

получим:

$$\Delta S = k \left[N \ln \frac{v_0^{pl}}{v_0^{hom}} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{1}{v v_0^{pl}} - \frac{1}{v v_0^{hom}} \right) - \frac{N^3}{3} \left(\frac{1}{(v v_0^{pl})^2} - \frac{1}{(v v_0^{hom})^2} \right) \right]$$

При значениях диаметра кластеров, использованных в работе, часть разности свободной энергии сцепления, обусловленной разностью ориентационных энтропий при планарной и гомеотропной ориентации, оказывается равной $(0,3-3) \times 10^{-5}$ Дж/м², что находится в хорошем согласии с малыми значениями свободной энергии сцепления, которые приведены в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Porous and Pillar Structures Formed by Anodization for Vertical Alignment of Nematic Liquid Crystal / S. Lazarouk [et al.]; Jpn. J. Appl. Phys., 46, No.10A, 2007, p. 6889-6892.
2. Orientation of mesogen and hydrocarbon molecules on graphite and polyethylene crystal surfaces / A.K. Dadivanyan [et al.]; Molecular Crystals & Liquid Crystals, V. 545, Issue 1, 2011, p. 1383-1391.
3. Anchoring energy of liquid crystals / A.K. Dadivanyan [et al.]; Molecular Crystals & Liquid Crystals, V. 560, Issue 1, 2012, p. 108-114.
4. Influence of the order parameter on the anchoring energy of liquid crystals / A. K. Dadivanyan [et al.]; Journal of Experimental and Theoretical Physics, V.115, No. 6, 2012, p. 1100-1104.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Ti-AL-N

И. М. Климович, В. А. Зайков, Н. В. Семенова

Белорусский государственный университет, imklimovich@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Покрытия на основе нитридов переходных металлов часто используются в качестве защитных [1], однако, это не единственное их применение. В зависимости от структурных и электрофизических свойств такие покрытия могут быть использованы в современной электронике в качестве диффузионных барьеров [2], частей солнечных элементов и т.д. Свойства пленок, в свою очередь, зависят от технологических особенностей их формирования.

Задачей данного исследования является выявление зависимости удельного сопротивления и распределения размеров структурных элементов Ti-Al-N покрытий от температуры и потенциала смещения на подложке во время осаждения методом реактивного магнетронного распыления.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нанесение покрытий Ti-Al-N методом реактивного магнетронного распыления проводилось на модернизированной установке УВН 2М, оснащенной магнетронным распылителем, ионным источником типа «Радикал», системой нагрева подложек, системой подачи смещения на подложку и системой контроля расхода газов [3], ко-

торая позволяет автоматически регулировать подачу инертного и реактивного газов, используя сигналы обратной связи с оптического датчика и вакуумметра, и тем самым стационарно поддерживать неравновесное состояние магнетронного разряда. Напуск азота контролировался по интенсивности спектральной линии титана Ti I 506,5 нм, величина которой поддерживалась постоянной [4].

Откачка вакуумной камеры, оснащенной азотной ловушкой, производилась с помощью диффузионного паромасляного и форвакуумного наносов. Вакуумная система позволяла получать предельное остаточное давление $9,0 \cdot 10^{-4}$ Па.

Непосредственно перед напылением производилась ионная очистка подложек с помощью ионного источника «Радикал». Режим работы ионного источника задавался следующими параметрами: давление аргона $P = 6,0 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 20$ мА; напряжение разряда $U = 2,4$ кВ; время очистки $t = 5$ мин. Выбор параметров разряда и времени очистки обусловлен стабильным горением разряда, а также полным удалением адсорбированного слоя и частичным распылением подложки, что значительно увеличивает адгезию покрытий.

Процесс распыления проводили с использованием мозаичной мишени на основе Ti (110 мм) с цилиндрическими Al вставками (10 мм), расположенными по среднему диаметру зоны эрозии (67 мм). Расстояние мишень-подложка выбиралось равным 80 мм. Мощность разряда поддерживалась постоянной и задавалась в диапазоне 400–600 Вт.

Нанесение покрытий проводили в следующих режимах: давление $P = 7,0 \cdot 10^{-2}$ Па; напряжение на источнике питания $U = 300$ –320 В; ток разряда $I = 1,3$ –1,75 А; смещение на подложке U_{cm} выбиралось равным -110 В, -150 В и -200 В; температура подложки T задавалась равной 220 °С, 340 °С и 440 °С. Время напыления составляло 10 мин.

