

УДК 537.533

ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИССИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Часть 2

канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ,
д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ, П.Н. СОЛДАТЕНКО
(Полоцкий государственный университет);
д-р физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ
(Физико-технический институт НАН Республики Беларусь, Минск)

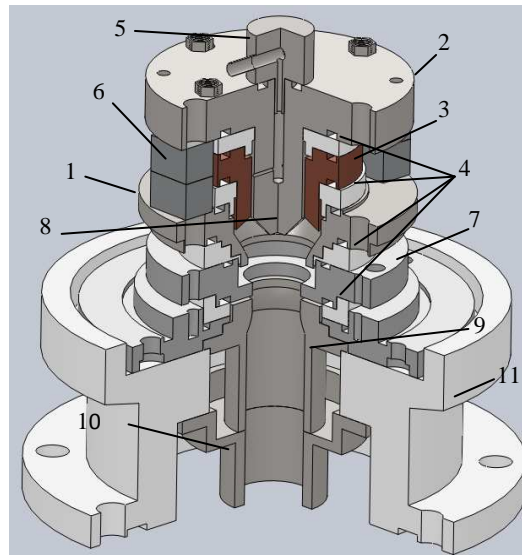
Продолжение работы, опубликованной в предыдущем номере. Представлена конструкция плазменного источника электронов со скрещенными $E \times H$ полями, способного формировать низкоэнергетичные электронные и ионные пучки для реализации плазмохимических процессов и технологий нанесения пленок и покрытий различного назначения методами попеременного или одновременного теплофизического электронного и модифицирующего ионного воздействия. Предложен ряд эскизов конструкций структур плазменных источников, перспективных к использованию для реализации комбинированного воздействия электронно-ионными пучками.

Ключевые слова: плазменный эмиттер, электродная структура, пучок заряженных частиц.

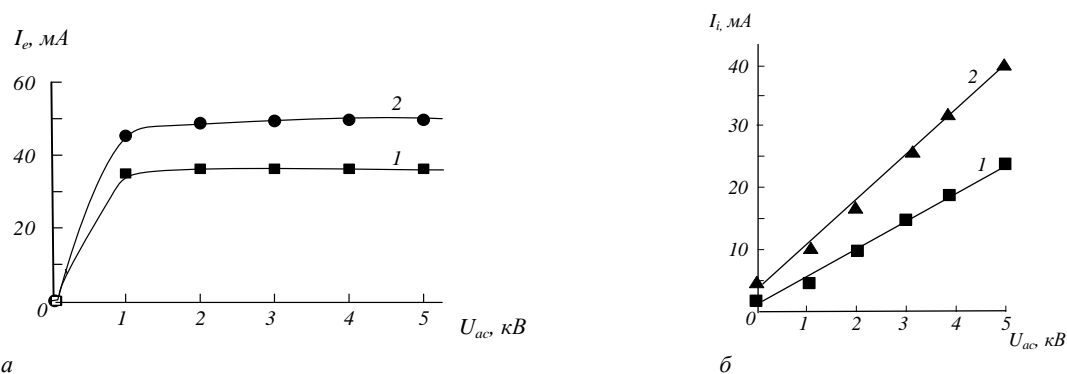
Источник низкоэнергетичных пучков заряженных частиц: электронов и ионов. Для реализации представленных в первой части данной статьи [1] технологий обработки материалов с применением низкоэнергетичных пучков заряженных частиц (с энергией до 5 кэВ) возможно применение плазменного источника электронов [2, 3], конструкция которого приведена на рисунке 1.

