

**П.П. Москвін, д.ф.-м.н., проф.
В.А. Рудніцький, к.ф.-м.н., доц.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Метод детонаційного напилення: особливості технічної реалізації процесу та технологія отримання надтонких шарів напівпровідникових оксидів

Розроблено конструкцію та модернізовано основні вузли обладнання для детонаційного напилення, що дозволяє проводити синтез напівпровідникових надтонких плівок. Модернізація установки проводилася з урахуванням особливостей термодинамічних властивостей напівпровідникових матеріалів. Наведено дані про основні елементи конструкції адаптованих вузлів, вказано їх функціональне призначення. Особлива увага надається принципам роботи як самих модифікованих вузлів обладнання, так і їхньому функціональному взаємозв'язку при керуванні процесом синтезу шарів.

Знайдено умови функціонування вузлів формування та запалювання газової воднево-кисневої суміші для отримання високоенергетичної ударної хвилі, що забезпечувала процес масопереносу речовини від джерела до підкладки при синтезі надтонких шарів оксидних напівпровідників. Особлива увага надана забезпеченню оптимальних газодинамічних умов розповсюдження зони підвищеного тиску в процесі переносу речовини від джерела до ростової підкладки. Розроблено конструкції та виготовлено системи перепускних клапанів, що забезпечують задану швидкість переключення газових потоків у процесі синтезу оксидів. Методом детонаційного напилення синтезовано надтонкі шари систем PbO та ZnO.

Кристалграфічні та морфологічні властивості поверхні плівок, що синтезовано методом детонаційного напилення, досліджено оптичними методами. Отримані фотографічні зображення проаналізовано методом мультифрактального аналізу. Доведено, що мультифрактальні параметри спектра площі поверхні наночасток, що формуються на поверхні росту шарів, за своєю величиною сумірні з відповідними параметрами для спектрів від поверхні шарів, які синтезовані вакуумними технологіями.

Ключові слова: синтез наноплівок напівпровідників A^2B^6 ; метод детонаційного напилення; морфологія поверхні; мультифрактальний аналіз.

Стан проблеми та аналіз досліджень і публікацій, на які спирається автор. Одними з найбільш ефективних методів отримання надтонких шарів варто вважати методи нанесення покриття із середовища, стан якого близький до вакууму. Дуже мала густина середовища, з якого здійснюється формування плівок, відповідає за незначні величини потоків речовини від джерела до підкладки. Останнє обумовлює малу швидкість росту шарів. Це відкриває перспективи отримання надтонких шарів матеріалу та, навіть, наночарів.

Використання газової фази як маточного середовища для проведення технологічних процесів епітаксiального нарощення відкриває можливість ефективного керування швидкістю масопереносу речовини до поверхні росту в дуже значних діапазонах. Дійсно, задаючи тиск парів у системі можна істотно впливати на швидкість переносу атомів до підкладки, а можливість змінювати геометричні умови переносу речовини роблять такі методи кристалізації актуальними і при синтезі шарів, що формуються з матеріалу, який знаходиться в термодинамічно нестабільному стані. Можливість значної варіації швидкості підводу речовини до фронту росту дозволяє реалізувати так звані «кінетичні» умови фазоутворення. В таких процесах умови термодинамічної рівноваги на поверхні росту не встигають реалізуватися. Дійсно, якщо процес фазоутворення в системі проводити таким чином, щоб на поверхні зростання твердої фази процеси спінодального розпаду не встигали б відбуватися, то з'являється можливість отримання шарів у їх термодинамічно нестабільному стані. Це твердження базується на експериментальних результатах [1–3], де повідомляється, що при використанні методів типу молекулярно-променевої епітаксії осаджувалися шари, склад яких відповідає нестабільному стану твердої фази.

Сучасні технологічні методи синтезу надтонких шарів напівпровідникових твердих розчинів, як правило, проводять при досить низьких температурах. Саме використання низьких температур зумовлює як можливість отримання шарів з високою структурною досконалістю при їх високій хімічній чистоті, так і забезпечує досить низькі швидкості росту нової фази. Останнє є принципово важливим при отриманні наночарів. У той самий час вибір низьких робочих температур означає, що термодинамічний стан твердої фази основної сукупності твердих розчинів систем A^2B^6 , які становлять практичний інтерес для сучасної оптоелектроніки, виявляється пересиченим і, як мінімум, близьким до стану спінодального

розпаду [4, 5]. Крім того, розташування точки, яка описує стан поблизу від спінодалей чи бінодалей розпаду на відповідній діаграмі стану системи є першопричиною появи інтервалів температур, при яких склад твердого розчину є надзвичайно чутливим до будь-яких малих збурень щодо умов проведення технологічного процесу. Тому проведення синтезу шарів у таких умовах вимагає прецизійного вибору, обґрунтування та контролю над параметрами процесу [4, 6]. Ігнорування таких термодинамічних особливостей у поведінці ростової системи відображається на низьких кристалографічних характеристиках шарів, або не дозволяє їх взагалі синтезувати. Така ситуація приводить до необхідності проведення спеціальних досліджень процесів фазоутворення, які протікають у зазначених термодинамічних умовах.

