

Отримання шарів AlN при магнетронному розпиленні алюмінію в газовій суміші Ar + N₂

Г.С. Корнющенко*

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

(Одержано 14.03.2014, у відредагованій формі – 14.04.2014, опубліковано online 20.06.2014)

В даній роботі були проведені дослідження впливу параметрів експерименту, таких як потужність розряду, тиск робочого газу, температура ростової поверхні на процес формування та основні характеристики шарів нітриду алюмінію. В результаті оптимізації вказаних параметрів одержані близькі до стехіометричного складу шари AlN, що мають кристалічну будову з гексагональною ґраткою типу вюрциту. Проведені дослідження структури, фазового складу та мікротвердості конденсатів, які мають найбільш близькі до стехіометричних елементні склади. Мікротвердість отриманих покриттів складала 0.760–1.12 Гпа.

Ключові слова: Нітрид алюмінію, Квазірівноважна стаціонарна конденсація, Реактивне магнетронне розпилення, Накопичувальна система плазма-конденсат.

PACS numbers: 81.07.Bc, 81.10.Bk,
81.15.Cd.

1. ВСТУП

Завдяки своїм унікальним властивостям нітрид алюмінію являється дуже перспективним матеріалом для створення цілого ряду напівпровідникових приладів. Так, AlN має ширину забороненої зони $E = 6.28$ еВ, що значно перевищує значення для таких напівпровідників як кремній, германій, арсенід галію та ін [1-5]. Це зумовлює його використання у якості матеріалу для виготовлення оптоелектронних приладів у видимому та ультрафіолетовому діапазоні, для світлодіодів, фотоперетворювачів ультрафіолетової області спектру, сонячних елементів [5-10]. Також до корисних властивостей нітриду алюмінію слід віднести високу теплопровідність [11], низький коефіцієнт термічного розширення [12], високу радіаційну та хімічну стійкість [13]. Все це обумовлює його широке використання в високотемпературній, силовій та високоенергетичній електроніці [10-14]. Добра міцність матеріалу обумовлює його використання у якості захисних плівок, наприклад при виробництві дзеркал для спектروفотометрів [15], для укріплення поверхні органічних фотопровідників [16]. Значна увага до синтезу AlN викликана також тим, що цей матеріал має унікальне поєднання фізичних та хімічних властивостей, а також є дуже перспективними для використання в екстремальних умовах, а саме при високих температурах, високих потужностях, інтенсивному опроміненні, в корозійних умовах і т.ін [15-18].

Однак технологічні труднощі отримання нітриду алюмінію, довгий час перешкождали практичному використанню його основних переваг. Нітрид алюмінію не існує у природному вигляді. Тому для його отримання використовують ряд методів синтезу. Він може кристалізуватися в структури типу вюрциту або сфериту. До основних методів вирощування належать: реактивне магнетронне розпилення, електроосадження, молекулярно-променева епітаксія, металургічна епітаксія з газової фази, електронно-променево, лазерне і термічне випарування [1-18].

Узагальнюючи літературні дані можна зробити висновки про те, що найбільш розповсюджений спосіб отримання шарів нітриду алюмінію є реактивний метод магнетронного розпилення при постійному струмі з використанням азотно-аргонної суміші в якості робочого газу. До найбільш типових проблем отримання шарів нітриду алюмінію слід віднести їх забруднення киснем [1-3]. При цьому процентний вміст кисню залежить не тільки від його присутності в суміші робочих газів. Так, дія плазмових потоків на поверхню росту, наприклад при використанні ВЧ розпилення та при зменшенні відстані від мішені до підкладки, підсилюється селективне формування AlN. Структурні, оптичні та захисні характеристики шарів AlN, як правило, покращуються при переході до формування конденсатів при більш низьких перепадах [10-14]. Наближення до термодинамічної рівноваги можна реалізувати, що найменше, за допомогою трьох чинників: підвищенням температури ростової поверхні, зниженням осаджуваних потоків та дією плазми на поверхню росту [19, 20].

