

**О. К. Порада*, В. І. Іващенко, Л. А. Іващенко, А. О. Козак,
О. О. Ситіков**

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича
НАН України, м. Київ, Україна

*o-porada@ukr.net

Плазмохімічне устаткування для осадження нанокompозитних наносаруватих плівок

Приведено основні принципи створення на базі вакуумного універсального поста ВУП-5(М) та подальшого використання плазмохімічного устаткування для осадження тонкопліткових, у тому числі наносаруватих, матеріалів із парів зазвичай рідких прекурсорів. Метод можна класифікувати як осадження в газовому середовищі, активоване радіочастотною плазмою Е-типу в системах з безперервним потоком (метод відкритої труби). Устаткування універсальна до вибору прекурсорів та має достатній набір технологічних параметрів, що дає можливість осаджувати широкий спектр покриттів з контрольованою товщиною від 1 до 2000 нм. Плазмохімічне устаткування вигідно доповнює набір технічних можливостей ВУП-5(М) і розширює його експлуатаційні характеристики без суттєвого втручання в конструкцію.

Ключові слова: тонкі тверді плівки, нанокompозитні та наносаруваті плівки, плазмохімічне устаткування, ВУП-5(М), PECVD, ALD, технологічні параметри.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку науки і техніки стрімко розвиваються технології, що пов'язані з розробкою та виготовленням нових тонкопліткових матеріалів. Особливо затребувані технології нанесення нанопокриттів – atomic layer deposition (ALD), що викликано значними успіхами в фундаментальних наукових дослідженнях в області нанотехнологій та комерціалізацією нанопокриттів [1–3]. Тонкопліткові матеріали у своїй структурі можуть мати або поєднувати аморфну, нано- та мікрокристалічну фази, в тому числі у складі багатосаруватих і композитних покриттів [4]. Тонкі плівки проявляють надзвичайні властивості і можуть мати різноманітне застосування – від зміцнення різальних інструментів [5] до створення нового покоління планарних напівпровідникових [6–8] і біомедичних [9, 10] пристроїв, що здатні працювати в екстремальних умовах.

Донедавна, у більшості випадків, тонкі плівки наносили хімічним осадженням – chemical vapor deposition (CVD), із летких прекурсорів [11–14] і фізичним осадженням – physical vapor deposition (PVD), зазвичай магнетронного розпилення відповідних мішеней [15, 16]. Розвиток цих методів і поєднання їх переваг привело до створення цілого ряду похідних методик по отриманню тонкопліткових матеріалів. Серед них найбільшого поширення набув плазмохімічний (PECVD) метод осадження [17–19]. На відміну від класичного CVD-осадження, метод PECVD надає можливість проводити осадження при помірних температурах, що запобігає температурному впливу

на підкладки (наприклад, не твердосплавного різального інструменту) чи на попередньо нанесені плівки при створенні покриттів типу “сандвіч”. Наявність газового розряду створює умови для організації зміщення на підкладко-тримачеві (за рахунок різниці в рухливості електронів та іонів). Зміщення надає можливість контролювати іонне бомбардування покриття, що осаджується. Воно запобігає дифузійному гальмуванню масообміну позитивним об’ємним зарядом, що накопичується на поверхні підкладки. Задаючи певне значення напруги зміщення, а також температури підкладки, витрати введених реагентів і потужності газового розряду можна керувати швидкістю осадження, розміром і формою зерна, залишковою напругою, кількістю бажаних і небажаних домішок, адгезією та іншими характеристиками покриття. В результаті можна отримати покриття, які по фізико-механічним властивостям перевершуватимуть відповідний об’ємний матеріал. Слід підкреслити, що в плазмохімічному методі технічно нескладно реалізувати осадження як багаточарового, так і композитного покриттів. Окремо слід зауважити, що треба враховувати швидкість осадження плівок на такому обладнанні. Як показав наш досвід експлуатації плазмохімічної установки (ПХУ), найменша контрольована товщина осаджених плівок має значення < 1 нм. Це відкриває широку перспективу використання методу для атомно-слоєвого осадження – ALD [1–3]. Але тільки осадження плівок з низькою швидкістю дає можливість створювати структури з нанометровими товщинами зі збереження відтворюваності характеристик покриттів. І, нарешті, плазмохімічне осадження не є енергозатратним.

