

## Исследования влияния некоторых параметров разряда с полым холодным катодом на магнетронный разряд и массзарядовый состав магнетронной плазмы

*А.С. Бугаев\**, *А.В. Визирь*, *В.И. Гушенец*, *Е.М. Окс*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*bugaev@opee.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** В докладе приводятся экспериментальные результаты исследований по влиянию разряда в полном катоде на характеристики сильноточного импульсного магнетронного разряда и массзарядовый состав магнетронной плазмы. Исследования проводились с использованием доработанного магнетрона, в центральной части мишени которого встроена малогабаритная разрядная система с полым катодом. Магнетрон (как и полый катод) работал на аргоне и с медной мишенью. Как было установлено в экспериментах, в определенных условиях наблюдалось зажигание дополнительного несамостоятельного разряда в ячейке с полым катодом, инициируемого магнетронным разрядом. Амплитуда этого несамостоятельного разряда в полном катоде в сильной степени зависит от внутреннего сопротивления источника питания, подключенного к полному катоду. Зажигание этого разряда сопровождается значительным снижением напряжения горения магнетронного разряда. С использованием времяпролетного спектрометра было изучено влияние на массзарядовый состав ионного пучка, извлекаемого из плазмы комбинированного разряда, величины тока разряда в полном катоде. В зависимости от отношения разрядных токов в катодной полости и в магнетроне содержание ионов меди в сформированном ионном пучке изменялась от 90% до 10% и менее.

**Keywords:** планарный магнетрон, полый катод, мишень, времяпролетный спектрометр, вольтамперная характеристика.

### 1. Введение

Исследования по повышению эффективности магнетронного распыления за счет совместного использования импульсного магнетронного разряда и дополнительной разрядной области с полым катодом имеют важное значение для развития технологий нанесения покрытий, что, в свою очередь, востребовано в различных областях науки и технологии. Магнетронные распылительные системы являются одним из типов газоразрядных систем, в которых используются скрещенные электрические и магнитные поля. Электрические параметры такой разрядной системы в сильной степени зависят от рабочего давления, величины и конфигурации магнитного поля и т.д.

Магнетронные системы нашли широкое применение из-за присущих им целого ряда неоспоримых достоинств. К достоинствам магнетронной системы относятся, например, отсутствие капельной фракции в полученных покрытиях, одновременное воздействие на поверхность обрабатываемого образца ионами разрядной плазмы и др. Одним из недостатков присущих МРС является относительно высокая степень примесей в полученных покрытиях. В какой-то степени можно нивелировать указанный недостаток снижением рабочего давления в магнетронной системе. Это позволит улучшить качество осажденных покрытий, за счет снижения количества дефектов в пленках, обусловленных захватом рабочего газа пленкой, избежать поверхностных деформаций и разрушения пленок атомами рабочего газа.

Почти в два раза снизить рабочее давление в планарной магнетронной системе удалось за счет дополнительного газоразрядного устройства на основе разряда с полым катодом [1]. В докладе представлены результаты исследований по влиянию магнетронного разряда на поведение разряда с полым катодом, по инициированию разряда в катодной полости магнетронным разрядом и влиянию тока разряда с полым катодом на компонентный состав ионов, извлекаемый из плазмы комбинированного разряда.

## 2. Экспериментальная установка и описание эксперимента

Исследованная в работе схема комбинированной разрядной системы приведена на Рис. 1. Мишень 2 магнетрона диаметром 50 мм и толщиной 3 мм была изготовлена из меди. На оси магнетронной распылительной системы за мишенью выполнена полость, в которой установлен полый катод 4, выполненный из нержавеющей трубки с внутренним диаметром 4.0 мм. Для изоляции полого катода от корпуса магнитопровода и предотвращения паразитных разрядов использовалась керамическая трубка 5 с размерами 7.5×5.5 мм. Связь области магнетронного разряда с разрядной областью полого катода осуществлялась через отверстие 6 диаметром 0.8 мм, выполненное в мишени 2. Мишень для разрядной системы с полым катодом являлась анодом. Магнитное поле создавалось двумя кольцевыми магнитами 3.

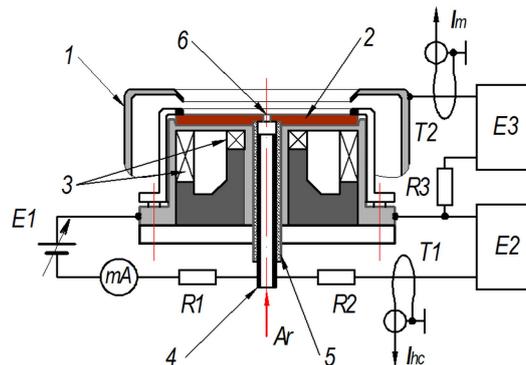


Рис. 1. Схема модифицированного планарного магнетрона: 1 – анод, 2 – мишень, 3 – магниты, 4 – полый катод, 5 – керамическая трубка, 6 – отверстие.  $E1$  – источник постоянного тока,  $E2$ ,  $E3$  – импульсные источники питания,  $I_{kc}$ ,  $I_m$  – токи в цепях полого катода и магнетрона.  $T1$ ,  $T2$  – широкополосные трансформаторы тока.

