ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНЕТРОНА С ПОЛЫМ КАТОДОМ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, А.Г.Евстигнеев Секция физики МФ МГТУ им. Н.Э.Баумана

STUDY OF A HOLLOW CATHODE MAGNETRON, OPERATING IN THE REGIME OF POWERFUL PULSES

N.P.Poluektov, Yu.P.Tsar'gorodsev, I.I. Usatov, A.G. Evstigneev

Department of Physics, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University E-mail: poluekt@mgul.ac.ru

Проведены исследования магнетронного разряда с полым катодом, питание которого осуществляется источником мощных импульсов тока. Источник питания и система измерений параметров плазмы импульсного разряда разработаны сотрудниками секции физики. С помощью зондовых и спектральных измерений изучены динамика импульсного разряда. Предложен механизм образования и развития разряда.

Investigations of a magnetron discharge with a hollow cathode, which is powered by a source of powerful current pulses, are carried out. The power source and the system for measuring the parameters of the pulsed discharge plasma were developed by the staff of the physics section. With the help of probe and spectral measurements, the dynamics of a pulsed discharge is studied. Based on the data obtained, a mechanism for the formation and development of a discharge is proposed.

Ключевые слова: магнетрон с полым катодом, плазма, импульсный разряд, зондовые и спектральные измерения.

Key words: hollow cathode magnetron, plasma, pulse discharge, probe and spectral measurements.

Среди различных способов получения тонких (толщиной микро-и нанометры) пленок наиболее широко применяется осаждение пленок в плазме низкого давления методом распыления. В данном методе в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. В электронной промышленности наиболее широко используется магнетронный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях [1] (Рис.1).

Плазма в аргоне загорается между анодом и катодом, который изготовлен из распыляемого металла. На катод подается отрицательное напряжение 400 - 800 В. Электроны захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по траекториям вблизи поверхности мишени. Область плазмы с высокой концентрацией (более 1011 см-3) в виде тора малого объема толщиной порядка 1 см, а вне его - концентрация уменьшается до 109 – 1010 см-3.

Магнетронный способ осаждения обладает рядом недостатков. Особые сложности возникают при осаждении пленок на рельефных субмикронных структурах. В качестве примера можно привести металлизацию сквозных отверстий и канавок (тренчей) при создании современных СБИС (проводящие шины для управления транзисторами). В обычном магнетроне поток распыленного металла состоит почти на 100% из нейтральных атомов, т.к. вероятность ионизации их приданных размерах и концентрациях плазмы мала. Изотропное распределение частиц здесь приводит к тому, что толщина пленок на различных поверхностях структуры будет существенно отличаться. Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность структуры вдоль нормали.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизация распыляемого металла. Позитивный эффект состоит в том, что на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя объемного заряда перед подложкой. Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации (более 10¹¹ см⁻³) во всем объеме между мишенью и подложкой (15-20 см).

Начиная с 80 – х годов появились так называемые источники высокоплотной плазмы. Эти источники создают существенно неравновесную плазму с концентрацией более 10¹¹ см⁻³ в объеме нескольких литров. Получение пленок в таких установках стимулируется большими потоками ионов, что позволяет получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокие адгезия, прочность, теплопроводность, износоустойчивость). К таким источникам относится индуктивно связанный разряд, СВЧ-ЭЦР- разряд, геликонный разряд и некоторые другие. [2-5] Область рабочих давлений от единиц до десятков мТорр. Температура атомов и ионов порядка 0,1 эВ, а температура электронов 1-5 эВ. Процесс образования пленок существенно неравновесный, что и является одной из причин уникальности их свойств.

В лаборатории секции физики МФ МГТУ создан источник высокоплотной плазмы на основе магнетрона с полым катодом [6-10].

Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более 10¹² см⁻³ при давлении 1 – 10 мТор), создаваемая в большом объеме, низкая (10–50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку. Установки на основе данного разряда широко применяются за рубежом для создания адгезионных, диффузионных и затравочных слоев в канавках (тренчах) и межслойных отверстиях современных УБИС.