1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод;
4 – изоляторы; 5 – штуцер для напуска плазмообразующего
газа; 6 – постоянные магниты; 7 – дополнительный
электрод; 8 – отверстие для напуска газа; 9 – расширитель
плазмы; 10 – ускоряющий электрод; 11 – фланец

Рисунок 1. – Конструкция плазменного источника электронов со скрещенными $E \times H$ полями



В данном источнике основные процессы ионизации газа происходят в области, ограниченной внешним и внутренним катодами 1, 2 и анодом 3. Магнитное поле формируется при помощи постоянных магнитов 6, расположенных между катодами 1 и 2. Такое расположение магнитов обеспечивает перпендикулярное, относительно рабочей поверхности катодов, направление вектора магнитной индукции. Это ограничивает подвижность электронов из плазмы на анод и приводит к повышению плотности плазмы в этой области. Плазмообразующий газ в разрядную структуру напускается через канал 8 в штуцере 5 и катоде 1. Применение дополнительного электрода 7, расположенного между внутренним катодом и расширителем, обеспечивает повышение эффективности извлечения и стабильность эмиссионного тока [2]. Основные характеристики данного источника и фотографии электронных и ионных пучков представлены на рисунках 2–3.



потенциал электрода-расширителя – катодный; ток разряда: 1 – 150 мА; 2 – 300 мА

Рисунок 2. – Характеристики извлечения электронов (а) и ионов (б)

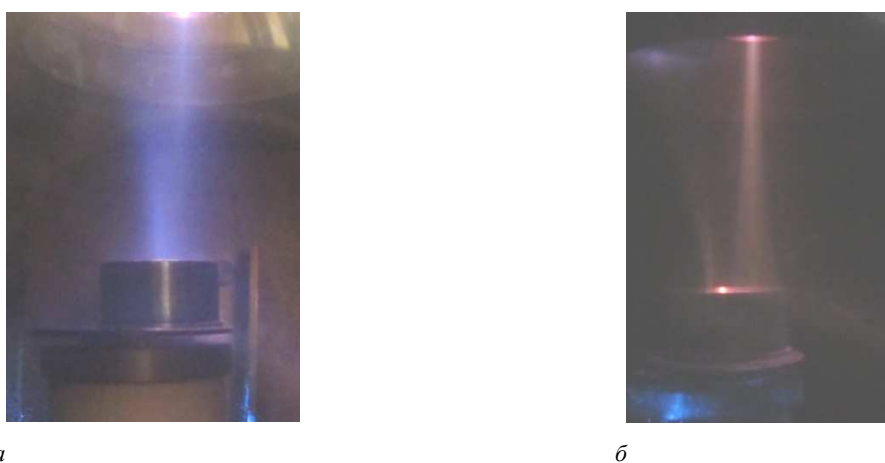


Рисунок 3. – Внешний вид электронного (а) и ионного (б) пучков заряженных частиц

Для определения наиболее перспективных режимов работы представленной конструкции низкоэнергетического источника были проведены эксперименты по реализации воздействия на образцы стали в различных режимах работы: электронном, ионном, комбинированном. Исследования процесса закалки проводились на примере инструментальной стали X12VM, применяемой для изготовления штамповой оснастки. При этом изменялись плотность тока в газоразрядной структуре и температура нагрева образцов. Наилучшие результаты были достигнуты при комбинированном режиме воздействия.

Результаты измерения твердости (HV) и микротвердости ($H_{0,19}$) стали X12VM после комбинированного режима электронно-ионной обработки представлены в таблице 1. Определение HV проводилось на неимплантированной поверхности образцов и характеризовало изменение твердости стали в процессе высокотемпературного воздействия при ионном легировании. С помощью измерения $H_{0,19}$ оценивалось упрочнение имплантированных поверхностных слоев стали.

Таблица 1. – Твердость HV и микротвердость $H_{0,19}$ термообработанной стали X12VM до и после обработки электронно-ионной ($j \approx 2 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$) при различных температурах

Сталь X12VM					
Измеряемая характеристика	Режим обработки				
	Исходное состояние	Температура электронно-ионной обработки, К			
		620	670	720	770
Микротвердость поверхности $H_{0,19}$, МПа	6100	9600–10 000	16 000–16 500	14 000–15 000	10 500–11 000
Твердость стали HV, МПа	5950	5800	5700	5300	4900

На рисунке 4 приведен график распределения микротвердости по глубине модифицированного слоя. Видно, что имплантация ионов азота при 670 К приводит к увеличению глубины модифицированного слоя до величины порядка 10–15 мкм. Микротвердость слоя существенно возрастает и достигает уровня $H_{0,19} = 16\ 000$ МПа.

