

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МИШЕНЬ – ПОДЛОЖКА НА РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК ТАНТАЛА, НАНОСИМЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Чан Д. Н. Х., Доан Х.Т.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Голосов Д. А. – канд. техн. наук, доцент, в.н.с. Центра 2.1

Аннотация. Проведены исследования равномерности толщины тонких пленок тантала, наносимых методом магнетронного распыления при различном расстоянии мишень – подложка. На основе полученных результатов установлено, что при расстоянии мишень – подложка 146 мм возможно нанесение тонких пленок Та с неравномерностью толщины менее 4 % на подложке диаметром 200 мм. При увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока, что позволяет эффективно наносить интерференционные покрытия цилиндрической магнетронной распылительной системой.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, цилиндрический магнетрон, оксид тантала, тонкие пленки, равномерность толщины

Введение. В последние годы широкое распространение для изменения оптических характеристик деталей оптики и оптоэлектроники получили многослойные интерференционные системы, состоящие из чередующихся слоев с высоким и низким показателями преломления и имеющие оптическую толщину кратную четверти заданной длины волны. Интерференционные явления, возникающие при прохождении излучения через последовательный ряд соответствующим образом подобранных пленок, приводят к изменению его коэффициентов отражения и пропускания для различных длин волн излучения. Такие интерференционные системы находят практическое применение в качестве просветляющих, фильтрующих, светоделительных, зеркальных и поляризирующих покрытий [1].

Для изготовления интерференционных покрытий наибольшее применение получили методы нанесения пленок в вакууме [2]. В настоящее время наряду с традиционными методами испарения в вакууме используются современные методы ионно-плазменного распыления и, в частности, реактивное магнетронное распыление. Данный метод обладает широкими возможностями получения композиционных материалов с требуемым стехиометрическим составом, что позволяет получать не только низкопреломляющие и высокопреломляющие слои, но и слои с показателем преломления в промежуточном диапазоне. Одной из главных проблем методов ионно-плазменного нанесения интерференционных покрытий является сложность получения однородных по толщине пленок на крупноформатных подложках диаметром до 300 мм. При этом при изготовлении многослойных фильтров толщина каждого из слоев должна выдерживаться с точностью до единиц нанометров.

Для получения однородных по толщине покрытий в настоящее время стали использоваться аксиальные цилиндрические магнетроны, которые позволяют наносить тонкие пленки на крупноформатные подложки. Однако расстояние мишень – подложка оказывает значительное влияние на равномерность толщины наносимых пленок. И выбор этого расстояния является сложной задачей.

Таким образом, целью работы являлось исследование влияния расстояния мишень – подложка на равномерность толщины пленок тантала, наносимых методом магнетронного распыления цилиндрическим магнетроном.

Основная часть. Экспериментальная установка для нанесения интерференционных покрытий методом магнетронного распыления выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП [3]. Для нанесения покрытий в установке применена внутрикамерная система магне-

тронного нанесения многослойных интерференционных покрытий на основе цилиндрических коаксиальных магнетронов производства ОАО "ИЗОВАК" (г. Минск, РБ) (рисунок 1). В состав системы входит два магнетрона с Ta мишенью $\varnothing 498 \times 30 \times 8$ мм, два магнетрона с Si мишенью $\varnothing 498 \times 30 \times 8$ мм, ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя, подложкодержатель, система газораспределения, система перемещения магнетронов, система охлаждения магнетронов и деталей оснастки.



Рисунок 1 – Общий вид внутрикамерной оснастки для нанесения интерференционных покрытий методом реактивного магнетронного распыления

Для исследования профилей распределения толщины и скорости нанесения пленок использовались подложки из стекла длиной 40 см, шириной 4 см. В ходе экспериментов подложки отмывались в ванне ультразвуковой очистки, затем промывались дистиллированной водой. Далее подложка протиралась изопропиловым спиртом и на её поверхность с шагом 5 мм наносилась сетка для взрывной фотолитографии. Далее подложка устанавливалась на подложкодержатель. Расстояние магнетрон 2 – подложка (h_2) изменялось от 86 до 226 мм.

