

УДК 537.533, 537.533.9, 621.791.92

С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе

Сфокусированные электронные пучки в пушках с плазменным эмиттером: исследования и применение

Представлены результаты исследований последних лет, посвященные изучению особенностей электронно-оптической системы с плазменным эмиттером, направленные на формирование сфокусированных электронных пучков малого диаметра. Показано, что формирование пучка в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером происходит в проникающем из разрядной камеры магнитном поле. Приведены результаты расчетов этого поля. Установлено, что созданием квазиоднородного магнитного поля в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером можно значительно улучшить фокусировку пучка. Описаны механизмы влияния газа в области первичного формирования, ускорения и транспортировки пучка на энергетическую неоднородность пучка и его ток. Представлены результаты по измерению яркости электронного пучка пушки с плазменным эмиттером. Яркость сфокусированного пучка пушки с плазменным эмиттером не уступает яркости пучков, полученных в термокатодных пушках. Представлены результаты исследований, направленных на создание устройства вывода электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером. Показано, что перепад давления до атмосферного в устройстве вывода электронного пучка в атмосферу может быть обеспечен двумя газодинамическими ступенями, которые откачиваются насосами с оптимальной производительностью. Приведено описание конструкции устройства с выводом электронного пучка в атмосферу на основе пушки с плазменным эмиттером, представлены основные характеристики. Приведен опыт как технологического применения пушек с плазменным эмиттером, так и в составе установок для проведения научных исследований.

Ключевые слова: пушка с плазменным эмиттером, электронно-оптическая система, электронный пучок, плазменный эмиттер, фокусировка, электронно-лучевые технологии.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-46-61

Одно из научных направлений Томского университета систем управления и радиоэлектроники – плазменная эмиссионная электроника. В рамках этого направления многие годы проводятся исследования по созданию электронных источников (электронных пушек) с плазменным эмиттером.

В настоящее время изучены и нашли практическое применение пушки с плазменным эмиттером для получения непрерывных и импульсных, узких и широких электронных пучков с различными параметрами, с разной формой поперечного сечения, с заданным распределением плотности тока по сечению. Такое многообразие генерируемых плазменными пушками электронных пучков позволяет применять пушки практически во всех современных электронно-лучевых технологиях, таких как сварка, наплавка, модификация материалов и др. [1]. Пушки постоянно совершенствуются, появляются новые сведения об особенностях и возможностях их практического применения.

Наибольшую сложность для изучения и совершенствования, на наш взгляд, представляют пушки, генерирующие сфокусированные электронные пучки с высокой яркостью. Такие пучки могут использоваться не только в традиционных технологиях, но и в новых, интенсивно развивающихся в последние годы. К ним относятся в первую очередь аддитивные технологии [2], а также вневакуумные применения, для которых требуется через надежную и недорогую систему вывести пучок в газ повышенного давления.

Сложность изучения таких пушек обусловлена тем, что кроме исследования плазмы как эмиттера электронов отдельного внимания требуют процессы

формирования пучков. Часто эти исследования выполняются для достижения параметров, уже полученных в пушках с твердотельным термоэмиттером. Простой перенос уже отработанных в пушках с термокатодом принципов построения такой системы на систему с плазменным эмиттером невозможен.

В настоящей работе приведены результаты исследований последних лет, посвященные изучению особенностей электронно-оптической системы с плазменным эмиттером, и направленные на формирование сфокусированных электронных пучков малого диаметра. Эти исследования позволили достичь такого уровня разработки пушек с плазменным эмиттером, что во многих применениях они оказываются предпочтительнее термокатодных.

Электронно-оптическая система пушек с плазменным эмиттером

Несмотря на большое разнообразие созданных пушек с плазменным эмиттером [3–6], сфокусированные электронные пучки удалось получить при использовании лишь ограниченного числа типов разрядов (разряды с полым катодом и различными системами инициирования, высоковольтный тлеющий разряд, некоторые другие) [3]. Более того, в электронно-лучевых промышленных технологиях нашли применение пушки с плазменным эмиттером только одного типа, основанные на отражательном разряде с полым катодом [3, 7].

