

УДК 538.9+539.23

СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN ДЛЯ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Константинов С. В.², Зайков В. А.¹, Комаров Ф. Ф.²,
Лобанок М. В.¹, Михаленок А. А.¹, Романов И. А.¹

¹Белорусский государственный университет

²НИИ «Институт прикладной физики проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе проведено исследование электрофизических свойств покрытий $Ti_{1-x}Al_xCuN$, осажденных на кремнии и SiO_2 методом реактивного магнетронного распыления из композитных мишеней с различным соотношением Al/Ti. Структура и компонентный состав пленок исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Электрофизические характеристики тонкопленочных покрытий $Ti_{1-x}Al_xCuN$ на SiO_2 измеряли четырехзондовым методом с помощью измерителя удельных сопротивлений (ИУС-3), а температурные зависимости сопротивления структур $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ определяли двухзондовым методом с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-6. Обнаружено, что структуры $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ в диапазоне $0,33 < x = Al/(Al+Ti) < 0,62$ имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и таким образом являются перспективными для разработки высокотемпературных термисторов с отрицательным ТКС.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, сканирующая электронная микроскопия, температурный коэффициент сопротивления, термистор.

PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATINGS OF TiAlCuN FOR THERMORESISTIVE SENSORS

Konstantinov S.², Zaikov V.¹, Komarov F.², Lobanok M.¹, Mikhalenok A.¹, Romanov I.¹

¹A. N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper studies the electrophysical properties of $Ti_{1-x}Al_xCuN$ coatings deposited on SiO_2 by reactive magnetron sputtering from composite targets with different Al/Ti ratios. The structure and component composition of the films were studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDXS). The electrophysical characteristics of $Ti_{1-x}Al_xCuN$ thin films coatings on SiO_2 were measured by the four-probe method using a resistivity meter (IUS-3), and the temperature dependences of the resistance of $Ti_{1-x}Al_xCuN / SiO_2$ structures were determined by the two-probe method using an IPPP 6 semiconductor device parameter meter. It was found that $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ structures in the range of $0.33 < x = Al/(Al+Ti) < 0.65$ have a negative temperature coefficient of resistance (TCR) and are thus promising for the development of high-temperature thermistors with negative TCR.

Key words: reactive magnetron sputtering, scanning electron microscopy, temperature coefficient of resistance, thermistor.

Адрес для переписки: Зайков В.А., ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Республика Беларусь

e-mail: valery48@tut.by

Введение. Керамические покрытия нитридов переходных металлов, в частности, $TiAlN$, $TiAlSiN$ и $TiAlCuN$, полученные методом реактивного магнетронного распыления, широко используются в авиационной и космической технике [1]. В работе [2] показано, что нитрид титана-алюминия ($TiAlN$), обладая превосходными механическими свойствами, является перспективным материалом для создания высокоэффективных термисторов с отрицательным ТКС. Этому способствует высокая адгезионная прочность и устойчивость $TiAlN$ к окислению. Добавление меди в состав покрытия $TiAlN$ уменьшает размер кристаллитов и препятствует миграции границ зерен [1].

В настоящей работе исследуются электрофизические свойства наноструктурных нитридных покрытий $TiAlCuN$ и рассматриваются возможно-

сти использования структур на их основе для создания термисторов, работающих при повышенных температурах.

Материалы и методы исследований. Формирование покрытий $TiAlCuN$ осуществлялось реактивным магнетронным распылением из двух мишеней с соотношением атомных долей $Ti / Al = 1:1$ в первой и $Ti / Al = 3:1$ во второй мишени. Осаждение проводилось по методике работы [3] как в режиме стехиометрии ($\alpha = 0,60$), так и режиме с дефицитом реактивного газа ($\alpha = 0,47$) на образцы размером 20 мм x 15 мм вырезанные из пластин кремния марки КЭФ-4 (100) и на образцы кремния со слоем SiO_2 , выращенным термическим окислением.

Результаты исследований. Состав покрытий в зависимости от параметра α приведен в

таблице 1. Первая цифра в обозначении образцов соответствует номеру распыляемой мишени, а последняя цифра определяет параметр α и стехиометрическое соотношение $(Ti + Al)/(N)$.

