

УДК 621.793.182

Оптимизация режимов ВЧ-магнетронного распыления для получения тонкопленочных покрытий титана

Артемьев Иван Владиславович

ivan.artemev.bmstu@mail.ru

Купцов Алексей Дмитриевич

alex-kouptsov@bmstu.ru

Сидорова Светлана Владимировна

sidorova@bmstu.ru

SPIN-код: 5780-4905

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе показана актуальность применения тонких пленок тугоплавких металлов, в частности, островковых пленок молибдена и титана, в различных устройствах для микроэлектроники, оптики, фотоники, биоинженерии и медицины. Описаны метод и оборудование для формирования тонкопленочных покрытий с помощью магнетронного распыления. Рассмотрены возможности и ограничения метода высокочастотного магнетронного распыления. Представлены результаты проведения полного факторного эксперимента в виде уравнения регрессии, учитывающего зависимость толщины тонкопленочного покрытия титана от режимов процесса ВЧ-магнетронного распыления. С помощью специализированного программного обеспечения обработаны и оценены результаты исследования зависимости толщины пленки титана от режимов процесса нанесения и параметров оборудования.

Ключевые слова: ВЧ-магнетронное распыление, молибден, титан, тонкие пленки, тугоплавкие металлы

Optimization of RF magnetron sputtering modes for obtaining thin-film titanium coatings

Artemev Ivan Vladislavovich

ivan.artemev.bmstu@mail.ru

Kouptsov Aleksey Dmitriyevich

alex-kouptsov@bmstu.ru

Sidorova Svetlana Vladimirovna

sidorova@bmstu.ru

SPIN-code: 5780-4905

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The report shows the relevance of using thin films of refractory metals, in particular, molybdenum and titanium island films, in various devices for microelectronics, optics, photonics, bioengineering and medicine. A method and equipment for forming thin-film coatings using magnetron sputtering are described. The possibilities and limitations of the high-frequency magnetron sputtering method are considered. The results of a complete factorial experiment are presented in the form of a regression equation that takes into account the dependence of the thickness of a thin-film titanium coating on the modes of the RF magnetron sputtering process. Using specialized software, the results of a study of the dependence of titanium film thickness on the application process modes and equipment parameters were processed and evaluated.

Keywords: RF magnetron sputtering, molybdenum, titanium, thin films, refractory metals

Введение. Тонкопленочные технологии занимают центральное место в создании современных функциональных материалов для микроэлектроники, оптики и фотоники. Островковые пленки тугоплавких металлов (Mo, Ti, Ta, W) представляют особый интерес благодаря уникальному сочетанию электрофизических, оптических и механических свойств [1, 2]. Однако их применение ограничено сложностью получения воспроизводимых структур с заданными параметрами. Традиционные методы вакуумного напыления сталкиваются с проблемами при работе с тугоплавкими материалами. Актуальность работы обусловлена потребностью в управляемом синтезе тонких пленок с предсказуемыми свойствами и высокой равномерностью по толщине.

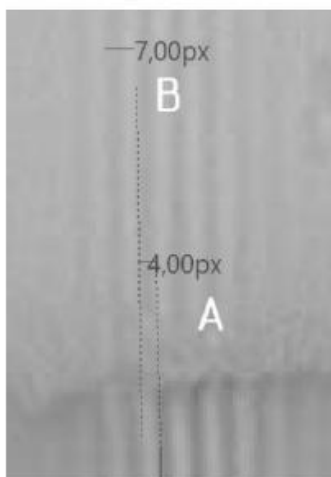
Целью данной работы является исследование процесса магнетронного напыления пленок титана и установление зависимости толщины покрытия от ключевых технологических параметров для последующего применения в качестве адгезионного подслоя.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной вакуумной установке MBTU-11-1MC, расположенной на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лабораторная установка MBTU-11-MC оснащена высокочастотным (ВЧ) магнетроном с мишенями Mo (99,99 %) и Ti (99,99 %), вакуумной камерой, подложкодержателем с вращением и системой подачи аргона (Ar). Для установления зависимостей толщины пленки от параметров процесса использовался полный факторный эксперимент, где варьируемыми факторами выступали: мощность на ВЧ-магнетроне (от 50 до 80 Вт), поток Ar (от 21 до 41 sccm, standard cubic centimeters per minute — стандартных кубических сантиметров в минуту) и давление в вакуумной камере (от 4,4 до 6,8 мБар). Стационарными параметрами являлись расстояние от мишени до подложки, температура в камере и все параметры ионной очистки.

Измерения толщины проводились на интерференционном микроскопе МИИ-4, расположенном на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для непрозрачного покрытия толщина (h) рассчитывалась по формуле: $h = (A/B) \cdot k$, где A — величина искривления системы полос, B — расстояние между отдельными полосами, k — коэффициент, зависящий от длины волны света (для желтого света $k=0,295$) (см. рисунок).

Для оптимизации режимов магнетронного распыления были выбраны тонкопленочные покрытия титана, сформированные на кремниевых и керамических подложках.