На жаль ПХУ, яке виробляють тільки закордонні фірми, є дуже вартісним. Так, за інформацією компанії ТОВ “СК “ІНТЕК”, яка є офіційним представником відомого виробника “Oxford Instruments Plasma Technology” на території Росії, України, Білорусії і Казахстану, орієнтовна вартість найдешевшої плазмохімічної установки Plasmalab 80 Plus становить біля 480 000 євро без урахування доставки, підключення та гарантійного обслуговування. З іншого боку, дослідники, які мають власноруч створене лабораторне обладнання, неохоче діляться інформацією по його конструктивному улаштуванню та експлуатації. Все це стримує розвиток плазмохімічних тонкоплівкових технологій, зокрема в Україні.

Враховуючи наведене вище, запропоновано лабораторне ПХУ на базі ВУП-5 [20]. Протягом багатьох років підприємством “SELMI” (Суми, Україна) було випущено велику кількість приладів ВУП-5(М), які переважно зосереджені в інститутах академії наук України і країн СНД. Прилад призначений для отримання широкого спектру тонкоплівкових матеріалів декількома методами для підготовки об’єктів, що досліджують за допомогою електронного мікроскопу чи інших аналітичних приладів, і може бути застосований для досліджень в різних областях фізики, хімії, біології, медицини та ін. ВУП-5 зручний і економний в експлуатації та має надійну вакуумну систему. Доповнення задекларованих можливостей ВУП-5 сучасною плазмохімічною технологією вигідно розширює його технічне застосування. Таке устаткування може бути реалізоване науково-дослідною, комерційною чи будь-якою іншою установою, що має у своєму розпорядженні діючий ВУП-5 (М) і має потребу у використанні плазмохімічної технології.

УЛАШТУВАННЯ І ПРИНЦИП ДІЇ ПХУ

Для пристосування ВУП-5(М) під плазмохімічне осадження у ньому демонтується всі навісні вузли в робочому об’ємі, а звільнений простір осна-

шується системою високочастотних електродів, електронагрівачем підкладок і газопідводом реактивної суміші в зону осадження. У конструкції внутрішньокамерного пристрою (рис. 1) використаний принцип планарної системи збудження і підтримки газового радіочастотного розряду, де поєднана класична конденсаторна система PECVD-осадження з радіочастотним розрядом між паралельними електродами Е-типу з живленням від основного генератора і система осадження, що аналогічна системі реактивного іонного травлення – reactive ion etching (RIE), з подачею напруги від додаткового радіочастотного (РЧ) генератора на електрод з підкладкою [21]. Така конфігурація забезпечує інтенсивну активацію суміші основним РЧ-генератором і регулювання енергії та потоку іонів на підкладку за рахунок утворення на ній потенціалу негативного зміщення від додаткового РЧ-генератора.

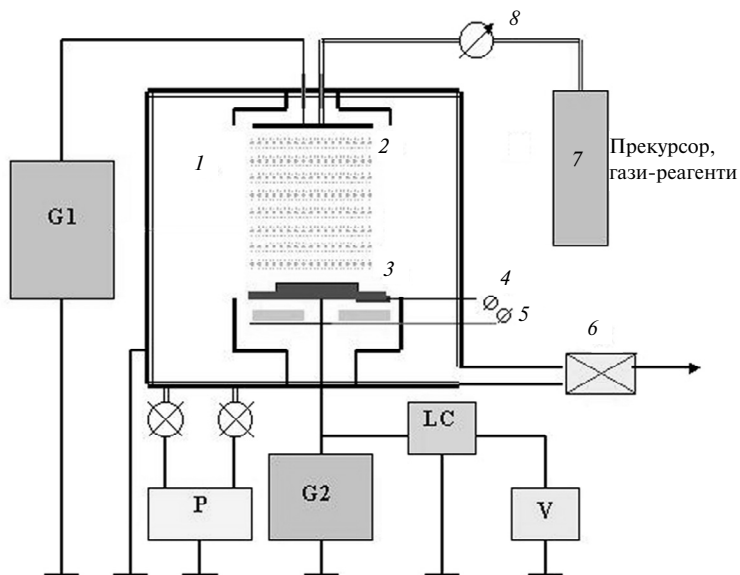


Рис. 1. Блок-схема плазмохімічної РЧ-установки на базі ВУП-5: 1 – вакуумна камера; 2 – верхній електрод; 3 – електрод зміщення (підкладкотримач) з підкладкою; 4 – термопара; 5 – нагрівач підкладкотримача; 6 – вакуумна система; 7 – система постачання реагентів; 8 – індикатор тиску в камері реактора; G₁ – основний РЧ-генератор; G₂ – РЧ-генератор негативного зміщення на підкладкотримачеві; LC – фільтр низьких частот; V – вольтметр для вимірювання плаваючого потенціалу U_f і потенціалу зміщення U_d ; P – вакуумметр.

