

**LOW-PRESSURE HIGH-CURRENT PULSED MAGNETRON DISCHARGE
WITH ELECTRON INJECTION FROM VACUUM ARC**

Maxim Valentinovich Shandrikov^{1a}, *Alexey Vadimovich Vizir*¹,
Efim Mihailovich Oks^{1,2}, *Aleksandr Alekseevich Cherkasov*¹

¹ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,, Academicheskyy pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

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

^a shandrikov@opec.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

The results of a study of a pulse-periodic (10–25 Hz, 250–1000 μ s) high-current (10–30 A) planar magnetron discharge with electron injection in the range of ultra-low (up to $2 \cdot 10^{-4}$ Torr) operating pressure in argon are presented. The injection of electrons into the cathode layer of the magnetron discharge was carried out from the back of the target through a central hole. Vacuum arc discharge plasma was used as an electronic emitter. The use of a vacuum arc discharge as an emitter is due to the possibility of its operation without additional gas supply. The current of the vacuum arc varied in the range of 10–60 A. Injection of additional high-energy electrons with a current up to 5 A provided a shift in the range of operating pressures of the magnetron discharge towards lower pressure values. An increase in a burning voltage of the magnetron in an extremely low pressure range, at high-energy electrons supporting, provides a large fraction of metal ions in the magnetron plasma and a large energy of sputtered atoms. The latter also occurs due to a decrease in the thermalization of atoms in the drift space due to a decrease in the number of collisions with a decrease in operating pressure. The properties of deposited metal films in the range of extremely low operating pressure are presented.

KEYWORDS

Magnetron discharge; electron injection; low pressure; film deposition.

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД НИЗКОГО
ДАВЛЕНИЯ С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВАКУУМНОЙ ДУГИ**

Максим Валентинович Шандриков^{1a}, *Алексей Вадимович Визирь*¹,
Ефим Михайлович Окс^{1,2}, *Александр Алексеевич Черкасов*¹

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

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40

^a shandrikov@opec.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования импульсно-периодического (10–25 Гц, 250–1000 мкс) сильноточного (10–30 А) планарного магнетронного разряда с инжекцией электронов в области предельно низкого (до $2 \cdot 10^{-4}$ Торр) давления в атмосфере аргона. Инжекция электронов в катодный слой магнетронного разряда осуществлялась с обратной стороны мишени через центральное отверстие. В качестве электронного эмиттера использовалась плазма импульсного вакуумного дугового разряда. Использование вакуумного дугового разряда в качестве эмиттера обусловлено возможностью его работы без дополнительной подачи газа, высокой эмиссионной способностью и энергетической эффективностью. Ток вакуумной дуги варьировался в диапазоне 10–60 А. Инжекция дополнительных электронов высокой энергии с током до 5 А обеспечила смещение диапазона рабочего давления магнетронного разряда в сторону более низких значений давления без снижения величины тока разряда. Увеличение напряжения горения магнетрона в области предельно низкого давления при одновременной поддержке высокоэнергичными электронами обеспечивает высокую долю ионов металла в плазме магнетрона и большую энергию распыляемых атомов. Последнее обеспечивается также за счет уменьшения эффекта термализации атомов благодаря снижению числа столкновений в пространстве дрейфа. Представлены результаты исследования свойств напыляемых металлических пленок в области предельно низкого рабочего давления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Магнетронный разряд; инжекция электронов; низкое давление; осаждение пленок.

Введение

Импульсное магнетронное напыление высокой мощности (HIPIMS – High-Power Impulse Magnetron Sputtering) является одним из ключевых методов физического осаждения из газовой фазы (PVD) уже на протяжении двух десятилетий [1–4]. Данный режим отличается высокой пиковой плотностью мощности, высокой степенью ионизации распыленного потока материала мишени, высокой плотностью плазмы в области мишени и подложки и, как следствие, высоким потоком ионов к подложке, что обеспечивает получение тонких пленок более высокого качества по сравнению с классической технологией магнетронного напыления в режиме постоянного тока [5, 6].

При достижении определенного критического порога мощности (в зависимости от материала мишени), сильноточный магнетронный разряд может перейти в т.н. режим самораспыления, поддерживаемый собственными ионами материала мишени [7, 8]. При этом доля ионов материала мише-

ни в составе плазмы может превышать 90% [9, 10]. Однако по окончании импульса, для зажигания следующего импульса разряда, давление рабочего газа должно соответствовать определенному уровню, обеспечивающему первоначальное развитие магнетронного разряда в газовой среде и только по прошествии нескольких десятков мкс – в среде материала мишени [11, 12]. Таким образом, магнетронный разряд даже в сильноточной форме часть рабочего импульса функционирует в режиме с преобладанием газового ионного компонента. Снижение давления рабочего газа позволяет также снизить эффект термализации распыленных атомов и ионов мишени [13], воздействующих на подложку в процессе роста пленки и обеспечивающих более высокую степень энергетического воздействия по сравнению с традиционным магнетронным напылением в режиме постоянного тока.

