

Особенности инжекции электронов из плазмы эмиттерного разряда в планарную магнетронную распылительную систему

М. В. Шандриков, Е. М. Окс, А. А. Черкасов

Изучены особенности инжекции электронов из плазмы эмиттерного разряда в разрядную систему планарного магнетронного разряда. В качестве эмиттерного разряда использовались тлеющий разряд с полым катодом и вакуумная дуга. Инжекция электронов осуществлялась через центральное отверстие в мишени магнетрона. Давление рабочего газа (аргон) в вакуумной камере составляло 0,05–0,09 Па. Эмиттерный тлеющий разряд в полым катодом функционировал как в слаботочном непрерывном режиме (10–100 мА), так и в сильноточном импульсном режиме (10–20 А, 25 мкс, 1 Гц). Вакуумный дуговой эмиттер функционировал в импульсном режиме (10–60 А, 200 мкс, 1 Гц). Измерены токи эмиссии для различных конфигураций разрядной системы, в том числе определены условия, обеспечивающие полное переключение электронного компонента тока эмиттера в разрядную систему магнетронного распылителя.

Ключевые слова: магнетронный разряд, плазма, инжекция электронов, коллектор.

DOI: 10.51368/1996-0948-3-17-24

1. Введение

Распылительные системы на основе планарного магнетронного разряда занимают лидирующее положение в индустрии создания защитных и функциональных покрытий. Поскольку энергия распыленных частиц в разряде на порядок превышает энергию атомов при термическом испарении, это обеспечивает более плотную структуру и лучшую адгезию осаждаемых пленок. Благодаря наличию скрещенных $E \times B$ полей магнетронный разряд выгодно отличается от обычного тлеющего разряда более эффективной ионизацией, что

обеспечивает его функционирование в области низких давлений порядка 1 мТорр и выше. При более низких давлениях разряд переходит из сильноточной низковольтной формы горения с напряжением в несколько сотен вольт в высоковольтную форму с напряжением горения выше 1 кВ и током в единицы мА [1, 2], которая не представляет практического интереса для осаждения покрытий.

Снижение рабочего давления магнетронных распылительных систем важно, как для повышения качества покрытий, так и для увеличения эффективности транспортировки распыленных атомов до мишени [3–6]. Предложенный нами ранее метод инжекции дополнительных электронов в планарный магнетрон с обратной стороны катода-мишени значительно расширяет диапазон рабочих параметров [7]. Электроны в этом случае инжектируются непосредственно в область катодного падения потенциала и ускоряются в нем также, как и γ -электроны, выбитые из мишени в результате ионно-электронной эмиссии. Эмиссия инжектированных электронов осуществляется из плазмы эмиттерного (эмиттер-

Шандриков Максим Валентинович¹, с.н.с., к.т.н.

E-mail: shandrikov@oree.hcei.tsc.ru

Окс Ефим Михайлович^{1,2}, профессор, д.т.н.

Черкасов Александр Алексеевич¹, аспирант, инженер.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2022 г.

© Шандриков М. В., Окс Е. М., Черкасов А. А., 2022

ного) разряда с полым катодом. По сути, такой подход эквивалентен увеличению локальной эмиссионной способности мишени. Поскольку коэффициент ионизационного усиления электрона в тлеющем разряде составляет величину порядка 10 [8], то инжекция в катодный слой магнетрона даже относительно малой дополнительной порции электронов приводит к значительному влиянию на характеристики и условия горения разряда, в том числе и на его стабильное горение в высоко-точной низковольтной форме в области предельно низких давлений.

На сегодняшний день актуальным остался вопрос об эффективности извлечения электронов из плазмы эмиттерного разряда и их инжекции в разрядную область планарной магнетронной распылительной системы. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по измерению тока инжектированных электронов в такой системе, как в непрерывном, так и в импульсном режиме горения эмиттерного разряда с существенно большим током. Важность изучения особенностей импульсной инжекции электронов связана с возможностью

реализации режима самораспыления импульсного планарного магнетрона в области низких давлений.

