

ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА РАЗРЯДА МАГНЕТРОНА С ГОРЯЧЕЙ ТИТАНОВОЙ МИШЕНЬЮ

© 2016 г. В.В. КАРЗИН, А.В. ЗАВЬЯЛОВ, И.Л. МЫЛЬНИКОВ, В.В. СМИРНОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
e-mail: karzin.ru@gmail.com

Введение

В последнее время большой интерес проявляют к распылительным системам с горячей мишенью. В этих системах конструктивно минимизирован отвод тепла от мишени. В таком случае за счет интенсивной ионной бомбардировки мишень разогревается до температуры близкой к плавлению. В целом конструкции систем с горячей мишенью похожи у разных исследователей: основная задача уменьшить отвод тепла от мишени [2], [7], [8]. Для этого между охлаждаемой поверхностью и мишенью создают промежуток (так называемый вакуумный зазор) от 0.5 до 1 мм с помощью тонкого кольца из нержавеющей стали [3]. Очевидно, что в теплоотводе также участвуют элементы крепежа мишени (прижимное кольцо, болты, шайбы и т. д.). При низких температурах, когда поток излучаемой энергии с поверхности мишени незначителен, преобладает механизм теплопроводности через элементы конструкции. При температуре мишени 900 °С и выше значительная часть тепла отводится за счёт излучения мишени. Обычно мишень имеет диаметр от 38 мм до 160 мм и толщину 0.5 – 1 мм.

Зондовый метод диагностики является надёжным инструментом для исследования параметров газового разряда. С помощью него локально определяют температуру и концентрацию заряженных частиц, а также потенциал плазмы [1], [4]–[6]. В данной работе с помощью одиночного зонда определяют концентрацию и температуру электронов в области положительного столба разряда магнетрона с титановой горячей мишенью в среде инертного газа аргона, а также зависимость этих параметров от давления газа и плотности тока разряда.

Оборудование для эксперимента

Измерения были выполнены для горячей и холодной мишеней. Режим горячей мишени был реализован с помощью шайб (толщиной 1 мм) из нержавеющей стали, которые были расположены между тонкой (толщина 1 мм) титановой (чистота 99.95 %) мишенью и основанием толщиной 4 мм, охлаждаемым водой. Холодная мишень имела толщину 6 мм и поэтому конфигурация магнитного поля в обеих системах имела одинаковый вид. В качестве рабочего газа использовался аргон (чистота 99.995 %). Зонд, изготовленный из молибденовой проволоки диаметром 0.5 мм, имел длину рабочей области (коллектор) 4 мм. На рис. 1 схематически показано расположение основных элементов экспериментальной установки. Зонд был расположен горизонтально напротив зоны эрозии мишени. Исследования производили на таких расстояниях от магнетрона, где отсутствует влияние магнитного поля, а также условия максимально приближены к плазме (положительный столб). Это было подтверждено измерением ВАХ зонда на расстояниях 200, 250 и 300 мм. Результаты имели отличие не более 10%, что свидетельствует об однородности распределения параметров положительного столба. Для устранения погрешности, связанной с запылением коллектора титаном, сменная керамическая головка зонда периодически заменялась.

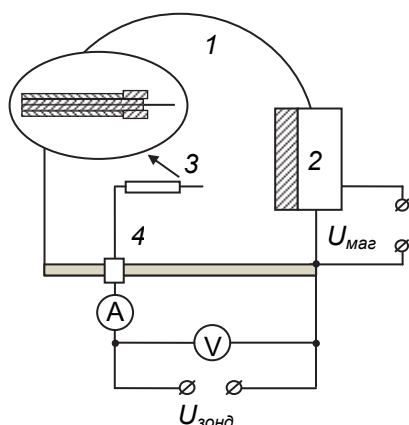


Рис. 1. Схематическое изображение зондового метода исследования разряда: 1 – вакуумная камера (анод), 2 – магнетрон (с горячей и холодной мишенями из Ti), 3 – зонд Ленгмюра, 4 – вакуумный ввод.