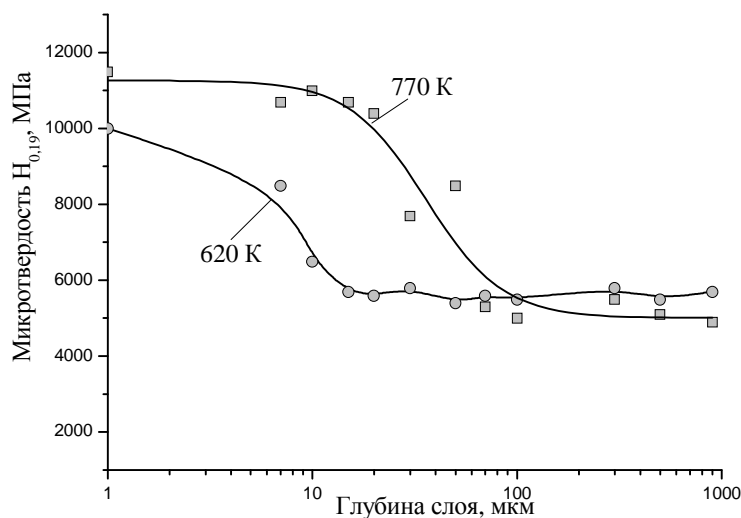


Рисунок 4. – Распределение микротвердости по глубине модифицированных слоев в стали X12VM

Конструкция источника с плазменным эмиттером для компенсации ионного пучка или совместного ионно-электронного воздействия. Одним из методов увеличения эффективности ионных источников, широко применяемых для нанесения тонкопленочных слоев металлов, полупроводников и диэлектриков, является использование высокоточных эмиттеров электронов, необходимых для поддержания процессов ионизации и обеспечения устойчивого горения разряда, компенсации как объемного заряда в пучке, так и поверхностного на формируемой пленке [4–9]. В настоящее время для этих целей используются твердотельные накаливаемые эмиттеры [4–9]. Однако в условиях интенсивных ионных потоков ресурс таких эмиттеров ограничен вследствие интенсивной ионной бомбардировки. Поэтому адаптация представленной конструкции, или разработка новых конструкций плазменных источников для системы компенсационных эмиттеров электронов является еще одним перспективным направлением применения представленных плазменных источников заряженных частиц.

В системах с плазменным эмиттером получение низкоэнергетичных компенсирующих электронных пучков возможно либо вследствие рекуперации энергии, либо за счет создания оптимальных условий для формирования таких пучков непосредственно в источнике. При формировании электронных пучков требуемой геометрии в системах с плазменным эмиттером определяющими являются положение и форма эмиттирующей плазменной поверхности. Они, в свою очередь, обусловлены параметрами плазмы, характеристиками системы формирования пучка (потенциал и геометрия формирующих электродов) и величиной приведенной напряженности поля ускоряющего электроны. Последнее определяет энергию электронов в пучке.

Поскольку условия формирования ионных пучков в известных системах магнетронного типа близки, в первую очередь по давлению, к условиям формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером, то возможно создание комбинированных источников, обеспечивающих формирование как электронных, так и ионных пучков [2–5, 7]. Такие системы могут формировать скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов или обеспечивать попеременное или одновременное воздействия пучками обоих типов заряженных частиц, и, значит, представляют уникальный универсальный инструмент для нанесения пленочных покрытий различного назначения. В настоящее время существуют конструкции ионных источников и накальные системы, создающие компенсирующие электронные пучки [4, 5]. Однако для этих целей источники электронов с плазменным эмиттером не использовались. Кроме этого, до настоящего времени не разработаны конструкции эффективных ионных источников, совмещенных с компенсирующими электронными источниками с плазменным эмиттером.