Отже, метою роботи була оптимізація таких робочих параметрів експерименту, як тиск робочого газу, потужність розряду в накопичувальній системі плазмаконденсат для отримання кристалічних шарів нітриду алюмінію з мінімальним вмістом домішок. З ціллю визначення параметрів експерименту, що відповідають формуванню найбільш структурно досконалих покриттів, також будуть проведені дослідження фізичних властивостей отриманих шарів. В якості наступної надважливої задачі роботи виступає створення достатньо чистого інертного середовища або напуск азоту високої чистоти.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для вирішення поставленої мети, в роботі використовується накопичувальна система плазма-конденсат, що дозволяє реалізувати умови квазірівноважної стаціонарної конденсації. В системі плазма-конденсат

* ann_korn@ukr.net

фазова селективність при реактивному осадженні речовини буде більш виражена, оскільки при підвищених енергіях атомів хімічні реакції проходять більш ефективно. Водночас в системі плазма-конденсат необхідно було враховувати підвищену чутливість механізмів структуроутворення шарів до зміни технологічних параметрів. У зв'язку з цим у якості важливої проблеми, що покладена в основу роботи являється реалізація стаціонарності процесу конденсації, що передбачає незмінність в часі малих пересичень.

Всі експерименти по отриманню конденсатів були проведені з використанням технологічної установки ВСА-350, укомплектованої двома бічними магнетронами на постійному струмі для додаткового розпилення титану і розташованою вгорі накопичувальною системою плазма-конденсат. Конструкція накопичувальної системи плазма-конденсат, що використовувалась для отримання шарів нітриду алюмінію представлена на рисунку 1. Принцип роботи полягає у наступному: між анодом 1 і катодом 2 в області схрещених електричних і магнітних полів відбувається розпилення алюмінієвої мішені 3, до якої підведений негативний потенціал. Зона ерозії позначена на малюнку позицією 4. Після отримання високого вакууму та очистки робочого газу речовина осаджується на підкладки 5, 6. В роботі була проведена серія експериментів по осадженню конденсатів на підкладки із скла, які були розміщені на аноді 5 та катоді 6 (рис. 1).

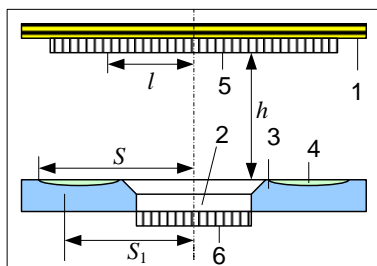


Рис. 1 – Накопичувальна система плазма-конденсат: 1 – анод, укомплектований системою резистивного розігріву; 2 – пустотілий катод; 3 – алюмінієва мішень; 4 – зона ерозії мішені; 5 – підкладка, розташована на аноді; 6 – підкладка, розташована на катоді

В цьому пристрої самоорганізація критично малих стаціонарних пересичень, перш за все, обумовлена двома взаємоузгодженими протилежними процесами. З одного боку в початковий момент роботи системи плазмові потоки, які впливають на ростову поверхню, підвищують її температуру, з іншого - розпилені атоми, активно взаємодіючи з робочим газом підвищеного тиску термалізуються, іонізуються, а потім за допомогою дифузії акумулюються біля підкладки 6 в пустотілому катоді 2 (рис. 1) [19, 20]. При цьому велика частина адатомів, унаслідок дії на них плазми і відсутності необхідного для конденсації пересичення, повторно випаровується, а в подальшому іонізується і за допомогою електричного поля повертається на ростову поверхню [20-22]. По закінченню деякого часу температура ростової поверхні стабілізується, а подальше накопичення речовини переводить систему в слабо пересичений стан. Оскільки, в міру накопичення речовини, градієнт концен-

трації розпиленних атомів на вході в полий катод знижується, а в момент нуклеації використовується запас накопиченого всередині полого катода речовини, подальше зростання пересичення обмежується. При цьому певну роль в самоорганізації критично малих пересичень відіграє помітне підвищення температури ростової поверхні за рахунок повної термічної акомодатії окремої частини адатомів. В роботі [21] описана математична модель, що підтверджує самоорганізацію критично малих стаціонарних пересичень. Слід зазначити, що накопичувальну систему плазма-конденсат можна використовувати і як звичайний магнетронний розпилювач, конденсуючи речовину на підкладку 5, яка розміщена на аноді 1 (рис. 1).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Оптимізація технологічних параметрів отримання шарів AlN

При виконанні роботи використовувався ряд технологічних підходів, які базуються на магнетронному розпиленні алюмінію з використанням в якості робочого газу аргонно-азотної суміші або азоту. В першому підході в якості робочого газу використовувалась аргонно-азотна суміш. При цьому приготування суміші відбувалося за допомогою закачки відповідних газів з балонів в додатковий об'єм. Контроль процентного співвідношення складових суміші контролювався за допомогою відповідних парціальних тисків. В подальшому приготування суміші газів потрапляла в технологічну камеру в проточному варіанті. Концентрація азоту змінювалась в межах від 20 до 70 ат. %.

