

ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОН С УСКОРЕНИЕМ ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КАТОДНОМ СЛОЕ

М.В.Шандриков, А.А.Черкасов, В.О.Оскирко, А.С.Климов, А.В.Тюньков, В.П.Фролова, А.В.Визирь

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования метода снижения предельного рабочего давления планарного магнетронного разряда. Основной эффект достигается за счет инъекции дополнительных электронов из плазмы эмиттерного разряда, расположенного с обратной стороны распыляемой мишени, и последующим ускорением этих электронов в катодном слое магнетронного разряда. Инъекция электронов в магнетронный разрядный промежуток осуществляется через эмиссионную апертуру малого диаметра (1-3 мм), расположенную в центре мишени в области наименьшего ионного распыления вдоль силовых линий магнитного поля. Перепад давления на эмиссионной апертуре обеспечивает стабильное зажигание и функционирование эмиттерного разряда с одной стороны, и низкое требуемое рабочее давление в области магнетронного разряда с другой. Предложенный метод выгодно отличается от используемых ранее систем с внешними источниками электронов более высокой энергетической эффективностью. В области предельно низкого рабочего давления (менее 0.5 мТорр) суммарные энергетические затраты на двухступенчатую разрядную систему оказываются меньше, чем на одноступенчатый магнетронный разряд. Предельное рабочее давление для магнетронного разряда с медной мишенью диаметром 120 мм составило 0.25 мТорр.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МАГНЕТРОН, ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, НИЗКОЕ РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ, ПЛЕНКИ

PLANAR MAGNETRON WITH ACCELERATION OF INJECTED ELECTRONS IN THE CATHODE LAYER

M.V. Shandrikov, A.A. Cherkasov, V.O. Oskirko, A.S. Klimov, A.V. Tyunkov, V.P. Frolova, A.V. Vizir

ABSTRACT

A method is proposed for reducing the limiting operating pressure of a planar magnetron discharge by injecting additional electrons from the back of the sputtered target from the emitter discharge plasma and then accelerating them in the cathode layer of the magnetron discharge. The injection of electrons into the magnetron discharge gap is carried out through an emission aperture of small diameter (1-3 mm) located in the center of the target in the region of the smallest ion sputtering. The pressure drop at the emission aperture ensures stable ignition and operation of the emitter discharge on the one hand, and the low required operating pressure in the magnetron discharge region on the other. The proposed method compares favorably with previously used systems with external electron sources with higher energy efficiency. In the region of extremely low operating pressure (less than 0.5 mTorr), the total energy costs for a two-stage discharge system are less than for a single-stage magnetron discharge. The maximum operating pressure for a magnetron discharge with a copper target with a diameter of 120 mm was 0.25 mTorr.

KEYWORDS

MAGNETRON, OPERATING PRESSURE, ELECTRON INJECTION

ВВЕДЕНИЕ

Магнетронное распыление получило широкое распространение благодаря ряду неоспоримых преимуществ. Помимо достаточной простоты конструкции и относительно высоких значений скорости осаждения пленок по сравнению с диодными схемами, более высокая энергия распыленных атомов (единицы и десятки эВ) по сравнению с энергией атомов, полученных в результате термического испарения (менее 1 эВ), обеспечивают лучшую адгезию и качество формируемых пленок. Магнетронное распыление обеспечивает возможности точного регулирования параметров разряда, обеспечивая высокую повторяемость процесса, контроль за ростом пленки, толщиной и структурно-фазовым составом.

Использование арочного магнитного поля вблизи мишени, обеспечивающего эффективное удержание электронов и утилизацию их энергии до ухода на анод, позволило снизить рабочее давление без снижения скорости осаждения. Тем не менее, даже при самых низких значениях давления рабочего газа, длина свободного пробега распыленных атомов не превышает нескольких сантиметров. При давлении уровня 2 мТорр до подложки на расстоянии 10 см достигает только 20-30 % распыленных атомов [1]. Помимо снижения эффективности магнетронного распыления, соударения атомов в пространстве дрейфа снижает их среднюю энергию, что в свою очередь влияет на качество формируемых покрытий [2].

