Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408 Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 12–20.

DOI: 10.7463/1015.0818660

Представлена в редакцию: 24.07.2015 Исправлена: 30.09.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 537.52

Измерение индукции магнитного поля и моделирование холловского тока в разряде магнетронной распылительной системы

Духопельников Д. В.^{1,*}

*<u>duh@power.bmstu.ru</u>

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Экспериментально определены изменения магнитного поля в разряде магнетронной распылительной системы, вызванные электронным холловским током при различных величинах индукции магнитного поля на поверхности катода. Изменения индукции магнитного поля в разряде определялось термостабилизированным магнитным зондом. Величина холловского тока определялась путем его моделирования пробным витком с током, расположенным на поверхности катода в зоне максимальной концентрации плазмы и вызывающим эквивалентное изменение магнитного поля. Показано, что изменение индукции магнитного поля, вызванное холловским током, не превышает 3% от величины внешнего магнитного поля, созданного магнитной системой. Величина полного электронного холловского тока в магнетронной распылительной системе с дисковым катодом превышает ток разряда в 4 – 6 раз.

Ключевые слова: магнетрон, магнитное поле, искажение, холловский ток, тонкие плёнки, покрытия, плазма

Введение

Метод магнетронного распыления давно и широко используется в технологии нанесения тонких пленок [1-4]. Однако недостаток знаний о строении магнетронного разряда и особенностях физических процессов в нем ограничивает возможности дальнейшего развития и разработки расчетных методик и методик проектирования магнетронных распылительных систем (MPC).

В МРС используется аномальный тлеющий разряд в неоднородных скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях, локализованный у поверхности распыляемой мишени, которая является катодом. Эмитируемые с поверхности катода при ионной бомбардировке электроны захватываются арочным магнитным полем и совершают сложные циклические движения у распыляемой поверхности, многократно сталкиваясь с атомами рабочего газа. В результате вблизи поверхности катода образуется область с высокой концентрацией частично замагниченной плазмы. Полученные в результате

ионизации рабочего газа ионы ускоряются приложенным разрядным напряжением в направлении катода-мишени и распыляют ее. Магнитное поле оказывает слабое влияние на ионы, незначительно меняя их траекторию [5]. При этом в скрещенных электрических и магнитных полях возникает электронный холловский ток плотностью $j_{xолл}$, который создает на внешней стороне разряда, со стороны анода, магнитное поле $B_{xолл}$, усиливающее поле B_{M} магнитной системы (рис.1). Это приводит к искажению поля B_{M} и усложнению анализа параметров плазмы в разрядном промежутке.

Суммарный (полный) холловский ток $J_{xoлл}$ может быть определен как:

$$J_{xONN} = \int_{S} j_{xONN} ds \,, \tag{1}$$

где: S – площадь поперечного сечения кольцевого разряда.



Рис.1. Схема полей и токов в разряде МРС: *B*_м –магнитное поле созданное магнитной системой; *B*_{холл} –магнитное поле холловского тока; *E*-напряженность электрического поля: *j*_{холл} –электронный холловский ток; *V*_{ex}- скорость дрейфа электронов

При теоретическом анализе параметров плазмы в МРС важно знать, допустимо ли пренебрегать изменением магнитного поля в разряде, вызванным холловским током [6], [7]. Например, импульсные магнетроны (HiPIMS-high power impulse magnetron sputtering) при своей работе могут значительно искажать магнитные поля, создаваемые магнитной системой [8].

Ранее в работе [9] производились оценки отношения холловского тока к току разряда, исходя из предположения о классической проводимости плазмы в магнитном поле. Из них следовало, что холловский ток может превышать ток разряда более чем на два порядка.

В работе [10] проводились измерения скорости дрейфа электронов и плотности холловского тока зондом Маха, представляющего собой двойной плоский

ленгмюровский зонд, и потенциала плазмы горячим ленгмюровским зондом. Но распределения плотности холловского тока по сечению разряда не производилось, что не позволяет точно подсчитать полную его величину.

В работе [11] проводили измерения величины холловского тока по изменению величины индукции магнитного поля на границе разряда со стороны анода. Было определено, что величина холловского тока превосходит ток разряда в 2-9 раз. Величину холловского тока J_{xonn} определяли расчетным путем по закону Био-Савара, считая, что изменения индукции магнитного поля вызваны холловским током:

$$\Delta B = \frac{\mu_0 J_{xonn} R^2}{2(R^2 + r^2)^{3/2}} , \qquad (2)$$

где: ΔB - изменение индукции магнитного поля *B* в разряде;

R – радиус холловского тока;

r – расстояние от плоскости холловского тока до магнитного зонда, расположенного на оси МРС.