Для уменьшения задержки и стабилизации момента зажигания импульсных разрядов, как в катодной полости, так и в магнетроне использовали дежурный разряд постоянного тока в системе с полым катодом, с током не более нескольких миллиампер. Для питания разряда постоянного тока использовали нестабилизированный регулируемый источник  $E1$  с напряжением холостого хода до 2 кВ. Ток разряда ограничивался балластным резистором  $R1$  сопротивлением 150 кОм. Для питания импульсных разрядов (как магнетронного, так и дополнительного с полым катодом) использовали импульсные источники питания ( $E2$ ,  $E3$ ) с независимой регулируемой длительностью импульсов и с независимой регулировкой момента подачи напряжения на электроды. Для ограничения токов дуговых разрядов, иногда возникающих во время экспериментов, импульсные источники питания подключались к электродам разрядных систем через балластные резисторы  $R2$ ,  $R3$ .

Экспериментальный стенд, на котором проводились исследования комбинированной разрядной системы оборудован времяпролетным спектрометром, подробно описанным в работах [2, 3]. Вакуумная камера и пролетная труба спектрометра откачивалась турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 900 л/с до остаточного давления  $(2-4) \times 10^{-6}$  Торр. Напуск рабочего газа аргона осуществлялся через катодную полость и регулировался контроллером с электронным регулятором. Измерение давления выполнялось магниторазрядным датчиком в вакуумной камере перед оптической системой времяпролетного спектрометра. Для измерения компонентного состава плазмы, модифицированная система с планарным магнетроном устанавливалась в ионный источник с полым анодом с диаметром эмиссионного окна 5 см. Подбором прозрачности эмиссионной сетки выставлялась требуемая величина тока эмиссии.

### 3. Результаты экспериментов и обсуждение

Если в работе [1] основное внимание в исследованиях уделялось влиянию разряда с полым катодом на магнетронный разряд, то в этой статье приводятся результаты исследований, касающихся в том числе и обратного влияния, а именно: в определенных экспериментальных условиях в режиме мощного импульсного разряда в магнетроне, наблюдаются режимы, когда магнетронный разряд влияет на поведение разряда с полым катодом. Для этого были выполнены измерения токов магнетронного разряда  $I_m$ , тока в цепи полого катода  $I_{hc}$ , и напряжений на электродах комбинированной разрядной системы. Как было установлено в экспериментах зажигание разряда в магнетроне приводит в ряде случаев к существенному росту разрядного тока в цепи полого катода, ток разряда в катодной полости может вырасти в несколько раз (Рис. 2а). И зависит этот прирост тока, как было установлено, от тока магнетронного разряда, величины тока самостоятельного разряда в полой катодной полости (Рис. 2б) и величины балластного резистора ( $R_2$ ) в цепи источника питания разряда с полым катодом. В момент зажигания магнетронного разряда напряжение между полым катодом и мишенью снижается с 300 В до 100 В (Рис. 2б) и даже до 0. Это означает, что мишень в этом случае не выступает в роли анода разряда с полым катодом.

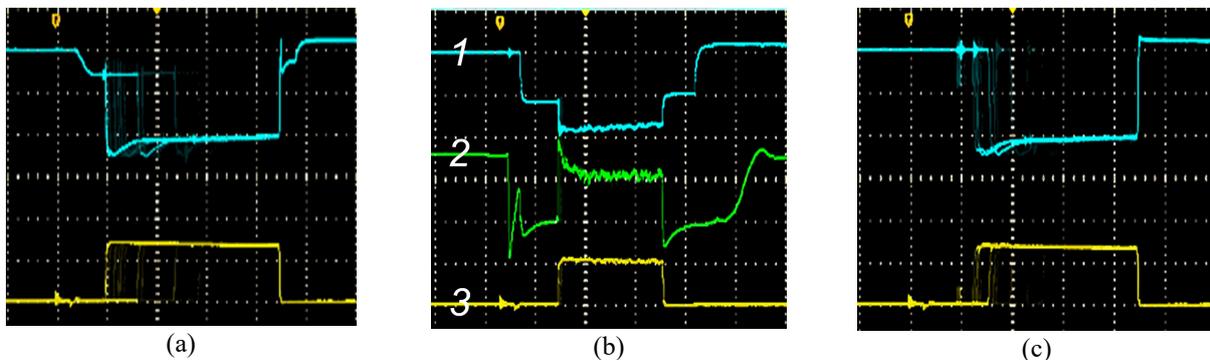


Рис. 2. Осциллограммы токов разряда с полым катодом  $I$  (2 А/дел) и магнетронного разряда  $3$  (5 А/дел), осциллограммы напряжения горения разряда с полым катодом  $2$  (200 В/дел). Чувствительность по горизонтали – 40 мкс/дел. Условия эксперимента  $p = 2.4 \cdot 10^{-4}$  Торр,  $R_2 = 150$  Ом.