Существует три возможных и принципиально отличающихся способа реализации компенсации электронами заряда пучка распыляющих ионов.

Первый заключается в том, что распыляемая мишень облучается одновременно ионным и электронным пучками, генерируемыми независимыми источниками ионов и электронов, использующими независимые системы электропитания и управления. В известных случаях реализации такого способа

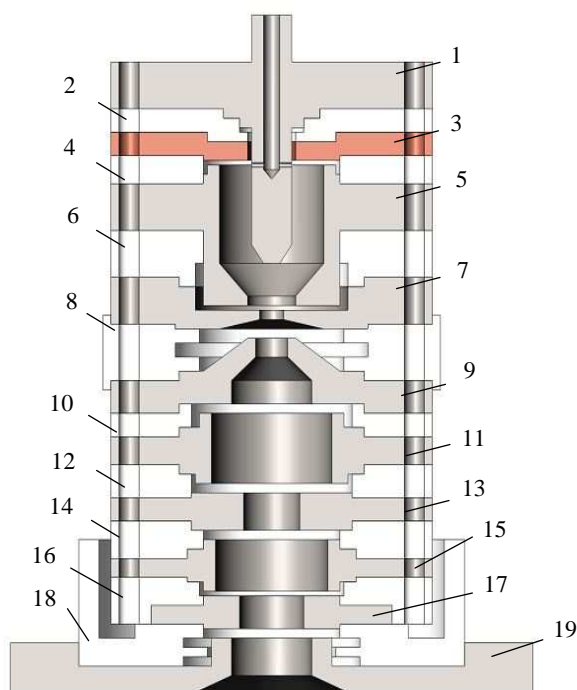
ионный пучок генерируется системой с плазменным эмиттером ионов на основе газового разряда, а электронный пучок генерируется системой на основе термоэмиссии (с термокатодом) [4–9].

Второй способ заключается в поочередно-периодическом воздействии на распыляемую мишень ионного и электронного пучков. Этот способ основан на использовании способности плазменного эмиттера излучать как ионы, так и электроны в зависимости от полярности ускоряющего напряжения. При этом частота переменного ускоряющего напряжения в электронно-ионной оптической системе с плазменным эмиттером определяется в основном, как показали известные примеры использования этого способа [4–9], временем формирования условий на мишени для образования микродуг и, в зависимости от распыляемого материала, обычно должна быть в диапазоне от единицы до десятков килогерц. Таким образом, второй способ может быть реализован на основе единой ионно-электронной оптической структуры.

Третий возможный, но практически не исследованный способ заключается в том, что он частично объединяет упомянутые первые два способа, но исключает применение электронно-оптической системы с термокатодом и обеспечивает непрерывное воздействие ионного и электронного пучков, поступающих на распыляемую мишень через единое пространство дрейфа ускоренных зарядов.

Для реализации этого (третьего) способа распыления материала совмещенным ионно-электронным пучком были разработаны три варианта конструкции их электродных структур (рисунки 5–7).

На рисунке 5 показана схема электродов для формирования последовательно (вдоль оси) двух плазменных эмиттеров: электронного и ионного. Плазма, через часть поверхности которой осуществляется отбор (эмиссия) электронов, формируется в объеме, ограниченном внутренними поверхностями стержневого катода 1, цилиндрического катода 5, вспомогательного анода 3 и основного анода 7. Указанные электроды разделены изоляторами 2, 4 и 6. Катоды 1 и 5 являются наконечниками постоянного магнита, создающего между ними магнитное поле, которое способствует осцилляции вторичных γ -электронов с катодов в пространство формирования плазмы. Электроды 7 и 9 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Изолятор 8 должен быть рассчитан на напряжение, на 50–100 В, превышающее напряжение ускорения ионного пучка. Это напряжение по величине более 2–3 кВ использовать нецелесообразно, так как интенсивность распыления материалов ионами с дальнейшим его увеличением возрастает незначительно.