При таком способе расчета не учитывается влияние магнитопровода на величину магнитного поля *В*_{холл}, создаваемого холловским током. Учет этого влияния приводит к необходимости решения сложной задачи.

Целью данной экспериментальной работы было

1. Определение величины изменения индукции внешнего магнитного поля $B_{\rm M}$ холловским током $J_{\rm холл}$ на границе разряда МРС постоянного тока.

2. Определение величины холловского тока $J_{XOЛЛ}$ в разряде MPC, путем его моделирования пробным витком с током.

Оборудование

Измерения проводились в MPC с плоским дисковым катодом из меди диаметром 105 мм и толщиной 8 мм. MPC была снабжена электромагнитной системой, которая создавала на поверхности катода магнитные поля с индукцией 0... 0,1 Тл при толщине катода 8 мм. Рабочий газ аргон. Диаметр зоны максимальной выработки катода составляет 55 мм.

Для измерения величины индукции магнитного поля в разряде над поверхностью катода был разработан термостабилизированный магнитный зонд.

В качестве чувствительного элемента был выбран датчик Холла фирмы «Honeywell» с аналоговым выходом серии SS94A2. Датчик имеет аналоговый выход втекающего (вытекающего) тока и встроенный ограничитель выходного напряжения на уровне около 9 В, что исключает превышение выходным напряжением этого значения независимо от напряжения питания и магнитного поля. Датчик выполнен в трехвыводном корпусе с керамическим основанием и шагом выводов 2,54 мм (0,1 дюйма). Датчик обеспечивает линейную зависимость выходного напряжения от индукции магнитного поля с отклонением $\pm 0,4$ % от измеряемой величины. При этом наблюдается зависимость показаний температуры с ошибкой 0,02 %/°С.

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

Для устранения влияния температуры датчика на его чувствительность магнитный зонд выполнен термостабилизированным и электрически изолирован от плазменного объема.

Конструкция магнитного зонда показана на рис. 2.

Датчик 1 вклеен в паз латунного охлаждаемого водой корпуса 2. Охлаждающая вода подается через медные трубки 3. Корпус размещен в кварцевой трубке 4 диаметром 15 мм и толщиной стенки 2,5 мм с зазором, обеспечивающим отсутствие теплового контакта. С одной стороны кварцевая трубка закрыта замазкой 5 (оксид циркония, жидкое стекло), с другой стороны в трубку запрессована фторопластовая пробка 6, через которую выводятся охлаждающие трубки и сигнальный кабель 7. Сигнальный кабель помещен в гибкий электростатический экран.



Рис.2. Конструкция термостабилизированного магнитного зонда: 1- датчик Холла, 2- корпус, 3- трубки охлаждения, 4- кварцевый изолятор, 5- замазка, 6- изолятор, 7- сигнальный кабель.

Питание магнитного зонда осуществлялось от источника стабилизированного напряжения 9В. Выходное напряжение датчика SS94A2 регистрировалось с помощью прецизионного цифрового мультиметра Tektronix DMM4050 имеющего диапазон измеряемых напряжений от 100 мВ до 1000 В, с разрешением до 100 нВ. Основная погрешность измерения напряжения постоянного тока составляет 0,0024 %.

Проверка выходной характеристики датчика Холла осуществлялась в однородном магнитном поле измерителем магнитной индукции Ш1-8. Однородное магнитное поле создавалось в центре магнитной катушки диаметром 40 мм и длиной 200 мм, намотанной на алюминиевом каркасе. Питание катушки осуществлялось от источника TEC-18. В центре катушки помешался датчик измерителя магнитной индукции Ш1-8 и датчик SS94A2, совмещенные между собой. При изменении силы тока в катушке одновременно регистрировались напряжение на выходе датчика и показания измерителя магнитной индукции Ш1-8. Полученная чувствительность датчика составила 25 В/Тл.

Внутри камеры магнитный зонд размещался над поверхностью катода и был закреплен в кронштейне, который позволял перемещать зонд в плоскости над

поверхностью катода и вдоль оси MPC рис.3а. Магнитный зонд располагался перпендикулярно силовым магнитным линиям, на оси MPC, на расстоянии 40 мм от катода.

Эксперимент

Изменение магнитного поля холловским током определялось по разности величин поля *B*, измеренных в отсутствии и при наличии разряда в MPC.

