

СИНТЕЗ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СПОЛУК НА БАЗІ МАГНЕТРОНУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

О.В. Зиков, С.Д. Яковін, С.В. Дудін

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Україна

Надійшла до редакції 15.09.2009

В роботі представлено результати розробки та дослідження технологічного модуля для реактивного синтезу складнокомпозиційних сполук типу оксидів та оксинітридів на базі магнетронного та ВЧ індукційного розрядів. Основна ідея технології полягає в сепарації двох процесів: розпилення металевої мішені за допомогою магнетрона постійного струму в інертному газі та активації реактивного газу за допомогою додаткового джерела плазми на базі ВЧ індукційного розряду з подальшим транспортуванням частинок активованого газу безпосередньо до області синтезу.

Ключові слова: реактивний синтез, складнокомпозиційні сполуки, ВЧ індукційний розряд, магнетрон, металева мішень.

В работе представлены результаты разработки и исследования технологического модуля для реактивного синтеза сложнокпозиционных соединений типа оксидов и оксинитридов на базе магнетронного и ВЧ индукционного разрядов. Основная идея технологии заключается в сепарации двух процессов: распыления металлической мишени с помощью магнетрона постоянного тока в инертном газе и активации реактивного газа с помощью дополнительного источника плазмы на основе ВЧ индукционного разряда с дальнейшей транспортировкой частиц активированного газа непосредственно к области синтеза.

Ключевые слова: реактивный синтез, сложнокпозиционные соединения, ВЧ индукционный разряд, магнетрон, металлическая мишень.

The results of development and research of a technological module for reactive synthesis of complex composite coatings like oxides and nitrides based on DC magnetron and RF inductive discharges are presented in the paper. The basic idea of technology consists in separation of two processes: metal target sputtering using DC magnetron in rare gas and activation of reactive gas by means of additional plasma source based on RF inductive discharge with further transportation of particles of the activated gas immediately to the surface of synthesis.

Keywords: reactive magnetron sputtering, RF ICP, magnetron, plasma activation.

ВСТУП

Планарні магнетрони постійного струму широко використовуються для нанесення металевих покриттів [1, 2]. В цей же час, синтез діелектричних сполук, таких як TiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 та інші, зустрічає значні труднощі за простої причини, що ці сполуки не проводять постійний струм заряджених частинок. Це приводить до пасивації мішені, інтенсивного утворення мікродуг, феномену “зникаючого аноду” та різноманітних нестійкостей розряду. Все це значно звужує технологічне “вікно” процесу синтезу та знижує якість покриттів [3 – 5].

Для вирішення цих проблем нами було розроблено технологічний модуль для реактивного синтезу складнокомпозиційних сполук типу оксидів та оксинітридів на базі магнетронного та ВЧ індукційного розрядів. В цій роботі узагальнюється цикл досліджень

складових частин модулю, які було проведено в попередніх роботах, а саме:

- дослідження магнетрону постійного струму низького тиску [6];
- дослідження процесів формування мікродуг у магнетроні в атмосфері кисню [7, 8];
- дослідження процесів пасивації мішені [9];
- дослідження ВЧ індукційного джерела плазми [10].

Також проведено дослідження роботи технологічного модуля в цілому при нанесенні високоякісних покриттів оксиду алюмінію [11]. Основна ідея технології полягає в сепарації двох процесів: розпилення металевої мішені за допомогою магнетрона постійного струму в інертному газі та активації реактивного газу за допомогою додаткового плазмового джерела на базі ВЧ індукційного розряду.

Особливість цієї системи у порівнянні з іншими полягає в тому, що вона працює в діапазоні низького тиску робочого газу (0,5 – 2 мТор), коли рух частинок протинає без зіткнень – вільно молекулярний режим. По-перше, це дозволяє збільшити дистанцію магнетрон – поверхня, що оброблюється, до 30 – 40 см, тому що швидкість нанесення падає з ростом відстані значно менше, ніж у режимі з зіткненнями. Це дозволяє значно збільшити площу поверхні нанесення. По-друге, вільно молекулярний режим дозволяє транспортувати активовані частинки реактивного газу від джерела плазми до зразків без зіткнень, які призводять до втрати частинкою енергії та неможливості вступити в реакцію. По-третє, формування діелектричного покриття реалізується в обмеженій робочій області, а не в усій вакуумній камері, що знімає проблеми зникаючого анода, пасивації мішені та активного дугоутворення в магнетроні. Технологічні параметри розробленого модуля відповідають вимогам промислового виробництва.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ

Технологічний модуль для нанесення діелектриків на базі магнетрона постійного струму низького тиску та ВЧІ розряду було зібрано на вакуумній технологічній установці типу УРМЗ (рис. 1.)

Вакуумна камера, зроблена з неіржавіючої сталі, має циліндричну форму, діаметром 700 мм. Форвакуумний та дифузійний насоси відкачують камеру до залишкового вакууму $1 \cdot 10^{-5}$ Тор. На торці камери розташовано магнетрон низького тиску 2 (робочий тиск $(2 - 10) \cdot 10^{-4}$ Тор) [6]. До складу магнетрона входить плоский магнетрон на постійних магнітах, конструкцію якого наведено на рис. 2, пасивна система дугогасіння [7, 8] та джерело живлення постійного струму 1. Джерело живлення для магнетрона дозволяє отримувати напруги до 1 кВ і струм розряду до 20 А, максимальна потужність блоку живлення – 6 кВт.