Таблица 1 – Стехиометрический состав покрытий

N°	α	Ti/Al	Al/(Ti + Al)	$(Ti + Al)/(N)$
1N1	0,60	0,91	0,62	0,99
1N2	0,47	0,65	0,61	1,24
2N1	0,60	2,06	0,33	0,99
2N2	0,47	3,33	0,23	1,79

Для всех образцов покрытий характерна столбчатая структура, с небольшим увеличением диаметра столбцов по мере роста покрытий. Средний размер зерна не превышает 30 нм для покрытий $(Ti + Al)/(N) \approx 1,0$ и ($\alpha = 0,60$) а для покрытий $(Ti + Al)/(N) > 1,2$ и ($\alpha = 0,47$) средний размер зерна меньше 20 нм.

В таблице 2 представлены результаты электрофизических измерений четырехзондовым методом, и с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-6. Измерения проводили на структурах $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$, толщина слоя SiO_2 равнялась 0,44 мкм. Обозначения в таблице: R_{\square} – слоевое сопротивление; h – толщина; ρ – удельное сопротивление.

Таблица 2 – Электрофизические параметры покрытий

N° п/п	R_{\square} , Ом/□	h , мкм	ρ , мкОм·см	ТКС
1N1	33,57	1,90	6378	отрицат.
1N2	5,37	1,29	692	отрицат.
2N1	2,98	1,31	388	положит.
2N2	1,20	1,30	156	положит.

Наибольшие значения слоевого и удельного сопротивлений наблюдались у образцов 1N1, которые также имели максимальный отрицательный ТКС. На рисунке 1 представлены зависимости сопротивления и температуры от времени.

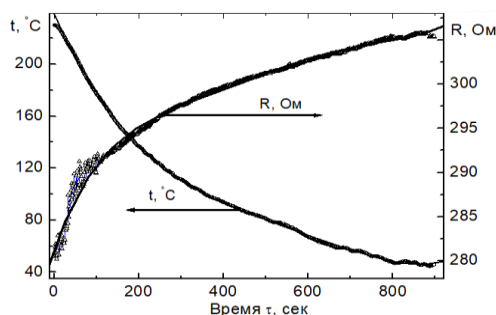
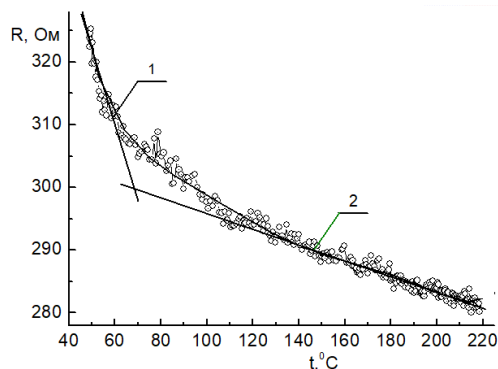


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления и температуры образца 4N1 от времени

Измерения проводили по двухканальной схеме. К входу ИИД1 прибора ИППП-6 подклю-

чали контакты для подачи постоянного напряжения ($3,000 \pm 0,002$) В и проводили измерение тока в реальном масштабе времени Ко входу ИИД2 подключалась термопара.

На рисунке 2 приведена зависимость сопротивления образца от температуры.

Рисунок 2 – Зависимость сопротивления образца 4N1 покрытия $TiAlCuN$ от температуры

На участке 1 среднее значение ТКС равно $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на участке 2 значение ТКС равно $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Полученные значения сопоставимы с результатами, приведенными в работе [2].

Заключение. Максимальное значение ТКС в структурах $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$, наблюдалось для стехиометрического состава $(Ti + Al)/(N) \approx 1,0$ и содержании алюминия $x = Al/(Al + Ti) = 0,62$.

В работе [2] максимальное значение ТКС соответствовало интервалу $0,46 < x < 0,69$, при этом кристаллическая структура соответствовала гранцентрированной кубической решетке. Предполагаемый механизм проводимости [2] основан на прыжках электронов, а сопротивление границ зерен более значимо при низких температурах. В работе показано, что материал $TiAlCuN$ перспективен для разработки термистора с отрицательным ТКС.

Литература

1. Константинов, С. В. Влияние режимов нанесения наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий на их структуру, оптические и электрофизические свойства / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2024. – № 2. – С. 69–83.
2. Expanding the applications of the wear-resistant titanium aluminum nitride thin-film to include temperature sensing / Bruno Martins [et al.] // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2024. – Т. 9. – №. 2. – С. 100716.
3. Климович, И. М. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / И. М. Климович В. Н. Кулешов, В. А. Зайков // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147.