В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась ионная очистка поверхности подложки. Для этого в газораспределительную систему ионного источника подавался Ar. Поток аргона в ионный источник составлял $Q_{Ar} = 25$ мл/мин, напряжение и ток разряда соответственно $U_d = 90$ В, $I_d = 4.5$ А, ток соленоида $I_c = 1.5$ А, ток компенсатора $I_k = 18$ А. Время очистки 270 секунд.

Затем производилось нанесение пленок Ta. Для этого в газораспределительную систему магнетронов подавался Ar. Поток аргона во всех экспериментах был постоянным и составлял $Q_{Ar} = 70$ мл/мин. При этом давление в камере составляло $p = 0.08$ Па. При исследовании влияния повышенного давления на профили распределения толщины поток аргона в камеру увеличивался до 150 мл/мин и использовался режим дросселирования при откачке камеры. При этом давление в камере составляло $p = 0.5$ Па.

Распыление Ta мишеней осуществлялось в режиме стабилизации мощности разряда ($P_t = 2.0$ кВт). Для распыления использовался униполярный импульсный ток ($F = 10$ кГц, $D = 80$ %). Время распыления во всех экспериментах было постоянным и составляло 12 минут. После нанесения пленки образцы извлекались из камеры и производилась взрывная фотолитография, при которой удалялись участки пленки с нанесенной сеткой. Затем образцы отенялись. Для этого на образцы методом ионно-лучевого распыления наносилась пленка Ni толщиной 50 – 70 нм.

Толщина нанесенных пленок определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Скорость нанесения пленки определялась исходя из толщины пленки и времени нанесения. Неравномерность скорости нанесения Δv рассчитывалась по формуле 1:

$$\Delta v = \frac{v_{max} - v_{min}}{\frac{v_{max} + v_{min}}{2}} 100\%, \quad (1)$$

где v_{max} и v_{min} – максимальная и минимальная скорость нанесения на исследуемом участке подложки.

На рисунке 2 представлена подложка с нанесенной пленкой Ta. На рисунке 3 представлен типичный профиль распределения толщины нанесенной пленки на подложке длиной 40 см. Толщина нанесенной пленки в зависимости от расстояния мишень – подложка изменялась от 160 – 370 нм.



Рисунок 2 – Стеклопанельная подложка с нанесенной пленкой Ta

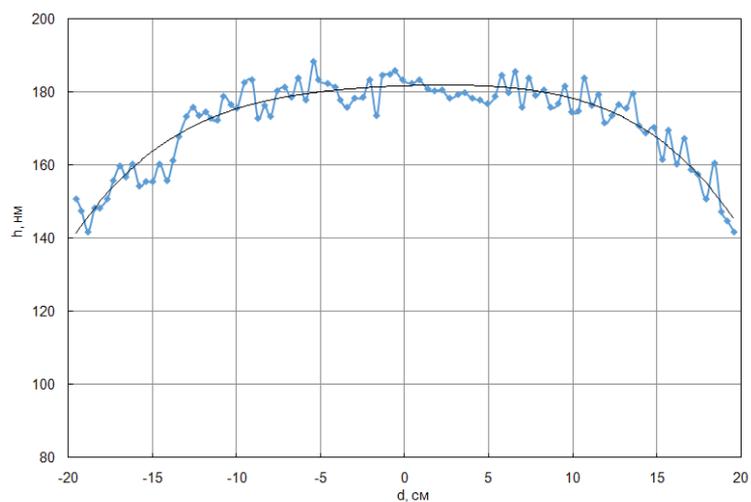


Рисунок 3 – Профиль распределения толщины пленки Ta ($h_{12} = 226$ мм, образец Ta-9)

Для анализа влияния расстояния мишень – подложка на равномерность скорости нанесения были получены профили распределения скорости нанесения при расстоянии мишень 2 – подложка от 86 до 226 мм (рисунок 4). Полученные профили аппроксимировались полиномиальной линией тренда.