Отбор электронов в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером происходит с поверхности плазмы газового разряда в ускоряющий промежуток [5, 7].

Плазма генерируется в разрядной камере, схема которой приведена на рис. 1.

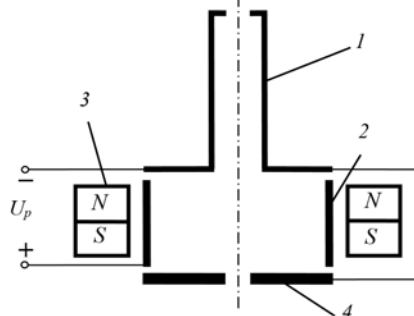


Рис. 1. Схема разрядной камеры пушки с плазменным эмиттером: 1 – полый катод; 2 – цилиндрический анод; 3 – постоянный магнит; 4 – эмиттерный электрод

Разрядная камера образована полым катодом 1, цилиндрическим анодом 2 и эмиттерным катодом 4 с выполненным на его оси каналом. Для зажигания и устойчивого горения разряда в разрядной камере постоянным магнитом 3 создается магнитное поле порядка 0,08 Тл и напуском газа поддерживается давление около $5 \cdot 10^{-2}$ Торр. Катоды выполнены из магнитного материала и являются элементами магнитной цепи. В стационарном режиме в разрядной камере существует плазма с неоднородным распределением концентрации, максимум которого приходится на осевую область разряда.

В электронно-оптической системе с плазменным эмиттером можно выделить четыре характерные области: область первичного формирования пучка, область ускорения (ускоряющий промежуток), область транспортировки (пространство дрейфа), область фокусировки (фокусирующая система).

Область первичного формирования электронного пучка включает в себя эмиттирующую поверхность плазмы 1 (рис. 2) и электрическое поле вблизи этой поверхности. В большинстве случаев в области первичного формирования присутствует и магнитное поле системы инициализации. Эмиттирующая поверхность плазмы может формироваться как внутри цилиндрического канала, выполненного в эмиттерном электроде 2 разрядной камеры, так и вне его [8].

Область ускорения (см. рис. 2) – это область между эмиттерным электродом 2 и ускоряющим электродом (экстрактором) 4, в которой сосредоточено высоковольтное электрическое поле, величина которого определяет энергию электронов в пучке 6.

Область транспортировки (пространство дрейфа) представляет собой эквипотенциальное пространство между ускоряющим электродом 4 и коллектором электронов 7.

Область фокусировки – это, как правило, часть области транспортировки, в которой локализовано магнитное поле фокусирующей системы 5.

Плазма как эмиттер электронов имеет ряд особенностей, отличающих электронно-оптическую систему с плазменным эмиттером от системы с твердотельным катодом. Форма и положение этой поверхности не являются строго фиксированными и зависят от концентрации плазмы, величины и формы

электрического поля, давления и рода газа и других факторов [3]. При изменении напряженности электрического поля эмиттирующая поверхность перемещается. Перемещение происходит до тех пор, пока не выполнится условие равенства давления электростатического поля и газокинетического давления плазмы [3].

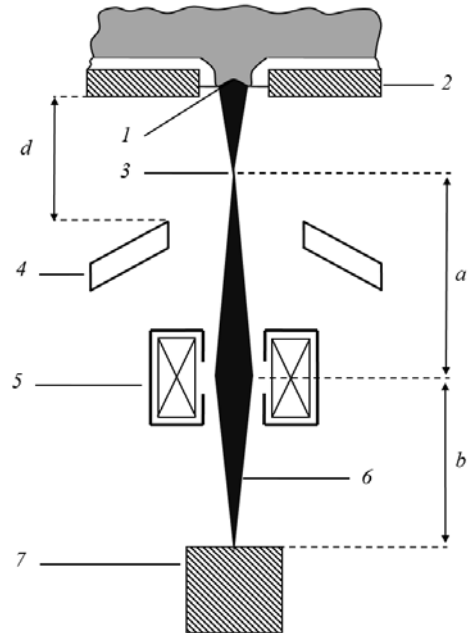


Рис. 2. Электронно-оптическая система с плазменным эмиттером: 1 – эмиттирующая поверхность плазмы; 2 – эмиттерный электрод; 3 – кроссовер; 4 – ускоряющий электрод; 5 – фокусирующая система; 6 – электронный пучок; 7 – коллектор электронов; d – длина ускоряющего промежутка; a – расстояние от кроссовера до фокусирующей системы; b – расстояние от фокусирующей линзы до коллектора электронов

