

УДК 537.525

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-41-45

EDN: DRUMXU

PACS: 52.80.-s, 52.80.Hc, 52.80.

Sm, 84.40.Fe



## Сильноточный импульсный планарный магнетронный разряд с инъекцией электронов

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

*Представлены результаты экспериментальных исследований разрядной системы на основе импульсного (200÷400 мкс, 5÷25 Ги) сильноточного (5÷30 А) планарного магнетронного разряда с мишенью диаметром 125 мм и дополнительной инъекцией электронов из вакуумного дугового разряда. Инжекция электронов в магнетронный разряд осуществляется с обратной стороны распыляемой мишени через центральное отверстие, что обеспечивает дополнительное ускорение инжектируемых электронов в катодном слое магнетронного разряда и увеличение энергетической эффективности разрядной системы. Исследован масс-зарядовый состав ионов генерируемой плазмы при снижении рабочего давления вплоть до предельно низкого уровня 0,2 мТорр. Получены условия обеспечения высокой доли ионов материала мишени в генерируемой плазме, в том числе в диапазоне низких значений рабочего давления, где стандартный магнетронный разряд характеризуется увеличением доли ионов рабочего газа и переходит в высоковольтную слаботочную форму.*

*Ключевые слова:* магнетронный разряд, инъекция электронов, масс-зарядовый состав плазмы.

### 1. Введение

Тенденции к снижению нижнего предельного рабочего давления планарного магнетронного разряда обусловлены увеличением эффективности процесса магнетронного распыления и энергии распыленных атомов в области подложки, что в конечном итоге оказывает влияние на процесс формирования и результирующие свойства осаждаемых пленок [1–4].

Одним из наиболее очевидных и простых методов снижения рабочего давления

является ассистирование магнетронного разряда электронами из дополнительного разряда. Вместе с тем, экспериментальные исследования разрядных систем с внешним расположением источника электронов показало их невысокую энергетическую эффективность [5, 6]. Метод с инъекцией электронов и их последующим ускорением в катодном слое магнетронного разряда позволяет снизить энергетические затраты как минимум на порядок при достижении аналогичного эффекта [7]. Инжекция электронов в магнетронный разряд в этом случае осуществляется через центральную апертуру небольшого диаметра, за которой расположен электрод, обеспечивающий перераспределение инжектированных электронов из приосевой области на периферию, в зону скрещенных  $E \times B$  полей и интенсивной ионизации. В качестве эмиттера электронов в такой системе использовался тлеющий разряд с полым катодом.

Использование вакуумного дугового разряда в эмиттере электронов представляет

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

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

Черкасов Александр Алексеевич, аспирант, инженер.

Окс Ефим Михайлович, профессор, д.т.н.

Институт сильноточной электроники СО РАН

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 26.04.2023

После доработки 30.05.2023

Принята к публикации 27.06.2023

интерес с точки зрения дальнейшего снижения предельного рабочего давления планарного магнетронного разряда, а также снижения ионизации потоком инжектированных электронов атомов рабочего газа в области выходной апертуры. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования такой разрядной системы, в т. ч. изменения масс-зарядового состава ионов плазмы магнетронного разряда в области предельно низких значений рабочего давления.

## 2. Описание эксперимента

Принцип действия планарного магнетронного разряда (рис. 1) с дополнительной инжекцией и ускорением электронов в катодном слое аналогичен ранее описанным системам [7]. Основное отличие заключается в использовании в качестве эмиттера электронов плазмы импульсного вакуумного дугового разряда, функционирующего между цилиндрическим медным катодом 4 диаметром 6 мм и обратной стороной мишени магнетрона 1, являющейся в тоже время анодом дугового разряда. Электроны из плазмы вакуумного дугового разряда, проходя через апертуру 3, ускоряются в прикатодном падении потенциала до энергии, соответствующей  $0,7 \div 0,8 U_M$ , где  $U_M$  – напряжение горения магнетронного разряда. Защита от микрокапельной фракции осуществляется за счет геометрии разрядной системы как на апертуре малого диаметра, так и за счет присутствия перераспределяющего электрода, установленного непосредственно за апертурой, что исключает возможность прямого пролета микрокапель из области эмиттера в область расположения подложки. Отсутствие необходимости обеспечения перепада давления для стабильного функционирования эмиттерного разряда снимает ограничение на размер выходной апертуры, что, в свою очередь, увеличивает площадь отбора электронного тока. В тех случаях, когда радиус апертуры превышал протяженность прикатодного слоя, для стабилизации плазменной границы использовалась мелкоструктурная сетка. Медный перераспределяющий электрод 2 находится под потенциалом мишени 1. В ряде случаев, для снижения нежелательного распыления, данный электрод может иметь пла-