Одним із досить простих, в технічному аспекті, і в якому можливо задовольнити зазначені термодинамічні умови фазоутворення, варто визнати метод детонаційного наплення. У цьому методі доставка основних компонентів фази, яка формується, до підкладки здійснюється детонаційною хвилею з високою швидкістю та за короткий проміжок часу. Така хвиля значної інтенсивності найбільш просто створюється підривом малої кількості суміші кисню з воднем (або, наприклад, ацетиленом).

Природно, що в такому методі кристалізації процес масопереносу здійснюється детонаційною хвилею, для поширення якої потрібне середовище, тобто газ. У цьому аспекті метод варто зарахувати до методів газової епітаксії і не зв'язувати його з класичними вакуумними методами нарощування. В той самий час проведення процесу синтезу шарів при атмосферному тиску газу не передбачає створення та використання вартісного вакуумного обладнання. Це варто визнати вагомою технічною перевагою детонаційного методу отримання напівпровідникових шарів. Слід також вказати, що належним вибором складу маткової газової фази, не тільки природного повітря, але, наприклад, і аргону, обґрунтовано можливість сподіватися на отримання шарів не лише оксидних напівпровідників. Згідно з нашими даними, напівпровідникові плівки методом детонаційного наплення раніше не отримувалися, хоча, безсумнівно, деякі фрагменти цього способу осадження шарів досить відомі і як окремі компоненти використовуються в інших газофазних методах формування шарів різного функціонального призначення.

Таким чином, завданням дослідження є технічна реалізація методу детонаційної епітаксії для отримання надтонких шарів оксидних напівпровідників для приладів сучасної електронної техніки; проведення модернізації наявного обладнання з використанням нових конструкторських рішень, виконання перших експериментів по синтезу зазначеного класу напівпровідників детонаційною кристалізацією.

Викладення основного матеріалу. Основні технічні результати по апаратній реалізації методу детонаційного наплення напівпровідників були отримані на базі промислового обладнання для детонаційного наплення захисних та зносостійких металевих покриттів. Основні вузли цієї установки було використано для адаптації цього обладнання для отримання шарів напівпровідників. У статті надаються дані про конструкційні особливості основних вузлів модифікованої установки для детонаційного наплення напівпровідників та обговорюються результати експериментів з виробування з її використанням шарів оксиду свинцю та оксиду цинку.

Особливості технічної реалізації методу детонаційного наплення.

Метод детонаційного наплення є відомим методом наплення надтвердих покриттів при створенні деталей для машинобудування та інструментів металообробки. У цьому методі потік частинок основної речовини до поверхні, на яку необхідно осадити плівку заданої товщини, задається (атоми захоплюються) детонаційною хвилею високої інтенсивності. Як правило, така детонаційна хвиля формується шляхом підриву суміші газів, хоча таку хвилю можна створити і іншими засобами. Малі частинки речовини, які вводяться під фронт такої хвилі, рухаються із хвилею до поверхні зростання і, природно, на ній (підкладці) відбувається осадження шарів з тими чи іншими кристалографічними характеристиками.

У розпорядженні авторів роботи було обладнання, яке раніше використовувалося для отримання досить товстих покриттів з надтвердих та важколетучих металевих матеріалів. Саме конструкторські рішення при створенні та умовах функціонування нових й основних виконавчих вузлів цього обладнання обговорюються в цій роботі.

На рисунку 1 показана загальна блок-схема установки для детонаційного наплення, яка була створена в роботі для отримання напівпровідникових плівок. На схемі наведено основні функціональні вузли та блоки керування обладнанням. Основні фізико-хімічні процеси формування потоків речовини від джерела до підкладки відбуваються в реакторній трубці (10), що з'єднана камерою запалювання газової суміші (9).

