

04.1;13.1;13.4

Распределение давления газовой среды в распылительной системе ионно-плазменного осаждения

© В.А. Вольпяс, Р.А. Платонов, В.В. Карзин, Т.К. Легкова, А.Д. Иванов, А.М. Сосунов, А.Б. Козырев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mlpeltech@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 27 сентября 2023 г.

Принято к публикации 15 ноября 2023 г.

Предложен метод определения величины давления газовой среды непосредственно в области дрейфа распыленных атомов мишени при ионно-плазменном осаждении тонких пленок. На примере распыления одноатомных мишеней титана и ниобия получены расчетные (моделирование методом Монте-Карло) и экспериментальные зависимости скорости их осаждения от давления рабочего газа. Сравнение этих результатов позволило определить распределение величины давления газовой среды в области дрейфа распыленных атомов мишень–подложка. Продемонстрировано радикальное различие между значениями показания датчика давления (0.6 Па) и реальным скорректированным давлением (от 5 Па в зоне распыления мишени до 1 Па в зоне осаждения на подложке).

Ключевые слова: ионно-плазменное осаждение пленок, корректность определения давления рабочего газа.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57098.19744

Технология ионно-плазменного осаждения тонких пленок широко используется для получения компонентов микроэлектроники и элементов преобразования энергии [1–10]. В настоящей работе показано, что давление в области осаждения пленок радикально отличается от показаний датчика давления, расположенного, как правило, на значительном расстоянии от области разряда. Предложен метод определения величины давления газовой среды в области дрейфа распыленных атомов мишень–подложка в экспериментальных технологических системах ионно-плазменного осаждения. В основе метода лежит сравнение экспериментальных зависимостей скорости осаждения от давления рабочего газа с аналогичными результатами численного эксперимента для одноатомных мишеней, которые являются достаточно надежными для определения величины давления газовой среды.

При заданной геометрии распылительной системы и технологических параметрах газового разряда скорость роста пленки на подложке фактически будет зависеть от величины давления газовой среды непосредственно в области дрейфа распыленных атомов мишень–подложка. При этом величина давления газовой среды в экспериментальных технологических распылительных системах измеряется на расстояниях от зоны распыления мишени и дрейфа мишень–подложка, в несколько раз превышающих область газового разряда.

В распылительной камере ионно-плазменного осаждения существует неоднородное распределение температуры рабочего газа, связанное с различием температуры магнетрона и разных частей камеры [11]. При стационарном (установившемся) режиме осаждения распределение температуры рабочего газа T в камере вызывает

соответствующее распределение давления рабочего газа P .

Для получения распределения величины давления газовой среды было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальной зависимостью скорости осаждения от давления рабочего газа для одноатомных мишеней, которые являются достаточно надежными для экспериментального исследования. В качестве распыляемых материалов были выбраны мишени титана и ниобия, атомы которых значительно различаются по массе (Ti — 47.87 у, Nb — 92.91 у).

Осаждение проводилось на подложки Pt/Si площадью 12×12 mm при различных расстояниях мишень–подложка: 7.5 cm для Ti и 21.5 cm для Nb . Давление рабочего газа в камере осаждения пленок поддерживалось на уровне $P = 0.6$ Pa по показанию датчика давления. Скорость напуска потока рабочего газа Ar при этом составляла 12 cm³/min, скорость его откачки — 80 l/s. Параметры газового разряда при распылении мишеней Ti и Nb были следующими: ток разряда $J = 250$ mA, напряжение смещения катод–анод $U = 485$ V. Для определения скорости роста осаждаемых пленок Ti и Nb измерялись толщины пленок и время их осаждения.

Были получены следующие экспериментальные значения скоростей осаждения на подложке пленок Ti и Nb при фиксированном значении давления рабочего газа Ar , равном 0.6 Pa: 1.74 nm/min для пленки Ti и 0.71 nm/min для пленки Nb .