вающий отрицательный потенциал. Поскольку расстояние от выходной апертуры до торца отражающего электрода превышает удвоенное значение протяженности прикатодного слоя, то для инжектированных электронов формируется потенциальная ловушка, в которой они вынуждены совершать многократные колебания вдоль силовых линий магнитного поля. За счет поперечной диффузии происходит дрейф инжектированных электронов из приосевой области на периферию мишени, в область скрещенных  $E \times B$  полей, где обеспечивается их эффективная релаксация и более интенсивная ионизация потока распыленного материала мишени. Электрическое питание разрядов включало источник поджигающих импульсов ( $U_{П.Р.}$ ), источник вакуумно-дугового ( $U_{В.Д.}$ ) и магнетронного разрядов ( $U_{М.Р.}$ ). Длительность поджигающего импульса между электродами 4 и 5, создающего предварительную плазму для вакуумно-дугового разряда посредством высоковольтного пробоя по поверхности керамического изолятора, составляла 25 мкс при амплитуде тока  $5 \div 10$  А (рис. 2). Длительность импульса вакуумно-дугового разряда составляла 300 мкс. Длительности поджигающего и вакуумно-дугового разряда были фиксированными. Длительность импульса магнетронного разряда могла варьироваться в диапазоне от 100 до 400 мкс.

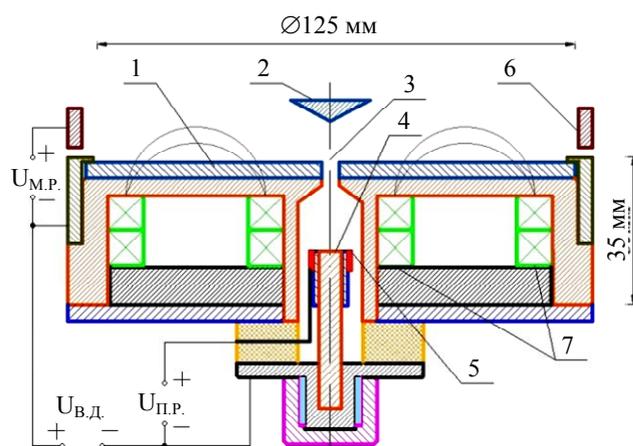


Рис. 1. Конструкция планарного магнетрона с эмиттером на основе вакуумно-дугового разряда: 1 – мишень (катод) магнетрона / анод вакуумной дуги; 2 – перераспределяющий электрод; 3 – выходная апертура; 4 – катод вакуумной дуги; 5 – поджигающий электрод; 6 – анод магнетрона; 7 – магнитная система



Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжения разрядов: CH4 – ток поджигающего разряда (5 А/дел); CH1 – ток вакуумно-дугового разряда (20 А/дел); CH2 – ток магнетронного разряда (10 А/дел); CH3 – напряжение магнетронного разряда (200 В/дел)

Измерение масс-зарядового состава ионов плазмы магнетронного разряда осуществлялось с использованием время-пролетной методики. Для этого разрядная система электрически смещалась под положительный потенциал уровня 20 кВ. Плазма магнетронного разряда заполняла объем экспандера, имеющего с анодом магнетрона один электрический потенциал. Отбор ионов из плазмы магнетрона происходил с торца экспандера, отстоящего от плоскости мишени магнетрона на 15 см. Для формирования ионного пучка в спектрометр использовалась трехсеточная ионно-оптическая извлекающая система. Пролетная база спектрометра составляла 1 м. Анализ долевого отношения металлического (материал мишени) и газового (рабочий газ) ионных компонентов включал учет многозарядных фракций. Синхронизация импульсов питания разрядов, отклоняющего напряжения и тока коллектора цилиндра Фарадея осуществлялась генератором задержанных импульсов ГИ-1.

### 3. Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты показывают, что величина тока инжектированных электронов имеет оптимальное значение с точки зрения достижения условия реализации сильноточной формы магнетронного разряда в области предельно низкого рабочего давления.