В начале 2000-х годов стали исследоваться магнетроны, в которых стационарный источник питания заменяется на импульсный-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум тока 100-1000 А) длительность разряда 10-300 мкс, период разряда 100 – 300 Гц). Вследствие малой скважности средняя мощность за период не превышает 1-2 кВт). Плотность ионного тока на мишень превышает 1 А/см², что на порядок больше, чем в стационарных магнетронах.

В зарубежной литературе этот тип разряда называется HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [12-15]. Дело в том, что мишень магнетрона, работающего в стационарном режиме с большой мощностью, испытывает большие тепловые нагрузки, что приводит к срыву тлеющего разряда (дугообразованию). В HiPIMS разряде вблизи катода концентрация плазмы достигает величины 10¹³ см⁻³, что позволяет электронам ионизовать распыленные атомы мишени на малом расстоянии (несколько см). Часть ионов металла возвращается на мишень и участвует в самораспылении, соответственно на подложку поток ионов металла уменьшается, что снижает скорость осаждения пленки.

Схема установки показана на Рис.1. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 14 см, длина 10 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Напряжение импульсного источника разряда – до 900 В, максимальный ток -150 А, длительность импульса -50-350 мкс, частота 100-200 Гц. . Магнитное поле создается столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода, а также электромагнита, установленного вблизи выходного сечения. Концы столбиков соединены магнитопроводами. Индукция магнитного кольцевыми железными поля вблизи цилиндрической поверхности катода составляет 500 Гс. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода.



Рис. 1. Схема и фото установки магнетронного разряда с полым катодом

Скрещенные Е×В поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более 10¹² см⁻³). Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покидать полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального керна потока составляет порядка 5 см на расстоянии 20 см от выходного сечения магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза и установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Из источника плазма поступает в технологическую камеру, в которой установлен медный диск с подложками для нанесения пленок.

Камера откачивается турбомолекулярным насосом до давления 5·10-6 Торр, затем напускается аргон до давления 3-10 мТорр. Разряд зажигается системой предионизации (2 кВ, 5-10 мА), а затем включается импульсный источник. Система предионизации обеспечивает повторяемость разряда.

Система диагностики включает зондовую, спектральную и сеточные кварцевые микровесы. С помощью зондов Лэнгмюра можно определять концентрацию плазмы, температуру электронов, плазменный и плавающий потенциалы в различные моменты времени импульсного разряда. Тепловые зонды измеряют энергетические потоки плазмы на подложку, в результате которых устанавливается температура подложки. Спектральная диагностика позволяет измерять динамику различных спектральных линий. Сеточные кварцевые микровесы применяются для измерения скорости осаждения пленки и степени



Рис.2. а) Ток и напряжение HiPIMS разряда, b) Ионный ток насыщения зонда на расстоянии 19 см от среза магнетрона. 10 мТорр, W = 4.42 Дж, P_{имп} = 29.5 кВт, P_{ср} = 440 Вт.

ионизации потока распыленных атомов металла. Все данные выводятся на компьютер с помощью системы сбора и обработки информации. Для регистрации применяются 2-х лучевой цифровой осциллограф Bordo 241(150 МГц) и плата Nation Instruments.

На Рис. 2а,б показаны характерные осциллограммы тока и напряжения разряда, а также ионный ток насыщения зонда. Видно, что после выключения импульса тока (t = 150 мкс) плазма рекомбинирует в течение сотен микросекунд.

На Рис. За приведены осциллограммы ионного тока насыщения зонда (напряжение на зонде – 60 В) на различных расстояниях Z от мишени. Здесь Z = 0 соответствует краю магнетрона на выходе. Зонд расположен на радиусе R = 6 см, т.е. на 1 см от боковой поверхности катода-мишени. Время достижения максимума тока возрастает по мере увеличения расстояния от дна (Z = -11 см). Разряд начинается в глубине мишени, а затем распространяется к выходному сечению. При этом в течение начального периода (t<15 мкс) внутри мишени (Z<0) ток отрицательный. Это свидетельствует о наличии электронов с энергией более 60 эВ. Ток зонда на расстоянии Z = 17 см от среза мишени имеет 2 максимума.



