

УДК 621.793.2:539.234

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК ИЗ $TiB_2+20\% TiC$ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННОЙ МИШЕНИ

Телеш Е.В., Лам Н.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Интенсивно развивающимся разделом науки и техники является инженерия поверхности для формирования наноструктурных тонкопленочных покрытий. Такие пленки успешно применяются в качестве защитных, износостойких, жаропрочных, биосовместимых покрытий, в качестве материалов для тонкопленочных резисторов и т. п. Композиты, которые объединяют бориды и карбиды, обеспечивают привлекательное сочетание превосходных механических и электрических свойств и коррозионной стойкости, особенно при относительно высоких температурах и в агрессивных средах [1].  $TiB_2$  и  $TiC$  являются ковалентными соединениями и обладают высокими твердостью и коррозионной стойкостью.  $TiB_2$  и  $TiC$  являются важными материалами для высокотемпературных применений из-за их высоких точек плавления, твердости, модуля упругости и электрической проводимости и относительно низкого коэффициента теплового расширения [2].

Формирование покрытий осуществляли на модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащенной ионным источником на базе ускорителя с анодным слоем и диффузионным насосом, что обеспечило получение остаточного вакуума  $(2-3) \cdot 10^{-3}$  Па. Мишень состава  $TiB_2+20\% TiC$  имела диаметр 80 мм и толщину 6 мм. Покрытия наносились на подложки из окисленного кремния, кремния. В качестве рабочего газа использовался аргон. Остаточный вакуум составлял  $3,2 \cdot 10^{-3}$  Па, рабочее давление аргона  $(5,3-8,2) \cdot 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение  $-3,0$  кВ, температура подложки  $-320-573$  К. Толщина покрытий измерялась с применением микроскопа МИИ-4, удельное поверхностное сопротивление – с использованием ИУС-3М. Микротвердость по шкале Кнуупа определяли на микротвердомере Leica VMHT MOT.

На рисунке 1 приведена зависимость скорости нанесения  $V_n$  от величины тока на мишени  $I_M$ . Наблюдалось монотонное увеличение  $V_n$  с 0,29 до 0,67 нм/с при росте  $I_M$  с 25 до 92 мА. Следует отметить, что пленки наносились на неподвижную подложку. Расстояние мишень–подложка составляло  $\sim 80$  мм.

На рисунке 2 представлена зависимость удельного объемного сопротивления  $\rho_v$  пленок от тока мишени (скорости нанесения).

При  $V_n = 0,29$  нм/с  $\rho_v$  составляло  $\sim 3 \cdot 10^6$  мкОм·см, а пленки имели радужную окраску. Это можно объяснить взаимодействием

распыленных атомов мишени с газами остаточной атмосферы ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  и др.) при низкой скорости нанесения. Повышение  $V_n$  способствовало резкому снижению удельного объемного сопротивления и получению покрытий с металлическим блеском.

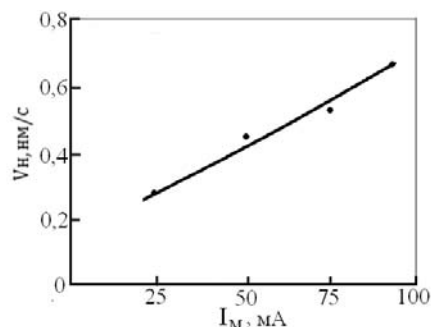


Рисунок 1 – Влияние тока мишени на скорость нанесения покрытий из  $TiB_2+20\% TiC$

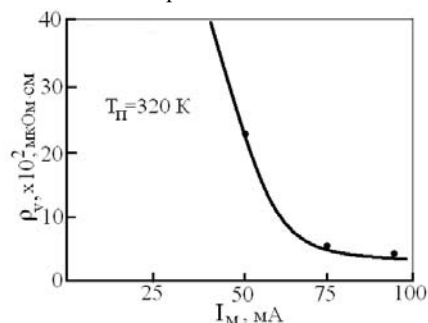


Рисунок 2 – Влияние тока мишени на удельное объемное сопротивление пленок из  $TiB_2+20\% TiC$

Увеличение температуры подложки  $T_n$  до 473 К способствовало снижению  $\rho_v$ , что можно объяснить некоторым ростом размеров кристаллитов, уплотнением структуры покрытия, десорбцией аргона и активных газов из пленки. Однако дальнейшее повышение  $T_n$  привело к резкому возрастанию  $\rho_v$ . Это может быть связано с более высокой степенью окисления конденсирующихся атомов (рисунок 3).