Величина холловского тока определялась моделированием увеличения магнитного поля пробной катушкой с током. В области максимальной выработки катода наблюдается наибольшая концентрация плазмы, и индукция магнитного поля $B_{\rm M}$ созданного магнитной системой имеет наибольшие значения. Это позволяет предположить, что в этом месте сосредоточен практически весь холловский ток. Тогда, пропуская ток в пробном витке, расположенном над поверхностью катода в зоне максимальной выработки, можно заменить действие холловского тока по изменению магнитного поля. Ток в пробном витке, при котором изменение магнитного поля соответствует изменению в присутствии разряда, можно считать равным полному холловскому току $J_{xолл}$.

Расположение пробной катушки и магнитного зонда при моделировании холловского тока показаны на рис. Зб. Пробная катушка располагалась над поверхностью катода в зоне его максимальной выработки на расстоянии 1 мм от поверхности катода. Глубина выработки катода составляла 3 мм. Пробная катушка содержала четыре витка и имела диаметр 55 мм, что соответствовала диаметру максимальной выработки. Питание катушки осуществлялось от источника TEC-42 в режиме стабилизации тока. Магнитный зонд располагался в той же точке, что и при определении увеличения магнитного поля в плазме разряда. Пропусканием тока по пробной катушке добивались увеличения магнитного поля такого же, как при горении, разряда. Полученный ток умножался на количество витков в катушке, и результат принимался за полный холловский ток $J_{холл}$, протекающий в прикатодной области разряда.





Рис. 3. Экспериментальный стенд для определения изменения магнитного поля холловским током.

Эксперименты проводились при работе с медным катодом и давлении аргона 0,15 Па. Напряжение разряда составляло 600 В. Ток разряда был 1 А и 3 А при индукции магнитного поля на поверхности катода соответственно 8,7·10⁻² Тл и 9,8·10⁻² Тл.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

№ Эксперимента	1	2
Напряжение разряда, В	600	600
Ток разряда, А	1,0	3,0
Индукция магнитного поля на поверхности катода, Тл	8,7·10 ⁻²	9,8·10 ⁻²
Индукция магнитного поля созданного магнитной системой	$2,6\cdot 10^{-3}$	2,9·10 ⁻³
в точке измерения, Тл		
Величина увеличения индукции магнитного поля в точке	$4 \cdot 10^{-5} (1,5\%)$	8.10-5 (2,7%)
измерения в присутствии разряда, Тл (%)		
Величина холловского тока, А	6,2	11,2

Таблица 1. Результаты измерений магнитного поля

Выводы

Как показал эксперимент, изменение индукции магнитного поля, вызванное холловским током в MPC постоянного тока, не превышает 3 % от величины индукции внешнего магнитного поля. Это позволяет не учитывать изменение индукции магнитного поля, вызванное холловским током при теоретическом анализе параметров плазмы в разрядном промежутке MPC. Величина холловского тока в MPC с дисковым катодом превышает ток разряда в 4 – 6 раз. Оценка увеличения индукции магнитного поля на оси MPC по выражению (2) даёт результат, близкий к полученным экспериментальным данным. Это согласуется с экспериментальными результатами работы [11] и расчетами, произведенными в работе [8].

Список литературы

- 1. Кузмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн.1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
- 2. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы. В 2 ч. Ч. 1. Устройство, принципы работы, применение: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
- 3. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
- 4. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Воробьёв Е.В., Кириллов Д.В. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления // Наноинженерия. 2014. № 9 (39). С. 30-32.
- 5. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В. Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

двигателях с анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 233-238. DOI: 10.7463/1112.0483882

- 6. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы с электромагнитами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 202 с.
- Musschoot J., Haemers J. Qualitative model of the magnetron discharge // Vacuum. 2009. Vol. 84, iss. 4. P. 488-493. DOI:<u>10.1016/j.vacuum.2009.10.011</u>
- Abolmasov S.N., Bizyukov A.A. On the Magnetic Field Profile in a High-Power Planar Magnetron Discharge // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33, no. 4. P. 447-1449. DOI: <u>10.1109/tps.2005.852358</u>
- Schiller S., Heising V., Goedicke K. Electron beam evaporation and high-rate sputtering with plasmatron/magnetron systems - a comparison // Vakuum Technik. 1978. Vol. 21, no.1. P. 51-56.
- 10. Borah S.M., Pal A.R., Bailung H., Chutiay J. Effect of ExB electron drift and plasma discharge in dc magnetron sputtering plasma // Chinese Physics B. 2011. Vol. 20, no. 1. P. 014701-1 014701-9. DOI: 10.1088/1674-1056/20/1/014701
- Rossnagel S.M., Kaufman H.R. Induced drift currents in circular planar magnetrons // Journal of Vacuum Science & Technology A. Vacuum Surfaces and Films. 1987. Vol. 5, no. 1. P. 88-91. DOI: <u>10.1116/1.574822</u>

Science & Education of the Bauman MSTU

Electronic journal ISSN 1994-0408 Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 10, pp. 12–20.