Рис.3. a) ионный ток зонда во время импульсного разряда внутри и снаружи полого катода; б) динамика ионного тока зонда на различных радиусах на расстоянии 19 см от катода.

На Рис. Зб показано распределение по радиусу ионного тока зонда, установленного на расстоянии Z = 19 см. Ионный ток зонда также имеет 2 максимума. Первый максимум на разных радиусах достигается в одинаковое время и совпадает по времени с максимумом разрядного тока. Время второго максимума ближе к концу импульсного тока увеличивается с ростом радиуса.

На Рис.4 а-г показано как изменяется в течение импульсного разряда интенсивность излучения спектральных линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии Z = 19 см от магнетрона. Интенсивность атомов аргона (Ar696.5 нм) (газа, в котором производится разряд) нарастает с увеличением тока разряда и максимум излучения (t=25 мкc) достигается немного ранее максимума тока (t = 60 мкc) (Pиc.4a). Интенсивность излучения распыленных с поверхности мишени атомов меди (Cu276.6 нм) медленно нарастает в течение разряда и максимум интенсивность излучения атомов меди (Cu276.6 нм) медленно нарастает в течение разряда и максимум интенсивности расположен вблизи выключения тока (t=200 мкc) (Pиc.46). Интенсивность излучения ионов аргона (Ar⁺480.6 нм) имеет достигает максимума в момент t = 60 мкс, это время совпадает с 1-м максимумом ионного тока (Pиc.36). Затем интенсивность излучения ионов аргона начинает уменьшаться (Pиc.4в). Интенсивность излучения ионов аргона начинает уменьшаться (Pиc.4в). Интенсивность излучения в момент t = 180-190 мкс. – время появления 2-го максимума ионного тока (Puc.36).

На основании зондовых и спектральных измерений можно предложить следующую трактовку динамики разряда. Разряд начинается в глубине катода вблизи его цилиндрической поверхности, а затем распространяется к выходному сечению. К моменту



Рис.4. Динамика излучения линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии Z = 19 см от среза мишени.

времени t = 60 мкс разрядный ток достигает максимума, затем начинает уменьшаться. Такое поведение тока объясняется уменьшением концентрации атомов аргона в магнетроне вследствие 2-х причин: во-первых, - поток ионов, выходящий из катода в результате столкновений с атомами выталкивает их (ионный ветер); во вторых - температура газа возрастает и при постоянном давлении концентрация падает. Измерения потенциала плазмы вдоль оси Z показали, внутри катода потенциал отрицательный (порядка десятков вольт), а снаружи катода он положительный (около 10 В). Таким образом, для ионов, находящихся внутри катода, создается потенциальный барьер, преодолеть который могут только ионы, обладающие большой энергией. Замагниченные электроны наиболее легко могут уходить из цилиндрической мишени вдоль оси разряда, где магнитное поле наименьшее. Электроны вытягивают из магнитной ловушки часть высокоэнергетичных ионов, которые не замагничены и могут уходить из катода по разным радиусам. К времени t = 60 мкс эта группа в основном ионов аргона и меди достигают расстояния Z = 19 см от выходного сечения. Оценка скорости этой группы порядка 2.5-3 км/с.

В последующие моменты времени разряда ток уменьшается, также падает потенциал плазмы, образующий барьер для ионов. Создаются условия для выхода оставшейся части ионов, что отражается на появлении 2-го максимума на ионном токе и увеличении интенсивности излучения ионов меди.

На рис.5 представлены распределения температуры электронов и концентрации ионов вдоль оси Z, снятые на радиусе R = 6 см в момент времени t = 100 мкс для двух значений тока электромагнита. Видно, что температура и концентрация сильно зависят от конфигурации магнитного поля и достигают максимальных значений вблизи выходного сечения. Вероятно, это связано с большим азимутальным током, протекающим в этой области.