Эффективными методами поддержания магнетронного разряда в области низкого давления является ассистирование разрядно-

го промежутка дополнительными ионными или электронными пучками [14–17]. Однако в области типичных значений энергии ионов в магнетронном разряде (400–600 эВ), коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии достаточно мал (менее 0,2), что требует увеличения мощности дополнительного источника ионов. В результате система трансформируется к классическому методу распыления металлических подложек ионным пучком, в которой роль самого магнетронного разряда оказывается второстепенной.

Использование электронного ассистирования с энергетической точки зрения представляет большой интерес, поскольку высокоэнергетичные электроны до термализации потенциально способны обеспечивать ряд последовательных актов ионизации рабочего вещества. Основная же проблема заключается в методе доставки ассистирующих электронов в область основной ионизации магнетронного разряда, расположенной в кольцевой области (т.н. рейстреке) на небольшом удалении от мишени (1–2 см). Расположение источника ассистирующих электронов с внешней стороны магнетронного разряда затрудняет движение электронов в область отрицательно заряженной мишени, находящейся в области сильного магнитного поля (до 100 мТл). Это приводит к замагничиванию электронов и их преждевременному уходу по внешним силовым линиям арочного магнитного поля на периферийный анод. Преждевременный уход высокоэнергетичных электронов до их термализации также вынуждает увеличивать ток дополнительного разряда, который по мощности может быть сопоставим или даже превышать мощность основного магнетронного разряда.

Более энергетически выгодным является подход с инжекцией ассистирующих электронов не с внешней, а обратной стороны мишени магнетрона [18]. При таком подходе инжектируемые электроны не испытывают торможение электрическим потенциалом мишени, а, наоборот, ускоряются в катодном слое магнетронного разряда. В этом случае аналогичный с точки зрения влияния на ха-

рактеристики магнетронного разряда эффект достигается при значениях тока эмиттера на 1–2 порядка меньших, чем в системах с внешним расположением ассистирующего разряда.

Реализация импульсной формы магнетронного разряда высокой мощности в области предельно низкого давления (менее 1 мТорр) накладывает требования по увеличению тока как в самом магнетронном разряде, так и в ассистирующем разряде. Переход в эмиттере от газового тлеющего разряда с полым катодом [19] к вакуумному дуговому, позволяет снизить долю ионов газа в плазме магнетрона за счет устранения дополнительного газового канала питания эмиттера. Поскольку напряжение горения дугового разряда на порядок ниже напряжения разряда в тлеющем режиме, затраты мощности на такой эмиттер также оказываются существенно ниже.

В настоящей статье представлены результаты исследований и особенности функционирования разрядной системы с эмиттером на основе вакуумного дугового разряда, в т.ч. изменение масс-зарядового состава ионов плазмы магнетрона и свойств напыляемых покрытий в области предельно низких значений рабочего давления.

1. Описание эксперимента

На рис. 1 представлена электродная схема разрядной системы на основе планарного магнетрона с эмиттером на основе вакуумного дугового разряда. Инжекция электронов в область магнетронного разряда осуществлялась через центральное эмиссионное отверстие 4 в мишени магнетрона 1. В экспериментах использовались мишени диаметром 125 мм толщиной 3 мм косвенного охлаждения. Мишень устанавливалась на водоохлаждаемый корпус 7. Внутри корпуса находились две кольцевые системы NdFeB магнитов 10, создающих на поверхности мишени магнитное поле величиной порядка 100 мТл. Анодом магнетрона служил кольцевой электрод 2. Для предотвращения ухода инжектированных электронов из зоны

магнетронного разряда вдоль центральных силовых линий магнитного поля, на их пути устанавливался конический отражательный электрод 3, выполненный из меди и находящийся под электрическим потенциалом мишени. В зависимости от величины рабочего давления расстояние от мишени до торца отражательного электрода составляло от 10 до 40 мм. Катодный узел вакуумной дуги 5 располагался на расстоянии 5–10 мм от тыльной поверхности мишени магнетрона.

Переход к вакуумному дуговому разряду в эмиттере электронов снимает ограничение на использование эмиссионной апертуры малого диаметра для поддержания требуемого перепада давления между областями магнетронного и эмиттерного 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 рас-

пределение 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. Поскольку средняя мощность вакуумного дугового разряда не превышала 50 Вт, водяное охлаждение эмиттерного узла не требовалось. Защита от микрокапельной фракции осуществляется как за счет геометрии разрядной системы, так и за счет электрода-отражателя, находящегося непосредственно за эмиссионным отверстием, что исключает возможность прямого пролета микрокапель из области эмиттера в область расположения подложки. При этом для предотвращения нежелательных примесей в плазме и осаждаемом покрытии, материал катода вакуумно-дугового разряда может быть выполнен из материала распыляемой мишени магнетронного разряда.