В ряде случаев, в определенных условиях, имело место инициирование чисто несамостоятельного разряда в катодной полости магнетронным разрядом. Происходит это при превышении разрядного тока в магнетроне выше некоторого значения, которое зависит от давления, и по тому же сценарию, как инициирование отражательного разряда типа Пеннинга с холодным полым катодом [4]. На Рис. 2с приведены результаты экспериментов по инициированию разряда в полой катодной полости без самостоятельного разряда с полым катодом. Такое инициирование происходило, например, при соединении полого катода с мишенью через резистор ( $R_2$ ) в 150 Ом.

Увеличение сопротивления резистора  $R_2$  в 2.5 раза (до 380 Ом) привело к меньшему значению приращения тока разряда  $I_{hc}$  в полой катодной полости, и оно составило  $\sim 1.5$  А (Рис. 3, осциллограмма  $I$ ), вместо ранее наблюдавшихся 3 ампер. Зажигание разряда в катодной полости, инициированного магнетронным разрядом, приводит к перестройке и самого магнетронного разряда – снижается напряжение горения и увеличивается амплитуда тока магнетронного разряда.

На Рис. 3 приведены результаты эксперимента, в которых момент зажигания разряда в полой катодной полости контролировался с помощью полупроводникового ключа в источнике питания. Когда ключ был выключен, цепь питания полого катода была практически разорвана. В полой катодной полости горел только слаботочный разряд от источника питания постоянного тока с

большим балластным резистором. Инициирование разряда в полном катоде не наблюдалось до момента отпирания ключа. В момент отпирания (помечен на Рис. 3 заретушированным треугольником) транзисторного ключа происходит зажигание разряда в полном катоде с током около 5 А. Спустя приблизительно 60 мкс, после принудительного гашения разряда в магнетроне, амплитуда разряда в полном катоде снижалась на величину 1.5 А и теперь в полном катоде горел только самостоятельный разряд. В результате такого взаимного влияния разрядов вольтамперная характеристика магнетронного разряда претерпела значительное изменение (Рис. 4). Приведенные на Рис. 4 значения токов разряда с полным катодом – это начальный ток (ток самостоятельного разряда в полном катоде) до зажигания магнетронного разряда.

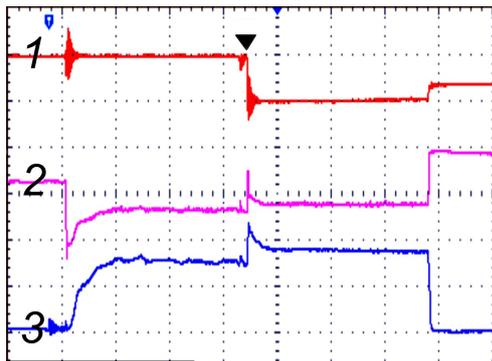


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда с полным  $I$  (5 А/дел), напряжение горения магнетронного разряда 2 (500 В/дел), ток магнетронного разряда 3 (5 А/дел). Чувствительность по горизонтали – 40 мкс/дел. Условия эксперимента  $p = 2.4 \cdot 10^{-4}$  Торр,  $R_2 = 380$  Ом.

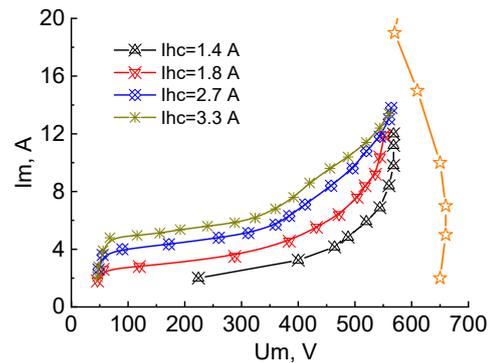


Рис. 4. Вольтамперные характеристики магнетронного разряда.  $I_{hc}$  – ток в цепи полого катода. Условия эксперимента:  $p = 2.4 \cdot 10^{-4}$  Торр,  $R_2 = 380$  Ом. Отмеченная пятиконечной звездой – ВАХ стандартного планарного магнетрона.