2. Описание эксперимента

Измерение тока инжектированных электронов проводилась на макете двухступенчатой газоразрядной системы на основе магнетронного разряда с центральной инжекцией электронов. В качестве эмиттера электронов использовался газовый разряд с полым катодом (рис. 1а), либо вакуумно-дуговой разряд со стержневым катодом (рис. 1б).

Для частичного экранирования области горения эмиттерного разряда от магнитного поля внутреннего кольцевого магнита полый катод 1 эмиттерного разряда длиной 45 мм был выполнен из магнитной стали (рис. 1а). Эксперименты проводились с использованием двух полых катодов с внутренним диаметром 10 и 5 мм, соответственно. Полый катод имел водяное охлаждение, расположенное на торце электрода. Рабочий газ в вакуумную камеру подавался в том числе через торец полого катода.

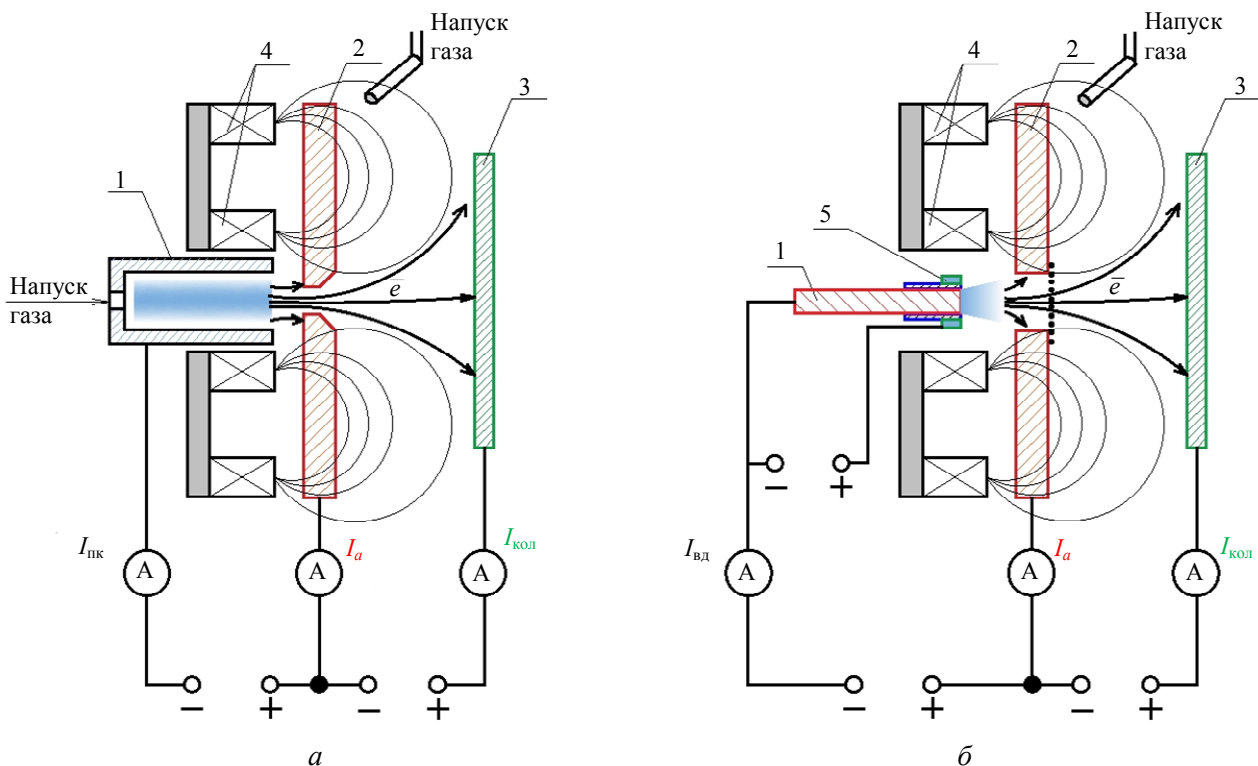


Рис. 1. Схема измерения тока инжектированных электронов в непрерывном (а) и импульсном (б) режимах: 1 – катод эмиттерного разряда; 2 – мишень магнетрона (анод эмиттерного разряда); 3 – коллектор электронов; 4 – магнитная система; 5 – поджигающий электрод