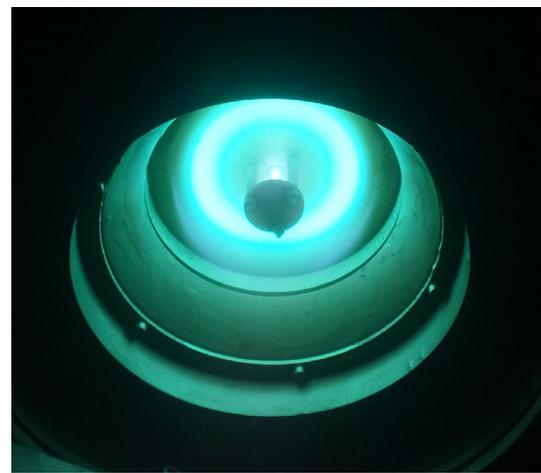
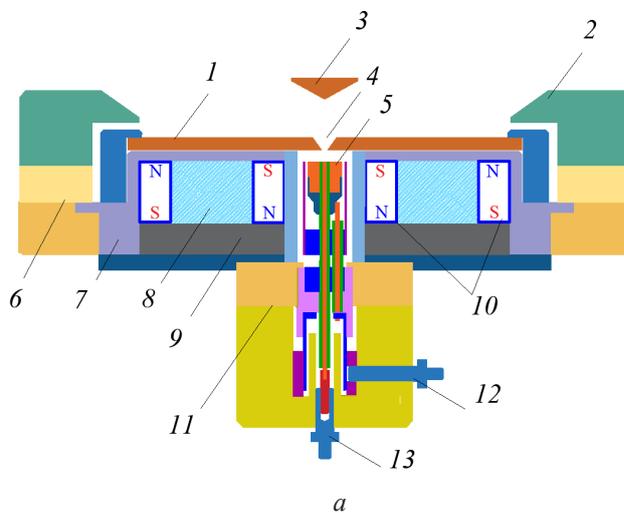


Рис. 1. Схема (а) и фотография свечения плазмы планарного магнетрона с эмиттером на основе вакуумного дугового разряда (б):

1 – мишень магнетрона (катод); 2 – анод магнетрона; 3 – отражательный электрод; 4 – эмиссионная апертура; 5 – катод вакуумного дугового разряда; 6 – изолятор магнетрона; 7 – корпус магнетрона; 8 – рубашка водяного охлаждения; 9 – магнитопровод; 10 – кольцевая система NbBFe магнитов; 11 – изоляторы эмиттера; 12 – контакт поджигающего разряда (катод); 13 – контакт поджигающего разряда (анод)

Fig. 1. Schematic diagram (a) and photo of plasma glow of the planar magnetron with emitter based on a vacuum arc discharge (b):

1 – magnetron target (cathode); 2 – magnetron anode; 3 – reflecting electrode; 4 – emission aperture; 5 – cathode of a vacuum arc discharge; 6 – magnetron insulator; 7 – magnetron housing; 8 – water cooling jacket; 9 – magnetic yoke; 10 – NbBFe magnetic ring system; 11 – emitter insulators; 12 – igniting discharge contact (cathode); 13 – igniting discharge contact (anode)

Внешний вид узла вакуумного-дугового эмиттера показан на рис. 2. Для простоты установки и обслуживания эмиттера, конструкция выполнена в виде штыревого втулочного наконечника, что обеспечивает возможность аксиального смещения разрядной системы по мере выработки катодного узла, а также угловое вращение эмиттера. В данной работе использована инвертированная схема электродов вакуумно-дугового эмиттера плазмы [20]. Инициирование вакуумного дугового разряда осуществляется пробоем по поверхности цилиндрического керамического изолятора между центральным поджигающим электродом (анод) и катодом вакуумной дуги (катод) при подаче высоковольтного (10 кВ) импульса короткой длительности (25 мкс). Использование кольцевого периферийного катода вместо центрального цилиндрического увеличивает площадь рабочей торцевой поверхности и ресурс вакуумного дугового эмиттера. Центральный поджигающий электрод, по причине малой величины амплитуды тока (10 А) и длительности поджигающего импульса, может при этом иметь достаточно малую площадь без заметного снижения его ресурса. Кварцевая цилиндрическая трубка, в которую помещается катод-

ный узел, предотвращает функционирование дугового разряда на боковой поверхности катода. Функционирование эмиссионных центров вакуумной дуги на торцевой поверхности катода обеспечивает распространение плазмы в направлении эмиссионного отверстия в центре мишени магнетрона.

Разрядная система устанавливалась на вакуумной камере, выполненной из нержавеющей стали. Длина камеры составляла 60 см при диаметре 40 см. Камера откачивалась турбомолекулярным насосом ТМН-500 до остаточного давления $2 \cdot 10^{-5}$ Торр. Напуск рабочего газа (аргон) с расходом 5–20 см³/мин производился в область анода магнетрона и контролировался электронным регулятором (РРГ-10, Элточприбор).

Плотность пленок определялась по результатам измерения массы и толщины напыленной пленки. Масса напыленной пленки определялась с помощью аналитических полумикровесов Госметр ВЛ-220М. Каждый образец взвешивался до и после напыления пленки. Толщина пленок определялась микроинтерферометром Линника МИИ-4 на длине волны 629 нм. Погрешность измерения толщины пленки составляла ± 25 нм.

