

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ МИШЕНИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ

© 2016 г. А.Е. КОМЛЕВ, А.А. УХОВ, В.В. КАРЗИН, В.В. СМИРНОВ,  
Е.С. ШУТОВА, А.А. КОМЛЕВ, А.А. МОРОЗОВА

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
e-mail: a.komlev@mail.ru

### Введение

В последнее время большой интерес проявляется к распылительным системам с горячей мишенью. В таких магнетронах конструктивно предусмотрено отсутствие активного охлаждения катода, за счёт минимизации отвода тепла от мишени. В таком случае за счет интенсивной ионной бомбардировки мишень разогревается до температур близких к плавлению [1]. Для минимизации оттока тепла между охлаждаемой поверхностью и мишенью создается промежуток от 0.5 до 1 мм [2]. При этом наблюдается увеличение скорости роста пленок, а их структура содержит ярко выраженную кристаллическую фазу.

Контроль температуры мишени а процессе осаждения осуществляется, как правило, бесконтактными пирометрическими методами [2], [3]. Прямое измерение температуры в данном случае затруднено, поскольку физический контакт датчика температуры с мишенью приводит к его разрушению в процессе работы. Авторами предложена методика оценки температуры мишени по результатам измерения суммарного спектра испускания газового разряда и излучения нагретой мишени. Методика основана на сопоставлении теоретического спектра излучения абсолютно черного тела при заданной температуре с положением минимумов на суммарном спектре.

### Условия эксперимента

Эксперименты выполнены на модернизированной установке УВН-71 с вакуумной камерой объемом  $7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ , оснащенной плоским магнетроном с горячей мишенью диаметром 70 мм. Для реализации режима горячей мишени диск диаметром 70 мм, изготовленный из танталового листа толщиной 0.5 мм, был закреплен с зазором 1 мм на металлической плате, охлаждаемой проточной водой. Распыление мишени проводилось при остаточном давлении менее  $10^{-2}$  мТорр, давлении аргона 3.5 мТорр и изменении плотности тока разряда 8 до 36 мА/см<sup>2</sup>.

Спектральные коэффициенты пропускания измерены в диапазоне 200–1000 нм на спектрометре ISM3600 (разработка СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), имеющем разрешение не более 2.0 нм и абсолютную ошибку измерения длины волны не более  $\pm 0.5$  нм. Для измерения оптических спектров в работе использован спектрометр ISM3600, имеющий базу данных по спектральным линиям элементов Периодической таблицы, позволяющей определить элементный и ионный состав газового разряда при магнетронном распылении. Спектрометр предназначен для регистрации оптических спектров в диапазоне 250–1000 нм со спектральным разрешением в видимой части спектра не более 2.5 нм и имеет абсолютную ошибку измерения длины волны в видимой части спектра не более  $\pm 0.5$  нм. Вывод оптического сигнала, генерируемого плазмой, из вакуумной камеры выполнен с помощью кварцевого моноволокна диаметром 0.4 мм.

### Обсуждение результатов

Основной особенностью высокоомощного распыления является разогрев поверхности мишени до высокой температуры, естественно, что её определение и контроль представляет несомненный интерес. Однако, прямое измерение температуры в данном случае затруднено, так же как и использование неконтактных пирометрических методов, которые в данном случае дают значительную погрешность [4]. Как видно из рис. 1 при увеличении мощности спектр газового разряда претерпевает существенное изменение. Регистрируемый при распылении «горячей» мишени оптический спектр представляет собой комбинацию спектров испускания тлеющего разряда и теплового излучения мишени. Разработанная авторами методика оценки температуры основана на сопоставлении теоретического спектра излучения абсолютно черного тела при заданной температуре с положением минимумов на суммарном спектре (рис. 1).

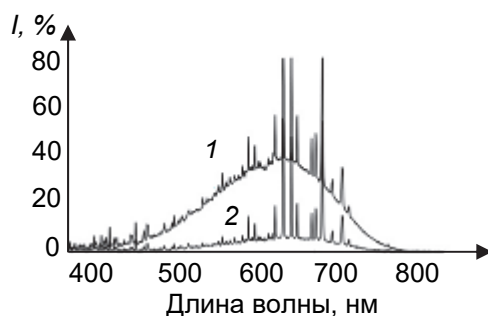


Рис. 1. Оптические спектры работающего магнетрона с горячей танталовой мишенью при мощности разряда (Вт): 1 – 370; 2 – 240.