DOI: 10.7463/1015.0818660

Received: Revised:

24.07.2015 30.09.2015

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Measurement of Magnetic Field and Hall Current Modeling in Discharge of Magnetron Sputtering System

D.V. Duhopel'nikov^{1,*}

*<u>duh@power.bmstu.ru</u>

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: magnetron, magnetic field, magnetic field distortion, thin films, coating, plasma

The work experimentally determines the changes of magnetic field in the magnetron sputtering system discharge because of electron Hall current near the cathode surface with different magnetic fields. The Hall current was also measured.

The magnetic field changes caused by Hall current were determined as a difference of the magnetic field induction values, which was measured with and without electric discharge. The magnet probe measured magnetic field induction changes. This probe had thermal stabilization and was electrically disconnected from plasma volume to eliminate the influence of temperature on its sensitivity. Magnetic field was placed normal to the magnet lines.

The Hall current value was determined by its simulation with a test coil placed near the cathode surface in the zone of maximum cathode erosion. This test coil caused equivalent changes of the magnetic field. The plasma density has a maximum value in the area of maximum cathode erosion with the highest magnetic field, which is parallel to the cathode. This assumption allows us to suggest that almost entire Hall current is concentrated in this area. Then, it is possible to replace Hall current effect of magnet field changes for the current in the test coil placed over the cathode surface in the maximum erosion area. The current in the test coil is equal to the total Hall current when this magnetic field change corresponds to the change with discharge available.

The experiment has shown that the magnetic field changes caused by Hall current in DC magnetron sputtering system does not exceed 3% of the external magnetic field value. The Hall current value in magnetron sputtering system with disk-like cathode 4 - 6 times exceeds discharge current. The small value of the Hall current may be explained by the fact that in the cathode area with the maximum plasma concentration and large values of the magnetic field, the current transport is carried out by ions on which the magnetic field does not have significant influence.

The data obtained in this experiment allow us to ignore the changes of magnetic field caused by the Hall current in the theoretical analysis of the plasma parameters in the discharge gap of the magnetron sputtering system.

References

- 1. Kuzmichev A.I. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy. Kn.1. Vvedenie v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya* [Magnetron sputtering systems. Book 1. Introduction to the physics and technology of magnetron sputtering]. Kiev, Avers Publ., 2008. 244 p. (in Russian).
- 2. Dukhopel'nikov D.V. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy. V 2 ch. Ch. 1. Ustroistvo, printsipy raboty, primenenie* [Magnetron sputtering systems. In 2 pts. Pt. 1. Devices principles, operating principles, application]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 53 p. (in Russian).
- 3. Danilin B.S., Syrchin V.K. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* [Magnetron sputtering systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 72 p. (in Russian).
- Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Kirillov D.V. Tribological properties of silver coatings made with magnetron sputtering system. *Nanoinzheneriya = Nano Engineering*, 2014, no. 9 (39), pp. 30-32. (in Russian).
- Marahtanov M.K., Duhopel'nikov V.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'ev E.V. Experimental demonstration of azimuthal ion deviation effect in engines with anode layer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 11, pp. 233-238. DOI: <u>10.7463/1112.0483882</u> (in Russian).
- Dukhopel'nikov D.V. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy s elektromagnitami. Kand. diss. [Magnetron sputtering system with electromagnets. Cand. diss.]. Moscow, 2007. 202 p. (in Russian).
- Musschoot J., Haemers J. Qualitative model of the magnetron discharge. *Vacuum*, 2009, vol. 84, iss. 4, pp. 488-493. DOI:<u>10.1016/j.vacuum.2009.10.011</u>
- Abolmasov S.N., Bizyukov A.A. On the Magnetic Field Profile in a High-Power Planar Magnetron Discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, vol. 33, no. 4, pp. 1447-1449. DOI: <u>10.1109/tps.2005.852358</u>
- Schiller S., Heising V., Goedicke K. Electron beam evaporation and high-rate sputtering with plasmatron/magnetron systems - a comparison. *Vakuum Technik*, 1978, vol. 21, no.1, pp. 51-56.
- Borah S.M., Pal A.R., Bailung H., Chutiay J. Effect of ExB electron drift and plasma discharge in dc magnetron sputtering plasma. *Chinese Physics B*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 014701-1 014701-9. DOI: 10.1088/1674-1056/20/1/014701
- Rossnagel S.M., Kaufman H.R. Induced drift currents in circular planar magnetrons. *Journal of Vacuum Science and Technology A. Vacuum Surfaces and Films*, 1987, vol. 5, no. 1, pp. 88-91. DOI: <u>10.1116/1.574822</u>