Мішень магнетрона, діаметром 170 мм, виконано з алюмінію. Відстань від мішені до зразків можна змінювати в межах 100 – 500 мм.

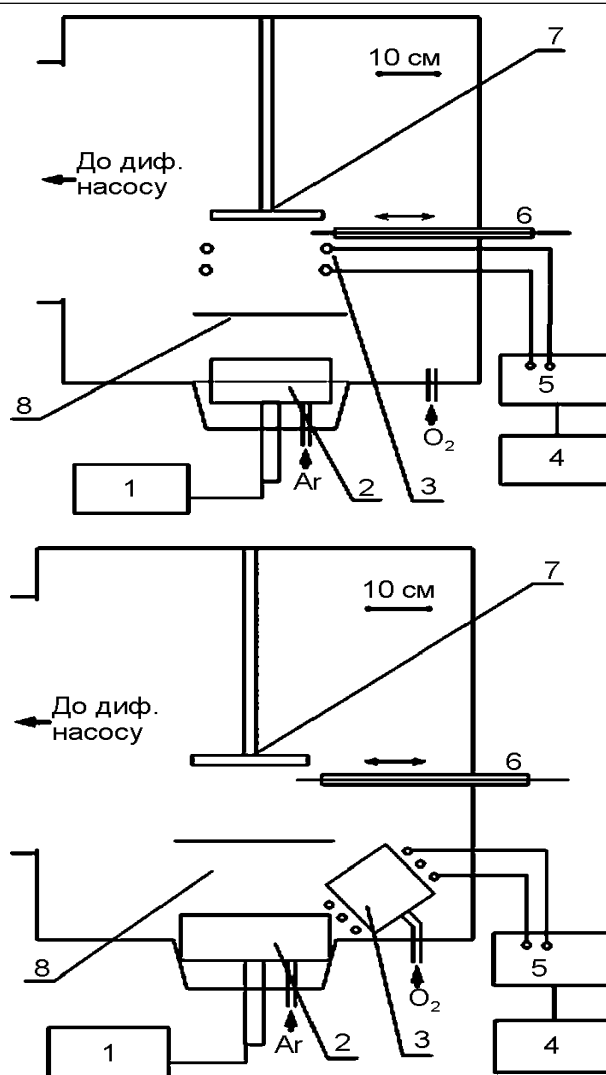


Рис. 1. Технологічна система для реактивного синтезу покриттів на базі магнетрона та джерела ВЧІ плазми першого типу (зверху) та другого типу (знизу): 1 – блок живлення магнетрона, 2 – магнетрон, 3 – джерело ВЧІ плазми, 4 – ВЧ генератор, 5 – узгоджуючий пристрій, 6 – рухомий зонд, 7 – підкладкоутримувач, 8 – заслінка.

У даній роботі розглянуто два типи індукційних джерел плазми (рис. 1). Конструкція з джерелом першого типу є випадком з необмежуваною плазмою. Індуктор розташовувався у вакуумній камері між магнетроном та підкладкоутримувачем.

Другий тип ВЧІ джерела – з локалізованою (об’ємно обмеженою) плазмою, що сконцентрована в окремій камері.

Для живлення джерела ВЧІ плазми використовується ВЧ генератор 4 частотою 13,56 МГц потужністю 1 кВт, який приєднується до котушки індуктивності за допомогою узгоджуючого пристрою 5.

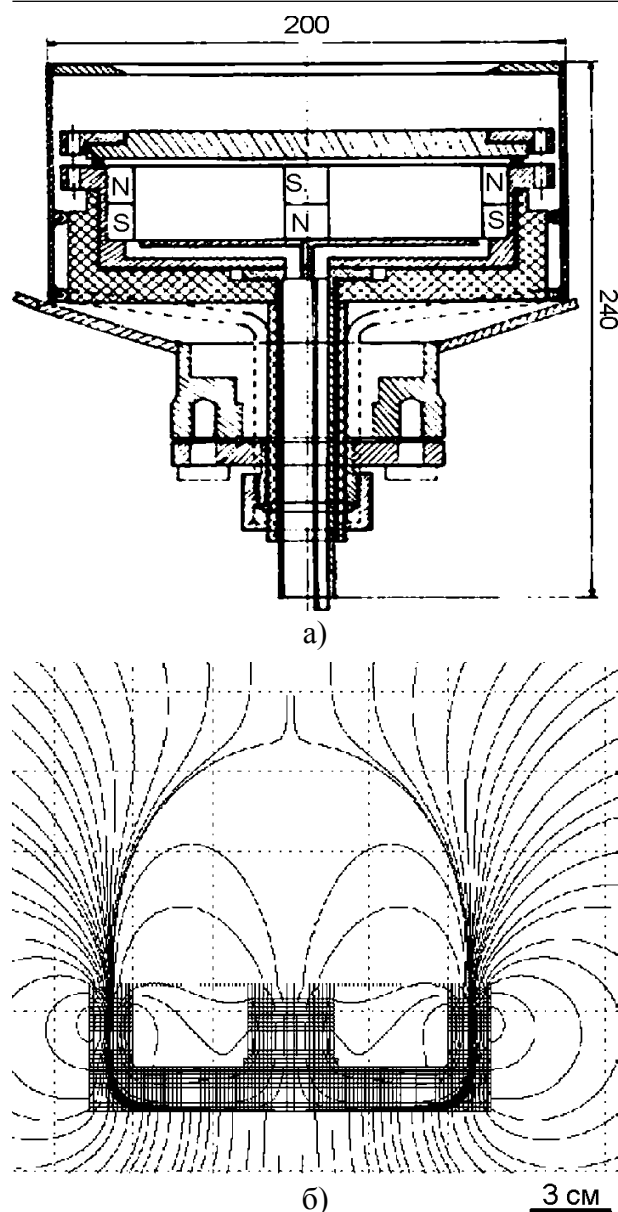


Рис. 2. Схема магнетрона низького тиску постійного струму зібраного на базі постійних магнітів (а) та конфігурація магнітних силових ліній (б).