Час осадження складав 3 години. При цьому, підкладки розігрівалися до температури $T_c = 680$ К, тиск суміші газів підтримувався на рівні $0.8 \div 1.5$ Па, а потужність розряду становила $17 \div 25$ Вт. При дослідженні елементного складу методом енергодисперсійного аналізу використовувалась прискорююча напруга 6 кВ, що мінімізувало вклад скла в спектр характеристичного рентгенівського випромінювання. Цей висновок підтверджується відсутністю кремнію в спектрі досліджуваних хімічних елементів. При цьому, як показав елементний аналіз, конденсати містять значну кількість кисню. Як слідує з приведенного на рисунку 2 типового спектру елементного складу, у цьому випадку основу конденсатів складають алюміній (48.26 ат. %), кисень (31.91 ат. %), азот (18.66 ат. %) і вуглець (1.17 ат. %). Використовуючи проточний варіант напуску суміші газів з різною концентрацією її складових, а також різні $P_{Ar + N_2}$ і P_w , не вдалося суттєво знизити кисневу складову конденсатів. Це пов'язано з тим, що гази які знаходяться в балонах мають у своєму складі значну кількість кисню. В силу цих обставин в подальшому був використаний інший підхід напуску робочого газу. Він складався з таких етапів: після вакуумної відкачки та прогріву технологічної камери система відкачки повністю відсікалась і проводився безпроточний напуск аргону до тиску ~ 3 Па; потім включалися два магнетронні розпилювачі титану і проводилася глибока очистка аргону за методикою [23], при цьому тиск аргону в технологічній камері також зменшувался приблизно до $0.8 \div 1.2$ Па; виклю-

чалися магнетронні розпилювачі титану і проводився безпроточний напуск азоту. Для реалізації більш чистих умов конденсації в якості азота були використані пари його рідкого стану. Парціальний тиск азоту складав 0.5 ± 0.3 Па.

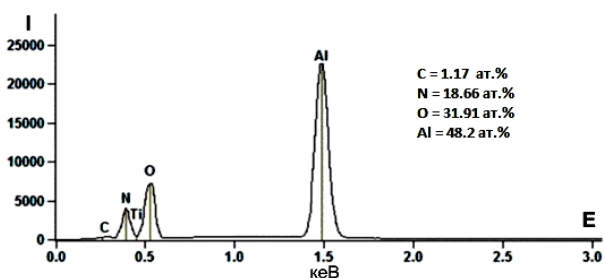


Рис. 2 – Результати досліджень елементного складу конденсатів системи AlN, отриманих при $P_{Ar+N_2} = 0.9$ Па, вкладі азоту в суміш газів 40-55 ат. %, $P_w = 18 \pm 20$ Вт, температурі підкладки $T_c = 680$ К і напрузі розряду $U_r = 280$ В. Час осадження 5 год (де I – інтенсивність, виражена у відносних одиницях)

В подальшому включався магнетронний розпилювач алюмінію. Як показали дослідження елементного складу конденсатів, що отримані на підкладках 5, розміщених на аноді 1 (рис. 1), при такій системі напуску газів вміст кисню в конденсатах знижується майже в два рази. Так із представлених на рисунку 3 результатів дослідження елементного складу можна говорити про те, що в цьому випадку основу конденсатів складають алюміній (46.42 ат. %), кисень (18.90 ат. %), азот (31.87 ат. %), титан (0.08 ат. %) і вуглець (2.73 ат. %). Разом з тим безпроточний варіант напуску газу призводив до погіршення вакуумних умов конденсації по мірі продовження технологічного процесу. Такі погіршення відбуваються за рахунок поступового накопичення кисню по причині газовиділень з внутрішньої поверхні технологічної камери, та проходження газів атмосфери через мікрощілини технологічної камери. В силу цих причин з часом осадження конденсату вміст кисню в них збільшується до 23 ат. %. При цьому поява в конденсатах обмеженої кількості титану є наслідком його попереднього розпилення. Слід зазначити, що при конденсації речовини на підкладці 6, які розміщені в пустотілому катоді 2 за умов безпроточного напуску газів, вміст кисню знижується на 2.5 ± 4.3 ат. %.