Газорозрядний проміжок умовно можна поділити на дві вертикально розміщені зверху вниз складові: зону активації реактивної суміші, яка концентрується ближче до верхнього електроду, і зону осадження біля електроду зміщення (підкладкотримача). Розряд в зоні активації збуджується РЧ-генератором G₁. Із зони активації продукти розпаду у плазмі розповсюджуються в зону осадження, в якій розміщується підкладкотримач, що підігрівається. На нього подається РЧ-напруга від генератора G₂. Негативний потенціал самозміщення, що виникає при цьому, визначає середню енергію падаючих іонів, а щільність іонного потоку задається потужністю, що відбирається від генератора G₁. Таким чином структура і склад отриманого покриття загалом залежні від складу газової суміші, температури підкладки, потужності газового розряду і умов іонного бомбардування, що визначається напругою зміщення.

Підкладкотримач підігривається компактним вбудованим електронагрівачем резистивного типу. Живиться підігрівач джерелом живлення пристрою для термічного випаровування з резистивних випаровувачів. Спіраль нагрівача, виготовлена із вольфрамової проволочки чи листового молібдену, разом з системою теплових екранів забезпечують ефективне направлене і рівномірне нагрівання підкладкотримача. На підкладкотримачеві з нержавіючої сталі, що має форму циліндра з діаметром основи ~ 70 мм і висотою 5 мм, досягається температура до 700 °С. Потрібно зауважити, що такий нагрівач спроможний забезпечити надійний підігрів значної кількості осаджуваних зразків. Для звичайних науково-дослідних потреб з невеликою кількістю осаджуваних зразків можна скористатися штатним пристроєм для нагрівання столика (для ВУП-5) або нагрівачем підкладок, що підігривається випромінюванням галогенових ламп (для ВУП-5М).

При осадженні нанорозмірних плівок дуже важливо тонко регулювати і контролювати витрату газового реагенту при подачі його в зону осадження. В системі постачання реагентів використано високочутливий електронний витратомір газів, що працює в парі з модернізованим терморезистивним датчиком витрати газів типу РРГ-3 і проградуирований на подачу конкретного газу, стабілізатор тиску типу РДМ-3, високочутливі вакуумні регулятори витрати газу. Підібраний розмір калібровочної втулки регуляторів забезпечує дозування витрат всього діапазону газових потоків (від $0,5$ до 20 $\text{см}^3/\text{хв}$), що використовуються в технологічній установці. Із термостатованого контейнера, в якому розміщено барботер з рідким прекурсором, пари прекурсорю транспортуються воднем (аргоном, гелієм) до реактора. Концентрація парів прекурсорю у транспортуючому газі залежить від витрати останнього і від температури термостатованого контейнера, яка регулюється в межах від кімнатної температури до 80 °С і підтримується з точністю ± 1 град.

Для потреби доочищення технологічних газів від залишків води, вуглекислого газу та кисню сконструйовано і виготовлено спеціальні триступінчаті газоочисні пристрої. Усі трубопроводи і вакуумні регулятори витрати газу системи газорозподілу, по яких транспортуються реагенти, оснащено системою регульованого підігріву. Це запобігає утворенню конденсату в лінії (особливо при використанні хлоровмісних реагентів), що могло б призвести до порушення прохідності трубопроводу і втрати контролю над витратою газово-парової суміші з наслідками погіршення відтворюваності характеристик покриттів.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПХУ, ЇХ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК

Для плазмохімічного осадження певного матеріалу в якості першоджерела можуть бути використані різні прекурсори. Вони мають відмінні механізми індукованих хімічних перетворень, а з практичної точки зору визначають відмінність властивостей отримуваних плівкових структур [3]. Окрім того, властивості покриттів можуть бути змінені вар'юванням значною кількістю технологічних параметрів [4, 22–25], межі регулювання яких визначаються технічними можливостями використаного обладнання. Основними параметрами осадження є T_S – температура підкладкотримача, яка регулюється в межах від 0 до 700 °С; p_w – питома потужність, що відбирається від основного РЧ-генератора для запалення та підтримки газового розряду, вона регулюється в межах від $0,1$ до 1 $\text{Вт}/\text{см}^3$; U_d – напруга негативного зміщення на підкладкотримачеві з можливістю регулювання за значенням від 0 до -300 В;

F_G – регульована витрата доданого технологічного газу, що подається в реактор; F_{G+P} – витрата транспортного газу з парами прекурсору через барботер; p_c – тиск суміші робочого газу в реакторі, що забезпечує стабільність газового розряду для всіх можливих комбінацій інших параметрів осадження; t – час осадження, який не пов’язується з іншими параметрами і визначається потребою в товщині плівки. Осадження протягом 60 хв у межах цих параметрів забезпечує товщину покриттів до 2000 нм в залежності від матеріалу підкладки, складу покриття і режиму осадження. Традиційно для наукових потреб використовували стандартні підкладки з монокристалічного кремнію, але в багатьох випадках для дослідження прикладних завдань застосовували підкладки з твёрдосплавних пластин, скла, кварцу, нікелю, сталі, ситалу, полікору та інших матеріалів [4].

Використання складних прекурсорів в якості джерела елементів майбутнього осадження, наприклад, метилтрихлорсилану як єдиного джерела вуглецю й кремнію, потребує механізму дозування кількості цих елементів в покритті. На рис. 2 для прикладу показано, як можна змінювати співвідношення C і Si в осаджуваній плівці в залежності від витрати метилтрихлорсилану, зміщення на підкладкотримачеві та потужності розряду [4].

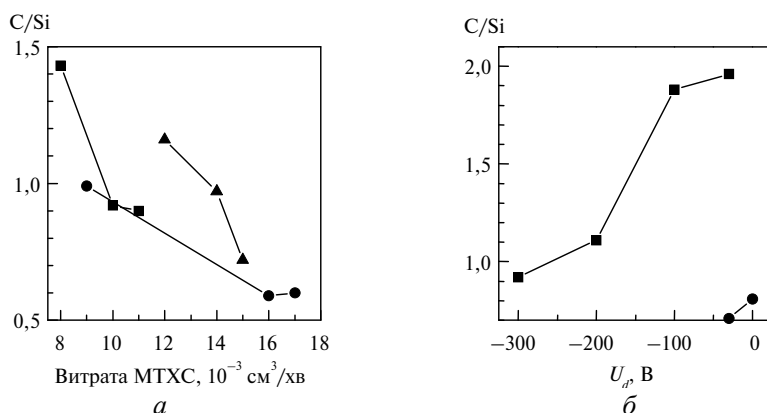


Рис. 2. Співвідношення вуглецю й кремнію в плівці SiC залежно від витрати метилтрихлорсилану (а) і напруги зміщення (б): $U_d = -300$ В, $P_W = 30$ Вт (1); $U_d = -100$ В, $P_W = 30$ Вт (2); $U_d = -100$ В, $P_W = 70$ Вт (3); $F_{\text{MTXС}} = 0,017 \text{ cm}^3/\text{хв}$, $P_W = 50$ Вт (4); $F_{\text{MTXС}} = 0,010 \text{ cm}^3/\text{хв}$, $P_W = 30$ Вт (5).

Рівень впливу приведених параметрів на властивості плівок різний. Їх значення певним чином комбінуються для отримання плівок з потрібними властивостями. Залежність властивостей плівок від комбінації параметрів осадження може бути використана лише при умові точного встановлення значень цих параметрів та їх стабільності протягом усього часу осадження. Але це можливо лише при використанні сучасних вимірювальних приладів і методик із залученням комп’ютерних систем. Наразі питання про точний контроль осадження плівок нанорозмірних товщин при ALD є дуже актуальним. Це забезпечить можливість створювати структури нанометрових товщин зі збереженням відтворюваності властивостей покриттів.