Методика вычисления температуры построена на выделении спектра теплового излучения мишени из суммарного спектра, который производится в несколько этапов:

- задается окно просмотра в зависимости от количества эмиссионных линий (стандартно 30 нм);
- в пределах спектрального диапазона прибора в первом окне просмотра ищется минимальный уровень сигнала и запоминается в массиве. Следующее окно просмотра задается от найденного в предыдущем окне уровня;
- по найденным минимальным уровням производится построение спектрального сигнала путем аппроксимации полиномами третьей степени. Результат выделения спектра теплового излучения при мощности разряда 370 Вт представлен на рис. 2;
- для оценки температуры мишени производится построение теоретического спектра излучения абсолютно черного тела в пределах спектрального диапазона работы прибора с минимальной температурой.

Вычисление производится по известной формуле Планка:

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

где  $I(\lambda)$  – интенсивность излучения, в зависимости от длины волны;  $\lambda$  – длина волны;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $c$  – скорость света в вакууме.

Полученное распределение интенсивности нормируется по амплитуде на значение интенсивности излучения выделенного спектра теплового излучения на фиксированной длине волны 850 нм и производится вычисление интегральной разности двух спектров – теоретического для выбранной температуры и выделенного из реального спектра. Разница вычисляется для спектрального диапазона, в котором амплитуда сигналов превышает минимальный установленный порог 5%. После нескольких итераций находится значение температуры, при которой интегральная разность минимальна.

Данная температура и будет максимально близко соответствовать реальной температуре мишени.

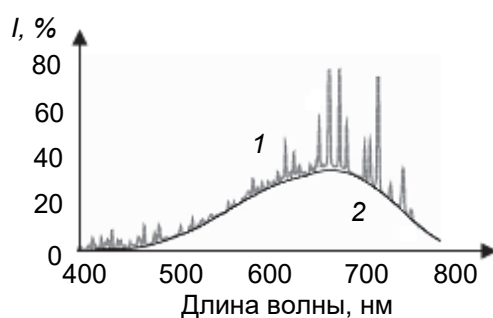


Рис. 2. Выделение спектра теплового излучения: 1 – исходный спектр, 2 – выделенный спектр теплового излучения.

Результаты расчетов температуры при обработке спектров для различной плотности мощности на мишени представлены на рис. 3.

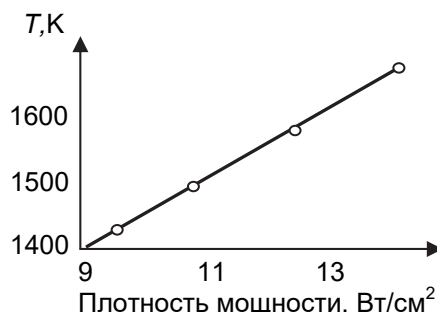


Рис. 3. Зависимость температуры горячей мишени от плотности мощности.

Из очевидных недостатков метода следует отметить невозможность абсолютно точного выделения спектра теплового излучения. Связано это в первую очередь с шумами фотоприемника и возникающими вследствие этого ошибками определения положения минимумов сигнала. Однако данный недостаток частично компенсируется сглаживанием выделенного сигнала, что позволяет минимизировать единичные ошибки определения амплитуды.

Исследования проводятся при поддержке РФФ (грант 15-19-00076).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laurikaitis M., Yviene J. C., Dudonis J. Deposition of Zr–ZrO<sub>x</sub> and Y–Y<sub>x</sub>O<sub>y</sub> films by reactive magnetron sputtering // *Vacuum*. 2005. V.78. P. 395–399.
2. Tesar J., Martan J., Rezek J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target // *Surface & Coatings Technology*. 2011. V. 206. P. 1155–1159.
3. Chau R. Y., Ho W.-S., Wolfe J. C., Licon D. L. / Effect of target temperature on the reactive d.c.-sputtering of silicon and niobium oxides // *Thin Solid Films*. 1996, V. 287. P. 57–64.
4. Маргунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 г. – 248 с.