Увеличение тока инжекции при фиксированном значении тока магнетронного разряда приводит к снижению напряжения горения разряда, что критично для материалов мишеней с низким коэффициентом ионного распыления (например, Cr, Ni, Zr) и поддержания магнетронного разряда в сильноточной форме. В свою очередь, уменьшение тока инжекции посредством уменьшения тока вакуумного дугового разряда ограничено снижением стабильности функционирования дугового разряда при низких значениях тока (менее 20 А). По этой причине предпочтение было отдано однопертурному эмиссионному электроду с диаметром отверстия 2 мм. Данная конфигурация разрядного промежутка обеспечивала как стабильное функционирование вакуумного дугового разряда в диапазоне значений тока 20–60 А, так и оптимальное отношение амплитуды тока магнетронного разряда и его напряжения горения в области предельно низкого рабочего давления, что позволяет использовать такую систему для широкого набора распыляемых материалов.

Анализ масс-зарядового состава плазмы магнетронного разряда по длительности импульса показывает, что доля металлического ионного компонента достигает насыщения приблизительно через 50–70 мкс от начала импульса (рис. 3). Уменьшение длительности импульса тока магнетронного разряда менее указанной величины нецелесообразно с точки зрения получения сильноточной формы разряда с высоким содержанием ионов материала мишени. Оптимальным временным масштабом для проведения измерений масс-зарядового состава плазмы был определен диапазон 150–200 мкс от начала импульса при общей длительности импульса 250–400 мкс. Результаты измерений долевого отношения ионов в плазме магнетронного разряда в режиме стабилизации тока разряда показывают, что в самостоятельной форме при снижении рабочего давления доля ионов материала мишени снижается и при давлении порядка 0,45 мТорр разряд перестает существовать даже в слабноточной форме (рис. 4). Инжекция 5 А электронов из вакуумно-дугового эмиттера обеспечивает смещение значений предельного рабочего давления вплоть до  $1,8 \times 10^{-4}$  Торр. При этом существенную роль играет расстоя-

ние между апертурой и перераспределяющим электродом, что связано с изменением ширины прикатодного слоя при снижении рабочего давления. Эксперименты показывают, что при фиксированном значении тока магнетронного разряда, снижение рабочего давления с  $1,5 \times 10^{-3}$  Торр до  $1,8 \times 10^{-4}$  Торр увеличивает оптимальное расстояние до перераспределяющего электрода с 2 до 4,5 см.

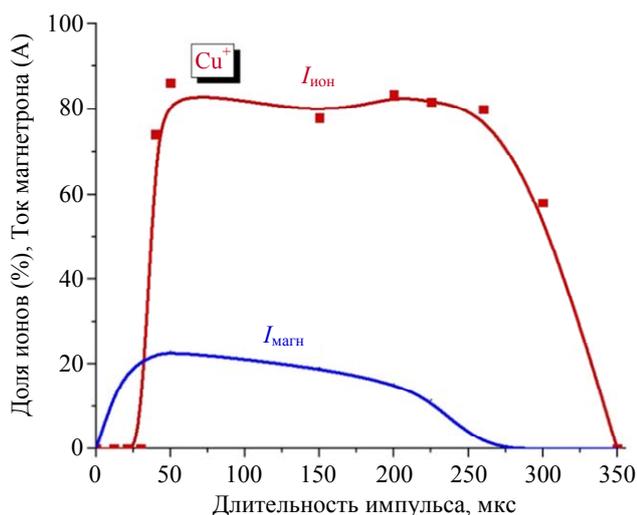


Рис. 3. Ток магнетронного разряда и доля ионов материала мишени (медь) по длительности импульса. 0,45 мТорр, 10 Гц, ток инжекции 5 А

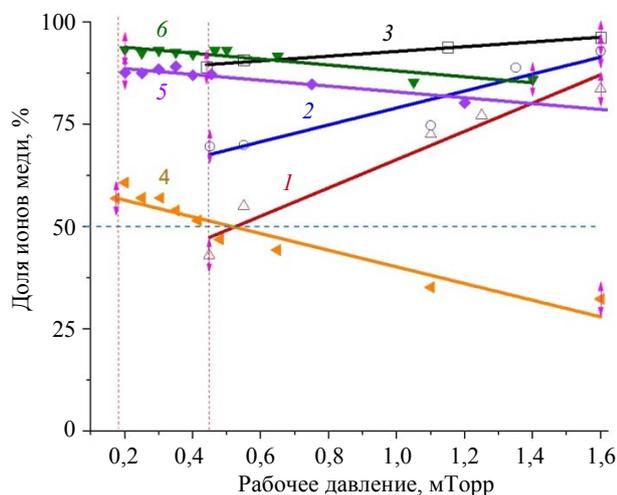


Рис. 4. Доля ионов материала мишени (медь) в плазме магнетронного разряда в режиме стабилизации тока разряда в зависимости от рабочего давления.  $I_{инж} = 0$  А,  $I_{магн}$ : кр. 1 – 5 А; кр. 2 – 10 А; кр. 3 – 20 А.  $I_{инж} = 5$  А,  $I_{магн}$ : кр. 4 – 5 А; кр. 5 – 10 А; кр. 6 – 20 А