РЕЗУЛЬТАТИ

Досягнуті авторами результати представлено в [4, 22–25]. Найвагоміші значення параметрів отриманих матеріалів наступні: нанотвердість і модуль пружності досягали відповідно 21 і 180 ГПа для плівок Si–C з метилтрихлор-

силану, 20,7 і 250 ГПа для Ti–N покриттів з тетрахлориду титану; для нанокompозитного покриття nc-TiNC/a-SiCN на кремнії нанотвердість, модуль Юнга, коефіцієнт тертя та перевищення зносостійкості покриття над зносостійкістю підкладки мали значення відповідно 26,4 ГПа, 356 ГПа, 0,034–0,079 і 3,4 [4]. На обладнанні було отримано аморфні, нанокристалічні, нанокompозитні та багатошарові плівки товщиною від 1 до 1800 нм [4]. Середньоквадратична шорсткість поверхні аморфних плівок a-SiCN із гексаметилдісилазану на кремнієвій підкладці з шорсткістю 0,4 нм мала найменше значення 0,2 нм.

Окрім плівок інструментального призначення отримано та досліджено гідрогенізовані аморфні плівки напівпровідникового призначення (a-Si-C-N:H) [23, 26]. Вони показали фотолюмінісцентні властивості, які виявилися залежними від параметрів осадження (рис. 3 і 4).

Слід зазначити, що лабораторне ПХУ було розроблено авторами для вирішення певних наукових завдань, а саме, отримання плівкових матеріалів на основі Si–C, Si–C–N і Ti–N з використанням рідких прекурсорів метилтрихлорсилану, гексаметилдісилану, гексаметилдісилазану та тетрахлориду титану. Але автори впевнені, що дане ПХУ успішно може бути використане для осадження інших тонкоплівкових матеріалів, як-то на основі вуглецю з вуглецевмісних прекурсорів, діелектричних плівок і легованих шарів на основі SiO_2 , SiN_x , аморфного та полікристалічного кремнію з використанням кремнійвмісних прекурсорів.

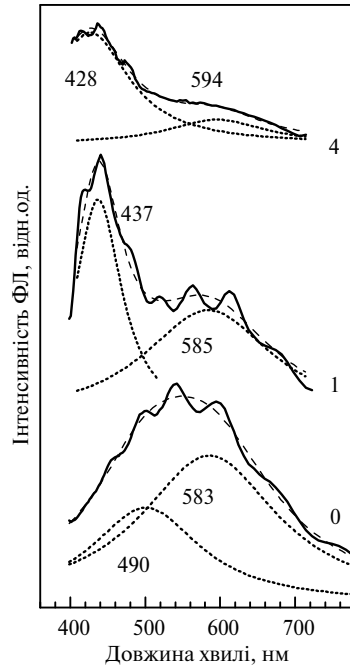


Рис. 3. Фотолюмінісцентні спектри плівок, осаджених при різній витраті доданого азоту F_{N_2} (0 (а), 1 (б) і 4 (в) $\text{cm}^3/\text{хв}$, суцільні лінії) і гаусіанівські криві розібраних експериментальних спектрів: загальні (пунктирні лінії) і часткові (точкові лінії).

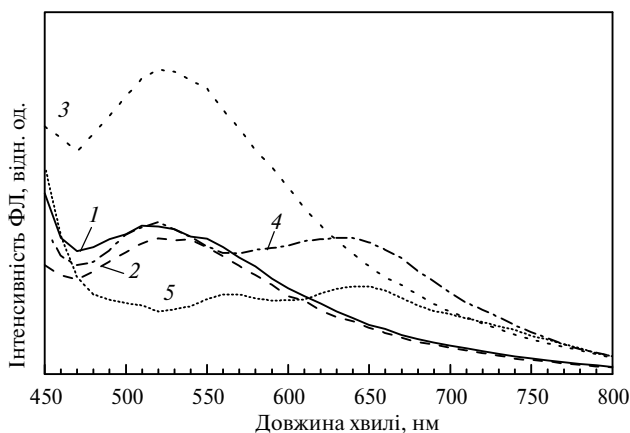


Рис. 4. Спектри фотолюмінесценції плівок, осаджених при різних значеннях напруги зміщення: –5 (1), –50 (2), –100 (3), –200 (4), –250 (5) В; температура зразків при вимірюванні – 293,15 К; збудження здійснювали лазером ($\lambda \approx 405$ нм).

ВИСНОВКИ

Плазмохімічні плівки можна осаджувати на різні тверді попередньо підготовлені підкладки.