Оскільки проточний варіант напуску газів можливий при використанні тільки неочищеного аргону, в подальшому в якості робочого газу використовувались виключно пари рідкого азоту. При цьому, як і в попередньому випадку, перед конденсацією шарів системи AlN в технологічній камері отримувался вакуум з одночасним прогрівом. Після цього відсікалася система відкачки від технологічної камери і напускався аргон до тиску ~ 1 Па.

В подальшому включалися магнетронні розпилювачі титану і наносилась його плівка на внутрішню поверхню технологічної камери, що призводило до очистки робочого газу. Потім відключалися магнетронні розпилювачі титану, до вакуумної камери підключалася система відкачки, проводився напуск парів азоту і включався розпилювач алюмінію. Ці операції дозволяли мінімізувати газовиділення з внутрішньої поверхні технологічної камери під час

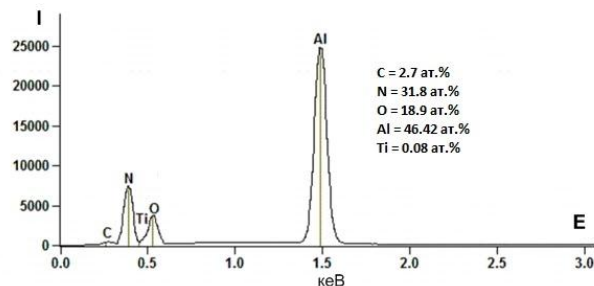


Рис. 3 – Результати досліджень елементного складу конденсатів системи AlN, отриманих при $P_{Ar+N_2} = 1.4$ Па, вкладі азоту в суміш газів 20-45 ат. %, $P_w = 25 \pm 28$ Вт, $T_c = 680$ К і $U_r = 290$ В. Час осадження одна година

формування конденсатів системи AlN. При використанні такого технологічного підходу були встановлені наднизькі швидкості формування конденсатів на підкладках, розміщених на аноді. Цей факт пояснюється тим, що коефіцієнт розпилення алюмінію іонами азоту суттєво нижчий, ніж коефіцієнт розпилення іонами аргону. Разом з тим швидкість нарощування конденсатів на підкладках, розташованих в пустотілому катоді складала 0.7 ± 0.9 мкм/год. В зв'язку з цим була проведена серія експериментів по отриманню конденсатів на підкладках, розміщених в пустотілому катоді при різних тисках азоту (0.8 ± 43 Па).

При цьому було встановлено, що вміст кисню в конденсатах в значній мірі залежить від тиску азоту. Так, при відносно малих тисках азоту ($\sim 1.5 \pm 5$ Па) атомна концентрація кисню складає 8 ± 12 %. На рисунку 4 приведений типовий спектр хімічних елементів, основу яких складає алюміній (48.96 ат. %) і азот (38.16 ат. %).

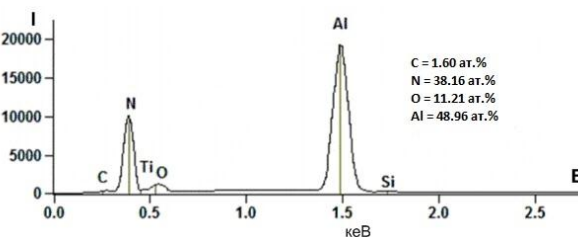


Рис. 4 – Результати досліджень елементного складу конденсатів системи AlN, отриманих при $P_{N_2} \approx 3$ Па, $P_w = 24 \pm 27$ Вт і $U_r = 340$ В. Час осадження дві години

Мінімальний вміст кисню в конденсатах був отриманий при тиску азоту $\sim 9 \pm 12$ Па. Так за таких умов осадження до складу конденсатів входить вуглець (1.66 ат. %), азот (46.16 ат. %), кисень (3.27 ат.%) і алюміній (48.91 ат. %) (рисунком 5). При подальшому збільшенні тиску азоту до 43 Па відбувається поступове зниження швидкості нарощування конденсатів до 130 нм/год. Відповідно до цього відбувається суттєве підвищення концентрації атомів кисню до 15 %.