В экспериментах с вакуумным дуговым эмиттером электронов (рис. 1б) для создания предварительной плазмы использовался дополнительный предварительный пробой (2,5 А, 25 мкс) по поверхности керамического кольцевого изолятора между электродами 1 и 5 (рис. 1б). Цилиндрический катод дугового разряда диаметром 6 мм был выполнен из меди и также имел водяное охлаждение, расположенное на торце. Рабочий газ в этом случае подавался только в вакуумную камеру.

Анодом эмиттерного разряда в обоих случаях являлся катод-мишень 2 планарного магнетрона. Диаметр и толщина медной мишени составляли 125 мм и 3 мм, соответственно. В центре мишени было выполнено отверстие для инъекции электронов. В экспериментах с тлеющим разрядом с полым катодом это отверстие дополнительно обеспечивало перепад давления между областями горения эмиттерного и планарного магнетронного разрядов. Диаметр отверстия составлял от 1 до 3 мм. Для стабилизации плазменной границы отверстие диаметром 3 мм перекрывалось мелкоструктурной вольфрамовой сеткой, либо выполнялось в виде многоапертурного электрода с высокой геометрической прозрачностью (до 60 %). За отверстием в мишени, со стороны магнетронного разряда, устанавливался плоский коллектор 3 диаметром 40 мм, изготовленный из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Расстояние L от отверстия в мишени до коллектора варьировалось в экспериментах в пределах 5÷15 мм, а положительный относительно катода-мишени потенциал коллектора составлял величину от 0÷400 В. Измерения тока проводились в цепях полого катода ($I_{\text{ПК}}$), катода-мишени магнетрона (I_a) и коллектора ($I_{\text{кол}}$).

Системой постоянных NdFeB магнитов марки N35 над поверхностью мишени формировалось арочное магнитное поле, характерное для стандартного сбалансированного планарного магнетронного разряда. Внешнее кольцевое магнитное поле магнетрона формировалось набором из 28 магнитов размером 20×10×10 мм. Внутреннее магнитное поле обеспечивалось кольцевым NdFeB с размерами 37×27×15 мм. Величина магнитного поля в центре арки на расстоянии 1 см от плоскости мишени составляла 100 мТл. Для предотвра-

щения зажигания самостоятельного магнетронного разряда, искажающего результаты измерений, на электроды магнетронного разряда напряжение в этом случае не подавалось, а анод магнетрона находился под плавающим потенциалом. Ток эмиттерного разряда и ускоряющее напряжение на коллектор обеспечивалось от изолированных источников питания, имеющих функцию защиты от дуги с детектированием тока.

Расход рабочего газа (аргон) контролировался посредством электронного регулятора расхода газа (РРГ, Элточприбор) и составлял 5–15 см³/м. Из-за низкой проводимости эмиссионного отверстия при протекании газа давление в разрядной системе эмиттерного разряда превышало давление в области магнетронного разряда. Для диаметра отверстия 2 мм, перепад давления составлял 0,25 Торр, что фактически означает, что при давлении в вакуумной камере уровня 0,7 мТорр и ниже, давление в катодной полости эмиттера составляло порядка 0,25 Торр.

В экспериментах перепад давления на отверстии обеспечивал стабильное функционирование непрерывного тлеющего разряда в диапазоне значений тока 1–100 мА при давлении в вакуумной камере вплоть до 6×10^{-5} Торр. В импульсной форме горения разряда амплитуда тока эмиттерного разряда составляла до 10÷20 А. Длительность импульса колоколообразной формы составляла 20 мкс при частоте следования 1 Гц.

При использовании вакуумного дугового эмиттера, давление в области его катода соответствовало давлению в вакуумной камере. Питание разряда осуществлялось от формирующей линии, обеспечивающей импульс прямоугольной формы длительностью 200 мкс с амплитудой тока от 1 до 60 А.