На устаткуванні, що створено на базі вакуумного універсального поста ВУП-5(М), можна отримувати тонкоплівкові матеріали, котрі поєднують аморфну, нано- та мікрочисталічну фази.

Вибором умов осадження, які визначаються природою прекурсору, доданих реагентів і низкою основних параметрів устаткування (в межах їх технічних можливостей), можна отримувати широкий спектр покриттів з наперед прогнозованими властивостями.

Обладнання дає можливість проводити осадження одношарових, багатшарових і композитних покриттів в одному технологічному циклі з товщинами від 1 до 1500–2000 нм.

Представлене устаткування та технологія можуть бути базовими для осадження атомних шарів (ALD)

Зважаючи на малу енергоємність, великий практичний досвід використання та удосконалення, лабораторне ПХУ можна використати в якості зразка для виготовлення іншого такого чи подібного устаткування для наукового дослідження, потреб виробництва, тощо.

Описане ПХУ вигідно доповнює набір технічних можливостей і розширює експлуатаційні характеристики ВУП-5(М) без суттєвої його модифікації.

Плазмохімічні покриття, окрім зміцнення металорізального інструменту, можна застосовувати для захисту від інтенсивного механічного зносу інструменту для холодної деформації металів (витягування, гнуття, волочіння, калібрування), прес-форм, вимірювальних датчиків, відповідальних деталей в мікро- та наноелектронних механічних системах (МЕМС, НЕМС), для осадження багатшарового функціонального покриття в оптичних системах багатцільового призначення, в медицині, стоматології, протезуванні та ін.

Представлена ПХУ постійно удосконалюється і оснащується новими деталями та функціональними вузлами для поліпшення якості осадження й подальшої обробки тонкоплівкових матеріалів в єдиному циклі.

Приведены основные принципы создания на базе вакуумного универсального поста ВУП-5(М) и дальнейшего использования плазмохимического оборудования для осаждения тонкопленочных, в том числе и нанощаровых материалов из паров в основном жидких прекурсоров. Метод можно классифицировать как осаждения в газовой среде, активированной радиочастотной плазмой E-типа в системах с непрерывным потоком (метод открытой трубы). Установка универсальная к выбору прекурсора и имеет достаточный набор технологических параметров, что позволяет осаждавать широкий спектр покрытий с контролируемой толщиной от 1 до 2000 нм. Плазмохимическое оборудование выгодно дополняет набор технических возможностей ВУП-5(М) и расширяет его эксплуатационные характеристики без существенного вмешательства в конструкцию.

Ключевые слова: тонкие твердые пленки, нанокompозитные и нанослоистые пленки, плазмохимическое оборудование, ВУП-5 (М), PECVD, ALD, технологические параметры.

The paper describes the main design principles of plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) equipment based on a Mod. VUP-5(M) universal vacuum pumping station, and the application of such equipment for deposition of thin films, including nanolayered ones, from vapors of usually liquid precursors. The method can be classified as PECVD in a gas atmosphere activated by E-type radio-frequency (RF) plasma in continuous flow systems (the open-tube method). The equipment is universal in terms of the types of precursors to be used and has a sufficient set of process variable in order to provide deposition of a wide range of coatings

with a controlled thickness from 1 to 2000 nm. The PECVD equipment favorably supplements the VUP-5(M) functionalities and extends performance without any significant alteration of its design.

Keywords: thin solid films, nanocomposite and nanolayered films, PECVD equipment, VUP-5(M), PECVD, ALD, deposition process variables.