Моделирование процесса ионного распыления мишени проводилось в рамках разработанной нами регрессионной модели каскада смещенных атомов [12]. Моделирование процесса переноса распыленных атомов в пространстве дрейфа мишень–подложка осуществля-

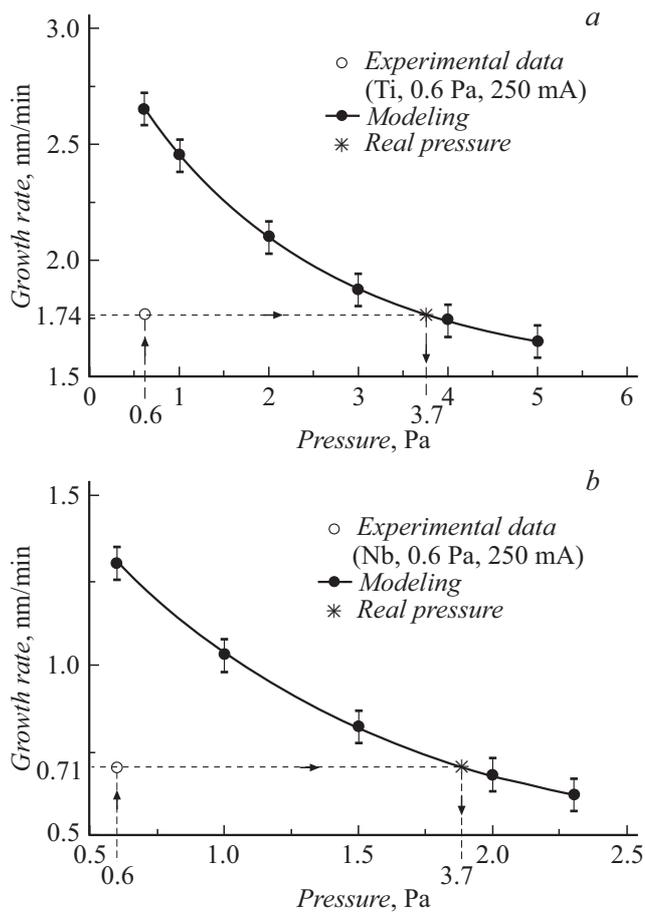


Рис. 1. Результаты сравнения экспериментального исследования и статистического моделирования зависимости скорости роста пленок Ti (a) и Nb (b) от давления рабочего газа Ar.

лось на основе математической модели процессов термализации атомных частиц в газах [13,14] и их последующего диффузионного движения в пространстве дрейфа мишень–подложка [15,16]. Процессы рассеяния атомных частиц описывались в рамках разработанного нами межатомного потенциала взаимодействия квазижестких сфер [16] с применением потенциала Борна–Майера.

Было проведено статистическое моделирование процессов ионно-плазменного осаждения пленок Ti и Nb в газовой среде Ar при геометрии распылительной системы и технологических параметрах газового разряда, аналогичных предварительно проведенному экспериментальному измерению скоростей их осаждения. Были численно исследованы зависимости скорости осаждения пленок Ti и Nb от давления рабочего газа Ar в диапазоне от 0.6 до 5.0 Па. В качестве первого приближения было принято, что величина заданного давления рабочего газа Ar в распылительной системе соответствует середине пространства дрейфа распыленных атомов мишень–подложка. Результаты статистического моделирования зависимости скорости роста пленок Ti и Nb от давления рабочего газа Ar представлены на рис. 1.

На том же рисунке приведены экспериментальные значения скорости осаждения, соответствующие показаниям расположенного на выходе из системы датчика давления $P = 0.6$ Па. Штриховой линией показано соответствие этого давления реальному давлению в области дрейфа распыленных атомов мишень–подложка, что свидетельствует об очевидности распределения давления в камере.