Измерение толщины и исследование морфологии покрытий Ti Al N методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) проводилось с помощью электронного микроскопа Hitachi S 4800. Энергодисперсионные рентгеновские спектры регистрировались датчиком рентгеновского излучения компании Princeton Gamma-Tech, Inc. Удельное сопротивление измерялось четырехзондовым методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. представлены РЭМ-изображения полученных Ti–Al–N пленок на сколах.

Все исследуемые покрытия имеют плотную структуру без видимых дефектов и отслоений, а также гладкую поверхность. Структура пленок преимущественно столбчатая, однако в случае формирования покрытия Ti–Al–N при $U_{cm} = -200$ В и $T = 440$ °С наблюдается переход от столбчатой к глобулярной структуре.

В табл. приведены количественные соотношения элементов в покрытиях Ti–Al–N, полученных в режимах нанесения с различными напряжениями смещения и температурами на подложке, а также результаты измерений толщин h , удельного сопротивления $\rho_{y\delta}$ и среднего размера элементов структуры (диаметр столбцов) d .

Как видно из табл., методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии не обнаружено присутствие кислорода в исследуемых покрытиях.

Удельное сопротивление является параметром, который характеризует степень совершенства кристаллической структуры, и зависит от совокупности всех факторов, влияющих на формирование покрытий Ti–Al–N. Поэтому зависимости $\rho_{y\delta}$ от температуры при различных значениях U_{cm} могут не коррелировать между собой. Схожая ситуация может наблюдаться и для зависимости $\rho_{y\delta}$ от U_{cm} при различных T .

Результаты измерений толщин, среднего размера элементов структуры, удельного сопротивления и количественного соотношения элементов в покрытиях Ti-Al-N, сформированных в режимах осаждения с различными $U_{см}$ и T

Задаваемые режимы		h , нм	Элементное содержание, ат.%			d , нм	$\rho_{уд}$, мкОм·см
$U_{см}$, В	T , °C		Ti	Al	N		
-110	220	488	41,02	23,05	35,93	38	1171
	340	511	40,68	23,22	36,10	35	758
	440	467	40,36	23,36	36,28	33	658
-150	220	498	40,36	23,36	36,28	62	578
	340	389	37,08	21,78	41,14	51	616
	440	419	35,12	24,08	40,80	57	710
-200	220	477	38,82	23,96	37,22	53	624
	340	442	37,07	22,39	40,55	42	771
	440	509	34,00	23,90	42,10	55	1060