3.2 Дослідження фізичних властивостей отриманих шарів нітриду алюмінію

В роботі були проведені дослідження структури, фазового складу та мікротвердості конденсатів, які мають найбільш близькі до стехіометричного елементні склади.

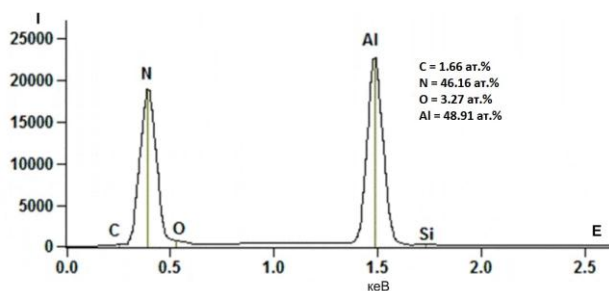


Рис. 5 – Результати досліджень елементного складу конденсатів системи AlN, отриманих при $P_{N_2} \approx 9$ Па, $P_w = 24 \div 27$ Вт і $U_r = 340$ В. Час осадження дві години

При відокремленні конденсатів від монокристалів KCl шляхом розчинення останніх в воді було виявлено, що вільні від підкладки плівки розтріскуються і скручуються в трубки. Ці особливості свідчать про те, що конденсати не однорідні по товщині і в них акумулюються значні механічні напруги. При цьому, як показали результати просвічуваної електронної мікроскопії, конденсати, отримані в полому катоді при тиску парів азоту 3 Па, а також при потужності розряду $24 \div 27$ Вт і напрузі розряду 340 В, мають аморфну структуру (рисунок 6 а).

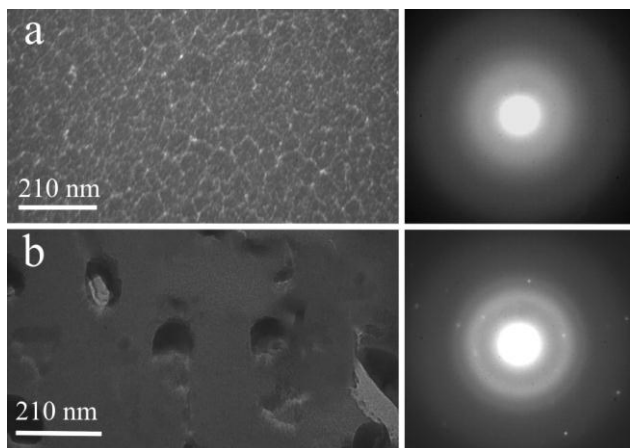


Рис. 6 – Мікроструктура і електронограми конденсатів AlN, які отримані на сколах (001) KCl, розміщених в полому катоді. Конденсати формувалися при $P_w = 24 \div 27$ Вт і $U_r = 340$ В (а – $P_{N_2} \approx 3$ Па; б – $P_{N_2} \approx 10$ Па). Час осадження склав $10 \div 25$ хв

Як свідчить поява на електронограмах окремих рефлексів а також зображення структури (рисунок 6б), підвищення тиску проточних парів азоту до 10 Па і відповідність інших технологічних параметрів попередньому експерименту призводили до формування конденсатів з кристалічними вкрапленнями.

Як показали рентгенівські дослідження, конденсати, отримані в полому катоді при тисках парів азоту $2.5 \div 6.3$ Па, потужності і напрузі розряду відповідно $24 \div 27$ Вт і $270 \div 340$ В, рентгеноаморфні (рисунок 7а). При цьому підвищення тиску проточних парів азоту до 11 Па та незмінність інших технологічних параметрів ($P_w = 24 \div 27$ Вт і $U_r = 310$ В) визначають появу на рентгенограмах помітних максимумів. Очевидно ці результати корелюють з електронно-мікроскопічними дослідженнями. Розрахунок міжплосинних відстаней показав (таблиця 1), що

вони з достатньою точністю співпадають з гексагональною ґраткою вюрциту, політип якого найбільш часто зустрічається при формуванні сполук AlN. Дослідження структури конденсатів, отриманих при інших технологічних умовах показали їх аморфну будову.

