

Параметры газового разряда с горячей титановой мишенью в среде аргона

А. Е. Шабалин, А. А. Козин

Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, E-mail: kozin.alexander.andreevich@gmail.com

В данной работе выполнено моделирование газового разряда магнетрона с горячей мишенью в среде аргона с помощью программного пакета COMSOL Multi physics. Результаты моделирования указывают на различия параметров разряда при использовании холодной и горячей мишеней. Концентрация электронов и атомов возбужденного аргона была выше для разряда с горячей мишенью. Но электронная температуру в этом случае оказалась ниже.

Gas discharge with a hot titanium target in argon environment. A.E. Shabalin, A.A. Kozin.
A magnetron gas discharge model with hot target in argon is created using COMSOL Multi physics software package. Result of this modeling show the differences of discharge parameters with cold and hot targets. Concentration of electrons and exited argon atoms was higher for discharge with the hot target. But in this case the electron temperature was lower.

Введение. В последние десятилетия магнетронное распыление является одним из самых эффективных методов нанесения высококачественных покрытий на твердую поверхность [1]. И магнетронные распылительные системы (МРС) с холодной мишенью являются достаточно хорошо изученными [2]. Вместе с тем энергетическая эффективность МРС с холодной мишенью является низкой и не позволяет осаждать пленки с высокой производительностью [3]. Для повышения энергетической эффективности магнетронного распыления применяют МРС с горячими мишенями [4–6]. Эти устройства в настоящее время изучены в недостаточной мере.

Одной из важных задач для понимания особенностей разряда с горячей мишенью является изучение его параметров, к которым относятся электронная температура и концентрация частиц разного рода. Эту задачу решают как экспериментально, так и с помощью моделирования. Моделирование позволяет предсказывать характеристики разряда и более точно понимать физические процессы исследуемого объекта.

В данной работе наша цель состояла в создании модели разряда магнетрона с горячей титановой мишенью в программном пакете COMSOL Multiphysics, выбор которого обусловлен его универсальностью и доступностью. Моделирование выполнялось в несколько шагов: была создана двумерная геометрическая модель, описаны физические законы, заданы граничные условия, построена конечно-элементная сетка и произведены расчеты.

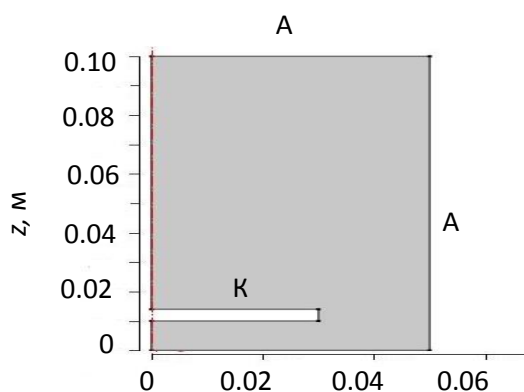


Рис. 1. Двумерная модель МРС.

Детали эксперимента. Расчет выполнялся в программном пакете COMSOL Multiphysics на персональном компьютере, имеющем следующие основные характеристики: процессор Intel(R) Core™ i5-4200M CPU @ 2.50 GHz (4 CPUs), оперативная память – 6 Гб.

Геометрическая модель разрядного блока представляет собой двумерную модель, созданную в пакете COMSOL Multiphysics, на основании которой была построена конечно-элементная треугольная сетка. Задача решалась в цилиндрической системе координат. Геометрия модели показана на рис. 1. Стенки в ней являются анодом. МРС является симметричной, поэтому на рис. 1 отображена только ее половина. Шаг сетки был выбран таким, чтобы погрешность расчетов не превышала 5%. Начальные условия эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры разряда.

Параметр	Значение
Напряжение разряда (V_0)	250В
Давление газа (p_0)	0.5 Торр
Коэффициент ионно-электронной эмиссии (γ)	0.25
Температура (T)	293.15 К
Коэффициентотражения (R)	0.33
Сопротивлениебалластногогорезистора (R_b)	$5 \cdot 10^5$ Ом

Результаты и обсуждение. На рис. 2, а показаны распределения электронной температуры вдоль координатыz, направленной от катода к аноду для разряда с мишенями разного типа. Приведенные на рис. 2, а кривые имеют как сходство, так и различия.