Рис.5. Температура электронов - а) и концентрация плазмы - б) внутри и снаружи магнетрона в момент времени разряда t = 100 мкс на радиусе R = 6 см для 2-х значений тока электромагнита

Выполнены зондовые и спектральные измерения временных характеристик импульсно-периодического разряда. Определены распределение параметров плазмы внутри и снаружи магнетрона. Проведенные измерения показали сложную картину процессов, происходящих в импульсном магнетронном разряде с полым катодом и для более полного понимания необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Hopwood, F. Qian. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering J. Appl. Phys. 1995 V. 78, p.758-765.

2. J. Hopwood. Ionized physical vapor deposition of integrated circuit interconnects. J.Phys. Plasmas 1998, V.5, pp.1624-1631.

3. S.M. Rossnagel. Thin film deposition with PVD and related technologies.J. Vac. Sci. Technol. 2003, V.21, p.74-81.

4. S. M. Gorbatkin, S. M. Rossnagel. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma. J. Vac. Sci. Technol. 1996, V.14B, p.1853-1859.

 N. P. Poluektov, V. N. Kharchenko, and I. G. Usatov. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. Plasma Physics Reports, Vol. 27, No. 7, 2001, pp. 625–633.
L. Meng, R. Raju, R. Flauta, H. Shin, D. N. Ruzic. J.Vac.Sci.Technol. 2010, V. 28 A, p.112.
L. Wu, E. Ko, A. Dulkin, K. J. Park, S. Fields, K. Leeser, L. Meng, D. N. Ruzic, Rev. Sci.

Instrum. 2010, V.81, p.123502.

8. A. Dulkin, E. Ko, L. Wu, I. Karim, K. Leeser, K. J. Park, L. Meng, D. N. Ruzic, J.Vac.Sci.Technol. 2011, V.29A, p.041514-1.

9. N.P.Poluektov, Yu. P. Tsar'gorodtsev, I. I. Usatov, A. G. Evstigneev, I. A. Kamyschov. Ionization Fraction of the Sputtered Metal Flux in a Hollow Cathode Magnetron. Plasma Physics Reports, 2014, Vol. 40, No. 9, pp. 754–759.

10. N.P.Poluektov, Yu. P. Tsar'gorodtsev, I. I. Usatov, A. G. Evstigneev, I. A. Kamyschov. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. Plasma sources Science and Technology. 2015, V.24, pp. 035009-035015.

11. J. Alami, J. T. Gudmundsson, J. Bohlmark, J. Birch, U. Helmersson. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 2005, V.14, pp. 525–531.

Figure captions.

Fig.1. Scheme and photo of the installation of a magnetron discharge with a hollow cathode. Fig.2. a) Current and voltage of the HiPIMS discharge, b) Ion saturation current of the probe at a distance of 19 cm from the magnetron. 10 mTorr, W = 4.42 J, $P_{imp} = 29.5$ kW, $P_{mean} = 440$ W. Fig.3. a) the ion current of the probe during a pulsed discharge inside and outside the hollow cathode; b) the dynamics of the ion current of the probe at different radii at a distance of 19 cm from the cathode.

Fig.4. Time dependence of atom and ion spectral lines at a distance Z = 19 cm from the target section.

Fig.5. The electron temperature - a) and the plasma concentration - b) inside and outside the magnetron at the discharge time $t = 100 \ \mu s$ at a radius of $R = 6 \ cm$ for 2 values of the electromagnet current.

Сведения об авторах.

1. Полуэктов Николай Павлович, проф., д.т.н., зав. секцией физики, 141005, Мытищи, Моск. обл., 1-я Институтская ул., д.1

тел.498-687-40-94. E-mail: poluekt@mgul.ac.ru

2. Усатов Игорь Игоревич, доц., к.т.н.

- 3. Царьгородцев Юрий Петрович, доц., к.т.н.
- 4. Евстигнеев Алексей Георгиевич, инженер.

Authors

- 1. N.P.Poluektov, Prof, Dr.
- 2. Yu.P.Tsar'gorodsev, Ass.prof., Dr.
- 3. I.I. Usatov, Ass.Prof., Dr.
- 4. A.G. Evstigneev, Engineer.

1st Institutskaya street, 1, 141005, Mytischi, Moscow region, Russia