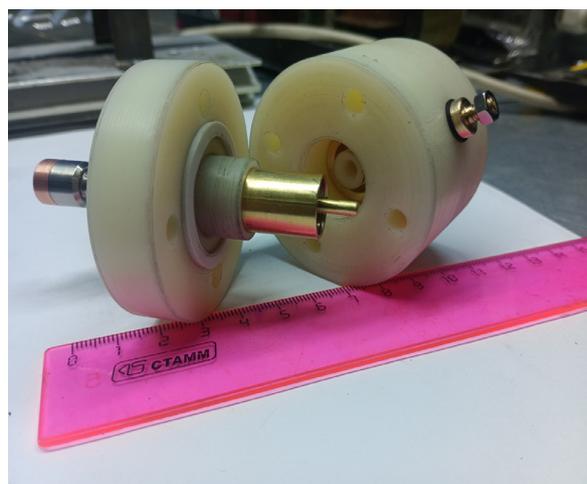
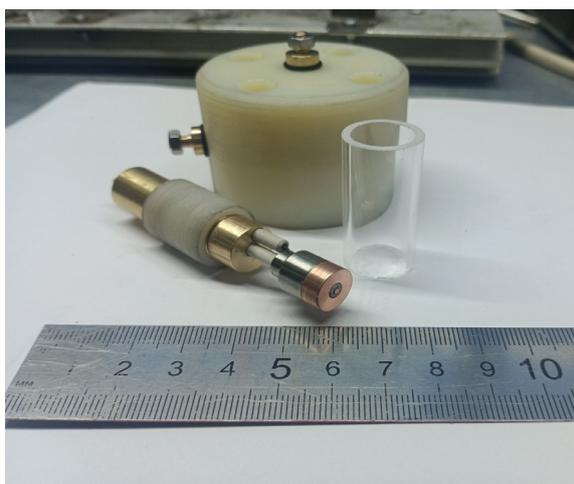


Рис. 2. Внешний вид узла вакуумного дугового эмиттера

Fig. 2. View of the vacuum arc emitter assembly

Для исследования микроструктуры поверхности использовался атомно-силовой микроскоп Solver P47 (NT-MDT, Россия) с использованием CSG01 кантиливера в контактном сканирующем режиме. Измерение шероховатости проводилось для трех размеров площадок: $1 \times 1 \text{ мкм}^2$, $5 \times 5 \text{ мкм}^2$, $15 \times 15 \text{ мкм}^2$. Обработка 3D-изображений осуществлялась с использованием программного пакета Image Analysis 2.0 (NT-MDT) и Gwyddion.

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Анализ фазового состава определялся с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

2. Результаты эксперимента и обсуждение

С целью дополнительного снижения рабочего давления магнетронного разряда была осуществлена оптимизация конфигурации магнитного поля, которая заключалась в создании условий для увеличения длины траектории электронов вдоль линий магнитной индукции в области скрещенных $E \times B$

полей. Такой подход эквивалентен увеличению размера мишени, что обеспечивает увеличение количества актов ионизации одним электроном в условиях низкой концентрации нейтралов рабочего газа. Для заданных размеров корпуса магнетрона и мишени такой подход может быть реализован изменением пространственной ориентации полюсных наконечников магнитной системы магнетрона. Моделирование конфигурации магнитного поля проводилось в стандартном программном пакете Vizimag (ver. 3.16) в допущении осесимметричности разрядной системы при воздушном заполнении пространства между электродами. На рис. 3, а изображена зеркальная половина стандартной магнитной системы планарного магнетрона. На рис. 3, б показана модифицированная магнитная система с наклоном полюсных наконечников. Помимо увеличения длины линий магнитной индукции, дополнительным преимуществом такого варианта является уменьшение длины магнитопровода и уменьшение потерь на нем, что, в свою очередь, проявляется в увеличении значений магнитного поля в области ионизации вблизи поверхности мишени.

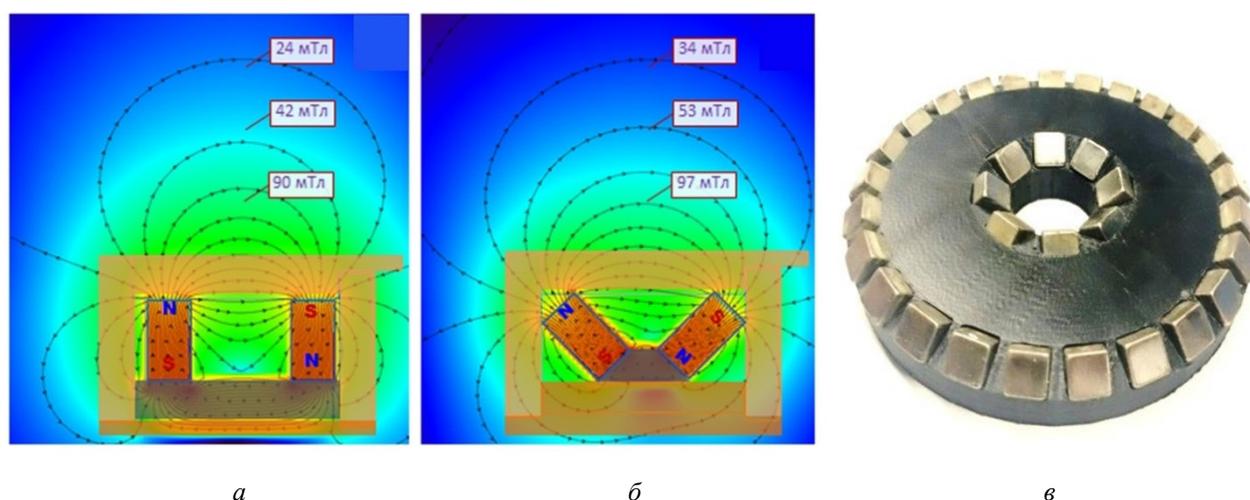


Рис. 3. Результат компьютерного моделирования (а, б) и внешний вид (в) системы магнитного поля планарного магнетрона (зеркальная половина магнетрона, ось симметрии справа):
а – стандартная конфигурация; б – модифицированная конфигурация с наклоном полюсных наконечников