Снижение напряжения горения стандартного (без полого катода) магнетронного разряда связано с переходом разряда в режим само-распыления (self-sputtering mode) [5]. По сути горизонтальные участки – это разряд с полным катодом, а магнетронная ветвь характеристики начинается с напряжения 400–450 В. Снижение балластного резистора в цепи питания полого катода приводит к смещению характеристики влево в сторону меньших значений напряжения на электродах магнетрона.

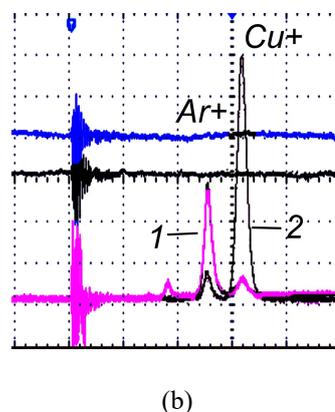
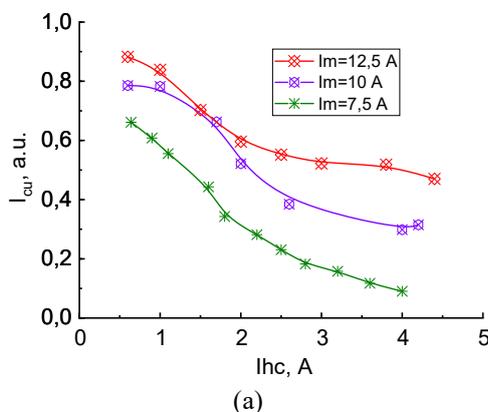


Рис. 5. Влияние тока разряда в полном катоде на относительную величину ионов меди для некоторых значений тока магнетронного разряда (а) и осциллограммы компонентного состава пучка (б) двух режимов - с разрядом в катодной полости (1) и без разряда (2).

Что касается влияния разряда с полым катодом на масс-зарядовый состав плазмы, то компонентный состав во многом определяется отношением тока магнетронного разряда к току разряда с полым катодом. Например, для комбинации Cu – мишень и рабочий газ Ar, в чисто магнетронном разряде с током около 4 А отношение токов составляющих Cu/Ar приблизительно равно 9:1. После инициирования разряда в полем катоде уже при токе 1.5 А ток ионов аргона превышает ток ионов меди и отношение и отношение токов ионов Cu/Ar становится равным 1:3.5. На Рис. 5а приведена зависимость относительной доли ионов меди в зависимости от тока разряда в полем катоде (на чертеже сумма токов самостоятельного разряда и приращения тока, вызванного магнетронным разрядом) для некоторых значений тока магнетронного разряда.

#### 4. Выводы

При проведении исследований комбинированной магнетронной системы было установлено взаимное влияние разрядных систем (разрядной системы с полым катодом и магнетронной разрядной системы). Зажигание самостоятельного разряда в полем катоде приводит не только к росту тока магнетронного разряда, но в свою очередь этот рост тока магнетронного разряда вызывает увеличение тока в полем катоде. И это увеличение тем больше чем меньше внутренне сопротивление источника питания разряда с полым катодом. В определённых экспериментальных условиях, которые зависят от давления рабочего газа и величины тока разряда в магнетроне, имеет место инициирование несамостоятельного разряда в катодной полости, подобное тому как это происходит в Пеннинговской разрядной системе с полым катодом [4]. Изменением отношения токов разряда с полым катодом и магнетронного разряда можно регулировать массзарядовый состав генерируемой плазмы.

#### Благодарность

Эта работа выполнена в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, проект FWRM-2021-0006.

#### 5. Список литературы

- [1] M.V. Shandrikov, A.S. Bugaev, E.M. Oks, A.V. Vizir, and G.Y. Yushkov, Planar magnetron sputtering with supplementary electron injection, *Vacuum*, vol. **143**, 458, 2017; doi: 10.1016/j.vacuum.2017.02.011
- [2] V.I. Gushenets, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, L.G. Vintzenko, G.Y. Yushkov, A. Oztarhan and I.G. Brown, Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **77**, 063301, 2006; doi:10.1063/1.2206778
- [3] V.I. Gushenets, A.S. Bugaev, E.M. Oks, T.V. Kulevoy, A. Hershcovitch and I.G. Brown, Experimental comparison of time-of-flight mass analysis with magnetic mass analysis, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **79**, 02B3701, 2008; doi: 10.1063/1.4861393
- [4] В.А. Груздев, Ю.Е. Крейндель, О.Е.Троян, *Инициирование разрядов низкого давления с холодным полым катодом в генераторах плазмы для ПИЭЛ, в кн. Источники электронов с плазменным эмиттером*, Новосибирск: Наука, 1983.
- [5] E. Oks and A. Anders, A self-sputtering ion source: A new approach to quiescent metal ion beams, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **81**, 02B306, 2010; doi: 10.1063/1.3272797