Изменение положения эмиттирующей поверхности может определять вид эмиссионных и электронно-оптических характеристик электронного источника. Поэтому при разработке плазменных источников электронов принимаются меры по стабилизации положения эмиссионной поверхности плазмы [3]. Обычно параметры электронной пушки выбираются таким образом, чтобы эмиттирующая поверхность была локализована в канале [9]. Эмиссионный канал задает поперечный размер эмиттирующей поверхности и ограничивает проникновение электрического поля в разрядную камеру со стороны ускоряющего промежутка.

Как показывают эксперименты, распределение по скоростям основной доли эмиттированных из плазмы электронов можно считать близким к максвелловскому. При этом температура электронов в зависимости от параметров и типа разряда может составлять 5–15 эВ [5], что значительно больше температуры термоэлектронов. Считалось, что получение остросфокусированных пучков в таких источниках затруднительно из-за высокой температуры электронов в плазме. Однако существует ряд специфических для плазменного эмиттера факторов,

действие которых на фокусировку не учитывалось. Один из таких факторов – магнитное поле, в котором горит отражательный разряд.

Магнитное поле в области формирования и ускорения электронного пучка

Магнитное поле отражательного разряда сконцентрировано в разрядной камере. Однако существует еще поле рассеяния, которое замыкается через зазоры между магнитопроводящими элементами конструкции источника. Это поле может присутствовать и в электронно-оптической системе источника. Проникающее в электронно-оптическую систему магнитное поле будет изменять условия формирования электронного пучка. Следовательно, с одной стороны, необходимо ослабить расфокусирующее действие этого поля на пучок. С другой стороны, не исключена возможность такой организации магнитного поля в электронно-оптической системе, которая позволила бы улучшить фокусировку.

Расчеты [10] показывают, что конфигурацию и величину этого поля в областях электронно-оптической системы можно менять выбором материалов электродов источника, образующих магнитную цепь. Результаты этих исследований позволяют оптимизировать как условия формирования электронного пучка в области ускорения, так и условия ввода его в область магнитного поля фокусирующей линзы.

На рис. 3 приведены рассчитанные в программе Femm [11] распределения магнитного поля в электронно-оптической системе.

Распределения демонстрируют возможность организации электронно-оптической системы с полностью экранированным (рис. 3, а), частично экранированным (рис. 3, б) и не экранированным (рис. 3, в) от магнитного поля эмиттером.

Под степенью экранировки эмиттера принято понимать отношение индукции поля у эмиттера B_e к индукции B в области транспортировки электронно-оптической системы [12].

Необходимо отметить, что для системы с плазменным эмиттером понятие экранировки может зависеть от режима работы электронного источника. Так, для варианта, показанного на рис. 3, а, условие $B_e/B \sim 0$ (полная экранировка эмиттера от магнитного поля) выполняется лишь тогда, когда эмитирующая поверхность плазмы сформирована в глубине эмиссионного канала. Однако если для этой же ситуации эмитирующая поверхность переместится к выходу из эмиссионного канала, то реализуется вариант с частичной экранировкой эмиттера ($0 < B_e/B < 1$).

На рис. 3, б представлен вариант с частичной экранировкой эмиттера. Степень экранировки будет зависеть от положения эмитирующей поверхности в канале. Однако важно то, что по сравнению с представленным на рис. 3, а вариантом магнитная индукция в областях первичного формирования и ускорения оказывается в 6–10 раз большей.

Расчет, результаты которого представлены на рис. 3, в, демонстрирует возможность создания

электронно-оптической системы с не экранированным от магнитного поля эмиттером ($B_e/B \sim 1$).