Fig. 3. The result of computer simulation (a, б) and photo (в) of the magnetic field system of a planar magnetron (mirror half of magnetron, the axis of symmetry is on the right):
а – standard configuration; б – modified configuration with the tilt of the magnet pole tips

Проведенные эксперименты показали, что модифицированная конфигурация обеспечивает более оптимальные условия для функционирования магнетронного разряда с более низкими значениями напряжения горения и предельного рабочего давления (рис. 4). Для нивелирования эффекта разрядки газа и высокой стабильности параметров сравнительные эксперименты проводились в режиме постоянного тока при значении 0,5 А.

Пространственное расположение отражательного электрода относительно эмиссионной апертуры также оказывает существенное влияние на характеристики магнетронного разряда. На рис. 5 показаны результаты измерения амплитуды тока магнетронного разряда в зависимости от аксиального положения отражательного электрода при фиксированном напряжении на электродах магнетрона. Данная зависимость имеет ярко выраженный максимум

(область II), определяющий оптимальное расстояние между отражательным электродом и мишенью для заданных параметров разряда (рабочее давление, напряжение магнетронного разряда). Оптимальное расстояние между мишенью магнетрона и торцом отражательного электрода составляет не менее двух характерных размеров ширины прикатодного слоя, образующих потенциальную ловушку для инжектированных электронов в приосевой области мишени. При меньшем расстоянии (область I) ток электронов из плазмы эмиттерного разряда замыкается на отражательный электрод, имеющий потенциал анода эмиттерного разряда. При расстоянии больше оптимального (область III) эффект отражательного электрода снижается ввиду ухода части высокоэнергетичных инжектированных электронов по расходящимся силовым линиям магнитного поля из зоны ионизации на анод магнетронного разряда.

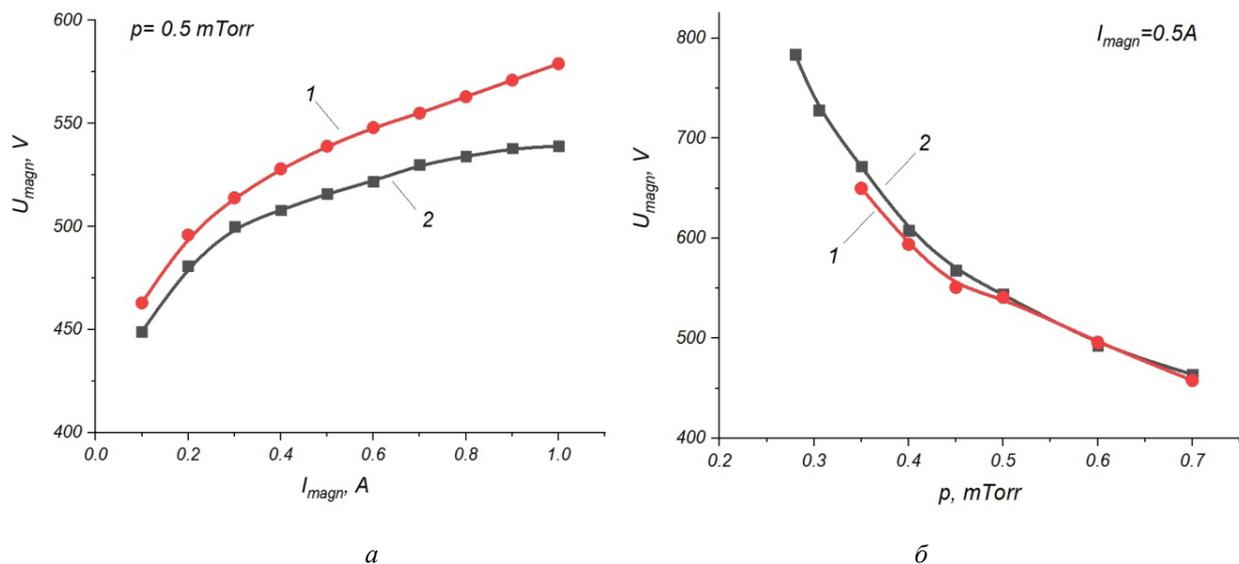


Рис. 4. ВАХ магнетронного разряда (а) и напряжение магнетронного разряда в зависимости от рабочего давления (б) для стандартной (1) и модифицированной (2) магнитной системы

Fig. 4. Magnetron volt-ampere characteristic (a) and magnetron discharge voltage versus the operating pressure (b) for standard (1) and modified (2) magnetic systems