Измерение тока в цепях полого катода, мишени и коллектора проводилось с использованием токовых поясов Pearson (Model 101). Для измерения напряжения на разрядных промежутках использовались высоковольтный делитель напряжения Testec HVP-15HF, мультиметры Fluke 17B и Актacom АМ-1118В. Осциллограммы токов и напряжения регистрировались на цифровых осциллографах Tektronix TDS 2024В и Tektronix DPO 2024. Вакуумная камера длиной 60 см и диаметром

40 см была выполнена из нержавеющей стали и откачивалась турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 500 л/с.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Тлеющий эмиттерный разряд с полым катодом (непрерывный режим)

После подачи рабочего газа и напряжения на разрядный промежуток, первоначальное зажигание эмиттерного разряда происходило между торцом полого катода и обратной стороной мишени магнетрона, которая электрически являлась анодом эмиттерного разряда. ВАХ эмиттерного разряда показывает, что проникновение плазмы в полый катод и возникновение т. н. эффекта полого катода [9] происходило при величине тока эмиттерного разряда выше 5 и 20 мА для внутреннего диаметра полого катода 10 и 5 мм, соответственно.

Для указанных значений пороговых токов оценки протяженности прикатодного слоя по закону Чайльда-Ленгмюра при напряжении 500 В дают близкие к радиусу полости значения $d \approx 4,8$ мм и $d \approx 2,7$ мм, соответственно. Возникновение эффекта полого катода обеспечивало практически пологую вольтамперную характеристику эмиттерного разряда с катодной полостью диаметром 10 мм при давлении уровня 4×10^{-4} Торр при напряжении горения порядка 300 В. Для катодной полости меньшего внутреннего диаметра (5 мм) напряжение горения было приблизительно на 25 В ниже.

Измерения величины токов в цепях электродов показало (рис. 2), что при разности потенциалов между мишенью и коллектором менее 15 В, ток электронов из полого катода замыкается преимущественно на катод-мишень магнетрона. Дальнейшее увеличение положительного потенциала приводило к резкому возрастанию тока в цепи коллектора ($I_{\text{кол}}$) и пропорциональному снижению тока в цепи мишени (I_a). При величине положительного потенциала 35–40 В происходило практически полное переключение электронного тока с анода (мишени) на коллектор, по сути имитирующий границу плазму основного магнетронного разряда. В этом отношении процесс аналогичен переключению электрон-

ного тока в системе с плазменным катодом в отсутствие внешнего магнитного поля [10].

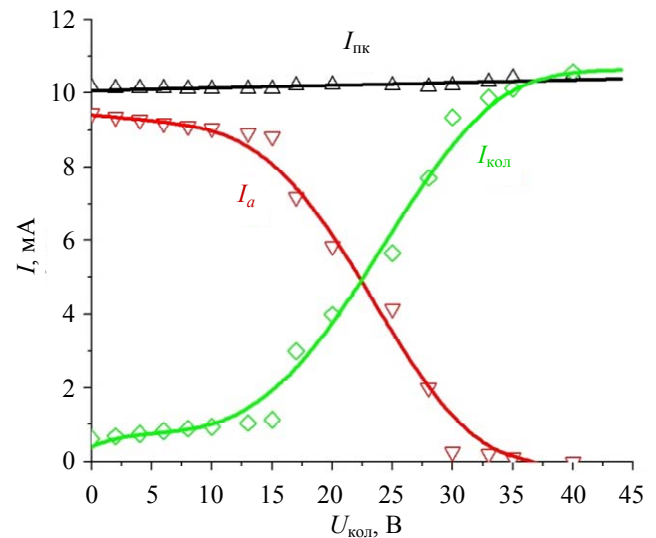


Рис. 2. Ток в цепях разряда в зависимости от потенциала коллектора. Непрерывный режим, $I_{\text{нк}} = 10$ мА, $p = 0,09$ Па, $L = 15$ мм

