

Влияние температуры рабочего газа в магнетронной распылительной системе на толщину осаждаемых металлических пленок

А.Р. Карамов¹, А.В. Тумаркин¹, Е.Н. Сапего¹, А.А. Сердобинцев², В.К. Сахаров³,
Л.Д. Волковойнова², О.Е. Зайцев¹, А. Богдан¹.

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

³Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Аннотация: разработана математическая модель, моделирующая распределение толщины пленки по поверхности подложки в зависимости от технологических параметров при ионно-плазменном распылении на высоких мощностях. Впервые было учтено влияние температуры газа на напряжение разряда. Результаты моделирования толщины пленок подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: металлические пленки, магнетронное распыление, равномерность осаждения слоев.

1. Введение

Ионно-плазменное осаждение широко используется для получения тонких пленок в электронике, что обусловлено рядом преимуществ данного метода, а именно: высокой скоростью осаждения покрытий, сравнительно низкой температурой процесса, большим количеством варьируемых технологических параметров, а также широким выбором материалов мишеней [1].

Широкое применение данного метода привело к необходимости математического описания физических процессов, происходящих при распылении, переносе вещества и осаждении его на подложку [2]. Благодаря моделированию данных процессов возможно подобрать условия осаждения, обеспечивающие равномерную толщину, однородность и заданные электрические характеристики плёнки.

На сегодняшний день опубликован ряд работ, посвященных описанию физических процессов, происходящих при ионно-плазменном осаждении [1]. Необходимо отметить, что в данных работах напряжение разряда приравнивается к напряжению на катоде. Однако, эффект резонансной перезарядки бомбардирующих ионов, а также нагрев рабочего газа при распылении мишени могут существенно влиять на напряжение разряда. Для учета вышеописанных эффектов было предложено ввести зависимость напряжения на катоде от температуры рабочего газа в процессе магнетронного распыления:

$$U_c = 1.2 \cdot 10^{-29} [\gamma j_0 T / PB]^{1/2} \sigma_i^{-1.5} (\gamma^{-0.5} - 1),$$

где T – температура газа, γ – коэффициент вторичной электронной эмиссии, P – давление рабочего газа, σ – сечение взаимодействия, j_0 – ионный ток, B – индукция магнитного поля в пространстве над катодом [3].

Учет реального напряжения на катоде позволил более точно оценить энергетический спектр бомбардирующих ионов, что, несомненно, окажет существенное влияние на точность получаемого распределения толщины пленки по поверхности подложки.

Целью работы являлось создание математической модели, включающей в себя процессы распыления, переноса и осаждения вещества при ионно-плазменном осаждении, с учетом энергетического спектра бомбардирующих ионов.

В разработанной модели для расчета коэффициента распыления использовался эмпирический потенциал Kr-C [4], позволяющий оценить потери в материале в широком спектре энергий бомбардирующих ионов. Также для оценки энергетического спектра бомбардирующих ионов была введена зависимость напряжения на катоде от параметров разряда.

Для оценки количества рассеянных атомов в пространстве дрейфа “мишень/подложка” использовалась модель, позволяющая учесть как баллистический, так и диффузионный механизм переноса вещества в рабочей камере.

Для проверки адекватности разработанной модели, проводились эксперименты по осаждению металлических пленок методом магнетронного распыления на установке RobvacVSM300 (Россия). Параметры эксперимента представлена на таблице 1:

Давление рабочего газа, Па	Мощность разряда, Вт	Расстояние мишень-подложка, мм	Время осаждения, с	Диаметр мишени, мм	Размер подложки, мм
0,26	100,300,500,700	90	600	50	30×25×1

Толщина полученных пленок измерялась с помощью профилометра Dektak 150 (Veeco Inc., USA) путём регистрации профилей высоты.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что расхождение между моделью и экспериментом составило менее 5%. Исходя из анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод об адекватности представленной модели и перспективности её использования для разработки технологических процессов осаждения тонких пленок.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках **государственного задания № FSEE-2025-0010**.

Список литературы

1. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Т. 29. – №. 11. – С. 113001.
2. Anders A. Tutorial: Reactive high power impulse magnetron sputtering (R-HiPIMS) //Journal of Applied Physics. – 2017. – Т. 121. – №. 17.
3. Czekaj D. et al. Ion energies at the cathode of the DC planar magnetron sputtering discharge //Applied Physics A. – 1989. – Т. 49. – №. 3. – С. 269-272.
4. Behrisch R., Eckstein W. (ed.). Sputtering by particle bombardment: experiments and computer calculations from threshold to MeV energies. – Springer Science & Business Media, 2007. – Т. 110.