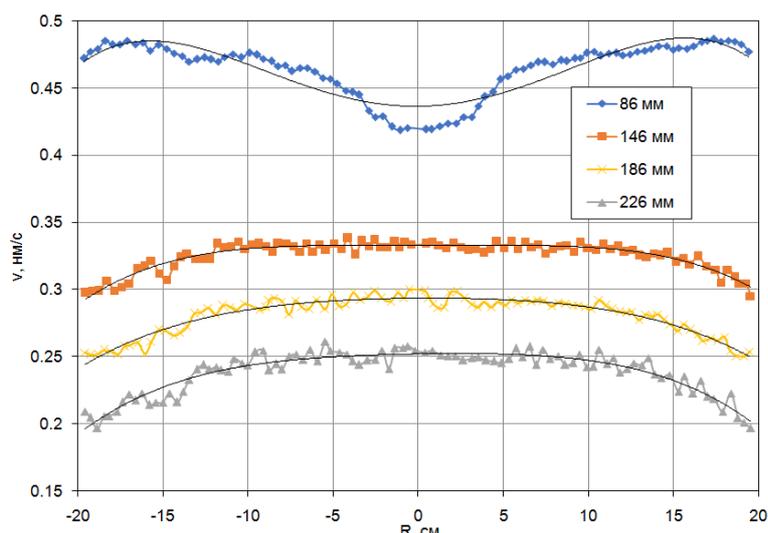


Рисунок 4 – Профили распределения скорости нанесения пленок Та при различном расстоянии магнетрон 2 – подложка

Как видно из рисунка при расстоянии $h_2 = 86$ мм средняя скорость нанесения составляла около 0.45 нм/с и на краях подложки превышала скорость нанесения в центре подложки. При увеличении расстояния мишень 2 – подложка наблюдалось снижение средней скорости нанесения и переход от минимума v в центре подложки к максимуму.

Также проведены исследования влияния давления в камере на профиль распределения скорости нанесения. На рисунке 5 а представлен профиль распределения скорости нанесения при распылении Та мишени в среде Ag при давлении в камере 0.5 Па. При этом поток Ag в камеру составлял $Q_{Ar} = 150$ мл/мин. Использовался режим дросселирования откачки камеры. Мишени распылялись в режиме стабилизации мощности разряда $P_t = 2.0$ кВт. При этом напряжение и ток разряда составляли соответственно $U_t = 300$ В, $I_t = 6.7$ А. При увеличении давления в камере скорость нанесения на оси подложки увеличивалась с 0.255 нм/с до 0.282 нм/с. Увеличение скорости нанесения связано с увеличением тока разряда при распылении на высоком давлении. Нормирование полученных профилей распределения скорости нанесения показало, что профили практически совпадают (рисунок 5 б). Это позволяет сделать вывод, что при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