Робочий газ аргон подається прямо до мішени магнетрона 2 незалежно від реактивного стану, з алюмінієвою поверхнею складає всього декілька відсотків [12]. Для підвищення ефективності такої взаємодії в даній роботі застосовано активацію молекул кисню за допомогою плазми додаткового розряду. Під активацією слід розуміти таку дію плазми на молекули кисню, що приводить до дисоціації або збудження молекул O_2 . Попередні експерименти довели, що для активації потоку молекул кисню у вживаній нами системі необхідна ВЧ потужність 100 – 600 ват.

Ці вимоги необхідно враховувати при виборі типу джерела плазми, і найбільш цим

умовам відповідають джерела плазми на базі індукційного розряду (джерела ВЧІ плазми) які знайшли широке вживання в різних плазмових технологіях. Основними перевагами джерел ВЧІ плазми якраз і є висока густина плазми ($10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$), низька енергетична ціна іона і активованої частинки, стабільність розряду в хімічно активних газах, низький тиск газу в розрядній камері, можливість використання зовнішніх магнітних полів. Індукційний ВЧ розряд низького тиску може ефективно застосовуватися для плазмової активації газу в установках з вакуумною камерою різних розмірів і конфігурацій [2].

Експерименти по нанесенню тонких плівок Al_2O_3 з джерелом першого типу довели певне покращення стехіометрії плівок Al_2O_3 . Вживання джерела ВЧІ плазми для активації кисню стало кроком в правильному напрямі. В той же час виявилися і недоліки такої системи. ВЧ енергія вводилася в плазму у всьому об'ємі технологічної камери. Через те, що ВЧ потужність поглиналася в достатньо великому об'ємі, густина плазми, а, отже, і ефективність активації молекул кисню плазмою, були невеликі. Крім того, більш 90% потужності поглиналося аргоном, і лише невелика її частина витрачалася на активізацію кисню. Низька енергетична ефективність активації приводила до обмеження потоку частинок кисню, здатних вступати у реакцію з алюмінієм і, як наслідок, отримання нестехіометричних плівок Al_2O_3 . Іншим недоліком такої системи є відсутність анізотропії: активований кисень розповсюджувався як у напрямі підкладки, так і у напрямі магнетрона.

Щоб подолати вказані вище проблеми, було застосовано джерело ВЧІ плазми другого типу – з локалізованою (об'ємно обмеженою) плазмою (рис. 3). Плазма в такому джерелі сконцентрована в індукційній камері, виконаній з керамічної труби. На виході джерела встановлено металеву сітку, що обмежує плазму і забезпечує перепад тиску між джерелом ВЧІ плазми та технологічною камерою. Особливістю системи було розташування джерела плазми всередині вакуумної технологічної камери. Завдяки цьому регулюванням положення та напрямку джерела по відношенню до магнетрона вдається добитися необхідної анізотропії потоку активованого

кисню на оброблювану поверхню. ВЧ потужність в цьому випадку поглинається у відносно невеликому об'ємі, забезпечуючи високу густину плазми. Завдяки тому, що основна частина ВЧ потужності, що підводиться, поглинається молекулами кисню, ми маємо більш високий ступінь активації кисню.

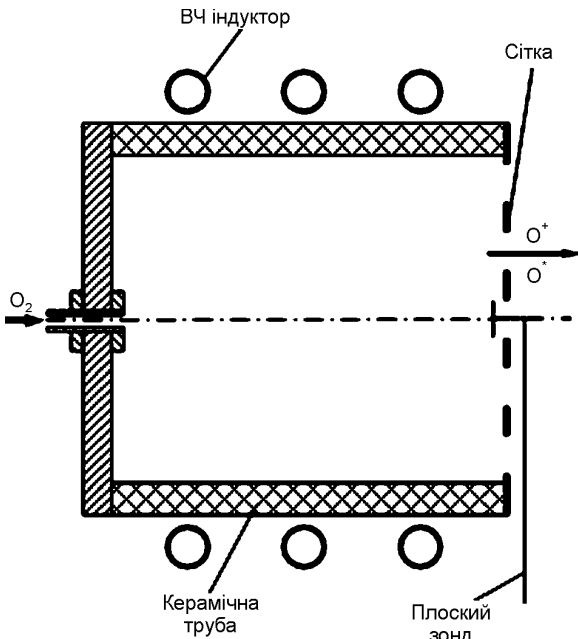


Рис. 3. Джерело ВЧІ плазми другого типу, що було застосовано для синтезу плівок Al_2O_3 .

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНЕТРОННОЇ ТА ІНДУКТИВНОЇ ПЛАЗМИ

Процес реактивного магнетронного нанесення оксиду алюмінію є дуже нестабільним. Нижче наведено результати детального дослідження інтегральних параметрів магнетронного та індукційного розрядів, параметрів плазми та газодинамічних особливостей для конкретних вакуумної установки та джерел електроживлення. Ці параметри – це початкова точка для вибору як технологічного режиму, так і процесу контролю.