Экспериментальные результаты. Обсуждение

На рис. 2, а отображено семейство вольт-амперных характеристик одиночного зонда. Напряжение изменялось в диапазоне $(-50 \dots 50)$ В. При положительном потенциале на зонде ток в цепи обеспечивается отрицательными заряженными частицами – электронами. При достаточно высоких положительных потенциалах на зонде (более 40 В) наблюдается интенсивный нагрев зонда (его цвет становится оранжево-красным). При приложении на зонд отрицательного потенциала, в цепи начинает протекать ионный ток, который на несколько порядков ниже электронного..

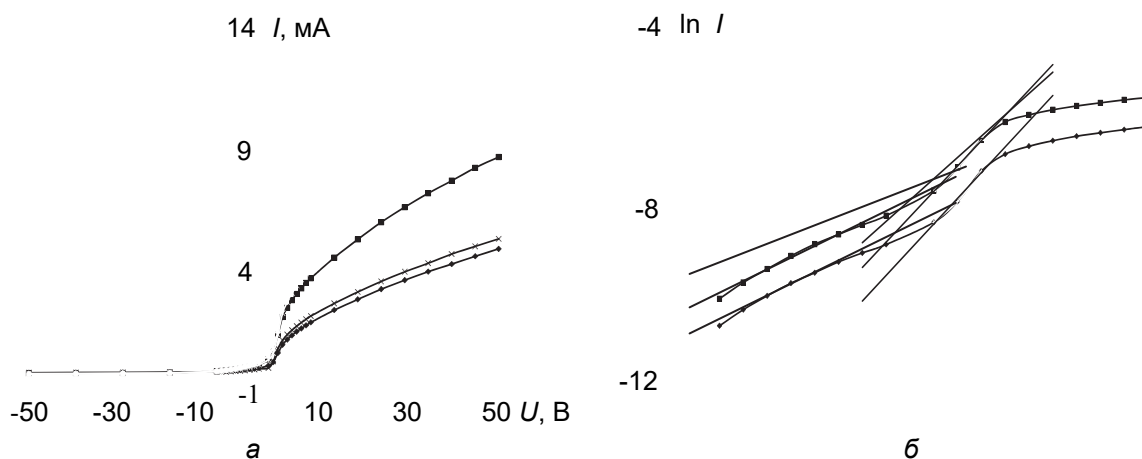


Рис. 2. Семейство ВАХ одиночного зонда (а) при плотности тока разряда (A/m^2): 1 и 2 – 640; 3 и 4 – 430; 5 и 6 – 220 и давлениях аргона (мТорр): 1, 3, 5 – 6; 2, 4, 6 – 3; (б) зависимость логарифма тока зонда от напряжения при разных токах разряда и давлении аргона 3 мТорр.

Для расчёта электронной температуры и концентрации была использована классическая теория зондового метода [4], [5], предложенная Ленгмюром ещё в 1923 году. При построении необходимых графических зависимостей логарифма тока зонда от напряжения было замечено наличие двух характерных участков на графиках (см. рис. 2, б). Это свойственно случаю, когда в среде находятся две группы электронов, обладающих разной средней температурой. Одни из них в литературе [5] называют горячими, другие – холодными. Для этих групп электронов были вычислены концентрации и температуры. На рис. 3, а и рис. 3, б показаны зависимости концентрации и температуры горячих и холодных электронов от плотности тока разряда для двух давлений аргона.

Обработка данных эксперимента предоставила возможность обнаружить две группы электронов (горячие и холодные) в положительном столбе разряда магнетрона

с холодной мишенью. Температура холодных электронов (давление аргона 3 мТорр) при увеличении плотности тока разряда от 200 до 600 А/м² возрастает от 16500 до 20200 К, т.е. примерно в 1.2 раза. Также увеличивается их концентрации в ~ 2.5 раза: от 8.8×10^{15} до 2.2×10^{16} м⁻³. Температура горячих электронов при таком же увеличении тока (при давлении аргона 3 мТорр) изменяется от 42000 К до 47700 К (увеличение в ~ 1.2 раза), а концентрация увеличивается от 5.5×10^{15} до 1.4×10^{16} м⁻³ (~ 2.5 раза).

