materials Science and Engineering B – 2001. – Vol. 79. – P. 27–30.

6. Fabrication and Characterization of Light Emitting Porous Silicon and Polymer Nano-composites [Text] / *S. P. Duttagupta*, P. M. Faucheta, X. L. Chena, S. A. Jenekhea // Cambridge Journals. – 2011. – Vol. 452, № 2. – P. 473-478.
7. Polypyrrole -porous silicon nanocomposites [Text] / A. C. Popa, R. Turcu, I. Craciunescu etc. // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2008. – Vol. 10, № 9. – P. 2319-2325.
8. Дрокин, Н. А. Измерения СВЧ-диэлектрической проницаемости жидких кристаллов в пористом кремнии [Текст] / Н. А. Дрокин, В. А. Тимашов, В. А. Юзова // «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы междунар. крым. микроволн. конф., (КрыМиКо'2008). – Севастополь : Вебер, 2008. – Т. 2, секция 7/3: Измерение параметров материалов. – С. 745-746.
9. *Li, Y. Y.* Porous-Silicon/Polymer Nanocomposite Photonic Crystals Formed by Microdroplet Patterning [Text] / Y. Y. Li, V. S. Kollengode, M. J. Sailor // Advanced materials. – 2005. – Vol. 17. – P. 1249-1251.
10. Наноконпозиты медь/пористый кремний: формирование, свойства и применение [Текст] / *Бондаренко А. В.*, Прищепа С. Л., *Valucani M.* и др. Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. науч. конф., 20-23 окт. 2009 г., Минск. В 3 т. / редкол. : Н. М. Олехнович (пред.). – Минск : Изд. центр БГУ, 2009. – Т. 3. – 406 с.
11. *Polisski, S.*, 2010. Porous silicon / noble metal nanocomposites for catalytic applications. Thesis (Doctor of Philosophy (PhD)). September 2010 [Electronic resource] / University of Bath. – Access mode : \ www / opus.bath.ac.uk/27835/1/UnivBath_PhD_2010_S.Polisski.pdf/ – 24.01.2013 г. – The title from the screen.
12. Rapid preparation of porous Fe₂O₃/SiO₂ nanocomposites via an organic precursor [Text] / *D. Li, D. Wu, X. Wang* etc. // Materials Research Bulletin. – 2001. – Vol. 36. – P. 2437-2442.
13. Наноконпозиты «диоксид кремния – оксид железа» формируемые золь-гель методом [Текст] / *А. А. Бойко*, Е. Н. Подденежный, О. А. Стоцкая и др. // сб. докл. междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела» ФТТ-2005. – Минск, 2005. – Том 1. – С. 361-363.
14. Синтез магнитного дисперсионного материала на основе нитевидных наночастиц железа в матрице мезопористого диоксида кремния [Текст] / *А. Ю. Арбенн*, И. Н. Мукконен, Е. Г. Земцова, В. М. Смирнова // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Часть 1: тез. докл. междунар. симпозиума, 23-25 мар. 2011 г., Минск / П. А. Витязь (отв. ред.). – Минск : Изд. центр ГНУ «Институт порошковой металлургии», 2011. – 384 с.
15. *Антропов, И. М.* Адсорбционная чувствительность наноконпозита «пористый кремний - никель» к метану [Текст] / И. М. Антропов, Г. Б. Демидович, С. Н. Козлов // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 5. – С. 43-48.
16. *Granitzer, P.* Magnetic Nanoparticles Embedded in a Silicon Matrix [Text] / P. Granitzer, K. Rumpf // Materials. – 2011. – Vol. 4. – P. 908-928.
17. Получение наноконпозитов пористого кремния с железом и кобальтом и исследование их электронного строения методами рентгеновской спектроскопии [Текст] / *В. М. Каукаров*, А. С. Леньшин, Б. Л. Агапов и др. // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 17. – С. 89-96.