На рис. 4 наведено напругу на магнетроні U_m , напругу на котушці індуктивності джерела ВЧІ плазми U_{ind} та швидкість потоку аргону q від тиску аргону в робочій камері.

З рис. 4 бачимо, що вони злегка змінюються залежно від тиску робочого газу. Залежність U_{ind} від ВЧ потужності має стабілітрон-подібну форму і змінюється не більше ніж 20% в діапазоні ВЧ потужності 300 – 700 Вт. З графіка бачимо, що “технологічне вікно” за тиском для одночасної роботи магнетрона та ВЧІ джерела плазми – $1 \cdot 10^{-3}$ –

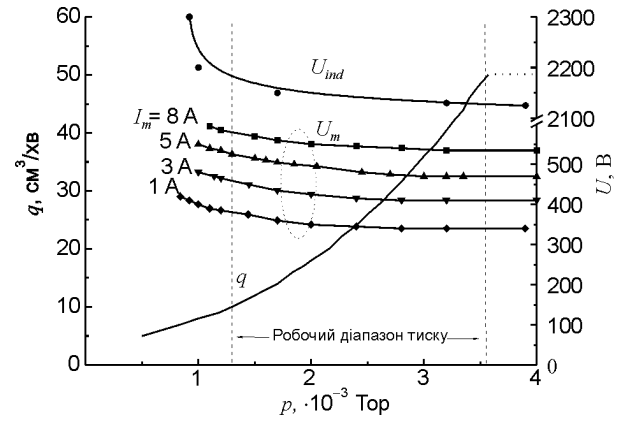


Рис. 4. Напруга на магнетроні U_m , напруга на котушці індуктивності джерела ВЧІ плазми U_{ind} та швидкість потоку аргону q від тиску аргону в робочій камері. ВЧ потужність 500 Вт.

$3,5 \cdot 10^{-3}$ Тор (зверху процес обмежено можливістю дифузійного насосу).

На рис. 5 наведено вольт-амперну характеристику магнетрона. Знайдено, що вольт-амперні характеристики магнетрона не залежать від форми та місцезнаходження анода.

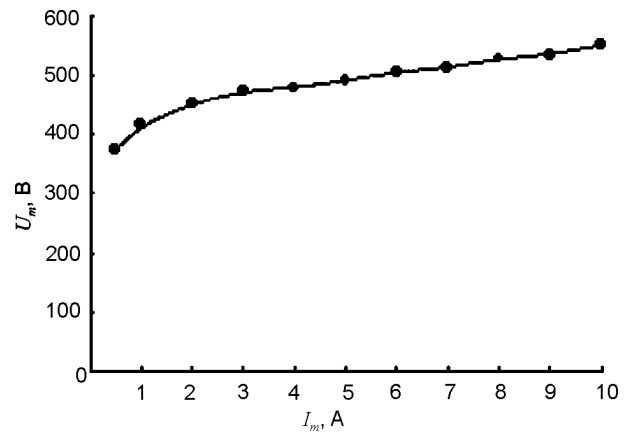


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика магнетронного розряду (аргон, $p = 2 \cdot 10^{-3}$ Тор).

На рис. 6 показано залежність густини іонного струму на зонд від струму магнетрона (потужності розряду). Коли магнетронний струм є сталим, струм зонда істотно не змінюється в усьому дослідженому діапазоні тиску аргону.

Плаваючий потенціал зонда знаходився у діапазоні (-20 – 25) В для всіх режимів магнетронного розряду та 5 – 8 В для індукційного розряду. Таким чином, в подальших експериментах струм зонда було виміряно при напрузі зонда мініус 50 В.

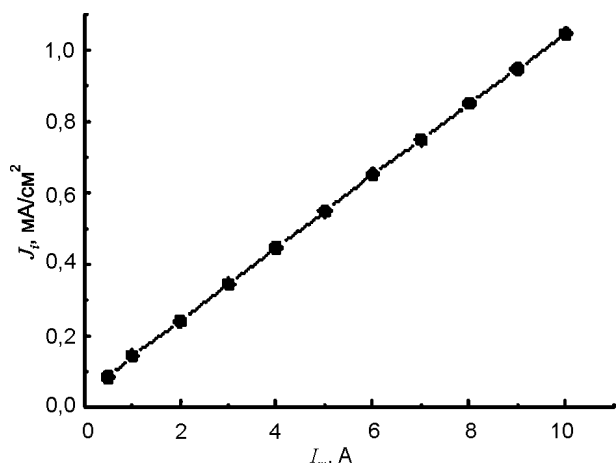


Рис. 6. Залежність густини струму іонів на зонд від струму магнетрона. Потік аргону $q = 12 \text{ см}^3/\text{хв}$, тиск $p = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$.

На рис. 7 представлено залежність густини іонного струму J_i на виході джерела плазми (1) і на підкладкоутримувачі (2) від ВЧ потужності.