Осадження речовини здійснюється на підкладку, температурні умови на якій контролюються блоками (11–12). До складу установки входять вузли створення вибухової суміші (6, 7), системи газових клапанів, що керують її подачею в активну зону установки, система запалювання газової суміші та інші допоміжні пристрої.

Оснoву створеногo обладнання складає система формування детонаційної хвилі для перенесення речовини до підкладки. Вона складається з направляючої трубки (поз. 2 на рис. 2), вихід якої, природно, спрямований до підкладки, на якій буде осаджуватися шар напівпровідника. Другий кінець трубки з'єднаний із камерою запалювання.

Оснoву установки становить міцна камера із нержавіючої сталі. Вид установки з відкритою робочою камерою, де розташовується пристрій фіксації підкладки з системою контролю температури, показано на рисунку 2. Підкладку для осадження матеріалу закріплено на підкладкоутримувачі за допомогою штативів безпосередньо під виходом детонаційної трубки (поз. 2 на рис. 2). Температура на підкладці задається нагрівником (4), який є традиційним, резистивним, із відносно масивною основою, яка забезпечує необхідну теплову стабільність і задані інерційні характеристики всього вузла стабілізації та контролю температури. Фотографічне зображення конструкції цього вузла установки представлено на рисунку 3, де спостерігаються раніше зазначені її основні вузли і виходи термодпар, за допомогою яких здійснюється контроль температури на підкладці.

Джерелами водню та кисню в експерименті слугували промисловий електролізер малої потужності, хоча в установці передбачена можливість і незалежної подачі зазначених газів із балонів. Суміш газів створювалася безпосередньо перед експериментами. Контроль процесу її формування відбувався шляхом управління газовими клапанами. Для керування тиском і складом середовища в трубці безпосередньо після проходження детонаційної хвилі використовується електромагнітний клапан. Конструкція цього вузла установки розроблена в роботі. Вид керуючого клапана з системою його перемикання двигуном з редуктором представлений на рисунку 4. Контроль за станом цього газового автоматизованого клапана здійснюється кінцевими вимикачами (3).

Загальне керування стану газових клапанів у системі запалювання газової суміші здійснювалося від основного блоку керування (поз. 1, рис. 1). Блок загального керування установкою складається із систем живлення та виконавчих електромагнітних реле, що керуються мікроконтролером. Головне завдання системи керування установкою полягає в правильній часовій синхронізації всіх процесів газопостачання на всіх стадіях процесу синтезу. Сказане, в першу чергу, стосується стадії формування газової суміші, її підпалу та дозованої подачі в систему аргону, що компенсує розрядження в активній зоні після проходження вибухової хвилі.

Найважливішим вузлом установки є її камера запалювання, де здійснюється запалювання «гримучої» воднево-кисневої суміші. Її фотографія представлена на рисунку 6. Підпал суміші газів (запуск процесу синтезу) здійснюється іскровим розрядом свічки (3), напруга запалювання якої подається від джерела живлення через блок керування (поз. 5, рис. 1). Основна частина камери (2) через сполучну муфту (5) скріплюється з верхнім кінцем детонаційної трубки (1). Газодинамічна внутрішня конструкція камери запалювання створена таким чином, щоб ефективно формувалася детонаційна хвиля.

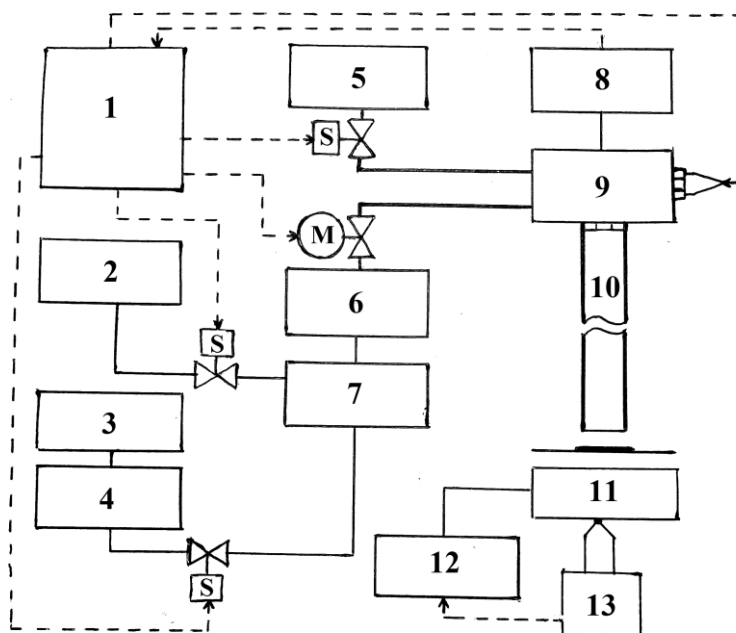


Рис. 1. Схема основних вузлів та їх функціональні зв'язки в установці для отримання надтонких шарів напівпровідників методом детонаційного наплення (1 – блок керування газовими клапанами і системою запалювання газової суміші;

