

УДК 620.186.82; 620.178.154.9

**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ КАК СПОСОБ
УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ
ПОКРЫТИЙ AlN**

**Хабарова А. В.¹, Лапицкая В. А.^{1,2}, Чижик С. А.^{1,2}, Трухан Р. Э.¹, Николаев А. Л.³,
Садырин Е. В.³, Айзикович С. М.³**

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Донской государственной технической университет
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Методом наноиндентирования определены физико-механические свойства – модуль упругости E (ГПа) и микротвердость H (ГПа) – двухслойных покрытий AlN. Покрытия толщиной 400 и 800 нм осаждены на кремниевые подложки магнетронным методом $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ и $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Уменьшение толщины каждого из слоев двухслойных покрытий от 400 до 200 нм приводит к снижению значений шероховатости и повышению физико-механических свойств в 2,3–2,8 раз.

Ключевые слова: двухслойное покрытие AlN, магнетронное распыление, шероховатость, модуль упругости, микротвердость.

**CHANGING THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DEPOSITION AS A WAY TO CONTROL
THE STRUCTURE AND SURFACE PROPERTIES OF TWO-LAYER AlN COATINGS**

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Trukhan R.¹, Nikolaev A.³, Sadyrin E.³, Aizikovitch S.³

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

³Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The nanoindentation method was used to determine the physical and mechanical properties – elastic modulus E (GPa) and microhardness H (GPa) – of two-layer AlN coatings. Coatings with a thickness of 400 and 800 nm were deposited on silicon substrates using the magnetron method $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ and $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Reducing the thickness of each layer of the two-layer coatings from 400 to 200 nm leads to a decrease in roughness values and an increase in the physical and mechanical properties by 2.3–2.8 times.

Key words: two-layer AlN coating, magnetron sputtering, roughness, elastic modulus, microhardness.

Адрес для переписки: Хабарова А. В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Создание многослойных покрытий позволяет изменить характеристики покрытий и расширить их область применения. Варьирование параметрами осаждения в процессе нанесения покрытий, позволяет влиять на структуру и напряжения внутри покрытия, что в дальнейшем изменяет как микроструктуру поверхности, так и физико-механические и трибологические свойства. Так, создание градиентных покрытий на основе AlN позволяет повлиять на внутренние напряжения в покрытии, и, в результате, на функциональные свойства устройств [1].

Покрытия на основе AlN обладают комплексом электрических свойств, позволяющим эффективно применять их в различных электронных устройствах и микроэлектронике. В этом случае важную роль играют не только электрические свойства и структура, но и свойства поверхности: шероховатость, физико-механические и трибологические свойства [2].

Формирование таких покрытий можно проводить путем изменения технологических параметров осаждения покрытий (мощность смещения на подложке [3], температура [4]).

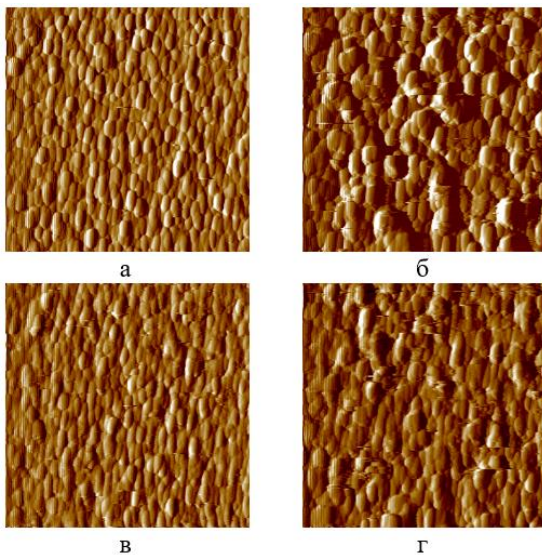
Целью работы является исследование особенностей морфологии и физико-механических свойств методом наноиндентирования двухслойных покрытий AlN, нанесенных магнетронным методом.

Материалы и методы исследований. Покрытия наносили на кремниевые подложки ориентации (100) вакуумно-магнетронным методом с помощью системы VSM 100 (ROBvac, Российская Федерация) при постоянном давлении в камере 0,78 Па. Подбор состава каждого из слоев выполнялся по результатам определения физико-механических и трибологических свойств на каждом отдельном из слоев – выбраны с наилучшими свойствами [5]. Получены две группы образцов – $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ и $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Толщина каждого слоя 200 и 400 нм.