Результаты. Обработка данных ПФЭ позволила получить уравнение регрессии для толщины тонкопленочного покрытия титана, полученного методом магнетронного распыления, в кодированных переменных: $Y = 139 + 12 \cdot X_1 + 17 \cdot X_3 + 9 \cdot X_1 \cdot X_3 + 14 \cdot X_2 \cdot X_3$, где Y — прогнозируемая толщина пленки, нм; X_1 — мощность на магнетроне, б/р; X_2 — давление в камере, б/р; X_3 — поток рабочего газа (Ar), б/р. Все значения измерений толщины на МИИ-4 и режимы формирования образцов приведены в таблице.



Обработанное на МИИ-4 изображение пленки титана

Планирование эксперимента

№	Давление в камере, мбар	Мощность магнетрона, Вт	Поток рабочего газа, ссст	Толщина покрытия, нм			Ср. значение толщины, нм	S_i^2
				Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3		
1	4,4	50	41	106	152	120	126	371
2	6,8			138	123	170	144	384
3	4,4	80		160	150	148	153	28
4	6,8			195	216	193	201	108
5	4,4	50	21	123	123	148	131	139
6	6,8			98	148	69	105	1065
7	4,4	80		105	157	141	134	473
8	6,8			107	128	114	116	76

Сравнение дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости показало, что полученная регрессионная зависимость адекватно описывает процесс нанесения тонкопленочных покрытий Ti на кремний и керамику. Анализ модели показывает, что толщина пленки прямо пропорционально зависит от мощности на магнетроне и газового потока. Значимым также является эффект взаимодействия мощности и газового потока ($X_1 * X_3$), а также давления и газового потока ($X_2 X_3$). Давление в камере само по себе не является значимым фактором в выбранном диапазоне варьирования.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что газовый поток (X_3) является доминирующим фактором, влияющим на толщину пленки, что согласуется с физикой процесса магнетронного распыления, где количество частиц-носителей определяет интенсивность переноса распыленного материала. Наличие значимых эффектов взаимодействия ($X_1 * X_3$ и $X_2 * X_3$) указывает на сложный, нелинейный характер процесса, где изменение одного параметра модулирует влияние другого. Тот факт, что давление (X_2) не оказывает самостоятельного значимого влияния, вероятно, обуслов-

лено малым диапазоном его варьирования в эксперименте. Это согласуется с данными из литературных источников [3–5], где также изучались пленки титана, полученные магнетронным напылением.

Полученное уравнение регрессии позволяет прогнозировать толщину тонкой пленки титана с погрешностью 5 % в диапазоне от 87 до 190 нм, что является удовлетворительным результатом для задач управления технологическим процессом. Рекомендованными режимами для формирования тонкопленочных покрытий титана толщинами до 200 нм методом ВЧ-магнетронного распыления являются мощность на ВЧ-магнетроне от 50 до 80 Вт, поток рабочего газа Ar от 21 до 41 ссм и давление в вакуумной камере от 4,4 до 6,8 мбар.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило эффективность использования метода ВЧ-магнетронного распыления и математического аппарата ПФЭ для управления процессом осаждения тонких пленок титана. Поставленная цель достигнута — получено адекватное уравнение регрессии, связывающее толщину покрытия с технологическими параметрами. Результаты были ожидаемыми и качественно согласуются с известными физическими принципами и результатами исследований других авторов. Полученная модель может быть применена для синтеза тонкопленочных структур с заданной толщиной в производстве кварцевых акселерометров, где титановое покрытие выступает в качестве адгезионного подслоя для молибдена. В более широком смысле, разработанный подход расширяет возможности проектирования функциональных покрытий для микроэлектроники и фотоники, позволяя целенаправленно формировать их свойства.

В дальнейшей работе планируется отработка режимов для формирования тонкопленочных покрытий молибдена, как сплошных, так и островковых.

Список источников

- [1] Ерофеев Е.В., Федин И.В., Казимиров А.И. Исследование электрофизических параметров тонких пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления. *Журнал прикладной физики*, 2020, № 4, с. 45–52.
- [2] Чехлова Т.К., Живцов С.В., Погосян А.С. Оптические волноводы на основе пленок, изготовленных по технологии золь-гель. *Оптика и спектроскопия*, 2019, т. 127, № 6, с. 78–85.
- [3] Вилья Н., Голосов Д.А., Нгуен Т.Д. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2021, № 8, с. 33–40.
- [4] Насакина Е.О., Севостьянов М.А., Леонова Ю.О., Колмаков А.Г., Заболотный В.Т. Варьирование условий магнетронного напыления для создания одномерных биокomпозитов. *Современные материалы и технологии. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 112–120.
- [5] Nasakina E.O., Sevostyanov M.A., Baikin A.S. et al. *Using of Magnetron Sputtering for Biocompatible Composites Creating. Advances in Composite Materials Development*. IntechOpen, 2018, pp. 87–106. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79609>