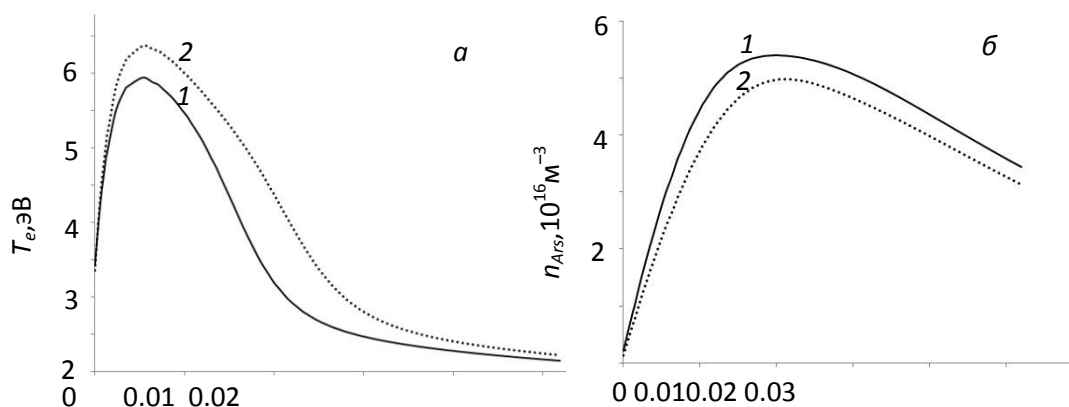


Рис. 2. Распределение при напряжении 250 В: а – электронной температуры; б – атомов возбужденного аргона для мишени: 1 – горячей; 2 – холодной.

Так оба распределения увеличиваются от катода до левого края начала области катодного свечения, где и наблюдается максимум электронной температуры [7]. Далее происходит падение, которое объясняется неупругими столкновениями (процессы возбуждения и ионизации), которые испытывают энергичные электроны, теряя при этом энергию от переднего края области катодного свечения до правого края темного катодного пространства. Далее электронная температура слабо изменяется до анода. Отметим также, что уменьшение этого параметра происходит там, где увеличивается концентрация электронов, что говорит об общей тенденции поведения кривых.

Уменьшение электронной температуры для разряда с горячей мишенью может быть связано с тем, что термоэлектроны имеют меньшую энергию и, следовательно, они снижают величину общей электронной температуры. Однако, стоит отметить, что кривые на рис. 2, а построены в электронвольтах. Перевод этой величины в кельвины приведет к тому, что различие в электронной температуре для разрядов с горячей и холодной мишенью будет малым. Из этого можно сделать вывод, что тип мишени слабо влияет на электронную температуру в МРС.

Распределение атомов возбужденного аргона (рис. 2, б) показывает область высокой интенсивности – область катодного свечения разряда [8]. Электроны, вылетая с катода, имеют энергию порядка единиц электрон-вольт, но, ускоряясь в поле, приобретают энергию, достаточную для возбуждения атомов аргона и возникает свечение.

Добавление дополнительного механизма эмиссии электронов (термоэлектронная эмиссия) сказывается на кривых на рис. 2,б. Видно, что в случае с горячей мишенью, концентрация атомов возбужденного аргона выше, так как происходит больше актов возбуждения, нежели в разряде с холодной мишенью.

На рис. 3. показано распределение электронов в разряде. Из рис. 3 видно, что плотность электронов возле катода значительно ниже, нежели в области темного катодного пространства. Это объясняется большим количеством актов ионизации в области темного катодного пространства, в результате которых рождается большое число электронов.

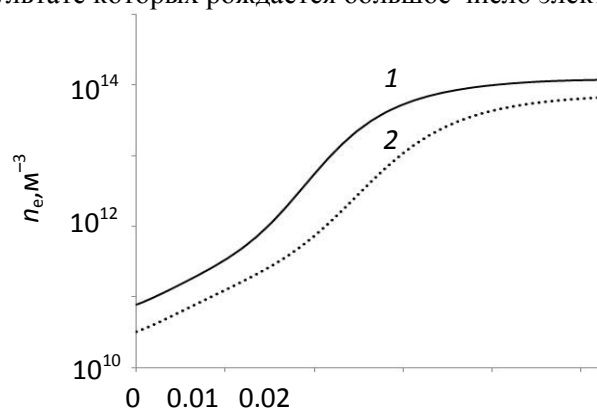


Рис.3. Распределение электронов при напряжении 250 В для мишени: 1 – горячей; 2 – холодной.

Кривая для МРС с горячей мишенью на рис. 3 имеет большие значения в результате появления дополнительных термоэлектронов.

Выводы. Подводя итоги, обратим внимание на то, что форма кривых для электронной температуры, распределения атомов возбужденного аргона и распределения электронов не меняется с изменением типа мишени. Но, в то же время, значительно различаются концентрации и незначительно (в рамках погрешности) различается величина электронной температуры, что согласуется с исследованиями в данной области.

Авторы благодарны профессору Шаповалову В.И. за помощь, оказанную при подготовке этой работы.

Литература

1. Барыбина А. А., Шаповалов В. И. Пленки оксидов переходных металлов: физика и технология реактивного распыления СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 176 с.
2. Komlev A. E., Shapovalov V. I., Shutova N. S. // Techn. Phys. 2012. V. 57. P. 1030–1033.
3. Anders A. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2010. V. 28. P. 783–790.
4. Shapovalov V. I., Minzhulina E.A. // Vacuum. 2019. V. 161. P. 324–327.
5. Kozin A.A., Shapovalov V. I. // Sur. Coat. Technol. 2019. V. 359. P. 451-458.
6. Shapovalov V. I. // 2019. V. 64, No. 7. P. 926–932.
7. Tao W. H., Prelas M. A., Yasuda H. K. // J. Vac. Sci. Tech. 1996. V. 14. P. 2113.
8. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics. Springer, Berlin, New York 1991 736 p.