18. Investigation of a Mesoporous Silicon Based Ferromagnetic Nanocomposite [Text] / *P. Granitzer, K. Rumpf, A. G. Roca* etc. // Nanoscale Res. Lett. – 2010. – Vol. 5. – P. 374-378.
19. *Яштулов, Н. А.* Электронодефицитные наночастицы платины и палладия на пористом кремнии [Текст] / Н. А. Яштулов // Вестник МИТХТ. – 2011. – Т. 6, № 3. – С. 87-93.
20. Investigation of Silver-, Meso- and Nanoporous Silicon Composite Layers for Biomedical Applications [Text] / *I. Kleps, M. Miu, M. Danila* etc. // Romanian journal of information science and technology. – 2007. – Vol. 10, № 1. – P. 97-111.
21. Магнитооптические и магнитные свойства наноконпозитов гранулированный кобальт – пористый кремний [Текст] / *А. Н. Виноградов*, Е. А. Ганьшина, В. С. Гушин и др. // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, № 13. – С. 84-89.

22. Oxide-matrix based nanocomposite materials for advanced magnetic and optical functionalities [Text] / *E. Pellicer, E. Rossinyol, M. Cabo etc.* // *Advances in Nanocomposites - Synthesis, Characterization and Industrial Applications* (2011) Ed.B.S.R.Reddy, InTech, Rijeka, Croatia, 2011. – 358 p. – ISBN 978-953-307-165-7.
23. Properties of the ZnO / PS nanocomposites obtained by sol-gel method [Text] / *H. Cai, H. Shen, L. Lu etc.* // *Optoelectronics and advanced materials – rapid communications.* – 2010. – Vol. 4, № 5. – P. 650-653.
24. *Карпова, С. С.* Исследование газочувствительных оксидов металлов, полученных золь-гель методом [Текст] / *С. С. Карпова, А. А. Бобков* // *Молодой ученый.* – 2012. – № 9. – С. 21-25.
25. Исследование слоев нанокompозита пористый кремний – оксид олова с помощью метода спектральной эллипсометрии [Текст] / *В. В. Болотов, Н. А. Давлеткильдеев, А. А. Коротенкой др.* // *Журнал технической физики.* – 2011. – Т. 81, № 11. – С. 52-57.
26. *Мошников, В. А.* Сетчатые газочувствительные нанокompозиты на основе диоксидов олова и кремния [Текст] / *В. А. Мошников, И. Е. Грачева* // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». – 2009. – № 4. – С. 92-98.
27. Исследование электрофизических и газочувствительных свойств слоев нанокompозита $\text{por-Si} / \text{SnO}_x$ [Текст] / *В. В. Болотов, В. Е. Росликов, Е. А. Курдюков и др.* // *Физика и техника полупроводников.* – 2012. – Т. 46, № 1. – С. 109-112.
28. Передача энергии фотовозбуждения в нанокompозите пористый кремний – фуллерен в кислородсодержащей атмосфере [Текст] / *В. Б. Пикулев, С. Н. Кузнецов, А. А. Сарен и др.* // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, № 3. – С. 75-80.
29. *Юзова, В. А.* Развитие технологии получения и исследования пористого кремния [Текст] / *В. А. Юзова, А. А. Левицкий, П. А. Харлашин* // *Журнал Сибирского федерального университета.* – 2011. – Т. 1, № 4. – С. 92-112.
30. Транспортные свойства термически окисленного пористого кремния [Текст] / *Л. В. Григорьев, И. М. Григорьев, М. В. Замокрынская и др.* // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, № 17. – С. 31-40.
31. Исследование структурных свойств и токового транспорта в нанокompозите, сформированном на поверхности кремния посредством окисления пористого слоя [Текст] / *Л. М. Сорокин, Л. В. Григорьев, А. Е. Калмыков, В. И. Соколов* // *Физика твердого тела.* – 2005. – Т. 47, № 7. – С. 1316-1322.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2012 р.
Рецензент, проф. Т.В. Критська