Помимо изменения конфигурации разрядного промежутка и геометрии распыляемой мишени магнетрона, для снижения давления традиционно используются внешние ассистирующие разряды, обеспечивающие в область магнетронного разряда поток электронов, либо ионов [3,4]. Однако энергетическая эффективность таких двухступенчатых систем, как правило, оказывается невысокой. В разрядах с инъекцией высокоэнергетических ионов это связано с тем, что коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии при энергиях ионов ниже 1 кэВ меньше единицы и увеличение энергии и тока ионов из внешнего источника превращает систему магнетронного распыления в классическую систему ионного распыления мишени высокоэнергетичным ионным пучком, где арочное магнитное поле магнетрона играет второстепенную роль. В системах с электронным ассистированием магнетронного разряда, внешний источник расположен на периферии разрядной системы и за пределами области основной ионизации магнетрона. Для обеспечения необходимого эффекта электроны из внешнего источника должны двигаться из области относительно слабого магнитного поля (на периферии) в область более сильного (в зоне рейстрека). Эффективное замагничивание ассистирующих электронов уже на внешних силовых линиях магнитного поля и их преждевременный уход на анод снижают энергетическую эффективность таких схем.

Инъекция ассистирующих электронов не с внешней, а внутренней стороны мишени магнетрона представляется более перспективным. Инжектируемые электроны в этом случае получают ускорение в прикатодном слое также, как и электроны, выбитые с поверхности мишени в результате вторичной ион-электронной эмиссии. Принимая во внимание высокий коэффициент ионизационного усиления инжектируемыми электронами в низковольтном тлеющем разряде и эффективное замагничивание электронов в арочном магнитном поле магнетронного разряда, такой подход является более энергетически выгодным, позволяя кратно снизить ток ассистирующего источника. В данной работе приводится сравнение характеристик стандартного магнетронного разряда с

магнетронным разрядом с инъекцией электронов, ускоренных в катодном слое, в той же конфигурации электродов и магнитного поля.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема разрядной системы с инъекцией и ускорением электронов в катодном слое магнетронного разряда представлена на рисунке 1. Диаметр мишени магнетрона 1 составлял 125 мм при толщине 3–4 мм. Основное отличие от классического планарного магнетрона заключается в том, что вместо цилиндрического магнита в центре мишени установлен кольцевой магнит 5, внутри которого размещен эмиттер электронов 6. В данной работе эмиттером электронов являлась плазма тлеющего разряда с полым катодом. Работы такого эмиттера требует подачи в область полого катода рабочего газа с расходом $5 \div 10 \text{ см}^3/\text{мин}$. В тех случаях, когда дополнительный расход газа в эмиттер является нежелательным, возможно использование вакуумного дугового разряда (импульсный режим), либо термоэмиссионного катода (непрерывный режим) в качестве эмиттера электронов. Инъекция электронов из эмиттера в магнетронный разряд осуществляется через центральное эмиссионное отверстие 3 диаметром 1.5–4 мм в мишени магнетрона 1. Для эффективного удержания инжектированных электронов в зоне основной ионизации магнетрона использовался электрод-отражатель 2 конической формы, препятствующий преждевременному уходу высокоэнергетичных электронов по силовым линиям арочного магнитного поля на анод магнетрона 4. Электрод-отражатель может находиться как под потенциалом самой мишени, так и под отрицательным плавающим потенциалом ($40 \div 60 \text{ В}$).