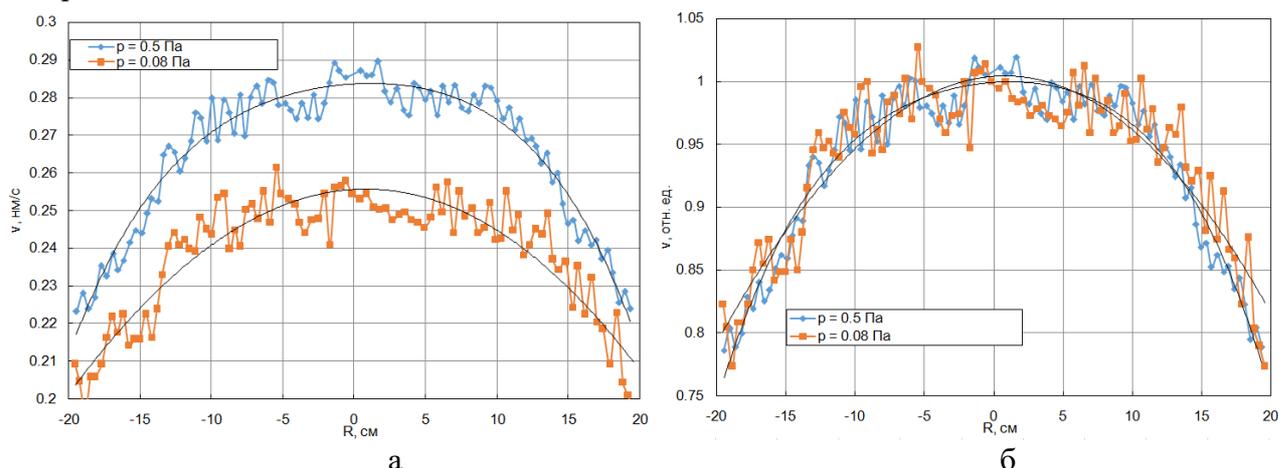


Рисунок 5 – Профили распределения скорости нанесения (а) и нормированные профили распределения скорости нанесения (б) пленок Та, нанесенных при различном давлении в камере

На основе полученных экспериментальных данных рассчитана неравномерность скорости нанесения на подложках диаметром 100, 200 и 300 мм (таблица 1). Как видно из таблицы, максимальная однородность по толщине пленок на подложках диаметром от 100 до 300 мм получена при $h_2 = 146$ мм.

Таблица 1 – Неравномерность скорости нанесения пленок Ta при различном расстоянии мишень 2 – подложка

Диаметр подложки, мм	Δv , % при различном h_2			
	86 мм	146 мм	186 мм	226 мм
100	8.65	3.66	4.50	6.82
200	12.88	3.66	6.21	8.59
300	13.89	9.58	11.91	19.05

Заклучение. Получены профили распределения скорости нанесения при распылении Ta мишени цилиндрической магнетронной распылительной системой. Установлено, что при уменьшении расстояния мишень – подложка происходит увеличение средней скорости нанесения пленок. При этом уменьшается относительная скорость нанесения на краях подложки и увеличивается относительная скорость нанесения на оси подложки. Максимальная равномерность скорости нанесения пленки получена при $h_{12} = 146$ мм. При этом при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

Список литературы

1. Интерференционные светофильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kpfu.ru/portal/docs/F1461633717/Interferencionnye.svetofiltry.pdf>. – Дата доступа : 25.02.2023.
2. Нанесение прозрачных проводящих покрытий на основе оксида цинка методом магнетронного распыления / С.В. Работкин // Томск, 2009, с. 13-25.
3. Вакуумная установка ВУ-2М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.szos.by/vakuumnaya-ustanovka-vu-2m> – Дата доступа : 25.02.2023.

UDC 621.3.049.77: 621.793

EFFECT OF THE TARGET – SUBSTRATE DISTANCE ON THE THICKNESS UNIFORMITY OF TANTALUM FILMS DEPOSITED BY A CYLINDRICAL MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM

Tran D.N.K., Doan H.T.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Golosov D.A. – PhD, associate professor, leading researcher of Center 2.1

Annotation. Studies of the thickness uniformity of thin tantalum films deposited by magnetron sputtering at different target-substrate distances have been carried out. On the basis of the results obtained, it was found that at a target-substrate distance of 146 mm, it is possible to deposit thin Ta films with a thickness uniformity of less than 4% on a substrate with a diameter of 200 mm. With an increase in the working pressure to 0.5 Pa, the effect of thermalization of the sputtered flow is not observed, which makes it possible to effectively apply interference coatings with a cylindrical magnetron sputtering system.

Keywords: reactive magnetron sputtering, cylindrical magnetron, tantalum oxide, thin films, thickness uniformity