1. ALD-UKRAINE 2017. HERALD Training School. Kyiv, Ukraine, 30 May–1 June 2017.
2. Азаренков Н.А., Береснев В.М., Погребняк А.Д. и др. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: Учеб. пос. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. 209 с.
3. Шпак А.П., Майборода В.П., Куницкий Ю.А., Рево С. Л. Нанослоистые композиционные материалы и покpытия. Киев: Академперіодика, 2004. 163 с.
4. Порада О.К. Вплив умов осадження плазмохімічних Si–C–N, Ti–N–C покpиттів на їх структуроутворення та властивості: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2009.
5. Блинков И.В., Волхонский А.О. Мультислойные наноструктурные покpытия для режущего инструмента. Москва: Lambert Academic Publishing, 2012. 124 с.
6. Хамакава Й. Аморфные полупроводники и приборы на их основе. Москва: Металлургия, 1986. 378 с.
7. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: Структура, приготовление и приборы / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. Т. 1. Москва: Мир, 1987. 363 с.; Т. 2. Москва: Мир, 1987. – 363 с.
8. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников. Москва: Мир, 1991. – 670 с.
9. Уварова І.В., Максименко В.Б., Ярмола Т.М. Наноматеріали та їх використання у медичних виробках. Навч. пос. ММІФ НТУУ “КПІ”. Київ: КИМ, 2013. 172 с.
10. Уварова І.В., Максименко В.Б. Біосумісні матеріали для медичних виробів. Навч. пос. ФБМІ НТУУ “КПІ”. Київ: КИМ, 2013. 232 с.
11. Park J.H., Sudarshan T.S. Surface engineering series. Chemical vapour deposition. Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2001. Vol. 2. 481 p.
12. Chemical vapour deposition: precursors, processes and applications / eds. A.C. Jones, M.L. Hitchman. Cambridge. UK: Royal Society of Chemistry, 2009. 582 p.
13. Мазуренко Є.А., Мазуренко Є.А., Герасимчук А.І., Овсянников В.П. Хімічне осадження з газової фази, синтез функціональних матеріалів (огляд). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2001. Т. 2, № 3. С. 339–349.
14. Тимошенко Н.И., Ребров А.К. Как получить наноструктурные пленки и покpытия из газовой фазы. Обзор. URL: http://www.itp.nsc.ru/articles/populjarno_o_nanotehnologijah.html
15. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – Москва: Радио и связь, 1982. 264 с.
16. Kelly P.J., Arnell R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
17. Jędrzejowski P., Cizek J., Amassian A., Klemberg-Sapieha J.E., Vlcek J., Martinu L. Mechanical and optical properties of hard SiCN coatings prepared by PECVD. *Thin Solid Films*. 2004. Vol. 447–448. P. 201–207.
18. Ferreira I., Fortunato E., Vilarinho P., Viana A. S., Ramos A. R., Alves E., Martins R. Hydrogenated silicon carbon nitride films obtained by HWCVD, PA-HWCVD and PECVD techniques. *J. Non-Cryst. Solids*. 2006. Vol. 352. P. 1361–1366.
19. Huran J., Valovič A., Kučer M., Kleinová A., Kovačková E., Boháček P., Sekáčová M. Hydrogenated silicon carbon nitride films prepared by PECVD technology: properties. *J. Electrical Eng.* 2012. Vol. 63. P. 333–335.
20. Пост вакуумный универсальный ВУП-5 (документация по эксплуатации). 1990 г. (5 кн.).
21. Плазмохимическое осаждение (PECVD). Передовые плазменные технологии. URL: <http://www.plasmasystem.ru/technology/pecvd>
22. Іващенко Л. А., Іващенко В. І., Порада О. К., Бутенко О. О., Дуб С. М., Литвин П. М., Мороженко В. О., Козак А. О. Характеристика плазмохімічних покpиттів, осаджених із використанням гексаметилдисилазану. *Наноструктурное материаловедение*. 2011. Vol. 4. С. 42–48.
23. Ivashchenko V.I., Kozak A.O., Ivashchenko L.A., Sinelnichenko O.K., Lytvyn O.S., Tomila T.V., Malakhov V.J. Characterization of SiCN thin films: experimental and theoretical investigations. *Thin Solid Films*. 2014. Vol. 569. P. 57–63.

24. Порада О.К. Вплив потенціалу зміщення на властивості Si–C–N плівок, отриманих на кремнії плазмохімічним методом із гексаметилдісилазану. *Наноструктурное материаловедение*. 2014. № 3–4. С. 3–14.
25. Порада О.К. Вплив умов осадження і відпалу на нанотвердість аморфних Si–C–N плівок. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2015. Vol. 13, № 1. С. 59–74
26. Порада О.К., Манжара В.С., Козак А.О., Іващенко В.І., Іващенко Л.А. Фотолюмінісцентні властивості PECVD плівок на основі Si, C, N. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2017. Т. 9, № 2. С. 02022 (6).

Надійшла 04.10.17

Після доопрацювання 04.10.17

Прийнята до опублікування 23.11.17