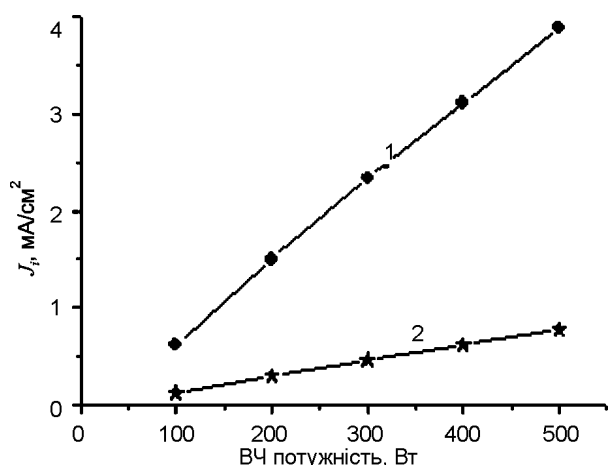


Рис. 7. Залежність густини іонного струму на виході джерела плазми (1) та по центру підкладкоутримувача (2) від ВЧ потужності.

Залежності густини іонного струму від ВЧ потужності джерела плазми для різного тиску робочого газу та різних сіток на виході джерела ВЧІ плазми представлено на рис. 8.

З діаграм стає безсумнівним, що прозорість сітки джерела суттєво впливає на густину іонного струму, що досягає зразків. Густина іонного струму максимальна без сітки ($\sim 1 \text{ mA/cm}^2$ при $P_{rf} = 600 \text{ Вт}$) і наближається до густини струму від магнетронного розряду при потужності 5 кВт.

На рис. 9 представлено радіальний розподіл густини іонного струму на зонд в площині підкладкоутримувача для магнетронної плазми (1) та ВЧІ плазми (2). Тиск $1 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$, потужність магнетронного розряду – 4 кВт, потужність ВЧІ розряду – 500 Вт.

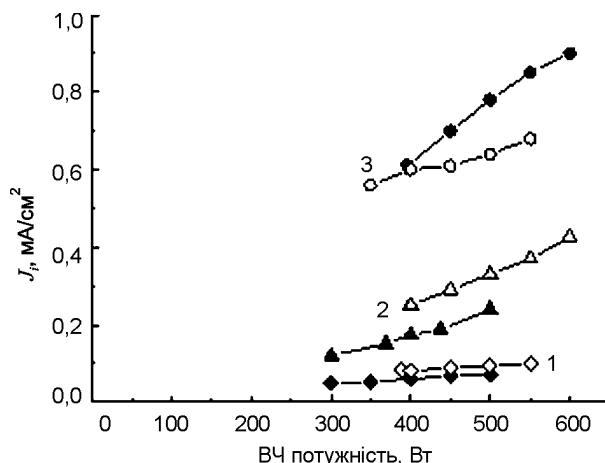


Рис. 8. Залежності густини іонного струму на підкладкоутримувачі від ВЧ потужності для різних сіток на виході джерела плазми. Робочий газ – аргон. Заповнені символи – $p = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$; відкриті символи – $p = 1,91 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$. 1 – сітка з отворами 0,5 мм, прозорістю 30%; 2 – сітка з отворами 8 мм, прозорістю 60%; 3 – джерело плазми без сітки.

підкладкоутримувача для магнетронної плазми та ВЧІ плазми. Джерело ВЧІ плазми було розміщено на 10 см ближче до підкладкоутримувача, ніж магнетрон. Наші вимірювання показали, що при тиску, меншому ніж $3 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$, потік іонів і активних частинок має профіль, що розбігається за законом косинуса.

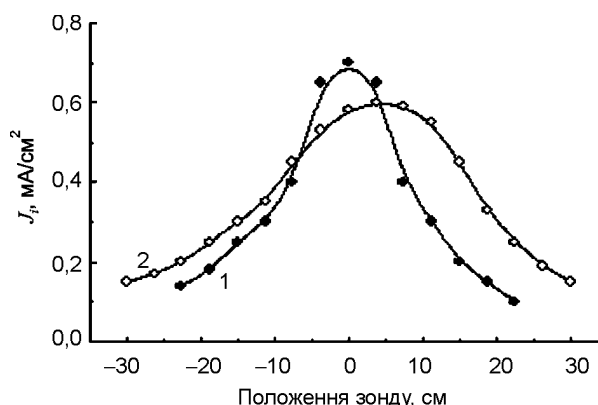


Рис. 9. Радіальні розподіли густини іонного струму на зонд в площині підкладкоутримувача для магнетронної плазми (1) та ВЧІ плазми (2). Тиск $1 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$, потужність магнетронного розряду – 4 кВт, потужність ВЧІ розряду – 500 Вт.

РЕАКТИВНЕ МАГНЕТРОННЕ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ З ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ

Невід’ємна особливість реактивних процесів нанесення, виконуваних із застосуванням звичайних магнетронів, – це існування роз-