Анализ сравнения результатов экспериментального исследования и статистического моделирования зависимости скорости роста пленок Ti и Nb от давления рабочего газа Ar позволил определить величину реального давления рабочего газа в пространстве дрейфа распыленных атомов мишень–подложка. Таким образом, при сопоставлении срединных пространств дрейфа мишень–подложка распыленных атомов Ti и Nb с полученными значениями давления рабочего газа Ar было определено распределение давления рабочего газа Ar (рис. 2, b) в распылительной системе (рис. 2, a). Величина давления рабочего газа Ar изменяется от

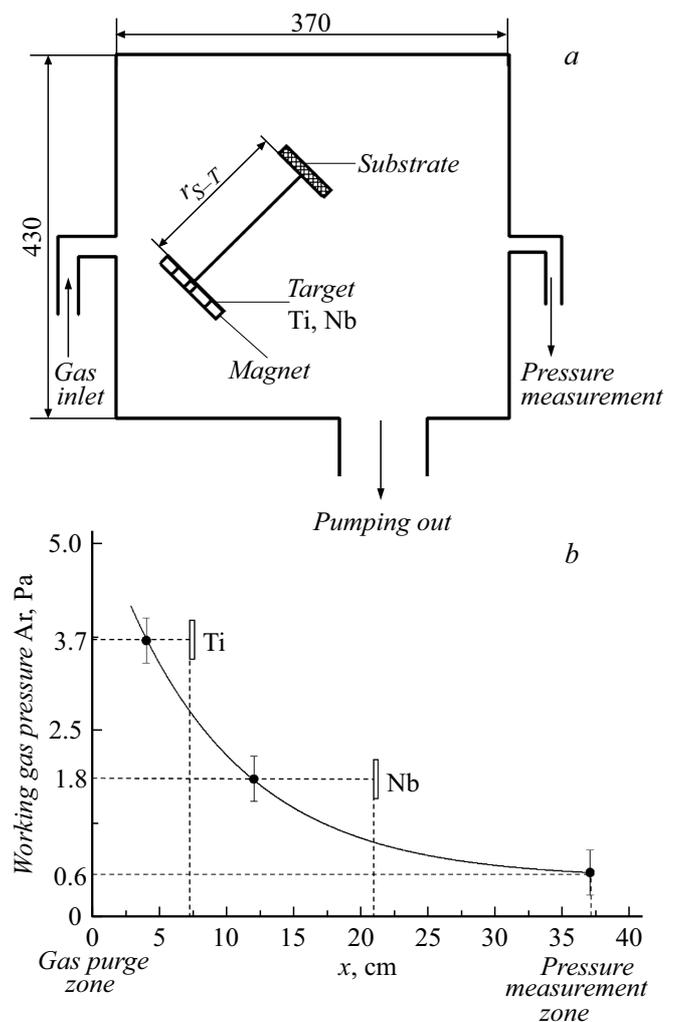


Рис. 2. a — схема экспериментальной технологической распылительной системы; b — результаты определения распределения давления рабочего газа Ar в экспериментальной распылительной системе.

$P \approx 5.0$ Па в зоне распыляемой мишени до $P = 0.6$ Па в зоне измерения давления.

Определение распределения давления рабочего газа в распылительной системе является основой для поиска и задания технологического режима ионно-плазменного осаждения качественных многокомпонентных пленок с заранее заданным видом распределения компонентного состава по толщине в процессе их осаждения [17].