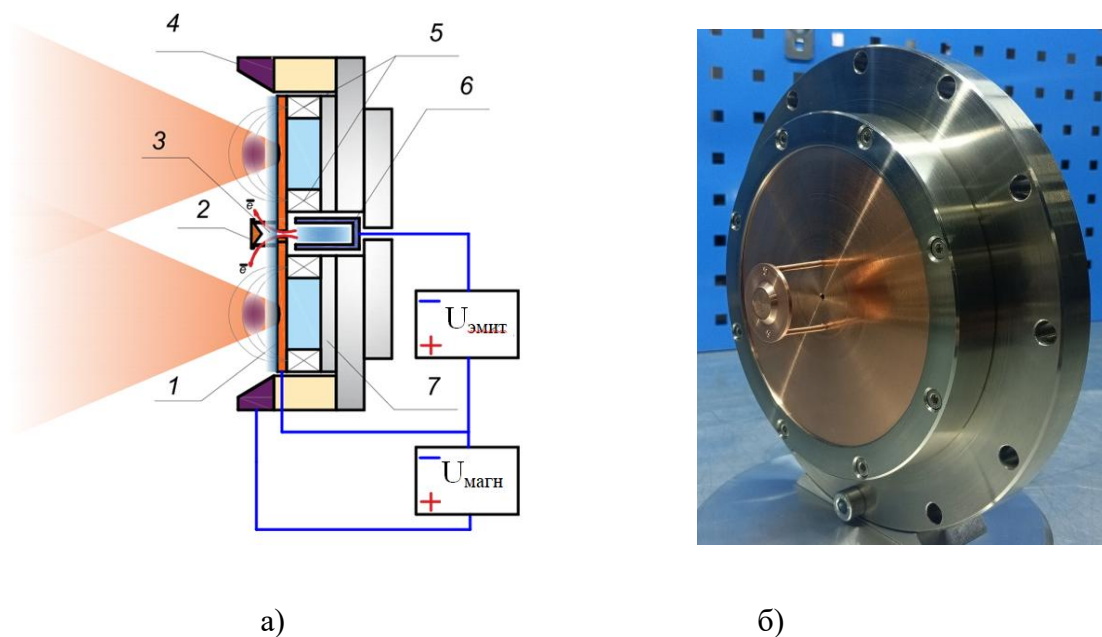


Рис.1. Схема разрядной системы (а) и внешний вид магнетрона с электродом–отражателем (б): 1 – мишень магнетрона; 2 – перераспределяющий электрод; 3 – ускоряющий прикатодный слой; 4 – анод магнетрона; 5 – кольцевая магнитная система (NdFeB); 6 – полый катод эмиттера; 7 – магнитопровод. $U_{\text{ЭМИТ}}$ – источник питания эмиттерного разряда; $U_{\text{МАГН}}$ – источник питания магнетронного разряда.

Особенностью схемы питания данной разрядной системы является то, что анод эмиттерного разряда одновременно является катодом магнетронного разряда. Это обеспечивает минимальные энергетические затраты для инъекции электронов. Анодное магнитное поле вблизи поверхности мишени обеспечивалось двумя кольцевыми наборами магнитов. Внешнее кольцо с наружным диаметром 124 мм состояло из 66 кубических магнитов NdFeB размером $10 \times 10 \times 10$ мм (2 ряда по 33 магнита). Внутреннее кольцо с наружным диаметром 46 мм состояло из 18 кубических магнитов NdFeB размером $10 \times 10 \times 10$ мм (2 ряда по 9 магнита). Максимальное значение магнитной индукции на поверхности мишени составляло 120 мТл. Анодом магнетронного разряда являлся кольцевой электрод 4 из нержавеющей стали.

Магнетрон был размещен на торце вакуумной камеры объемом 0.2 м^3 , изготовленной из нержавеющей стали. Вакуумная камера откачивалась с помощью турбомолекулярного насоса со скоростью 500 л/с до остаточного давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Рабочий газ подавался в полый катод эмиттерного разряда и в анодную область магнетронного разряда. Расход контролировался электронным регулятором расхода газа. Питание разрядов осуществлялось от источников питания с режимами стабилизации тока, напряжения и мощности разряда [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В магнетронном разряде, как разновидности тлеющего разряда низкого давления, доля электронного компонента в токе разряда не превышает 10 %. При достаточно низком коэффициенте вторичной ион-электронной эмиссии (порядка 0.1), самоподдержание разряда осуществляется за счет высокого коэффициента электронной ионизации газа (порядка 10). В таких условиях наличие даже небольшой порции дополнительных высокоэнергетичных электронов существенно меняет характеристики тлеющего разряда [6]. Прежде всего, обеспечивается поддержание разряда в области низкой концентрации нейтралов при соответствующем уменьшении давления рабочего газа. В самостоятельной форме разряда в результате увеличения длины ионизации в таком случае наблюдается дефицит ионов и, как следствие, вторичных электронов, что приводит к переходу в слаботочную форму (единицы мА), либо полному погасанию разряда. Инжекция электронов с их последующим ускорением в катодном слое, а также возможность независимого регулирования тока инжекции, обеспечивают выполнение условия самоподдержания разряда и расширение диапазона рабочих параметров. Как показывают эксперименты, для поддержания тока магнетронного разряда на уровне нескольких сотен мА в области предельно низкого рабочего давления ($2.5 \cdot 10^{-4}$ Торр) достаточно инжекции электронов с током 50 мА (рис.2.), что в 40 раз ниже, чем при использовании источника электронов внешнего расположения [3].