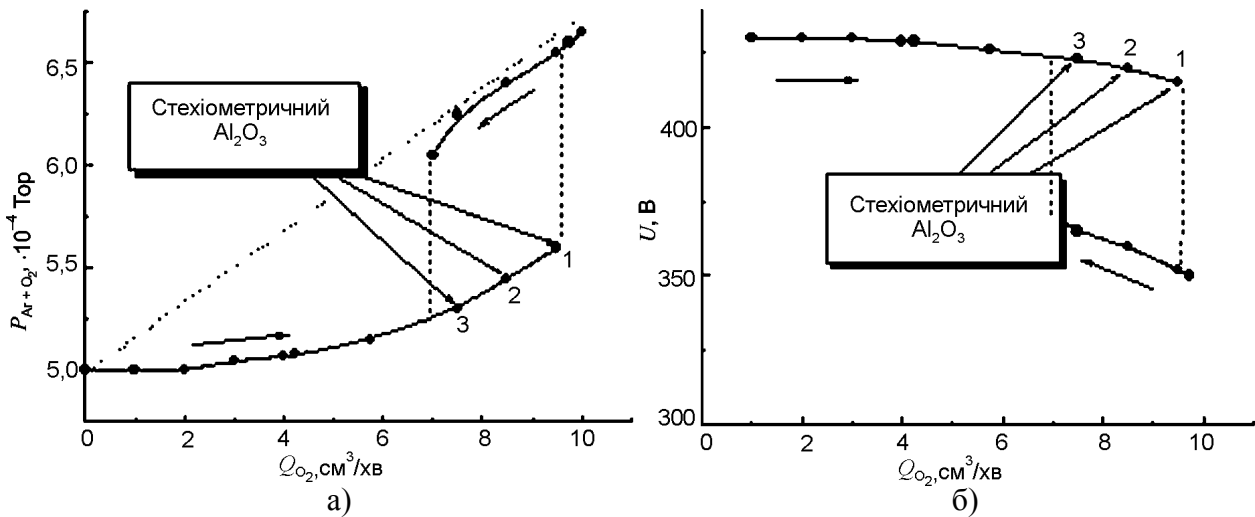


Рис. 10. Гістерезис параметрів процесу від швидкості потоку реактивного газу: а) гістерезис парціального тиску кисню, б) гістерезис катодної напруги. Точки 1, 2, 3 відповідають межі формування стехіометричної плівки з різними режимами активації кисню. 1 – без активації кисню, 2 – активація кисню джерелом ВЧІ типу 1, 3 – активація кисню джерелом ВЧІ типу 2.

рядної нестабільності, що пов'язано з явищем отруєння мішені. Для рішення цієї проблеми реактивну магнетронну розпилювальну систему для синтезу Al_2O_3 покриттів було модернізовано за допомогою джерела ВЧІ плазми 1 типу, а згодом 2 типу.

На рис. 10а показано типовий гістерезис на характеристиці парціального тиску кисню для реактивного нанесення оксиду алюмінію. Наведений графік чітко показує динамічні ефекти, що мають місце в процесі розпилення алюмінію зі зростанням парціального тиску кисню. При низькому потоці кисню, він витрачається на реакцію з алюмінієм на поверхні всередині робочої камери. Після критичного значення (точка 1 на рис. 10а), де ми маємо стехіометричну сполуку, процес газопоглинання в камері напилювання досягає насичення, тому можливість відкачування значно падає, що приводить до швидкого зростання парціального тиску кисню в камері. В діапазоні кисневого насичення, всі поверхні в робочій камері (включаючи мішень магнетрона) покриті ізолюючим шаром оксиду алюмінію. Найбільше в цьому випадку нас турбує стан мішені: ми можемо говорити про "отруєння" або "пасивацію" мішені внаслідок появи оксидного шару на її поверхні. Коли відбувається "пасивація", швидкість нанесення різко падає, зростає інтенсивність дугоутворення, та розряд стає дуже нестабільним. Це пояснюється зростанням коефіцієнту вто-

ринної емісії електронів на поверхні оксиду та проілюстровано за допомогою кривої гістерезису напруги магнетрона, що показана на рис. 10б. Тут, напругу мішені було виміряно при фіксованому катодному струмі, що дорівнював 2,5 А. Коли кисневий потік збільшується та поверхня камери окислюється, перехід мішені з металічної моди (450 В) у моду пасивації (340 В) здійснюється вельми швидко.

На рис. 11 наведено вольт-амперні характеристики магнетрона для різних значень потоку кисню. Вимірювання було зроблено в наступній послідовності.

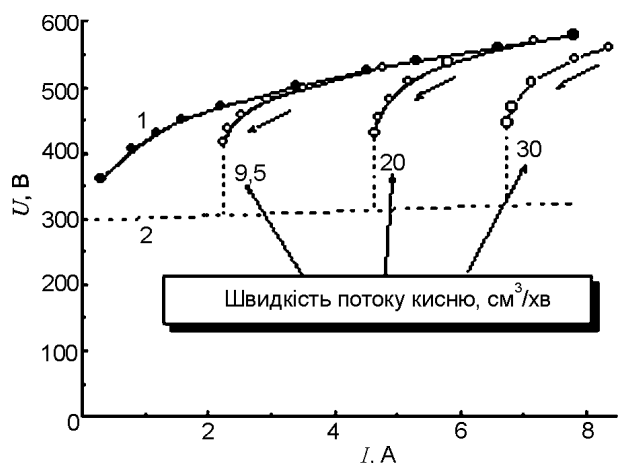


Рис. 11. Вольт-амперні характеристики магнетрона для різних потоків кисню. 1 – аргон, тиск – $0,8 \cdot 10^{-3}$ Тор, 2 – аргон плюс O_2 , тиск аргону – $0,8 \cdot 10^{-3}$ Тор.

При високому розрядному струмі (8 А) виставляли необхідний потік кисню, а потім

зменшували струм магнетрона, доки не відбувався перехід у режим пасивації. Таким чином було виміряно залежність мінімальної потужності, при якій магнетрон ще зостався у металевій моді, від швидкості потоку кисню (рис. 12). З графіка бачимо майже лінійну залежність, приблизно $10 - 12 \text{ (см}^3/\text{хв)}/\text{кВт}$.