2 – джерело кисню; 3, 4 – блок живлення електролізера та електролізер;

5 – джерело аргону; 6 – дозатор формування газової суміші; 7 – об'єм для змішування газів; 8 – механізм подачі речовини в активну зону реактора; 9 – камера запалювання киснево-водневої суміші; 10 – трубка, в якій формується детонаційна хвиля;

11 – нагрівник підкладки; 12 – блок живлення нагрівника підкладки; 13 – блок стабілізації температури підкладки)

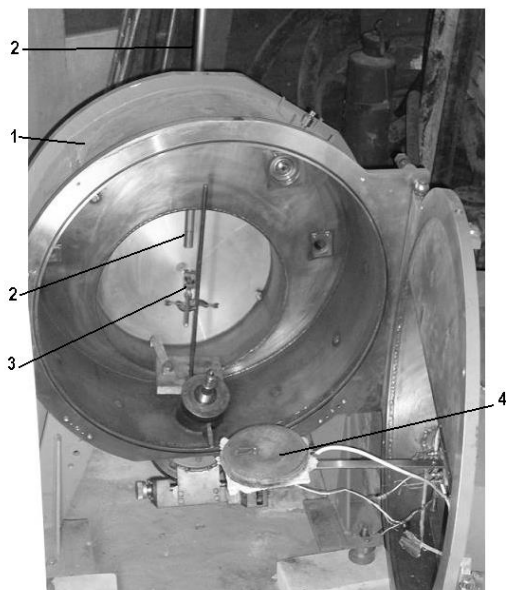


Рис. 2. Камера для отримання надтонких шарів методом детонаційного наплення на етапі завантаження перед проведенням процесу синтезу напівпровідникових структур: 1 – міцний корпус; 2 – трубка, в якій формується детонаційна хвиля; 3 – система підкладкоутримувача; 4 – система розігріву і контролю температури підкладки

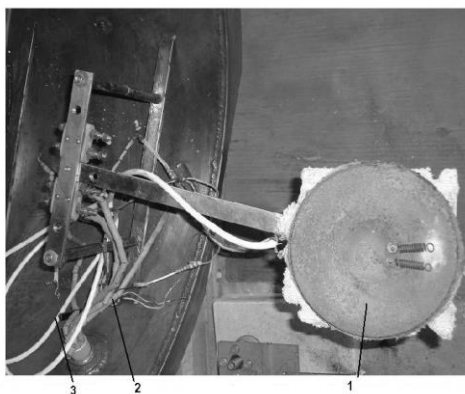


Рис. 3. Фотографія силового вузла системи контролю температури на підкладці установки для синтезу надтонких шарів методом детонаційного наплення: 1 – масивна (термостабільна) основа підкладкоутримувача з пружинами, що фіксують положення підкладки; 2, 3 – виводи силових кабелів нагрівача та термопар

Технологічні аспекти процесу синтезу шарів напівпровідників.

Для проведення процесу синтезу на першій стадії досліджень були обрані оксиди свинцю і цинку. Оксид свинцю завдяки своїй невисокій енергії атомізації є добрим модельним матеріалом для вивчення стану речовини в детонаційній трубі. Дійсно, невисока енергія атомізації цього оксиду відповідальна як за можливість його дисоціації при знаходженні в високотемпературній і енергонасиченій зоні хвилі, так

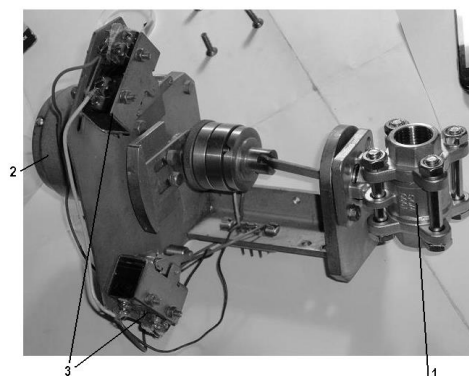


Рис. 4. Блок керування системою формування газової суміші та захисту від зворотної хвилі: 1 – газовий клапан; 2 – двигун з редуктором, що керує закриттям (відкриттям) клапана; 3 –кінцеві вимикачі