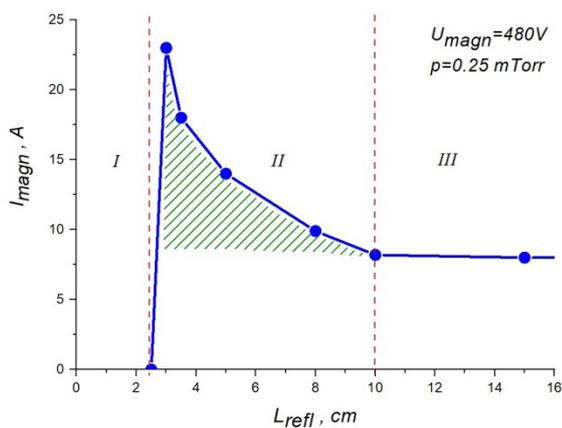


Рис. 5. Ток магнетронного разряда в зависимости от аксиального положения отражательного электрода в области предельно низкого рабочего давления. $U_{\text{магн}} = 480 \text{ В}$; $p = 0,25 \text{ мТорр}$

Fig. 5. Magnetron discharge current versus the axial position of the reflecting electrode at low operating pressure. $U_{\text{magn}} = 480 \text{ V}$; $p = 0.25 \text{ mTorr}$

Проведенные эксперименты показали, 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 выше определенного значения, несмотря на увеличение тока магнетронного разряда, приводит к снижению напряжения горения магнетронного разряда, что критично для материалов с низким коэффициентом ионного распыления (например, Cr, Ni, Zr) и поддержания магнетронного разряда в сильноточной форме в области предельно низкого рабочего давления. 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 одноапертурному 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 оптимальную величину тока инжектированных электронов, поддерживая амплитуду тока и напряжения магнетронного разряда на достаточно высоком уровне в области предельно низкого давления для широкого набора распыляемых материалов.

Важным моментом является выбор режима стабилизации параметров электрического питания магнетронного разряда. Инжекция дополнительных высокоэнергетических электронов в магнетронный разряд позволяет либо увеличить ток магнетронного разряда при стабилизации напряжения горения, либо снизить напряжение горения разряда при стабилизации тока магнетрона. В области типичных значений рабочего давления магнетронного разряда (2–20 мТорр) снижение напряжения горения разряда является нежелательным, поскольку уменьшает коэффициент ионного распыления и вторичной ион-электронной эмиссии. В этой области давления более предпочтительным является режим стабилизации напряжения магнетрона, что приводит к увеличению тока разряда, количества бомбардирующихся мишень ионов и, соответственно, скорости распыления мишени (рис. 6).

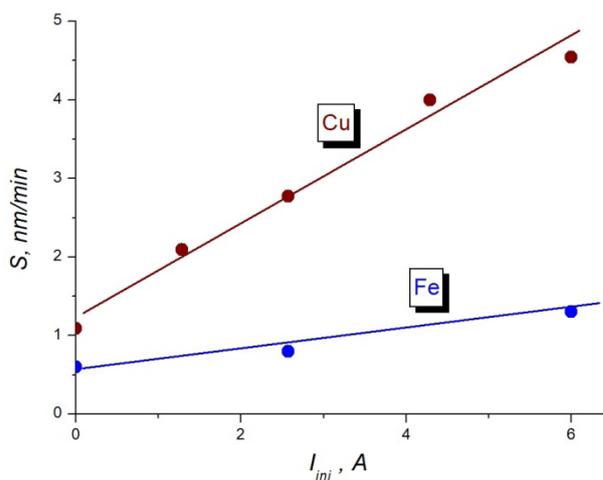


Рис. 6. Скорость напыления в зависимости от тока инжекции электронов. Медь: $U_{\text{магн}} = 380 \text{ В}$; железо: $U_{\text{магн}} = 660 \text{ В}$

Fig. 6. Deposition rate versus the current of electron injection. Copper: $U_{\text{mag}} = 380 \text{ V}$; Iron: $U_{\text{mag}} = 660 \text{ V}$

При переходе в область предельно низкого рабочего давления (менее 1 мТорр) снижение концентрации нейтралов рабочего газа в условиях ограничения максимальной энергии инжектируемых электронов (в режиме стабилизации напряжения разряда) приводит к снижению тока, деградации разряда, уменьшению скорости распыления и доли металлического ионного компонента в плазме (рис. 7, кривые 1). С этой точки зрения, для работы в области предельно низкого рабочего давления более предпочтительным является режим стабилизации тока магнетронного разряда. В этом случае снижение концентрации нейтралов рабочего газа компенсируется повышением ионизационной способности как вторичных, так и инжектированных электронов в результате повышения установившегося напряжения горения и, соответственно, катодного падения магнетронного разряда, обеспечивающего, в свою очередь, увеличение энергии ионов и скорости распыления. Инжекция электронов в комплексе с отражательным электродом позволяеткратно снизить предельное рабочее давление (0,2 мТорр) по сравнению с самостоятельной формой разряда (0,5–1 мТорр), обеспечивая при этом увеличение доли металлических ионов на 5–20% (рис. 7, кривые 2).

Снижение предельного рабочего давления обеспечивает увеличение плотности ионного тока на подложку, причем как газового, так и металлического ионного компонентов (рис. 8). Очевидно, что уменьшение транспортного рассеяния увеличивает не только количество, но и энергию приходящих на подложку ионов.