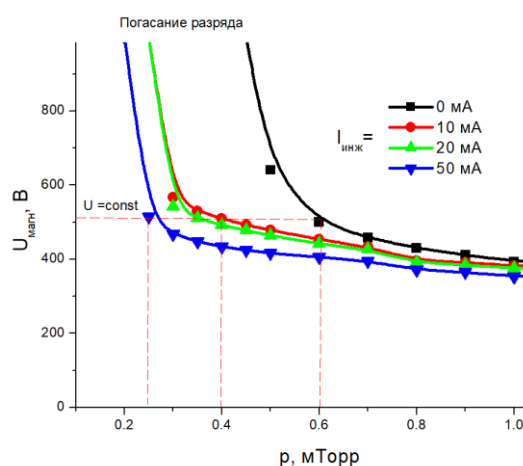


Рис.2. Зависимость напряжения горения магнетронного разряда с электродом-отражателем от давления рабочего газа при различном токе инжекции. Ток магнетрона 500 мА.

Необходимо отметить, что в отсутствие пучка инжектируемых электронов само по себе присутствие электрода-отражателя не влияет на ВАХ магнетронного разряда (рис.3 а,б). При фиксированной величине тока разряда, инжекция электронов без электрода-отражателя приводит к снижению напряжения горения разряда приблизительно на 50-200 В (рис.3 в). Максимальный же эффект достигается только при комплексном использовании инжекции электронов и электрода-отражателя. В этом случае снижение напряжения составляет от 100 до 250 В (рис.3 г).