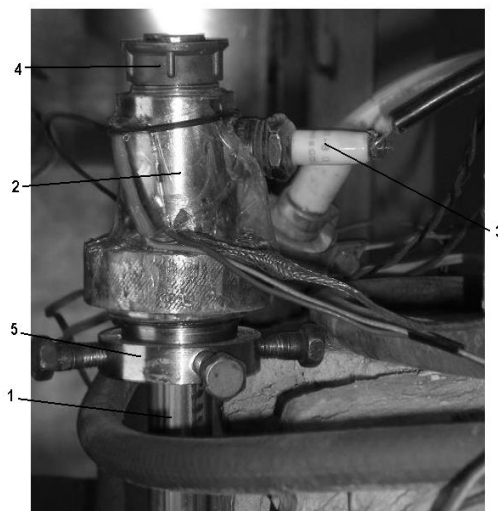


Рис. 5. Загальний вигляд камери запалювання киснево-водневої суміші для формування детонаційної хвилі. Камера розташована в верхній частині детонаційної трубки – 1; 2 – робочий об'єм камери, де здійснюється підпал та формується детонаційна хвиля; 3 – автомобільна свічка запалювання; 4 – механізм дозованої подачі порошку вхідної речовини; 5 – муфта, що з'єднує камеру запалювання із детонаційною трубкою

і за відносну високу рухливість його компонентів у процесі руху до підкладки. Необхідно відразу зазначити, що оксид цинку не володіє таким сприятливим набором термодинамічних параметрів. У той самий час оксид цинку в даний час є важливим і перспективним матеріалом для створення прозорих у оптичному діапазоні контактів для електронних приладів. Це стимулювало провести в роботі серію експериментів по осадженню шарів оксиду цинку. Таким чином, основна частина експериментів по дослідженню умов управління роботою обладнання і всього технологічного процесу проводилася при осадженні шарів оксиду свинцю, тоді як для проведення експериментів по синтезу оксиду цинку приділялося менше часу і уваги.

Особлива увага в роботі приділялася підготовці вихідної сировини, тобто порошку для синтезу матеріалу. В роботі використовувалися матеріали хімічної чистоти. Отриманий традиційними методами порошок проходив контроль свого гранулометричного складу. Для цього його просівали через набір сит з різним розміром комірок. Це дозволяло виключити появу в вихідному завантаженні порошків великого розміру. Такі порошокинки, як правило, за час руху разом із детонаційною хвилею не випаровуються повністю при дії газової суміші та досягають поверхні підкладки у вигляді макровключень.

У цьому відношенні не менш важливим параметром, що впливає на кристалографічну досконалість шарів, є вибір довжини детонаційної труби. Дійсно, відстань від положення порошку вихідного матеріалу в момент підпалу газової суміші та розміщенням підкладки, за своєю сутністю, задає час знаходження речовини в активованому стані. У виконаних експериментах довжина труби, все ж залишалася постійною і становила 1,8 м. Довжина детонаційної труби задавала також і об'єм суміші газів, яким потрібно заправити установку. Згідно з попередніми експериментами, об'єм газової суміші в процесі синтезу складав 520 мл.

Підготовлений порошок основної речовини заправляли в поворотний дозатор, який розташовувався у верхній частині камери запалювання. Механізм повороту (перекидання) дозатора керувався постійним магнітом, що мав форму тороїда та був розташований у камері запалювання (поз. 4 на рис. 5). Механізм повороту в експериментах запускався одночасно з включенням свічки запалювання для підриву газової суміші

Підкладки для проведення процесу нарощування готувалися за стандартною методикою. Використовувалися як неорієнтовані (скляні) підкладки, так і підкладки з монокристалічного кремнію. Підготовка поверхні кремнієвих підкладок детально описана в [7–9]. Маса порошку, яка використовувалася в процесі синтезу, вибиралася з урахуванням його втрат (осадження) на стінки детонаційної труби та допоміжне обладнання. Все ж ця величина, як правило, визначалася експериментально після вивчення товщини шарів, що спостерігалися на підкладці.

Принципово необхідно зазначити, що за один процес підриву газової суміші через малу масу речовини порошку (20 мг), що переноситься детонаційною хвилею, на підкладці осідає шар, товщина якого вимірюється нанометрами. Тому для отримання плівки, яку можливо спостерігати, і з товщиною, що забезпечує можливість вимірювання її електрооптичних властивостей, процес синтезу доводилося повторювати кілька разів. У деяких експериментах для отримання досить «товстих» шарів кількість «пострілів» досягало 60. Це дозволяло отримувати плівку до 0,8 мкм.