Энергетический диапазон предложенного алгоритма определения давления газовой среды в вакуумной системе представляет интерес для многих прикладных задач физики плазмы, газового разряда и процессов ионного осаждения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Vallee, M. Bonvalot, S. Belahcen, T. Yeghoyan, M. Jaffal, R. Vallat, A. Chaker, G. Lefèvre, S. David, A. Bsiesy, N. Posseme, R. Gassilloud, A. Granier, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38** (3), 033007 (2020). DOI: 10.1116/1.5140841
- [2] W. Deng, C. Jin, C. Li, S. Yao, B. Yu, Y. Liu, *Surf. Coat. Technol.*, **395**, 125691 (2020). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125691
- [3] H.-J. Choi, J.-U. Woo, H.-G. Hwang, D.-S. Kim, M. Sanghadasa, S. Nahm, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **41** (4), 2559 (2021). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.027
- [4] F. Ahmad, A. Lakhtakia, P.B. Monk, *Appl. Opt.*, **59** (4), 1018 (2020). DOI: 10.1364/AO.381246
- [5] H. Bergeron, L.M. Guiney, M.E. Beck, C. Zhang, V.K. Sangwan, C.G. Torres-Castanedo, J.T. Gish, R. Rao, D.R. Austin, S. Guo, D. Lam, K. Su, P.T. Brown, N.R. Glavin, B. Maruyama, M.J. Bedzyk, V.P. Dravid, M.C. Hersam, *Appl. Phys.*, **7** (4), 041402 (2020). DOI: 10.1063/5.0023080
- [6] M.D. Nguyen, Y.A. Birkhölzer, E.P. Houwman, G. Koster, G. Rijnders, *Adv. Energy Mater.*, **12** (29), 2200517 (2022). DOI: 10.1002/aenm.202200517
- [7] S. Moradi, S. Kundu, M. Rezazadeh, V. Yeddu, O. Voznyy, M.I. Saidaminov, *Commun. Mater.*, **3** (1), 13 (2022). DOI: 10.1038/s43246-022-00235-5
- [8] J. Sakai, J.M.C. Roque, P. Vales-Castro, J. Padilla-Pantoja, G. Sauthier, G. Catalan, J. Santiso, *Coatings*, **10** (6), 540 (2020). DOI: 10.3390/coatings10060540
- [9] S. Khan, E.M. Tag-ElDin, A. Majid, M. Alkhedher, *Coatings*, **12** (9), 1300 (2022). DOI: 10.3390/coatings12091300
- [10] Yu.Zh. Tuleushev, V.N. Volodin, E.A. Zhakanbayev, I.D. Gorchachyov, E.E. Suslov, *Vacuum*, **208**, 111711 (2023). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111711
- [11] А.Г. Лучкин, *Вестн. КГТУ*, № 16, 121 (2011).
- [12] В.А. Вольпяс, П.М. Дымашевский, *ЖТФ*, **71** (11), 1 (2001). [V.A. Volpyas, P.M. Dymashevskii, *Tech. Phys.*, **46** (11), 1347 (2001). DOI: 10.1134/1.1418494].
- [13] В.А. Вольпяс, А.Б. Козырев, *ЖЭТФ*, **140** (1), 196 (2011). [V.A. Volpyas, A.B. Kozyrev, *JETP*, **113** (1), 172 (2011). DOI: 10.1134/S1063776111060227].
- [14] V.A. Volpyas, A.Y. Komlev, R.A. Platonov, A.B. Kozyrev, *Phys. Lett. A*, **378** (43), 3182 (2014). DOI: 10.1016/j.physleta.2014.09.014
- [15] P.K. Petrov, V.A. Volpyas, R.A. Chakalov, *Vacuum*, **52** (4), 427 (1999). DOI: 10.1016/S0042-207X(98)00326-1
- [16] В.А. Вольпяс, Е.К. Гольман, *ЖТФ*, **70** (3), 13 (2000). [V.A. Volpyas, E.K. Gol'man, *Tech. Phys.*, **45** (3), 298 (2000). DOI: 10.1134/1.1259619].
- [17] А.Б. Козырев, В.А. Вольпяс, А.В. Тумаркин, А.Г. Алтынников, А.Е. Комлев, Р.А. Платонов, П.М. Трофимов, *Письма в ЖТФ*, **49** (4), 28 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.04.54523.19429 [A.B. Kozyrev, V.A. Volpyas, A.V. Tumarkin, A.G. Altynnikov, A.E. Komlev, R.A. Platonov, P.M. Trofimov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (2), 62 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.02.55374.19429].