Помимо этого, комплексное использование инъекции электронов и конического пе-

рераспределяющего электрода обеспечивают высокую долю металлического ионного компонента в плазме магнетронного разряда (выше 50 %), что позволяет говорить о реализации т. н. режима самораспыления. При этом, в отличие от самостоятельной формы магнетронного разряда, при снижении рабочего давления доля ионов металла растет, что обусловлено увеличением напряжения горения магнетронного разряда приблизительно на 100 В в режиме стабилизации его тока. Полученные тенденции характерны для других материалов мишени (Zn, Pb). Отличия заключаются в значениях предельного рабочего давления и доли металлического ионного компонента.

## Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование безгазового эмиттера электронов, в частности на основе вакуумно-дугового разряда, позволяет снизить предельное нижнее рабочее давление магнетронного разряда в сильноточной форме вплоть до значений уровня 0,2 мТорр при сохранении доли ионов материала мишени выше 50 %, что представляет интерес для исследований магнетронного разряда в режиме самораспыления.

Работа выполнена за счет гранта  
Российского научного фонда (проект 21-19-00136).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Thornton J. A. / J. Vac. Sci. & Techn. 1974. Vol. 11. P. 666.
2. Nikulin Yu. V., Dzhumaliev A. S., Filimonov Yu. A. / Technical Physics. 2016. Vol. 61. № 5. P. 141.
3. Li T., Han J., Xing Y., et al. / Micro & Nano Letters. 2018. Vol. 14. № 2. P. 146.
4. Helmer J. C., Wickersham C. E. / J. Vac. Sci. & Techn. 1986. Vol. A4. P. 408.
5. Cuomo J. J., Kaufman H. R., Rossmagel S. M. Patent № 4588490. 1986.
6. Gavrilov N. V., Kamenetskikh A. S., et al. / J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 652. P. 012024.
7. Shandrikov M. V., Cherkasov A. A., Oks E. M. / Vacuum. 2022. Vol. 200. P. 111056.

## High-current pulsed planar magnetron discharge with electron injection

*M. V. Shandrikov, A. A. Cherkasov and E. M. Oks*

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

*Received 26.04.2023; revised 30.05.2023; accepted 27.06.2023*

***The results of experimental studies of a discharge system based on a pulsed (200÷400  $\mu$ s, 5÷25 pps) high-current (5÷30 A) planar magnetron discharge with a target diameter of 125 mm and additional electron injection from a vacuum arc discharge are presented. The injection of electrons into the magnetron discharge is carried out from the back of the sputtered target through the central aperture, which provides additional acceleration of the injected electrons in a cathode layer of the magnetron discharge and an increase in the energy efficiency of the discharge system. The mass-to-charge ion composition of the generated plasma has been studied in a range of operating pressure up to an extremely low level of 0,2 mTorr. The conditions for achieve a high fraction of target material ions in magnetron plasma are defined, including in the range of low operating pressure range, where the typical magnetron discharge is characterized by an increase of a working gas ions fraction, transition into a low-current form, or is not realized at all.***

*Keywords:* magnetron discharge, electron injection, ion mass-to-charge composition.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-41-45

### REFERENCES

1. Thornton J. A., J. Vac. Sci. & Techn. **11**, 666 (1974).
2. Nikulin Yu. V., Dzhumaliev A. S. and Filimonov Yu. A., Technical Physics **61** (5), 141 (2016).
3. Li T., Han J., Xing Y., et al., Micro & Nano Letters **14** (2), 146 (2018).
4. Helmer J. C. and Wickersham C. E., J. Vac. Sci. & Techn. **A4**, 408 (1986).
5. Cuomo J. J., Kaufman H. R. and Rossnagel S. M., Patent № 4588490 (U.S.). 1986.
6. Gavrilov N. V., Kamenetskikh A. S., et al., J. Phys.: Conf. Ser. **652**, 012024 (2015).
7. Shandrikov M. V., Cherkasov A. A. and Oks E. M., Vacuum **200**, 111056 (2022).