Увеличение расстояния от мишени до коллектора приводит к смещению точки переключения электронного тока (ток в цепи мишени становится равен нулю) в область более положительных значений потенциала коллектора в среднем на 10–20 В (рис. 3). Аналогичная зависимость наблюдается при уменьшении диаметра отверстия. В среднем уменьшение диаметра отверстия на 1 мм приводит к пропорциональному смещению кривых в область более положительных значений потенциала в среднем на 5–10 В. Поскольку напряжение основного магнетронного разряда составляет, как правило, не менее 300 В, можно сделать однозначный вывод, что при наличии плазмы основного магнетронного разряда в непосредственной близости от отверстия мишени (менее 5 мм) в подобной разрядной системе обеспечиваются условия для полного переключения электронного тока из полого катода эмиттерного разряда на плазму основного магнетронного разряда, находящуюся приблизительно под потенциалом анода магнетронного разряда. Т. е. величина тока инжектированных электронов в этом случае будет полностью определяться величиной тока эмиттерного разряда. Превышение тока коллектора над током эмиттерного разряда можно объяснить дополнительной ионизацией инжектируемыми электронами в области, приле-

гающей к отверстию в катоде–мишени, а также γ -процессами с поверхности полого катода обратным потоком ионов. За счет локально высокого рабочего давления в области эмиттера, длина ионизационного пробега сравнима с характерными размерами разрядного промежутка.

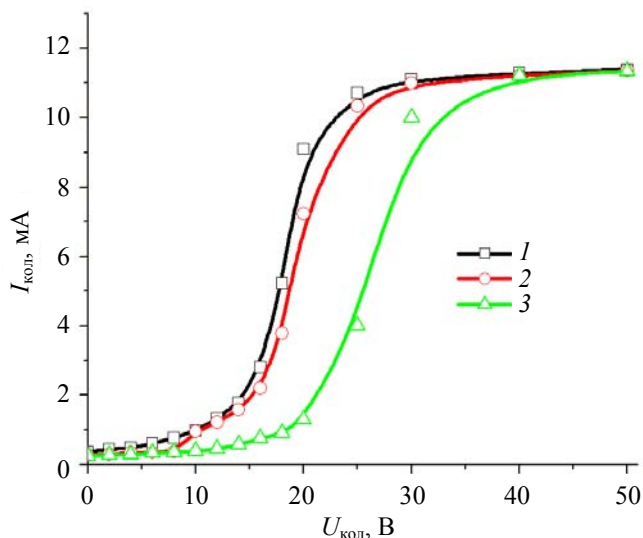


Рис. 3. ВАХ коллектора в зависимости расстояния до коллектора. Расстояние до коллектора: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 15 мм. Диаметр отверстия 2 мм. Непрерывный режим, $I_{пк} = 10$ мА, $p = 0,09$ Па

Необходимо отметить, что в экспериментах с использованием эмиссионного отверстия малого диаметра (1 мм и менее) не удалось обеспечить переключение электрон-

ного тока на коллектор даже при положительном потенциале вплоть до 200 В. Кроме того, эксперименты показали, что увеличение разности потенциалов на промежутке «мишень–коллектор» при переключении электронного тока в режиме стабилизации тока эмиттерного разряда приводит к снижению напряжения между электродами «полый катод–мишень» приблизительно на 40 В. При этом суммарное падение напряжения на участках «полый катод–мишень» + «мишень–коллектор» после переключения электронного тока на коллектор всегда выше на величину приблизительно 6–9 В напряжения горения разряда на участке «полый катод–мишень» при замыкании электронного тока только на мишень и практически не зависит от диаметра отверстия в диапазоне 1,5–3 мм.

3.2. Глеющий эмиттерный разряд с полым катодом (импульсный режим)

В сильноточном импульсном режиме эмиттерного разряда зависимость тока в цепях электродов разрядной системы от потенциала коллектора имеет вид аналогичный непрерывной форме разряда (рис. 4). Однако за счет увеличения концентрации плазмы и сокращения протяжённости прикатодного слоя вблизи мишени, извлечение электронов на коллектор наблюдалось и для отверстия диаметром 1 мм.