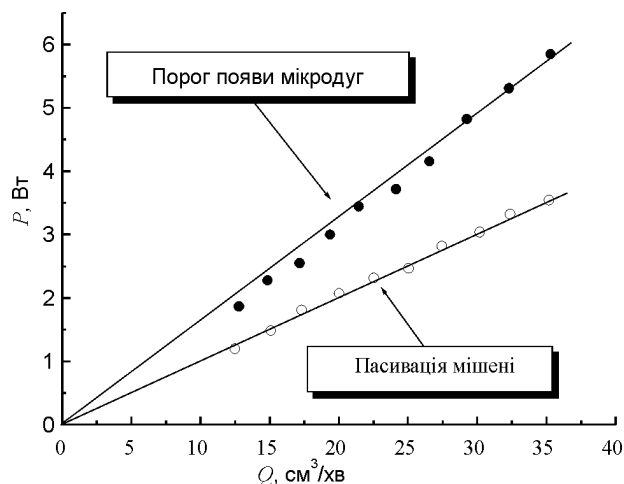


Рис. 12. Залежність мінімальної потужності P , що необхідна для роботи магнетрона в металевій моді та в режимі без дуг, від швидкості потоку кисню Q .

За допомогою реактивного магнетронного розпилювання можливо нанесення високоякісних плівок оксиду алюмінію з великими швидкостями, але лише за умови надійного усунення переходу до пасивації мішені. Для досягнення цієї мети можна застосовувати складні системи контролю зі зворотнім зв'язком або, як у цій роботі, модифікувати розпилююче обладнання, щоб збільшити ефективний парціальний тиск кисню в області синтезу плівки. Кінцева мета – досягти бажаних умов на підкладці зі зразками при тому, що мішень буде знаходитися в більш сприятливому оточенні, далекому від режиму пасивації.

Найбільш цікавим у цій роботі є створення таких умов синтезу, за якими створюється попередня активація реактивного газу за допомогою незалежного джерела ВЧІ плазми та доставка цього реактивного газу з високим ступенем активації якнайближче до підкладки, збільшуючи тим самим ефективний парціальний тиск кисню в області синтезу, таким чином розширюючи діапазон робочого режиму завдяки утримувannya мішені в умовах, що

відповідають більш стабільній області на гістерезисній кривій. Проведені експерименти з успіхом підтвердили цю ідею. На рис. 10 границю нанесення стехіометричної плівки показано точками 2 та 3 для різних типів джерела ВЧІ плазми. Заслуговує на увагу той факт, що включення джерела ВЧІ плазми майже не змінює гістерезисну залежність, яку показано на рис. 10. Таким чином принциповою проблемою при нанесенні стехіометричної плівки Al_2O_3 за допомогою направленного джерела активованого кисню є відносне розташування магнетрона, джерела ВЧІ плазми та підложки. Було встановлено, що трьохмірну область формування стехіометричного Al_2O_3 в робочій камері визначають не тільки головні технологічні параметри процесу (потужності магнетронного та ВЧІ розрядів, швидкість потоку кисню, тиск аргону), але й геометричні параметри (відстані, кути та позиції магнетрона та джерела ВЧІ плазми по відношенню до підкладкоутримувача).

На рис. 13 показано 2 мірну діаграму синтезу стехіометричної плівки в даній системі в площині магнетрона та джерела ВЧІ плазми.

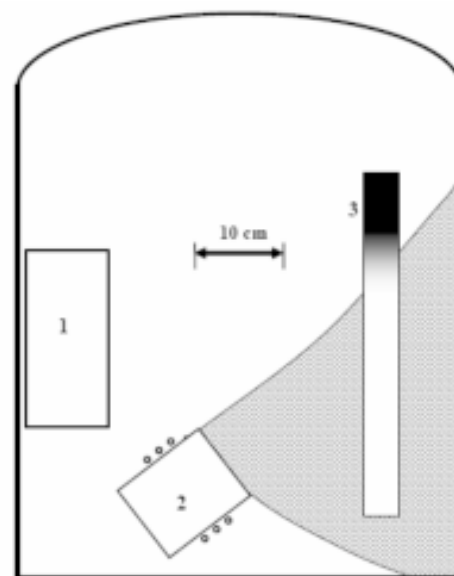


Рис. 13. Експериментальна двумерна діаграма півки, синтезованої за допомогою активації кисню джерелом ВЧІ плазми. 1 – магнетрон, 2 – джерело ВЧІ плазми, 3 – підкладкоутримувач з показаним розподілом прозорості плівки (стехіометричну область заштриховано).

Експериментально знайдено, що на відстані 30 см від магнетрона стехіометрична плівка оксиду алюмінію синтезується на всій

площі підложки 30×30 см при потужності магнетронного розряду 5 кВт та ВЧ потужності близько 500 Вт.

На рис. 14 наведено залежність швидкості нанесення оксиду алюмінію в площині підкладкоутримувача від тиску аргону у камері.