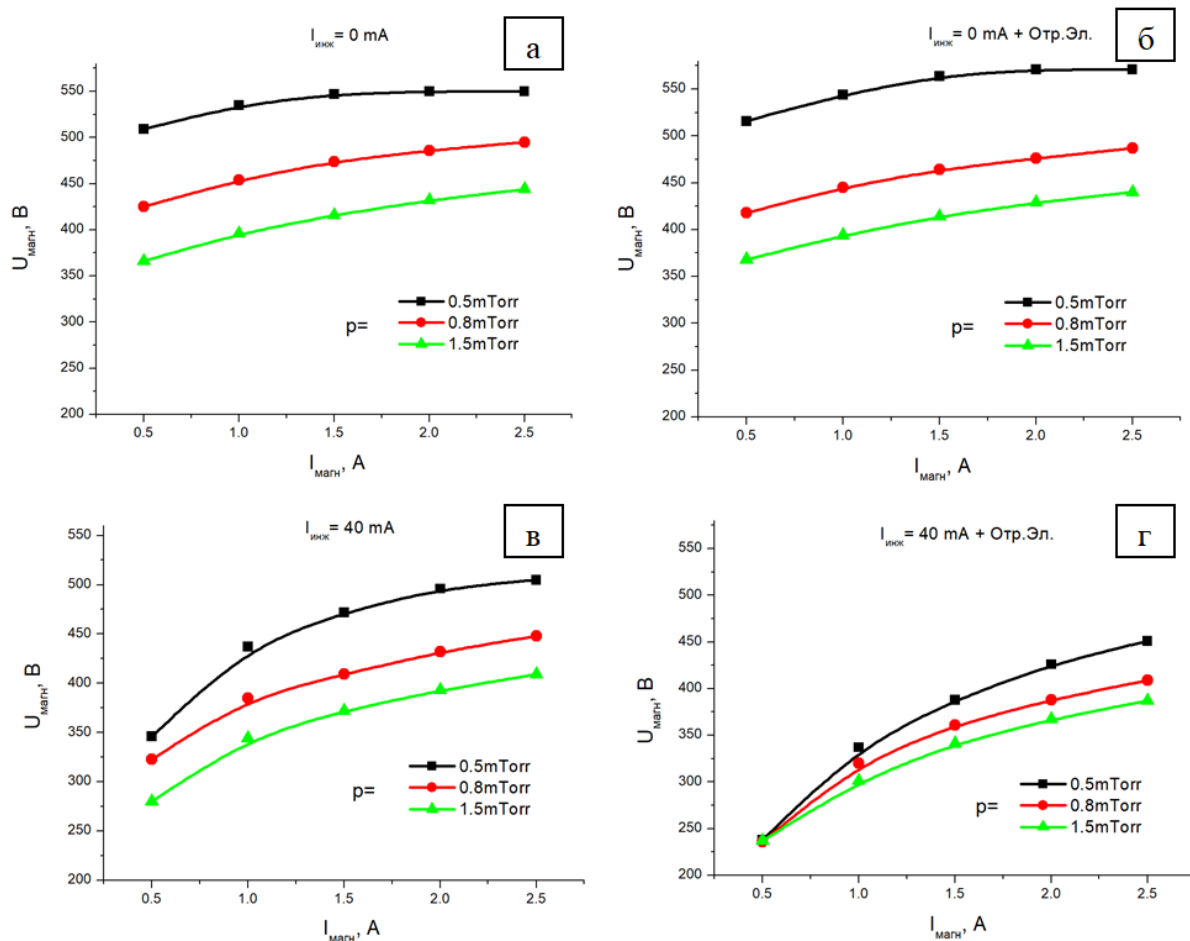


Рис.3. Влияние инжекции электронов и отражательного электрода на ВАХ магнетронного разряда для нескольких значений рабочего давления.

При фиксированной величине рабочего давления, инжекция электронов как с электродом-отражателем, так и без него, обеспечивает параллельное смещение ВАХ магнетронного разряда (рис.4). При этом использование электрода-отражателя смещает характеристику таким образом, как это происходило бы при соответствующем увеличении тока инжекции. Фактически такой эффект достигается за счет уменьшения потерь инжектируемых электронов, уходящих из зоны разряда в аксиальном направлении и перераспределении их из центральной части мишени (зона эмиссионного отверстия) в зону основной ионизации (зона в области т.н. рейстрека).

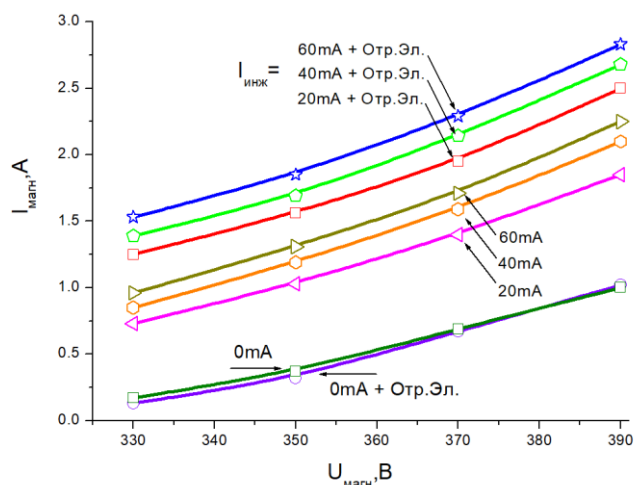


Рис.4. Влияние величины тока инжекции на ВАХ магнетронного разряда. Давление аргона 1.3 мТорр.

Использование двух независимых источников питания, при котором источник питания эмиттерного разряда регулирует ток инжектируемых электронов, а источник питания магнетронного разряда задает энергию, которую получают инжектируемые электроны в прикатодном слое, позволяет регулировать либо ток инжектируемых электронов при их постоянной энергии, либо энергию при постоянном количестве инжектируемых электронов.

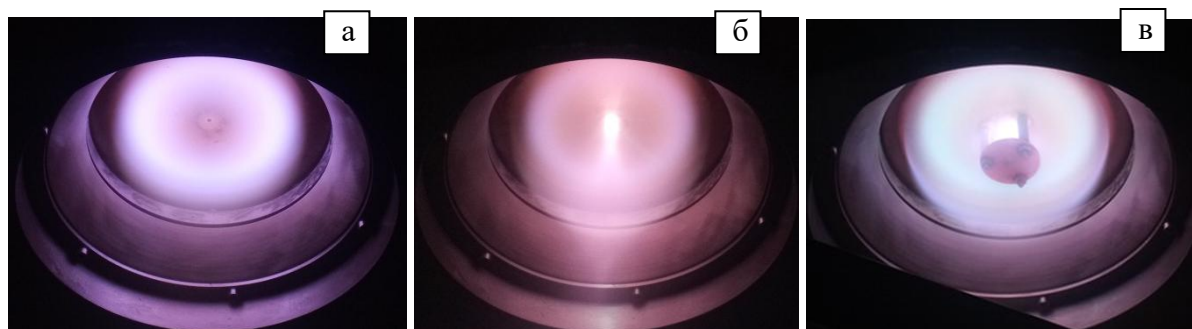


Рис.5. Фотографии свечения плазмы в различных режимах работы: а – без инжекции; б – с инжекцией без электрода-отражателя; в – с инжекцией и электродом-отражателем. Рабочее давление 1 мТорр.