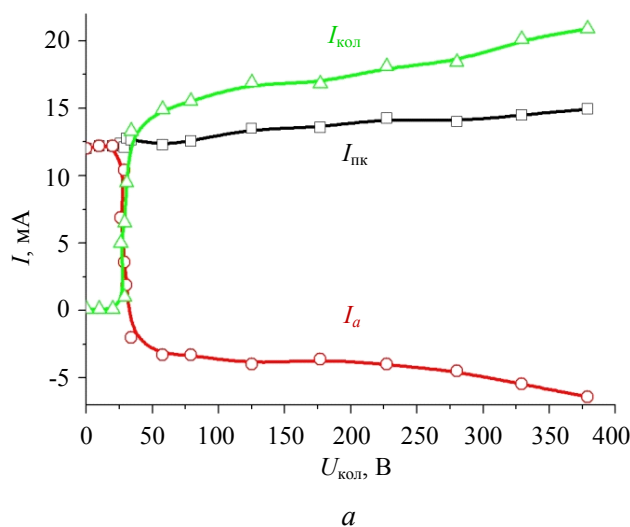


Рис. 4. Инжекция электронов в импульсном режиме работы эмиттера: а) ток в цепях разрядной системы в зависимости от потенциала коллектора (диаметр отверстия 1 мм); б) фотография пучка электронов в области эмиссионного отверстия (диаметр отверстия 3 мм). Ток эмиттерного разряда 12,5 А (25 мкс), $L = 10$ мм, $p = 0,09$ Па

Полное переключение электронов из плазмы полого катода на коллектор (ток в цепи анода-мишени равен нулю) происходило при потенциале приблизительно 50 В, после чего ток коллектора выходил в насыщение (рис. 4а). Как и в случае непрерывного разряда с ростом потенциала коллектора в диапазоне 50–200 В наблюдалось увеличение тока в цепи полого катода и коллектора за счет дополнительной ионизации инжектированными электронами в области эмиссионного отверстия, а также за счет дополнительных γ -процессов, вызванных обратным потоком ионов в полый катод, однако в сильноточном режиме этот эффект был выражен гораздо сильнее.

С увеличением напряжения на коллекторе более 200 В в кольцевой зоне распыления мишени возникало слабое свечение плазмы магнетронного разряда, что приводило к дополнительному возрастанию тока на коллектор, который в этом случае выступал анодом магнетронного разряда.

Эксперимент с эмиссионным отверстием диаметром 3 мм, перекрытой мелкоструктурной вольфрамовой сеткой, показал, что характер переключения электронов на коллектор не изменяется. Однако область насыщения тока коллектора выражена более характерно, а дополнительный рост тока, связанный с возникновением магнетронного разряда сдвинут в область более положительных значений потенциала коллектора (~300 В). Пучок электронов при этом имеет четкие границы и распространяется на расстояние кратно превышающее диаметр выходного отверстия (рис. 4б).

3.3. Вакуумный дуговой эмиссионный разряд (импульсный режим)

Переход к вакуумному дуговому разряду в эмиттере электронов снимает ограничение на использование эмиссионных отверстий малого диаметра для поддержания требуемого перепада давления между областями магнетронного и эмиссионного разрядов. В этом случае эффективная площадь эмиссии может быть увеличена кратно, что в свою очередь обеспечивает более равномерную тепловую нагрузку и увеличение ресурса эмиссионного

канала, а также более эффективное распределение инжектированных электронов в области магнетронного разряда. При этом уменьшение напряжения горения вакуумной дуги позволяет в 4–5 раз снизить мощность эмиттера при тех же значениях разрядного тока по сравнению с тлеющей формой разряда. Защита от микрокапельной фракции в данном случае может осуществляться за счет геометрии разрядной системы как на эмиссионном электроде, так и за счет электрода-отражателя, находящегося непосредственно за эмиссионным отверстием, что исключает возможность прямого пролета микрокапель из области эмиттера в область расположения подложки.