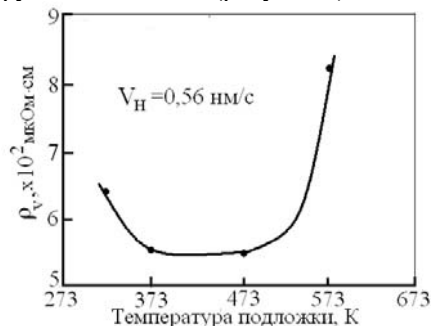


Рисунок 3 – Влияние температуры подложки на удельное объемное сопротивление пленок из  $TiB_2+20\% TiC$

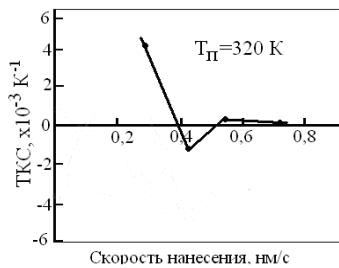


Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки

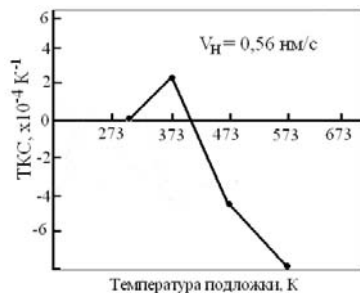


Рисунок 5 – Зависимость ТКС пленок TiB<sub>2</sub>+20% TiC от температуры подложки

Измерение температурного коэффициента сопротивления (TKC) пленок показало, что повышение  $V_n$  способствует снижению ТКС до  $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  (рисунок 4). Покрyтия наносились при  $T_n = 313 \text{ K}$ .

В тоже время повышение  $T_n > 373 \text{ K}$  приводит к переходу к отрицательным значениям ТКС (рисунок 5). Это можно связать с окислением поверхности кристаллитов и образованием пленок из оксидов титана и бора, наличие которой способствует

механизму токопереноса путем туннелирования электронов через диэлектрический барьер.

На рисунке 6 представлена зависимость микротвердости пленок от температуры подложки.

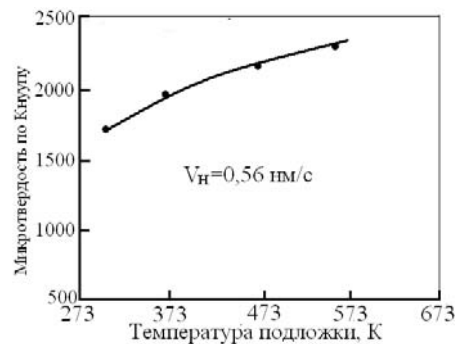


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости пленок TiB<sub>2</sub>+20% TiC от температуры подложки

Установлено, что высокая  $T_n$  способствует получению покрытий с более плотной структурой, что повышает их твердость.

### Литература

1. Shu, S. Fabrication of  $\text{TiC}_x\text{-TiB}_2/\text{Al}$  composite for application as a heat sink / S. Shu, H. Yang, C. Tong, F. Qiu // *Materials*. – 2016. – № 9. – P. 642–672.
2. Sundgren, J.E. Growth, structural characterization and properties of hard and wear-protective layered materials // J.E. Sundgren, J. Brich, G. Hakansson, I. Haltman, U. Helmersson // *Thin Solid Films*. – 1990. – V. 193–194. – P. 818–831.

УДК 681.5

## КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ

Уласюк Н.Н., Сычик В.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Критерий качества управления является краеугольным камнем при построении управляющих функций и всей системы управления в целом.

При проектировании управляемых систем, необходимо, прежде всего, конкретизировать:

- критерий качества управления и способ его минимизации (максимизации);
- ограничения системы и способ их удовлетворения;
- средства, обеспечивающие адаптивность управления;
- способы идентификации ненаблюдаемых координат и коррекции ошибок наблюдаемых координат, чтобы исключить автоколебательные процессы;
- способ выбора оптимальных значений параметров алгоритма управления;
- средства, гарантирующие устойчивость управляемой системы.

Без корректного ответа на эти вопросы не может быть корректно сформулирована и решена задача управления системой.

Пусть желаемые свойства движения управляемой системы для выходных координат

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$  заданы в виде многообразия

$$\Omega: w_\mu(x, t) = C_\mu, \mu = 1, \dots, m \quad (1)$$

где  $w_\mu(\cdot)$  – заданные операторы;  $C_\mu$  – константы;  $C_\mu > 0$ ;  $t$  – время.

Форма представления желаемых свойств движения системы в виде (1) не является единственно возможной. Свойства движения могут быть заданы в дифференциальной форме, например уравнениями эталонного движения:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(\bar{x}, x, t), \\ t &\geq t_o: x(t_o) = x_o, \end{aligned} \quad (2)$$