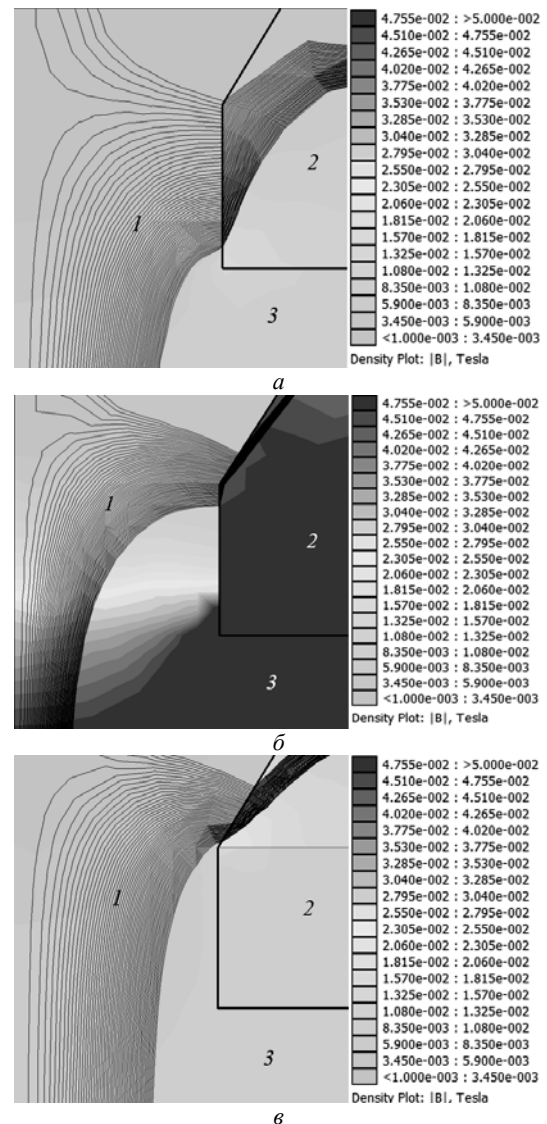


Рис. 3. Распределение магнитного поля в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером при B_e/B : а – $B_e/B \sim 0$ и $0 < B_e/B < 1$; б – $0 < B_e/B < 1$; в – $B_e/B \sim 1$.

1 – силовые линии магнитного поля;

2 – эмиттерный катод; 3 – ускоряющий промежуток

Радиальные распределения плотности тока сфокусированного пучка, соответствующие полученному в расчетах магнитному полю в электронно-оптической системе, представлены на рис. 4.

Распределения плотности тока, представленные на рис. 4, а, показывают, что магнитное поле в электронно-оптической системе может существенным образом изменять условия формирования и фокусировки электронного пучка.

В электронно-оптической системе с неэкранированным плазменным эмиттером действие магнитного поля проявляется в эффективном ограничении поперечных размеров пучка при его ускорении и транспортировке (рис. 4, кривые 3). Плотность тока в пучке максимальна, распределение плотности более однородно по сечению пучка.

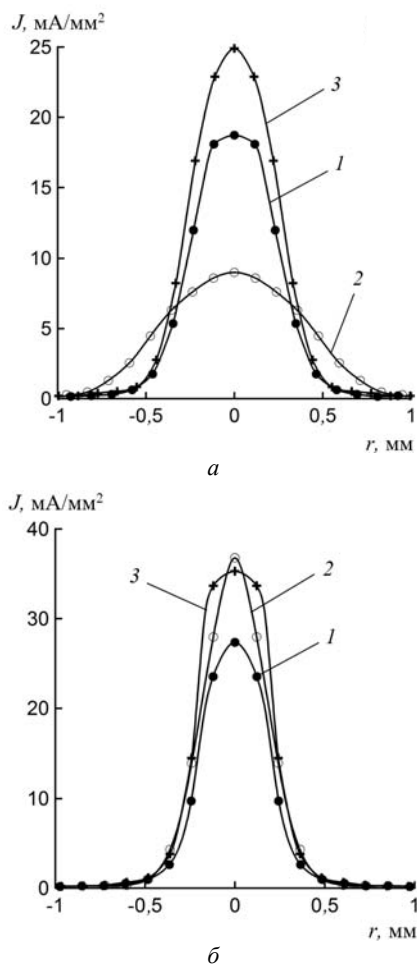


Рис. 4. Распределение плотности тока вдоль радиуса пучка при токе пучка 20 мА и ускоряющем напряжении, кВ:
 а – 10; б – 20. 1 – $B_z/B \sim 0$ и $0 < B_r/B < 1$;
 2 – $0 < B_r/B < 1$; 3 – $B_z/B \sim 1$