Характер поведения тока в цепях электродов разрядной системы от потенциала коллектора при извлечении электронов из плазмы вакуумного дугового разряда аналогичен зависимостям, полученным для импульсного тлеющего разряда с полым катодом. Основное переключение электронов с анода-мишени на коллектор происходило в диапазоне значений потенциала коллектора 30–60 В. Величина извлекаемого электронного тока линейна в диапазоне тока вакуумного дугового разряда 10–60 А независимо от геометрической формы эмиссионного электрода (одно- или многоапертурный). Однако в отличие от эмиттера на основе тлеющего газового разряда, в режиме вакуумного дугового разряда в отсутствие ускоряющего потенциала коллектора, ток анода не равен току катода эмиттера. Физическое объяснение этому эффекту связано с тем, что в плазме вакуумной дуги присутствует группа высокоэнергетичных электронов, формирующаяся на переднем фронте тока дугового разряда. Энергия этой первичной группы электронов достигает нескольких сотен эВ и значительно превышает среднюю энергию термализованных электронов вакуумной дуги в установившемся квазистационарном режиме (2–5 эВ). Данная группа формируется в первые микросекунды развития вакуумного дугового разряда, когда плазменный факел под действием градиента электронного давления, поддерживаемого джоулевым нагревом начинает расширение из области катодного пятна, в то время как напряжение, приложенное к разрядному промежутку ($U_{\text{XX}} = 700$ В) еще не успело снизиться до установившегося значе-

ния напряжения горения квазистационарного режима дугового разряда (~100 В). При этом, как было показано в работе [11], ускорение таких электронов происходит преимущественно в направлении нормали к поверхности катода. Таким образом, при извлечении электронов из плазмы вакуумного дугового разряда при нулевом потенциале коллектора его ток не равен нулю и определяется в первую очередь геометрической прозрачностью эмиссионного электрода. Временная задержка магнетронного разряда относительно вакуумного дугового разряда обеспечивает два характерных скачка плавающего потенциала коллектора, синхронизованных с моментами нарастания токов разряда. Величина плавающего потенциала коллектора резко уменьшалась по мере удаления от эмиссионного отверстия вследствие расширения инжектированных электронов по силовым линиям магнитного поля в полусфере, ограниченной поверхностью мишени магнетрона. Вблизи эмиссионного отверстия плавающий потенциал коллектора достигал значений -980 В. При этом выключение источника питания магнетрона приводило к уменьшению потенциала до -280 В, что свидетельствует о том, что максимальная энергия инжектированных электронов определяется не только ускорением в плазме эмиттерного разряда, но и ускорением в прикатодном слое магнетронного разряда.

Заключение

В двухступенчатой разрядной системе магнетронного распылителя изучены особенности инжекции электронов из плазмы эмиттерного разряда в разрядную систему планарного магнетрона. Установлено, что уже при относительно небольшом извлекающем электроны потенциале (порядка 50 В), реализуются переключение электронов из плазмы эмиттерного разряда на коллектор, имитирующий границу плазмы основного магнетронного разряда. При этом уменьшение диаметра отверстия для инжекции электронов, как и расстояния от мишени до коллектора приводят к смещению точки переключения электронного тока в область более положительных значений потенциала коллектора на 5–10 В. Насыщение электронного тока на коллектор наблюдается уже при подаче положительного потенциала

уровня 100 В, что кратно ниже реальных значений потенциала плазмы магнетронного разряда относительно мишени. В разрядной системе с сеточной стабилизацией эмиссионной границы величина извлекаемого электронного тока определяется геометрической прозрачностью эмиссионного электрода. При этом использование в качестве эмиттера плазмы вакуумного дугового разряда, не требующего организации перепада давления, позволяет значительно увеличить размер эмиссионного электрода без риска нарушения стабилизации плазменной границы и прикатодного слоя, в котором происходит ускорение инжектированных электронов в магнетронный разряд.