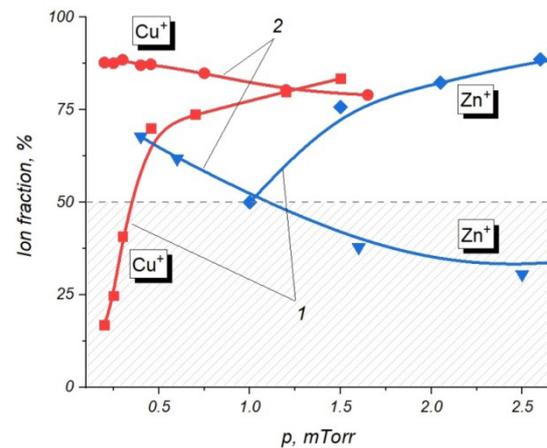


Рис. 7. Зависимость доли ионов материала мишени (Cu, Zn) от рабочего давления (аргон) для разных типов режима стабилизации:
1 – режим стабилизации напряжения магнетрона;
2 – режим стабилизации тока магнетрона

Fig. 7. Dependence of the target material ion component (Cu, Zn) on the operating pressure (argon) for different type of stabilization mode:
1 – magnetron voltage stabilization mode;
2 – magnetron current stabilization mode

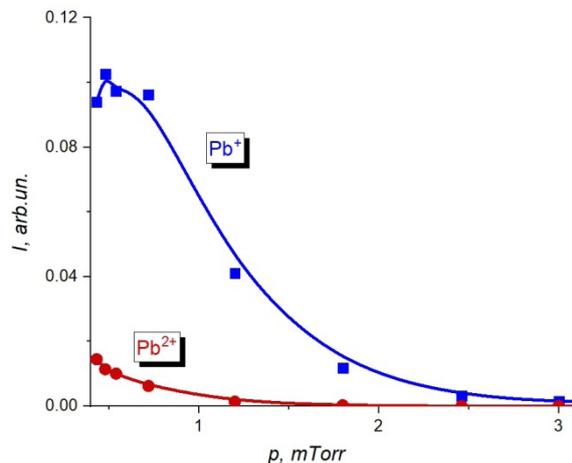
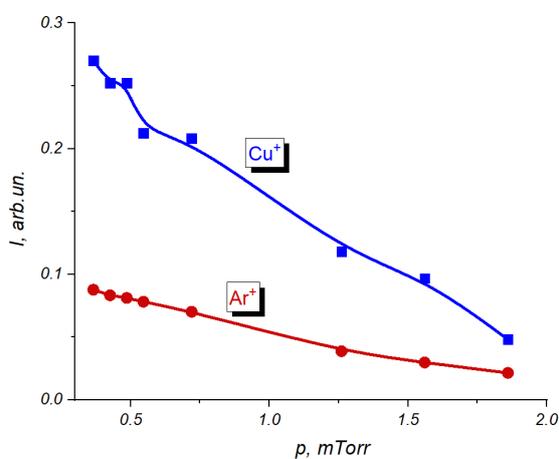


Рис. 8. Ток на подложку для разных ионных компонентов в зависимости от рабочего давления

Fig. 8. The current on substrate measured for different ion components versus operating pressure

Таблица 1. Параметры пленок меди в зависимости от тока инжектированных электронов**Table 1.** Parameters of copper films depending on the current of injected electrons

Параметр/ Parameter	Ток инжекции, А / Current on injection, А				
	0,2	1,3	2,6	4,3	6
Плотность пленки, г/см ³ / Film density, g/cm ³	7,99	7,89	8,16	8,28	8,75
Среднеквадратичная шероховатость, нм / Root-mean-square roughness, nm	0,87	1,3	1,7	2,2	2,7
Фаза кристалличности, % Phase of crystallinity, %	70	74	74	78	78

Увеличение энергетического воздействия на пленку в процессе ее формирования приводит к изменению ее характеристик. Из результатов, представленных в табл. 1, следует, что увеличение тока инжектированных электронов и соответствующее увеличение концентрации генерируемой плазмы магнетронного разряда в области предельно низкого рабочего давления (0,5 мТорр) обеспечивает увеличение плотности формируемой пленки, а также увеличение степени ее кристалличности. Помимо этого наблюдается увеличение шероховатости поверхности, что может быть связано с недостаточной мобильностью адатомов при увеличении скорости роста пленки. Необходимо отметить, что сильноточная форма магнетронного разряда с током 10–20 А при указанном давлении была реализуема только в режиме дополнительного электронного ассистирования.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования импульсной планарной магнетронной распылительной системы с инжекцией электронов в катодный слой из плазмы вакуумного дугового разряда показали, что предельное рабочее давление такой системы по отношению к самостоятельной форме может быть снижено кратно при сохранении амплитудных значений тока и напряжения магне-

трона на уровне, необходимом для высокой скорости напыления. При этом использование в области предельно низкого рабочего давления (менее 1 мТорр) режима стабилизации тока магнетрона в источнике питания позволяет обеспечить высокое содержание металлического ионного компонента в плазме магнетрона и реализацию квазистационарного режима самораспыления с долей металлических ионов выше 50%. Увеличение тока инжектированных электронов и соответствующее увеличение концентрации плазмы магнетрона обеспечили увеличение плотности и степени кристалличности формируемой пленки.

Благодарности / Acknowledgments

Исследования частично поддержаны в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, проект FWRM-2021-0006.