Значимо, що синтезовані плівки, поверхня яких досліджується, не піддавалися подальшій термообробці, тобто їх не відпалювали.

Кількісна характеристика морфологічного стану поверхні шарів, які синтезовані методом детонаційного напылення, була здійснена методом мультифрактального аналізу (МФА) [7–8]. Відповідно до цієї методики поверхні шарів PbO та ZnO, що були осаджені на скло та на підкладку із Si, спостерігалися і фотографувалися в оптичному мікроскопі. Фотографії було отримано з використанням саморобного обладнання, основу якого складає освітлювач, виготовлений на базі світлодіодів, які розміщувалися по колу, в центрі якого розташовувався досліджуваний зразок. Саме таке розташування джерел світла забезпечувало необхідний рівень освітленості поверхні зразка на предметному столику мікроскопа та умови його рівномірного освітлення. Ефективність використання такої конструкції освітлювача було доведено при дослідженнях мультифрактальних спектрів від поверхні металічного зразка після його механічної обробки [9].

На рисунках 6–8 надано типові фотографічні зображення поверхні якісних шарів, які були синтезовані в різних умовах формування потоку атомів детонаційним потоком до підкладки. Типове збільшення зображення в таких умовах фотографування на рисунках 6–7 знаходилося на рівні 300–600. Необхідно відразу ж вказати, що при використанні МФА для чисельної характеристики властивості поверхні шарів, мати прецизійні дані за коефіцієнтом збільшення не обов'язково. При проведенні такого роду вимірювань важливим є не точний вибір величини роздільної здатності спостереження поверхні, а тільки сам факт фіксації її дефектного стану [7–8]. Така ситуація дещо зменшувала вимоги до проведення операції фотографування.

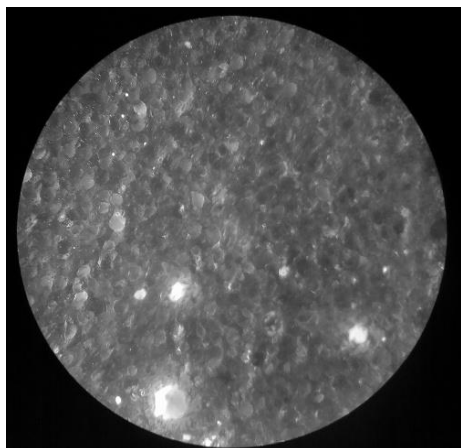


Рис. 6. Мікрофотографія поверхні плівки PbO з великою зернистістю. Мультифрактальні параметри поверхні: $D_0 = 2,34$,
 $\Delta = 0,3547$

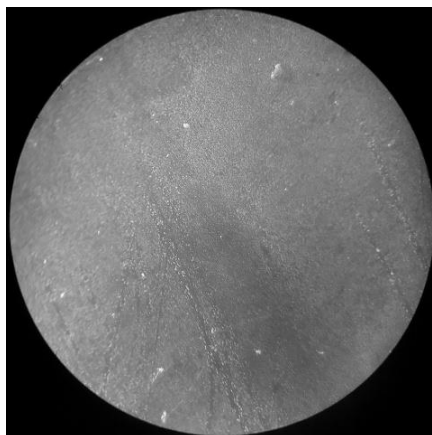


Рис. 7. Фотографія поверхні плівки PbO з малою зернистістю. Мультифрактальні параметри поверхні: $D_0 = 2,50$, $\Delta = 0,315$

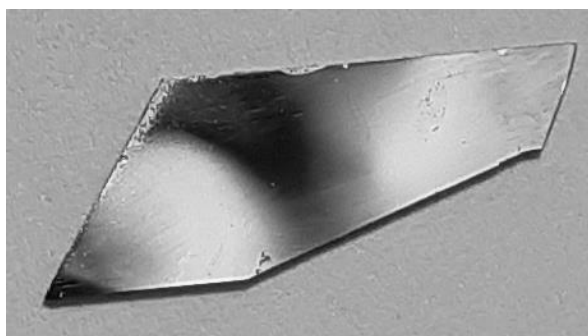


Рис. 8. Фотографія кремнієвої підкладки з плівкою ZnO, яку синтезовано методом детонаційного наплення