Результаты проведенных исследований позволяют более обоснованно подходить к выбору параметров и условий для достижения максимально возможного тока инжекции электронов в разрядную систему планарного магнетрона и тем самым обеспечения устойчивого функционирования магнетронного распылителя в области предельно низких давлений.

*Исследование выполнено за счет
гранта Российского научного фонда
(проект 21-19-00136).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов К. Н. // ТВТ. 1978. Т. 16. № 6. С. 1121.
2. McClure G. W., Granzow K. D. High-Voltage Glow Discharges in D2 Gas. II. Cathode Fall Theory // Phys. Rev. 1962. Vol. 125. P. 3.
3. Craig S., Harding G. L. // Journal of Vacuum Science & Technology. 1982. Vol. 21. P. 833.
4. Chan K.Y., Teo B. S. // IET Sci. Meas. Technol. 2007. Vol. 1. (2). P. 87.
5. Helmer J. C., Wickersham C. E. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1986. Vol. 4. P. 408.
6. Свадковский И. В. // Доклады БГУИР. 2007. № 2 (18).
7. Shandrikov M. V., Bugaev A. S., Vizir A. V., Oks E. M., Yuskov G. Yu. Planar magnetron sputtering with supplementary electron injection // Vacuum. 2017. Vol. 143. P. 458.
8. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. – М.: Наука, 1971.
9. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. – М.: Энергия, 1969.
10. Жаринов А. В., Коваленко Ю. А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 4. С. 681.
11. Muzukin I. L. // IEEE Transactions on plasma science. 2005. Vol. 33 (5). P. 1560.

Special features of electron injection from an emitter discharge plasma into a planar magnetron sputtering system

M. V. Shandrikov¹, E. M. Oks^{1,2}, and A. A. Cherkasov¹

¹ Institute of High Current Electronics Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: shandrikov@opee.hcei.tsc.ru

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

Received April 28, 2022

The special features of the central injection of electrons from the emitter discharge plasma into the discharge system of a planar magnetron are studied. A glow discharge with a hollow cathode and a vacuum arc were used as an emitter discharge. The injection of electrons was carried out through the central hole in the magnetron target. The pressure of the working gas (argon) in the vacuum chamber was 0.05–0.09 Pa in the case of glow discharge emitter. The emitter glow discharge in the hollow cathode functioned in both low-current continuous mode (10–100 mA) and high-current pulse mode (10–20 A, 25 microseconds, 1 Hz). The vacuum arc emitter operated in pulse mode (10–60 A, 200 microseconds, 1 Hz). Emission currents were measured for various configurations of the discharge system, including the conditions for the complete switching of the electronic component of the emitter current into the discharge system of the magnetron sputter.

Keywords: magnetron discharge, plasma, electron injection, collector.

DOI: 10.51368/1996-0948-3-17-24

REFERENCES

1. K. N. Ulyanov, High Temperature **16**, 1121 (1978).
2. G. W. McClure and K. D. Granzow, Physical Review **125**, 3 (1962).
3. S. Craig and G. L. Harding, Journal of Vacuum Science & Technology **21**, 833 (1982).
4. K. Y. Chan and B. S. Teo, IET Sci. Meas. Technol. **1**, 87 (2007).
5. J. C. Helmer and C. E. Wickersham, Journal of Vacuum Science & Technology A **4**, 408 (1986).
6. I. V. Swadkovsky, Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, No. 2, 112 (2007).
7. M. V. Shandrikov, A. S. Bugaev, A. V. Vizir, E. M. Oks, and G. Yu. Yuskov, Vacuum **143**, 458 (2017).
8. V. L. Granovsky, *Electric current in gas. steady current* (Moscow, Nauka, 1971) [in Russian].
9. B. I. Moskalev, *Discharge with a hollow cathode* (Moscow, Energia 1969) [in Russian].
10. A. V. Zharinov, Yu. A. Kovalenko, I. S. Roganov, and P. M. Tyuryukanov, Soviet Physics: Technical Physics **56**, 687 (1986).
11. I. L. Muzukin, IEEE Transactions on plasma science **33** (5), 1560 (2005).