The work was partially funded within the framework of the state task for the Institute of High Current Electronics (the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Tomsk, project No. FWRM-2021-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lundin D., Minea T., Gudmundsson J. (Eds.) High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals,

Technologies, Challenges and Applications. Elsevier, 2020. P. 398.

2. Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering // *Surface & Coatings Technology*. 2011. V. 205, Suppl. 2. P. S1–S9. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2011.03.081.

3. Lundin D., Sarakinos K. An introduction to thin film processing using high-power impulse magnetron sputtering // *J. Mater. Res.* 2012. V. 27, Iss. 5. P. 780–792. DOI: 10.1557/jmr.2012.8.

4. Anders A. Tutorial: Reactive High Power Impulse Magnetron Sputtering (R-HiPIMS) // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 121. Article number 171101. DOI: 10.1063/1.4978350.

5. Keraudy J., Nguyen D. T., Ferrec A., Jouan P-Y. Comparison Between DC and HiPIMS Discharges. Application to Nickel Thin Films // *ICERA, LNNS*. 2019. V. 63. P. 196–203. DOI: 10.1007/978-3-030-04792-4_27.

6. Semenov V. A., Grenadyorov A. S., Oskirko V. O., Zakharov A. N., Rabotkin S. V., Ionov I. V., Solovyev A. A. Comparison of plasma parameters and optical emission in DC, HiPIMS and hybrid DC+HiPIMS modes of magnetron sputtering // *IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1393. Article number 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012023.

7. Lundin D., Brenning N., Jädernäs D., Larsson P., Wallin E., Lattemann M., Raadu M. A., Helmersson U. Transition between the discharge regimes of high power impulse magnetron sputtering and conventional direct current magnetron sputtering // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. V. 18, No. 4. Article number 045008. DOI: 10.1088/0963-0252/18/4/045008.

8. Huo C., Lundin D., Raadu M. A., Anders A., Gudmundsson J. T., Brenning N. On the road to self-sputtering in high power impulse magnetron sputtering: particle balance and discharge characteristics // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2014. V. 23. Article number 025017. DOI: 10.1088/0963-0252/23/2/025017.

9. Vizir A., Nilolaev A., Oks E., Savkin K., Shandrikov M., Yushkov G. Boron ion beam generation using a self-sputtering planar magnetron // *Review of Scientific Instruments*. 2014. V. 85. Article number 02C302. DOI: 10.1063/1.4824643.

10 Oks E., Anders A. A self-sputtering ion source: A new approach to quiescent metal ion beams // *Review of Scientific Instruments*. 2010. V. 81. Article number 02B306. DOI: 10.1063/1.3272797.

11. Oks E., Anders A. Evolution of the plasma composition of a high power impulse magnetron sputtering system studied with a time-of-flight spectrometer // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 105. Article number 093304. DOI: 10.1063/1.3125443.

12. Vizir A., Gushenets V., Hershcovitch A., Kulevoy T. V., Oks E. M., Yushkov G. Yu. Ion Source of Pure Single Charged Boron Based on Planar Magnetron Discharge in Self-Sputtering Mode // *AIP Conference Proceedings*. 2011. V. 1321. P. 472–475. DOI: 10.1063/1.3548454.

13. Kadlec S., Quaeysaegens C., Knuyt G., Stals L. M. Energy distribution of ions in an unbalanced magnetron plasma measured with energy-resolved mass spectrometry // *Surface and Coatings Technology*. 1997. V. 89, Iss. 1–2. P. 177–184. DOI: 10.1016/S0257-8972(96)3088-5.

14. Cuomo J., Kaufman H. R., Rossnagel S. M. Hollow cathode enhanced magnetron sputter device. US Patent 4588490. Publ. 13.05.1986.

15. Жуков В. В., Кривобоков В. П., Янин С. Н. Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком // *Известия Томского политехнического университета*. 2004. № 307 (7). С. 40–45.

16. Semenov A. P., Semenova I. A. Decrease in the ignition pressure of anomalous glow discharge in a magnetron with an ion-beam-irradiated cathode // *Instrum. Exp. Tech.* 2009. V. 52. P. 99–103. DOI: 10.1134/S0020441209010151.

17. Gavrillov N. V., Kamenetskikh A. S., Men'shakov A. I., Bureyev O. A. Magnetron sputtering system for coatings deposition with activation of working gas mixture by low-energy high-current electron beam // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 652. Article number 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/652/1/012024.

18. Shandrikov M. V., Artamonov I. D., Bakeev I. Yu., Bugaev A. S., Oks E. M., Vizir A. V., Yushkov G. Yu. Planar magnetron discharge with confinement of injected electrons // *Vacuum*. 2021. V. 192. Article number 110487. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110487.

19. Shandrikov M. V., Cherkasov A. A., Oks E. M. Parameters and ion mass-to-charge composition of a high-power impulse magnetron discharge with electron injection // *Vacuum*. 2022. V. 200. Article number 111056. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111056.

20. Oks E. M., Savkin K. P., Yushkov G. Yu., Nikolaev A. G., Anders A., Brown I. G. Measurement of total ion current from vacuum arc plasma sources // *The Review of scientific instruments*. 2006. V. 77, Iss. 3. Article number 03B504. DOI: 10.1063/1.2164967.