1 – стержневой катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 – изоляторы; 3 – вспомогательный анод; 5 – цилиндрический катод; 7 – основной анод; 9, 13, 17 – катоды; 11, 15 – аноды; 19 – ускоряющий электрод

Рисунок 5. – Электродная структура для формирования последовательно (вдоль оси) двух плазменных эмиттеров: электронного и ионного

Электроды 9, 11, 13, 15 и 17 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником распыляющих ионов. Эта структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа [4]. Элементы этой структуры 10, 12, 14 и 16 являются изоляторами; элементы 11 и 15 – анодами разрядных ячеек; элементы 9, 13 и 17 – катодами, которые одновременно являются полюсными наконечниками постоянных магнитов, обеспечивающих осцилляцию электронов между катодами второй газоразрядной структуры. Одновременно с этим маг-

нитное поле, формируемое катодами 9, 13 и 17, образует некоторую магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси второй газоразрядной структуры до выхода из источника ионно-электронного пучка в технологическую камеру.

Между электродами 17 и 19 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. Одновременно в этом же промежутке между электродами 17 и 19 осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных в промежутке между электродами 7 и 9. Эмитирующая ионы поверхность плазмы, формирующаяся между электродами 17 и 19, определяет траектории как ионов, так и электронов в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка до распыляемой мишени, а значит и определяет распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

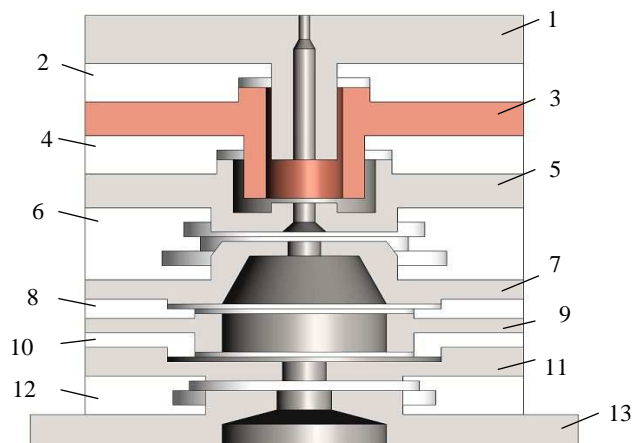
Напуск рабочего газа в ионно-электронный источник осуществляется через отверстия в катоде 1, откачка газа из источника – через отверстие в электроде 19. Формирующийся поток газа создает во всей электродной структуре 1–19 источника определенное распределение давления газа, зависящее как от потока напускаемого газа, так и отдаваемое в технологической камере. Последнее определяет также длину дрейфа ионного пучка в технологической камере с приемлемой потерей энергии и импульса пучка ионов.

При давлении в технологической камере порядка 10^{-2} Па приемлемая длина дрейфа ионно-электронного пучка составляет около 0,1–0,2 м, что обычно достаточно и для технологических целей. Оценочные расчеты показали, что при таком давлении в технологической камере (10^{-2} Па) давление в верхней части второй газоразрядной структуры достигает величины порядка 10^{-1} Па. Можно предполагать, что при таком давлении во второй газоразрядной структуре необходимые параметры электронного пучка из первой газоразрядной структуры (электроды 1–8) будут определяться не только условиями заряда мишени ионным пучком источника, но и условиями инициирования разряда во второй разрядной камере и достижения в ней необходимых параметров плазмы.

На рисунке 6 показана электродная структура источника с совмещенным ионным и электронным пучками, отличающаяся от предыдущей структуры (рисунок 5) тем, что в первой газоразрядной ячейке для формирования эмитирующей плазмы реализуется отражательный разряд пеннинговского типа с полым катодом. Эта ячейка образована полым катодом 1, анодом 3 и катодом 5. Катоды 1 и 5 одновременно являются полюсными наконечниками постоянного магнита и формируют в разрядной ячейке магнитное поле с осевой магнитной индукцией. Этот тип разряда достаточно хорошо изучен и эффективно применяется в плазменных источниках электронов и ионов.