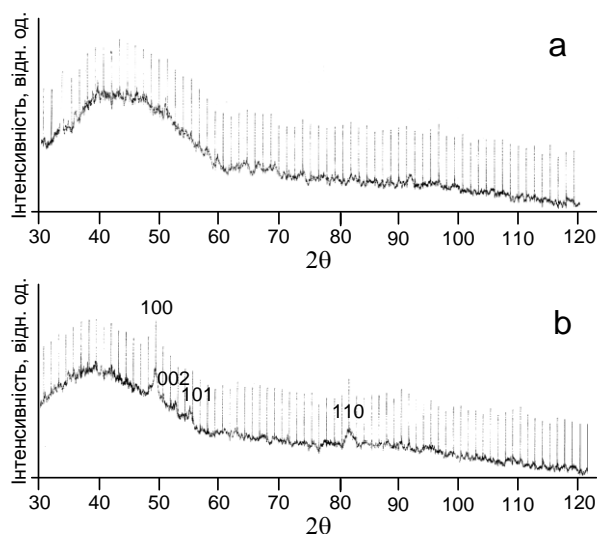


Рис. 7 – Типові рентгенограми від конденсатів AlN, які отримані підкладках із скла, що були розташовані в полому катоді. Конденсати формувалися при $P_w = 24 \div 27$ Вт і $U_r = 340$ В (а – $P_{N_2} \approx 3$ Па; б – $P_{N_2} \approx 11$ Па). Час осадження 7 годин

Таблиця 1 – Табличні та розрахункові дані міжплосинних відстаней, що отримані на основі рентгенограми, представленої на рис. 7б

hkl	d_{hkl} , Å (розрахунки.)	d_{hkl} , Å (табл. дан.)
100	2.71	2.695
002	2.50	2.490
101	2.371	2.371
102	–	1.829
110	1.557	1.5559
103	–	1.4133
200	–	1.3475

Мікротвердість конденсатів AlN вимірювалася за допомогою приладу ПМТ-3 відповідно до ГОСТу 9450-90. У цьому випадку проводилося вдавлення алмазної стандартної 136-градусної піраміди з квадратною основою, причому тривалість опускання індентора була більше 15 с, а тривалість витримки становила не менше 5 с. Вимірювання отриманого при цьому відбитка проводилося не менше двох-трьох разів, а чисельне значення мікротвердості по Вікерсу визначалося відповідно до виразу:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

де P – вага, яка прикладена до індентора; d – розмір відбитка.

Як показали дослідження, мікротвердість зразків складала $0.760 \div 1.12$ ГПа.

Досліджені конденсати AlN були повністю прозорі в видимому спектрі світла. При цьому вони мали високі діелектричні властивості.

4. ВИСНОВКИ

1. Використання балонних азоту та аргону, а також проточний напуск їх суміші, призводять до формування конденсатів з високою концентрацією кисню (до 32 ат. %).

2. Безпроточний напуск парів рідкого азоту в середовище очищеного аргону призведе до формування конденсатів, в яких впродовж процесу осадження значно підвищується вміст кисню (до 19 ат. %).

3. Найбільш близькі до стехіометричного складу конденсати AlN можна отримати на підкладках, які розміщені в полому катоді при проточному напуску парів рідкого азоту, тиск яких підтримувався на рівні 10 Па, а також при $P_w = 24-27$ Вт, $U_r = 340$ В і $P_{N_2} \approx 10$ Па.

4. Встановлено, що впродовж формування конденсатів AlN, що відбувається у середині полого катода, відбувається перехід від аморфного до кристалічного стану, який має гексагональну решітку вюрцита.

Получение слоев AlN при магнетронном распылении алюминия в газовой смеси Ar + N₂

А.С. Корнющенко

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

В данной работе проведены исследования влияния параметров эксперимента, таких как мощность разряда, давление рабочего газа, температура поверхности ростовой поверхности на процесс формирования и основные характеристики слоев нитрида алюминия. В результате оптимизации указанных параметров нами получены близкие к стехиометрическому составу слоя AlN, имеющие кристаллическое строение с гексагональной решеткой типа вюрцита. Проведенные исследования структуры, фазового состава и микротвердости конденсатов, которые имеют элементные составы наиболее близкие к стехиометрическим. Микротвердость полученных покрытий составляет $0.760 \div 1.12$ ГПа.