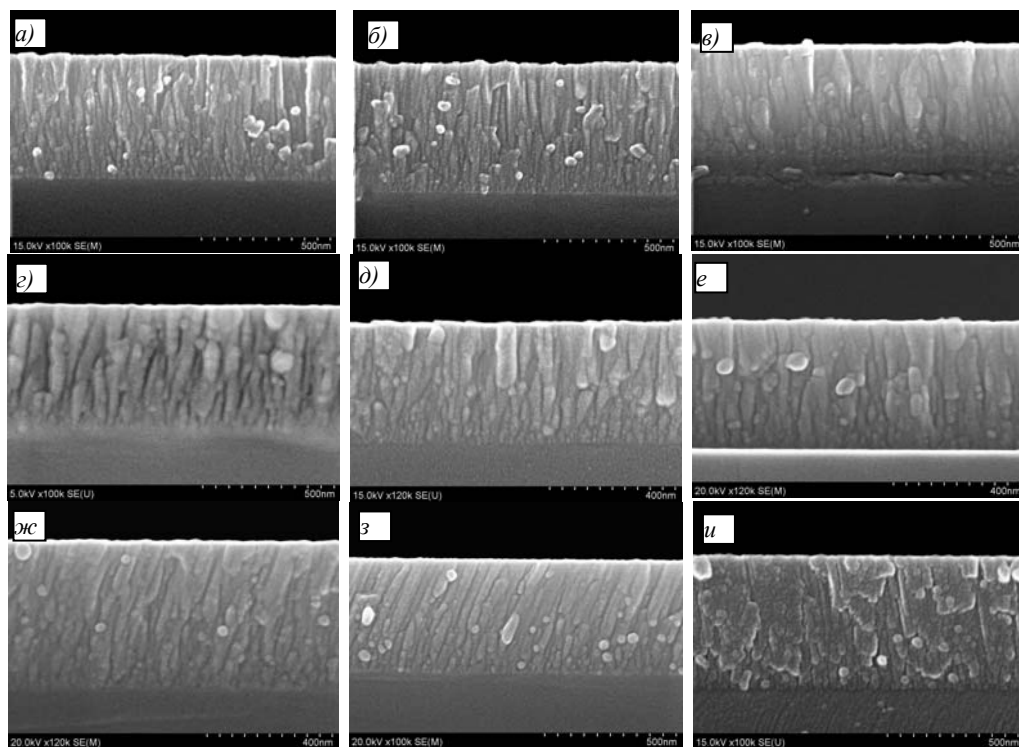


Рисунок 1. – РЭМ-изображения сколов покрытий Ti-Al-N, сформированных при разных потенциалах смещения и температурах подложки:

$U_{см} = -110$ В: а – $T = 220$ °C; б – $T = 340$ °C; в – $T = 440$ °C;
 $U_{см} = -150$ В: г – $T = 220$ °C; д – $T = 340$ °C; е – $T = 440$ °C;
 $U_{см} = -200$ В: ж – $T = 220$ °C; з – $T = 340$ °C; и – $T = 440$ °C

ВЫВОДЫ

Результаты исследования показали, что метод контролируемого реактивного магнетронного распыления позволяет получать качественные бескислородные покрытия с плотной структурой и гладкой поверхностью. Толщины исследуемых покрытий Ti-Al-N варьировались от 390–510 нм. Средний размер элементов структуры составляет 33–62 нм. Значения ρ_{30} находились в пределах от 575 до 1171 мкОм·см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aliva R.F. Comparative analysis of wear on PVD TiN and (Ti_{1-x}Al_x)N coatings in machining process / R.F. Aliva [et. al.] // *Wear*. 2013. No 302. P. 1192-1200.
2. Jalali R. Effect of Al Content, Substrate Temperature and Nitrogen Flow on the Reactive Magnetron Co-sputtered Nanostructure in TiAlN Thin Films Intended for Use as Barrier Material in DRAMs / R. Jalali // *Journal of the Korean Physical Society*. 2015. Vol. 66. No 6. P. 978–983.
3. Климович, И.М. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / И.М. Климович [и др.] // *Приборы и методы измерений*. 2015. Т. 6. № 2. С. 139–147.
4. Burmakov, A.P. Spectroscopic system for controlling gas flow and impurity content during magnetron deposition of films / A.P. Burmakov, and V.N. Kuleshov // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2007. Vol. 74. No 3. P. 459–463.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ЗОЛЯ SnO₂ В ЭЛЕКТРОЛИТ МЕДНЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОНКИХ МЕДНЫХ ПЛЕНОК

А. О. Конаков¹, Т. Н. Воробьева^{1,2}

¹Белорусский государственный университет,

²НИИ Физико-химических проблем БГУ

При изготовлении интегральных микросхем (ИМС) одной из ключевых стадий является металлизация. При металлизации ИМС с размером элементов более 0,25 мкм в качестве основного межсоединительного материала используют алюминий и его сплавы. В условиях миниатюризации ИМС алюминий становится малопригодным из-за деградационных процессов, обусловленных электромиграцией и как следствие разрушением связи между элементами. По этой причине более перспективным материалом межсоединений в ИМС становится медь благодаря ряду преимуществ перед алюминием, таких как более низкое сопротивление, стойкость к электромиграции, увеличение скорости переключения элементов ИМС [1].

Традиционно металл осаждают на подложку методами CVD, PVD, однако эти методы дорогостоящие. Альтернативой становится метод электрохимического осаждения тонких металлических пленок. В последнее время интерес к нему возрастает из-за дешевизны, простоты в технологическом использовании, возможности регулирования микроструктуры пленок, получения композиций с варьируемым составом [2].

Для нанесения медных покрытий электрохимическим способом часто используют пирофосфатный электролит. Он не токсичен (в отличие от цианидных), имеет высокую рассеивающую способность, выход металла по току в случае электроосаждения при комнатной температуре равен 99,9% [4].