1 – полый катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12 – изоляторы;
3, 9 – аноды; 5, 7, 11 – катоды;
13 – ускоряющий электрод

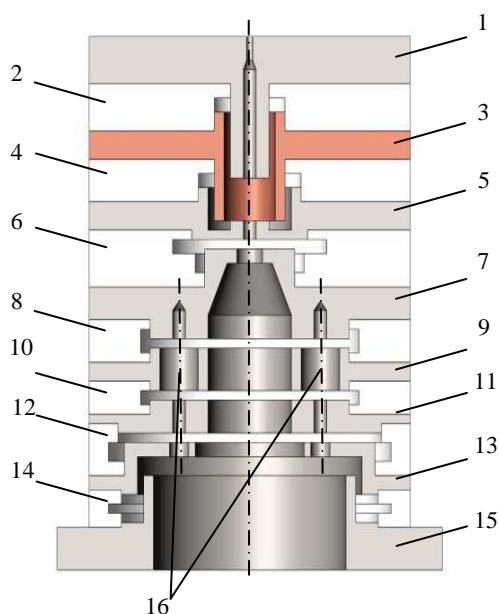
Рисунок 6. – Электродная структура источника с совмещенным ионным и электронным пучками



Вторая газоразрядная ячейка также является модифицированной ячейкой пеннинговского типа и образована катодами 7, 11 и анодом 9. Катоды 7 и 11 являются также полюсными наконечниками постоянного магнита, формирующими магнитное поле в ячейке с осевой индукцией. Применение естественной газоразрядной ячейки для формирования второго плазменного объема (в отличие от структуры, представленной на рисунке 5) обусловлено тем, что из первого плазменного объема (отражательного разряда с полым катодом) будет осуществляться отбор ионов и с помощью ускоряющего электрода 7 формироваться ионный пучок, часть которого будет использована для инициирования разряда во второй разрядной ячейке с постоянным давлением газа, а другая часть ионов пучка, пройдя через систему электродов 7, 9, 11, 13, попадет на распыляемую мишень. При этом длина дрейфа ионного пучка возрастает, в сравнении с источником (см. рисунок 5), и возникает необходимость его сокращения, в частности за счет уменьшения осевой длины второго плазменного образования, которое в источнике рассматриваемо-

го типа является эмиттером электронов. Ускорение электронного пучка осуществляется электродом 13. Элементы 2, 4, 6, 8, 10 и 12 являются изоляторами между электродами источника. Изолятор 6 должен выдерживать приложение к электродам 5 и 7 полного ускоряющего ионы пучка напряжения. Очевидно, что рассмотренная электродная структура (рисунок 6) может работать и по принципу, рассмотренному для электродной структуры (см. рисунок 5). В этом случае изолятор 12 должен быть таким же высоковольтным, как и изолятор 6.

На рисунке 7 показана одна из возможных схем электродной структуры ионно-электронного источника с параллельным относительно оси источника расположением и не связанными между собой (как в источниках на рисунках 1 и 2) газоразрядных объемов, эмитирующих электроны и ионы. Смешивание электронного и ионного пучков в этом источнике должно происходить во внутреннем объеме электрода 15 и в области дрейфа пучка от источника до распыляемой мишени под действием реальной компоненты напряженности электрического поля, обеспечиваемой электродами 13 и 15, а также объемным зарядом ионного пучка.