Ключевые слова: Нитрид алюминия, Квазиравновесная стационарная конденсация, Реактивное магнетронное распыление, Накопительная система плазма-конденсат.

Formation of AlN Layers at Magnetron Sputtering of Aluminum in Ar + N₂ Gas Mixture

A.S. Korniyushchenko

Sumy State University, 2, Rymsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

The influence of technological parameters, such as discharge power, working gas pressure, growth surface temperature, on the formation mechanisms and main characteristics of aluminum nitride has been investigated in the work. On the basis of optimization of the stated technological parameters, the aluminum nitride layers close to stoichiometric composition having hexagonal crystal lattice of wurtzite type have been obtained. The investigations of the structure, phase composition and microhardness have been performed for the layers with elemental composition closest to the stoichiometric one. The microhardness of the layers obtained varies from 0.760 to 1.12 GPa.

Keywords: Aluminum nitride, Near-equilibrium steady-state condensation, Reactive magnetron sputtering, Plasma-condensate accumulation system.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. K.G. Grigorov, I. Nedkova, G. Beshkov, *J. Opt. Adv. M.* **7**, 381 (2005).
2. G.E. Stan, I. Pasuk, A. C. Galca, *Dig. J. Nanomater. Bios.* **5**, 1041 (2010).
3. Q.X. Guo, K. Yahata, T. Tanaka, *J. Cryst. Growth* **257**, 123 (2003).
4. C. Duquenne, M-P. Besland, P.Y. Tessier, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **45**, 015301 (2012)
5. B. Mednikarov, G. Spasov, Tz. Babeva, *Opt. Adv. Mater.* **7**, 1421 (2005).
6. M.G. Mendez, S.M. Rodriguez, R. Machorro, *Rev. Mex. de Fis.* **54**, 271 (2008).
7. J.X. Zhanga, H. Chenga, Y.Z. Chenat *Surf. Coat. Technol.* **198**, 68 (2005).
8. X.S. Miao, Y.C. Chan, E.Y.B. Pun, *Thin Solid Films* **315**, 123 (1998).
9. G.W. Aunera, F. Jin, V. M. Naik, *J. Appl. Phys.* **85**, 7879 (1999).
10. M.B. Assouara, M.E. Hakikia, O. Elmazria, *Diamond Relat. Mater.* **13**, 1111 (2004).
11. X.-H. Xua, H.-S. Wu, C.-J. Zhang, *Thin Solid Films.* **388**, 62 (2001).
12. A. Mahmood, R. Machorr, S. Muhl, *Diamond Relat. Mater.* **12**, 1315 (2003).
13. C.-J. Ho, T.-K. Shing, P.-C. Li, *Tamkang J. Sci. Eng.* **7**, 1 (2004).
14. K. Jagannadham, A.K. Sharma, Q. Wei, *J. Vac. Sci. Technol.* **16**, 2804 (1998).
15. M. Jergel D.C. Falcony, M. Aguilar-Frutis *Superficies Y Vacío.* **16**, 22 (2003).
16. M.A. Auger, L. Vazquez, M. Jergel. *Surf. Coat. Technol.* **180**, 140 (2004).
17. J. Li, K.B. Nam, M.L. Nakarmi. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 5163 (2003).
18. W. Bo, W. Mei, W. Ruzhi. *Mater. Lett.* **53**, 367 (2002).
19. V.I. Perekrestov, Yu.O. Kosminska, A.A. Mokrenko, I.N. Kononenko, A.S. Korniyushchenko, *Vacuum* **86**, 111 (2011).
20. V.I. Perekrestov, A.I. Olemskoi, A.S. Korniyushchenko, Yu.A. Kosminska, *Phys. Solid State.* **51**, 1060 (2009).
21. V.I. Perekrestov, A.I. Olemskoi, Yu.O. Kosminska, A.A. Mokrenko, *Phys. Lett. A.* **373**, 3386 (2009).
22. V.I. Perekrestov, Yu.O. Kosminska, A.S. Korniyushchenko, V.M. Latyshev, *Physica B* **411**, 140 (2013).
23. V.I. Perekrestov, S.N. Kravchenko, *Instrum. Exp. Tech.* **45**, 404 (2002).