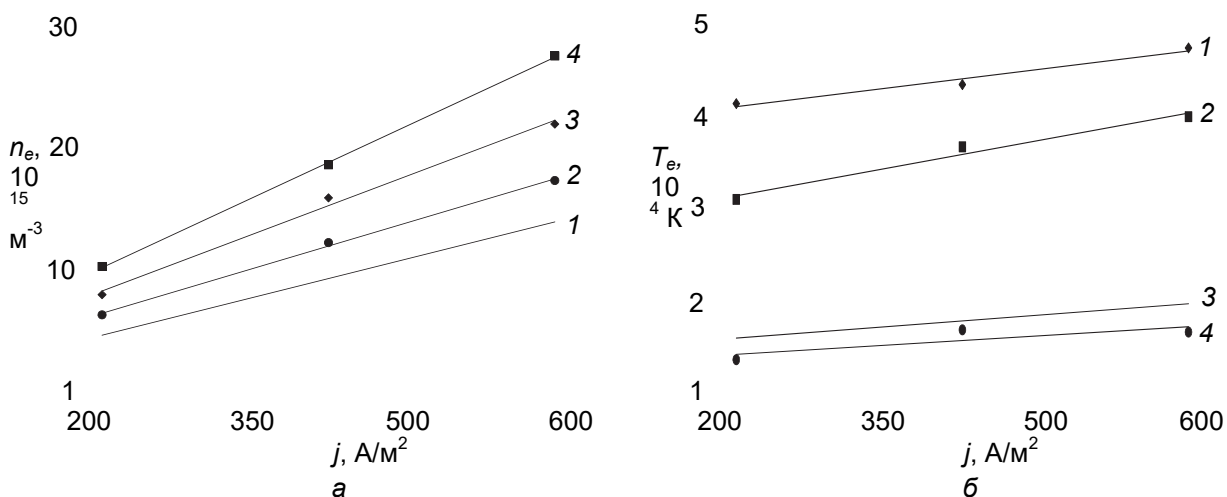


Рис. 3. Зависимость концентрации (а) и температуры (б) горячих (1, 2) и холодных (3, 4) электронов от плотности тока разряда магнетрона при разных давлениях аргона (3 мТорр (1, 3) и 6 мТорр (2, 4)).

При работе в режиме горячей мишени возникает нестабильность разряда и при плотности тока разряда более 230 А/м² разряд вообще может погаснуть, поэтому измерения вольт-амперных характеристик зонда проводились только при плотности тока разряда 213 А/м² (что соответствовало току разряда 1 А). В табл. 1 представлены рассчитанные концентрации и температуры электронов. Сразу нужно отметить тот факт, что в положительном столбе разряда магнетрона с горячей мишенью концентрация электронов значительно (на ~ 2 порядка ниже), чем при использовании холодной мишени.

В разряде магнетрона с горячей мишенью обнаружено две энергетические группы электронов. Температура холодных электронов при увеличении давления аргона от 3 до 6 мТорр снижается от 11500 до 10500 К, т.е. примерно в 1.1 раз. При этом их концентрация возрастает в ~ 1.1 раза: от 4.2×10^{13} до 4.7×10^{13} м⁻³. Температура горячих электронов при таком же увеличении давления уменьшается от 28400 К до 27000 К (в ~ 1.05 раза), а концентрация увеличивается от 2.8×10^{13} до 3×10^{13} м⁻³ (~ 1.1 раза).