1 – полый катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 – изоляторы;
3 – анод; 5 – катод; 7 – ускоряющий электрод;
9, 11, 13, 15 – электроды, формирующие магнитную
фокусирующую систему, 16 – газоразрядные ячейки

**Рисунок 7. – Электродная структура
ионно-электронного источника с параллельными
(относительно оси источника) не связанными
между собой газоразрядными объемами,
эмитирующих электроны и ионы**

Электродная структура, включающая полый катод 1, анод 3 и катод 5, образует газоразрядную ячейку пеннинговского типа с полым катодом и обеспечивает эмиссию ионов в ускоряющий промежуток между катодом 5 и ускоряющим электродом 7. Давление газа в области осевых отверстий в электродах 7, 9, 11, и 13 вследствие их достаточно большого диаметра оказывается почти таким же низким, как и в технологической камере. Поэтому предполагается, что плазма в этой области практически не образуется и внутренние стенки осевых отверстий в электродах 7, 9 и 11 образуют электростатическую линзу, оказывающую некоторое фокусирующее действие на ионный пучок и ограничивающую расходимость пучка. Кроме этого, периферийные отверстия в электродах 7, 9 и 11 образуют газоразрядные ячейки 16 пеннинговского типа, расположенные соосно с главной осью источника, равномерно по окружности вокруг главной оси. В масштабе, использованном в рисунке 3, их количество может достигать десяти. Электроды 7 и 11 являются, как и электроды 1, 5, полюсными наконечниками постоянных магнитов. Эта мультиячейчатая газоразрядная структура обеспечивает эмиссию электронов в ускоряющие их промежутки между электродами 11 и 13. После ускорения дискретные электронные пучки смешиваются благодаря электрическим полям с ионным пучком. При необходимости в реальных источниках ионно-электронного пучка может быть использована отдельная система напуска рабочего газа в мультиячейчатую разрядную систему, а также электромагнитная система, установленная ниже электрода 15, для управления и оптимизации смешивания дискретных электронных пучков с ионным, в частности, по распределению плотностей ионного и электронного тока на мишени.

Заключение. Представленные конструкции плазменных источников заряженных частиц, различного технологического назначения, показаны как наиболее перспективные, отличные от традиционных, области их применения. Применение таких источников, а также разработка новых конструкций на их основе будут способствовать повышению эффективности ионно-плазменного нанесения покрытий раз-

личного назначения и качества наносимых покрытий, а также откроют возможности электронно-лучевого ассистирования модификации поверхности материалов ионными пучками и получения покрытий с новыми свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / В.Г. Залесский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 37–44.
2. Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
3. Антонович, Д.А. Применение низкоэнергетичных пучков заряженных частиц для реализации комбинированного воздействия на материалы / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко // Перспективные материалы и технологии : сб. материалов междунар. симп. – Витебск, 2015. – С. 216–218.
4. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.] ; под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
5. Семенов, А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение / А.П. Семенов. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
6. Исследование влияния ионно-электронной эмиссии на характеристики электронного источника с плазменным катодом / С.В. Григорьев [и др.] // Плазменная эмиссионная электроника : тр. II Междунар. семинара, Улан-Удэ, 23-30 июня 2009 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Удэ, 2009. – С. 37–44.
7. Гаврилов, Н.В. Формирование пучка ионов, извлекаемых из плазмы тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 5. – С. 74–81.
8. Никулин, С.П. Влияние ионной эмиссии на характеристики тлеющего разряда с полым катодом / С.П. Никулин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 122–124.
9. Кузьмичёв, А. И. Магнетронные распылительные системы / А. И. Кузьмичёв. – Киев : Аверс, 2008. – Кн. 1 : Введение в физику и технику магнетронного распыления. – 244 с.

Поступила 16.03.2017

PLASMA-EMISSION SYSTEMS FOR ELECTRON-BEAM TECHNOLOGIES

Part 2

D. ANTONOVICH, V. GRUZDEV, P. SOLDATENKO, V. ZALESSKI

Continuation of the work published in the previous issue. The design of a plasma electron source with crossed $E \times H$ fields capable of forming low-energy electron and ion beams for the realization of plasma-chemical processes and technologies for depositing films and coatings for various purposes by alternating or simultaneous thermophysical electronic and modifying ionic effects is presented. A number of sketches of designs of structures of plasma sources promising for use for realization of combined action by electron-ion beams are proposed.

Keywords: plasma emitter, electrode structure, charged particle beam.