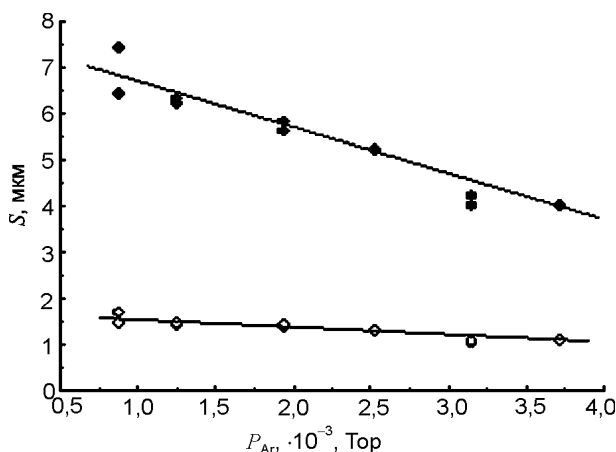


Рис. 14. Залежність швидкості нанесення оксиду алюмінію в площині підкладкоутримувача від тиску аргону. Верхня лінія – швидкість нанесення, нижня – приведена швидкість нанесення на кіловат потужності магнетронного розряду.

Описувана в роботі система для синтезу покриттів оксиду алюмінію є закінченим самостійним модулем, який може бути приєднано до будь-якої вакуумної установки. Розроблену нами систему було змонтовано на вакуумній установці “Бальцерс” у м. Радом, Польща і було проведено цикл експериментів по нанесенню покриттів на зразки та їх подальшого дослідження [11]. Таким чином, бачимо, що наша система є працездатною на різних вакуумних установках, з різними параметрами насосів тощо. Тобто можна говорити про “технологічний кластер”, який можна буде приєднувати до будь-якої вакуумної системи.

ВИСНОВКИ

Результатом циклу робіт стала розробка нового технологічного модуля для реактивного синтезу складнокомпозиційних сполук типу оксидів та оксинітридів на базі магнетронного та ВЧ індукційного розрядів. Основна ідея технології полягає в сепарації двох процесів: розпилення металеві мішені за допомогою магнетрона постійного струму в інерт-

ному газі та активації реактивного газу за допомогою додаткового плазмового джерела на базі ВЧ індукційного розряду.

Для того, щоб добитися стабільної роботи системи, було вирішено такі проблеми. По-перше, було застосовано незбалансований магнетрон другого роду, який може працювати при низькому тиску, одночасно з індукційним розрядом. По-друге, для більш повної активації молекул кисню було застосовано допоміжний розряд – ВЧ індукційний. По-третє, було застосовано ВЧ джерело з локалізованою плазмою, створене так, щоб реактивний газ з високим ступенем активації потрапляв якнайближче до підкладки, збільшуючи тим самим ефективний парціальний тиск кисню в області синтезу, та майже не досягав мішені магнетрона. Таким чином розширюється діапазон робочого режиму системи завдяки утримуванню мішені в умовах, що відповідають більш стабільній області.

Робочий діапазон параметрів дозволяє монтувати модуль на стандартному вакуумному обладнанні, в єдиному циклі проводити очистку та активацію поверхні, що обробляється, наносити металеві, діелектричні складнокомпозиційні та багат шарові покриття. Конструкція модуля дозволяє проводити модернізацію шляхом використання декількох магнетронів та поляризацію зразків напруженою в декілька кіловольт.

Роботу виконано в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна за держбюджетною темою № 9-13-09.

ЛІТЕРАТУРА

1. Danilin B.S. The use of low-temperature plasma for thin film deposition. – М.:Energoatomizdat, 1989.
2. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing// Wiley: New York, 1994.
3. Deshpandey C., Bunshah R.F.//Thin Solid Films. – 1988. – Vol. 163. – P. 131-147.
4. Scholl R.A.//Surf. Coat. Technol.–1998. – Vol. 98. – P. 823.
5. Dorre E., Hubner H. (Eds.). Alumina: Processing Properties and Applications/Springer, Berlin, 1984.
6. Zykov A.V., Dudin S.V., Yakovin S.D., Walkowicz J. Magnetron sputtering system for syn-

- thesis dielectric coatings//10th Intl. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, Ukraine. Book of Abstracts. – 2004. – P.170.
7. Borodin M.I., Dudin S.V., Farenik V.I. Time resolved investigation of non-stationary magnetron discharge//10th Intl. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, Ukraine. Book of Abstracts. – 2004. – P. 181.
 8. Dudin S.V., Farenik V.I., Dahov A.N. Development of arc suppression technique for reactive magnetron sputtering//Physical Surface Engineering. – 2005. – Vol. 3, No 3-4.
 9. Walkowicz J., Zykov A.V., Dudin S.V., Yakovyn S.D. Oxygen activation effect on reactive magnetron synthesis of alumina coatings. Problems of atomic science and technology//Series Plasma physics. – 2007. – No 1. – С. 194-196.
 10. Denysenko M.Yu.I., Dudin S., Zykov A., Azarenkov N. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources//Phys. Plasmas. – Vol. 9, No. 11.
 11. Walkowicz Jan, Zykov Aleksandr, Dudin Stanislav, Yakovyn Stanislav, Brudnias Rafal. ICP enhanced reactive magnetron sputtering system for syntesis of alumina coating//Tribologia. – 2006. – No 6. – P. 163-174.
 12. Behler Jorg, Delley Bernard, Lorenz Sonke, Reuter Karsten, and Scheffter Matthias. Dissociation of O₂ at Al(111): The Role of Spin Selection Rules//Physical Review Letters. – 2005. – No. 94.

Зыков Александр Владимирович – начальник отдела ионно-плазменных систем НИЛ ДПТП до 1993 года, доцент кафедры физических-технологий, старший научный сотрудник НИЛ ДПТП (по совместительству).

Яковин Станислав Дмитриевич – старший научный сотрудник НИЛ ДПТП.

© О.В. Зиков, С.Д. Яковін, С.В. Дудін, 2009.