Это позволяет реализовать несколько режимов функционирования в одном разрядном устройстве. В отсутствие инжекции, устройство функционирует в стандартном магнетронном режиме (рис.5 а). При включении инжекции электронов, без использования электрода-отражателя (рис.5 б), за счет ухода части инжектированных электронов вдоль линий магнитного поля, в аксиальном направлении формируется область генерации газовой плазмы, распространяющаяся на 15÷20 см от плоскости мишени. При этом плотность ионного тока в области подложки возрастает в 1.5÷2 раза. Поскольку в режиме стабилизации тока магнетронного разряда, инжекция в разрядный промежуток высокоэнергетичных электронов приводит к снижению напряжения горения магнетронного разряда (рис.3 в, г), то регулируя величину тока инжекции возможна реализация магнетронного разряда при низком напряжении горения, когда ионное распыление мишени будет несущественно (менее 200 В). В этом случае разрядная система

будет функционировать как генератор газовой плазмы, например для очистки поверхности подложки перед осаждением пленки, либо активации поверхности. В режиме с инжекцией электронов и электродом-отражателем (рис.5 в) при стабилизации напряжения горения магнетрона и, соответственно, фиксированной величине прикатодного падения, обеспечивается ускорение инжектируемых электронов до высоких значений энергии (400÷500 эВ). Инжекция дополнительной порции высокоэнергетичных электронов в область магнетрона и их удержание в зоне основной ионизации обеспечивает увеличение тока магнетронного разряда и скорости ионного распыления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнетронный разряд с ускорением инжектируемых электронов в катодном слое имеет расширенный диапазон рабочих параметров. Отличительной особенностью такого подхода являются низкие энергетические затраты на ассистирующий разряд по отношению к мощности основного магнетронного разряда. Использование инжекции электронов с регулируемой величиной тока, а также организация условий для их предпочтительного распространения (в аксиальном, либо радиальном направлении) за счет специального перераспределяющего электрода на пути инжектированных электронов позволяют реализовать режимы магнетронного разряда с широким диапазоном независимого регулирования параметров, как по току, так и по напряжению горения, в т.ч. в ранее недостижимых областях предельно низкого рабочего давления (вплоть до 0.25 мТорр).

Исследования по непрерывной форме магнетронного разряда с эмиттером на основе полого катода выполнены по теме государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM–2021–0006. Исследования по импульсной форме магнетронного разряда с эмиттером на основе вакуумного дугового разряда выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект 21-19-00136).

ЛИТЕРАТУРА

1. Митин Д. М., Сердобинцев А. А., Влияние рассеяния распыленных атомов на скорость роста пленок, полученных методом магнетронного распыления, Письма в Журнал технической физики, Т.43, №17, 78 (2017)
2. Zheng B. C., Meng D., Che H. L., Lei M. K., On the pressure effect in energetic deposition of Cu thin films by modulated pulsed power magnetron sputtering: A global plasma model and experiments, J. Appl. Phys. 117, 203302 (2015)
3. Cuomo J., Kaufman H. R., Rossnagel S. M., Hollow cathode enhanced magnetron sputter device, US Patent 4,588,490 (1985)
4. Жуков В.В., Кривобоков В.П., Янин С.Н., Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком, Известия Томского политехнического университета, Т.307, №7, 40 (2004)
5. <http://apelvac.com/catalog/groups/27>
6. Shandrikov M.V., Vizir A.V., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Bulk Plasma Production Using Gaseous Discharge System with External Electron Injection, AIP Conference Proceedings 669, 380 (2003)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шандриков Максим Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник (ORCID: 0000-0002-0844-0356). Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск. e-mail: shandrikov@opee.hcei.tsc.ru

Черкасов Александр Алексеевич – аспирант (ORCID: 0000-0002-2429-4969). Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск. e-mail: cherkasov@opee.hcei.tsc.ru

Оскирко Владимир Олегович – кандидат технических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-5167-0133). Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, ООО «Прикладная электроника» технический директор, e-mail: oskirkovo@gmail.com

Климов Александр Сергеевич – профессор, старший научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-5848-0519). Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск. e-mail: aleksandr.s.klimov@tusur.ru

Тюньков Андрей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-9742-9636). Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск. e-mail: tyunkov84@mail.ru

Фролова Валерия Петровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник (ORCID: 0000-0002-6494-8621). Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск. e-mail: frolova_valeria_90@mail.ru

Визирь Алексей Вадимович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (ORCID: 0000-0002-9563-8650). Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск. e-mail: vizir@opee.hcei.tsc.ru