Таблица 1
Концентрация и температура электронов в ПС разряда с горячей мишенью

Давление, мТорр	n_e , м ⁻³ (холодные)	T_e , К (холодные)	n_e , м ⁻³ (горячие)	T_e , К (горячие)
3	4.2×10^{13}	11500	2.8×10^{13}	28400
6	4.7×10^{13}	10500	3×10^{13}	27000

При сравнении параметров электронов в системе с холодной и горячей мишенями стало видно, что разряд в системе с нагретым катодом сильно обеднён отрицательно заряженными частицами. Температура электронов также значительно ниже в системе с горячей мишенью. К сожалению, отследить зависимости параметров электронов от плотности тока разряда не удалось из-за нестабильности разряда при работе в горячем режиме. При изменении давления рабочего газа параметры разряда в том и другом случае ведут себя похоже: при увеличении концентрации аргона увеличивается концентрация электронов, но уменьшается их температура.

В результате работы было показано, что в положительном столбе разряда магнетрона существует две группы электронов. Концентрация холодных электронов в среднем в ~ 1.6 раз выше, чем горячих, а их температура ниже в ~ 2.5 раза. При увеличении тока разряда повышается доля ионизированных атомов газа, что влечет за собой увеличение концентрации электронов в исследуемом пространстве. Это отчетливо наблюдается на представленных графиках. При повышении давления рабочего газа происходит увеличение концентрации электронов, а их средняя температура снижается. Эта тенденция свойственна как горячим, так и холодным электронам. Обеднённая электронами область положительного столба разряда в режиме работы горячей мишени (ниже на два порядка) свидетельствует о том, что для обеспечения равных токов разряда магнетрона в сравнении с холодной мишенью необходима большее напряжение. Исходя из этого, уже сейчас становится ясным тот факт, что вольт-амперная характеристика разряда магнетрона с горячей мишенью должна находиться в области более высоких напряжений, чем с холодной. Дальнейшее изучение параметров разряда поможет установить эту связь.

В результате данного исследования было установлено, что:

- в разряде магнетрона с титановой мишенью, работающего в обоих температурных режимах, присутствуют две группы электронов: горячие и холодные;
- в разряде магнетрона с горячей мишенью средняя концентрация электронов на два порядка ниже, чем в случае охлаждаемого катода;
- при увеличении давления аргона в камере концентрация электронов растёт, а их температура снижается; эта тенденция свойственна обоим режимам работы магнетрона;
- разряд магнетрона с горячей титановой мишенью имеет низкую стабильность горения, сопровождается постоянным включением поджигающего высоковольтного импульса источника тока.

Дальнейшие измерения в перспективе позволят найти функцию распределения электронов по энергиям в разряде, что может лечь в основу создания теоретической модели газового разряда. Впоследствии, имеется возможность сравнения данных результатов с полученными на установке с другими режимами работы магнетронной распылительной системы, например, таким как высокомоощное импульсное распыление.

Исследование проводится при поддержке РФФИ (грант 15-19-00076).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Б.В., Котельников В.А.* Зондовый метод диагностики плазмы. // М.: Энергоатомиздат, 1988 г. 242 С.
2. *Laurikaitis M., Yviene J. C., Dudonis J.* Deposition of Zr–ZrO_x and Y–Y_xO_y films by reactive magnetron sputtering // *Vacuum*. 2005. V. 78. P. 395–399.
3. *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.
4. *Langmuir I., Mott-Smith H.M.* The theory of collectors in gaseous discharges // *Phys. Rev.* 1926. V. 28. P. 727.
5. *Field D. J., Dew S. K., and Burrell R. E.* Spatial survey of a magnetron plasma sputtering system using a Langmuir probe // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. V. 20. P. 2032–2041.
6. *Bradley J.W., Backer H., Kelly P.J.* Time-resolved Langmuir probe measurements at the substrate position in a pulsed mid-frequency DC magnetron plasma // *Surface and Coatings Technology*. 2001. V. 135. P. 221–228.
7. *Domaradzki J., Kaczmarek D., Prociow E.L.* Microstructure and optical properties of TiO₂ thin films prepared by low pressure hot target reactive magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2006. V. 513. P. 269–274.
8. *Mercs D., Perry F., Billard A.* Hot target sputtering: A new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films // *Surface & Coatings Technology*. 2006. V. 201. P. 2276–2281.