Исследование микроструктуры, определение шероховатости и физико-механических свойств двухслойных покрытий AlN проведено на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США). Использовали алмазный индентор конической формы с радиусом закругления острия 226 нм. Для определения физико-механических свойств (модуль упругости E и микротвердость H) покрытий проводили индентирование в 9 точках с фиксированной глубиной внедрения, которая не превышает 10 % от общей толщины покрытия.

Результаты исследований и обсуждения.

На рисунке 1 приведена морфология поверхности двухслойных покрытий AlN (размер поля 10×10 мкм). Определена шероховатость покрытий – у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ (рисунок 1 а, б) значения возрастают при увеличении толщины слоев от 200 до 400 нм – R_a от 12,2 до 50,5 нм, а R_q от 15,3 до 64,0 нм соответственно. При верхнем слое $Al_{70,3}N_{29,7}$ (рисунок 1 в, г) шероховатость ниже, чем у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$. При толщине 200 нм шероховатость R_a и R_q составляет 11,1 и 13,9 нм, тогда как при толщине 400 нм – 25,49 и 32,84 нм, соответственно.



а, б – с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$;
в, г – с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$

Рисунок 1 – Морфология поверхности (10×10 мкм) двухслойных покрытий AlN

Физико-механические свойства двухслойных покрытий AlN приведены в таблице 1. При увеличении толщины слоев от 200 до 400 нм модуль

упругости и микротвердость снижаются вне зависимости от типа верхнего слоя. При этом у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ H и E выше, чем у покрытия с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$. Самые высокие значения физико-механических свойств определены у покрытий, имеющих толщину каждого слоя 200 нм – $E = 45,18 \pm 19,83$ ГПа при $H = 0,73 \pm 0,37$ ГПа для покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ и $E = 33,04 \pm 8,58$ ГПа при $H = 0,44 \pm 0,13$ ГПа для покрытия с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$.

Таблица 1 – Физико-механические свойства двухслойных покрытий AlN

Верхний слой покрытия	Толщина каждого слоя, нм	Модуль упругости E , ГПа	Микротвердость H , ГПа
$Al_{82,8}N_{17,2}$ 2	200	$45,18 \pm 19,83$	$0,73 \pm 0,37$
	400	$15,81 \pm 7,67$	$0,37 \pm 0,15$
$Al_{70,3}N_{29,7}$ 7	200	$33,04 \pm 8,58$	$0,44 \pm 0,13$
	400	$14,07 \pm 2,99$	$0,24 \pm 0,05$

Установлено, что лучшими физико-механическими свойствами и низкой шероховатостью обладает двухслойное покрытие AlN, нанесенное магнетронным методом, имеющее толщину каждого слоя 200 нм с верхним составом $Al_{82,8}N_{17,2}$ – $E = 45,18 \pm 19,83$ ГПа при $H = 0,73 \pm 0,37$ ГПа.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T23РНФ-132).

Литература

1. Structure and morphology evolution of ALN films grown by DC sputtering / M. A. Auger [et al.] // Surf. Coatings Technol. – 2004. – V. 180. – P. 140–144.
2. Electrical characterization and morphological properties of AlN films prepared by dc reactive magnetron sputtering / M. A. Moreira [et al.] // Microelectron. Eng. – 2011. – V. 88, № 5. – P. 802–806.
3. Method for controlling stress gradients in PVD aluminum nitride / K. E. Knisely [et al.] // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2018. – V. 28, iss. 11. – P. 115009.
4. Epitaxial growth of AlN films on sapphire via a multilayer structure adopting a low-and high-temperature alternation technique / X. Zhang [et al.] // CrystEngComm. – 2015. – V. 17, iss. 39. – P. 7496–7499.
5. Deposition and Characterization of Magnetron Sputtered AlN Coatings with Variable Stoichiometry / A. L. Nikolaev [et al.] // Advances in Linear and Nonlinear Continuum and Structural Mechanics. Advanced Structured Materials. Springer, Cham. – 2023. – V. 198. – P. 357–367.