Фотографічні зображення поверхні шарів, що подано на рисунках 6–7, належать до різних умов керування станом детонаційної суміші в процесі синтезу. Виконані експерименти довели, що морфологія поверхні синтезованої плівки істотно залежить від вмісту в суміші аргону, який компенсує розрідження, що виникає при витoku продуктів детонації із відкритого кінця труби. Зміна вмісту аргону в газовому середовищі впливала на парціальний тиск компонентів у зоні фазоутворення та впливала на стан поверхні, на морфологію плівки. Така варіація параметрів технологічного процесу відобразилася на розмірах кристалітів (зернах), що сформувалися на поверхні шарів. Відповідно проведеним експериментам при зменшенні компенсаційного тиску аргону розмір зерна, що формує поверхню шару, зменшувався. Так дані рисунка 7 доводять, що вказана варіація тиску аргону приводить до можливості отримання шарів із практично дзеркальною поверхнею з дуже малими розмірами кристалітів.

Варто вказати, що для досягнення товщини шарів на рівні 100 нм, цикл процесу детонаційного наплення повторювався 10–20 разів. Саме така кількість операцій доставки речовини до підкладки в розробленій установці детонаційною хвилею дозволила осадити шари з товщиною, необхідною для проведення фізичних досліджень властивостей плівки. Істотно, що провести виміри товщини шарів на такому малому рівні становить важку технічну проблему. Тому в роботі оцінка товщини плівки оксиду цинку була виконана на основі даних про ефект просвітлення для відбитого від структури світла, який відображався набором смуг різного кольору. Інтерференційні смуги чітко спостерігаються на рисунку 8.

Отримані фотографії поверхні плівок були оброблені методами мультифрактального аналізу (МФА). На цьому етапі аналізу МФ параметризація була здійснена для площі поверхні отриманих шарів [7, 8]. Розраховані МФ спектри дозволили знайти відповідні числа Реньї D_0 та параметри фрактального упорядкування Δ . Отримані дані для наданих зображень наведено в підписах під рисунками. Аналіз

величин МФ параметрів дозволив зробити деякі висновки стосовно якості поверхонь отриманих шарів. Дійсно, величини чисел Реньї, що відповідають плівкам синтезованим методами вакуумної та золь-гель технології мають значення на рівні 2.1–2.2 [9]. У той самий час дані за числами Реньї, що наведені в підписах під рисунками 6–7, все ж незначно більші. Останнє відповідає більш дефектному стану поверхні, не дивлячись на те, що розміри зернят, очевидно, менші. Нагадаємо, що для ідеально плоскої поверхні число Реньї має дорівнювати двом. Зрозуміло, що якість поверхні шарів, що отримуються методом детонаційної епітаксії, можна істотно покращити за рахунок корегування умов функціонування технологічного обладнання.

Висновки.

Таким чином, за результатами проведеної роботи можна зробити такі висновки:

1. Виконано модернізацію наявного технологічного обладнання для детонаційного наплення стосовно отримання шарів напівпровідників.
2. Методом детонаційного наплення синтезовано надтонкі шари оксидів свинцю та цинку на орієнтованих та неорієнтованих підкладках.
3. Кількісний аналіз мультифрактальних спектрів шарів РbO показав, що кристалграфічна досконалість поверхні синтезованих шарів є порівняною з якістю поверхні шарів, отриманих вакуумною і золь-гель технологіями.

Список використаної літератури:

1. Waho J. Ga_{1-x}As_{1-x}Sb_x (0.3<x<0.9) growth by molecular beam epitaxy / J.Waho, S.Ogawa, S.Maruyama // Japanese Journal of Applied Physics. – 1977. – Vol. 16. – № 10. – P. 1875–1876.
2. Properties of MBE grown InSb and InSb_{1-x}Bi_x / A.J. Noreika, Jr.J. Gregg, W.J. Takei, M.H. Francombe // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1983. – Vol. 2. – Part 1. – Ser. A. – P. 558–561.
3. Farrow R.F.C. The stabilization of metastable phases by epitaxy / R.F.C. Farrow // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1983. – Vol. B1. – № 2. – P. 222–229.
4. Кузнецов В.В. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов / В.В. Кузнецов, П.П. Москвин, В.С. Сорокин. – М. : Металлургия, 1991. – 174 с.
5. Ouillec M. Liquid phase epitaxy of unstable alloys: Substrate-induced stabilization and connected effects / M.Ouillec, H.Launois, M.C. Joncour // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1983. – Vol. 1–2. – P. 238.
6. Kuznetsov V.V. Coherent phase diagram and interface relaxation processes during LPE of A³B⁵ solid solutions / V.V. Kuznetsov, P.P. Moskvin, V.S. Sorokin // Journal of Crystal Growth. – 1988. – Vol. 88. – P. 241–262.
7. Multifractal analysis of areas of spatial forms on surface of Zn_xCd_{1-x}Te–Si (111) heterocompositions / P.Moskvin, V.Kryzhanivskyy, L.Rashkovetskiy and other // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 404. – P. 204–209.
8. Invariance of multifractal spectrums of spatial forms on the surface of Zn_xCd_{1-x}Te–Si heterocompositions synthesized by electron beam epitaxy and hot wall epitaxy / P.Moskvin, V.Kryzhanivskyy, L.Rashkovetskiy and other // Journal of Crystal Growth. – 2017. – Vol. 475. – P. 144–149.
9. Special features in the application of fractal analysis for examing the surfsure microrelief formed at face milling / P.Moskvin, N.Balytska, P.Melnychuk and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2/1 (86). – P. 9–15.
10. Золь-гель синтез, морфологія поверхні та спектральні властивості надтонких плівок на основі ZnO на монокристалі кремнію / П.П. Москвін, Г.В. Скуба, В.Л. Добряков та ін. // Вопросы химии и химической технологии. – 2018. – № 4. – С. 36–42.

References:

1. Waho, J., Ogawa, S. and Maruyama, S. (1977), «Ga_{1-x}As_{1-x}Sb_x (0.3<x<0.9) growth by molecular beam epitaxy», *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 16, No. 10, pp. 1875–1876.
2. Noreika, A.J., Gregg, Jr.J., Takei, W.J. and Francombe, M.H. (1983), «Properties of MBE grown InSb and InSb_{1-x}Bi_x», *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. 2, Part 1, Ser. A, pp. 558–561.
3. Farrow, R.F.C. (1983), «The stabilization of metastable phases by epitaxy», *Journal of Vacuum Science and Technology*, V. B1, No. 2, pp. 222–229.
4. Kuznetsov, V.V., Moskvin, P.P. and Sorokin, V.S. (1991), *Neravnovesnye yavleniya pri zhidkostnoi geteroepitaksii poluprovodnikovoykh tverdykh rastvorov*, Metallurgiya, M., 174 p.
5. Ouillec, M., Launois, H. and Joncour, M.C. (1983), «Liquid phase epitaxy of unstable alloys: Substrate-induced stabilization and connected effects», *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. 1–2, P. 238.
6. Kuznetsov, V.V., Moskvin, P.P. and Sorokin, V.S. (1988), «Coherent phase diagram and interface relaxation processes during LPE of A³B⁵ solid solutions», *Journal of Crystal Growth*, Vol. 88, pp. 241–262.
7. Moskvin, P., Kryzhanivskyy, V., Rashkovetskiy, L., Lytvyn, P. and Vuichyk, M. (2014), «Multifractal analysis of areas of spatial forms on surface of Zn_xCd_{1-x}Te–Si (111) heterocompositions», *Journal of Crystal Growth*, Vol. 404, p. 204–209.
8. Moskvin, P.P., Kryzhanivskyy, V.B., Rashkovetskiy, L.V., Rudnitskiy, V.A., Morozov, A.V. and Lytvyn, P.M. (2017), «Invariance of multifractal spectrums of spatial forms on the surface of Zn_xCd_{1-x}Te–Si heterocompositions synthesized by electron beam epitaxy and hot wall epitaxy», *Journal of Crystal Growth*, Vol. 475, p. 144–149.

9. Moskvina, P., Balytska, N., Melnychuk, P., Rudnitskyi, V. and Kyrylovych, V. (2017), «Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2/1 (86), pp. 9–15.
10. Moskvina, P.P., Skyba, G.V., Dobryakov, V.L., Kolodij, M.A., Rashkovec'kyj, L.V., Kolomys, O.F. and Rarata, S.V. (2018), «Zol'-gel' syntezy, morfologija poverhni ta spektral'ni vlastyvyosti nadtonkyh plivok na osnovi ZnO na monokrystalni kremniju», *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, No. 4, pp. 36–42.

Москвін Павло Петрович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- фізика та технологія складних напівпровідникових матеріалів для сучасної оптоелектроніки;
- термодинаміка напівпровідникових твердих розчинів.

E-mail: moskvinpavel56@gmail.com.

Рудніцький Валентин Анатолійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технології напівпровідникових матеріалів;
- детонаційно-плазмове наплення;
- низькотемпературна плазма.

E-mail: org.rva@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2019.