Распределения (рис. 4, кривые 2) соответствуют частичной экранировке эмиттера сильным, с $|B| = 60$ мТл, магнитным полем. При низком ускоряющем напряжении на траектории электронов значительное влияние оказывает поперечная составляющая магнитной индукции. Возрастает поперечный размер пучка, становится более плоским распределение плотности тока. При повышении ускоряющего напряжения влияние поперечной составляющей магнитного поля сказывается меньше. Распределение плотности тока приобретает клиновидную форму.

Распределение (рис. 4, а, кривая 1) также соответствует случаю частичной экранировки эмиттера от магнитного поля, но получено при значительно меньшем магнитном поле ($|B| = 10$ мТл). Влияние поперечной составляющей магнитного поля даже при малом ускоряющем напряжении менее выражено. При увеличении ускоряющего напряжения эмиттирующая поверхность перемещается в область, свободную от магнитного поля. В этом случае эмиттер полностью экранирован от магнитного поля. Распределение плотности тока иллюстрируется кривой 1 (рис. 4, б).

Газ в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером

Помимо проникающего в электронно-оптическую систему магнитного поля постоянного магнита разрядной камеры, на формирование электронного пучка существенное влияние оказывает наличие остаточного газа в области эмиссии [13]. Особенность пушек с плазменным эмиттером состоит в необходимости поддерживать в области существования плазменного эмиттера определенное давление газа, в большинстве случаев выше, чем давление в рабочей камере установки. Давление плазмообразующего газа в разрядной камере составляет примерно $5 \cdot 10^{-2}$ Торр. Такое давление создается дозированным напуском газа с величиной около $10\text{--}20$ см³атм/ч. Напускаемый газ, как правило, откачивается через ускоряющий промежуток.

Эмиссия электронов из плазмы происходит через отверстие в катоде разрядной камеры в область ускоряющего поля между этим катодом и заземленным высоковольтным анодом (экстрактором), как показано на рис. 5. На этом же рисунке представлено распределение давления в ускоряющем промежутке для постоянного давления в вакуумной камере 10^{-3} Торр при напуске газа в разрядную камеру с расходом около 10 см³атм/ч. Распределение давления в области генерации электронного пучка получено путем проведения модельных расчетов в программе Ansys.

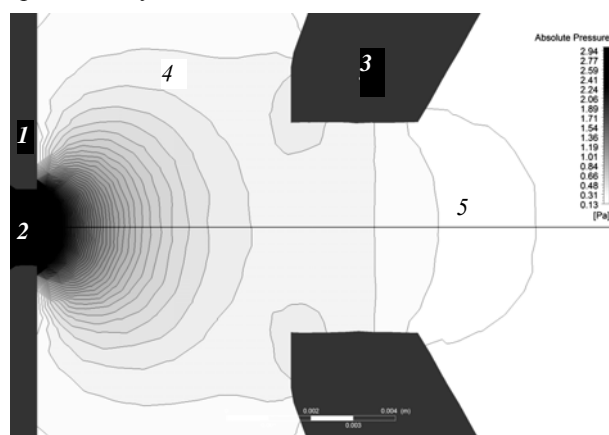


Рис. 5. Картина распределения давления в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером:
 1 – эмиттерный катод; 2 – эмиссионный канал;
 3 – экстрактор; 4 – ускоряющий промежуток;
 5 – пространство дрейфа. Черный цвет – самое высокое давление, белый – самое низкое

Расчет в программе Ansys выполнялся в декартовой системе координат.

Начальными условиями для расчетов были постоянное давление в вакуумной камере, температура газа и скорость потока газа. Граничным условием выступало значение напуска газа через полый катод разрядной камеры.

Указанные условия использовались для численного решения уравнения Навье–Стокса, дополненного уравнениями неразрывности, баланса энергии и состояния [14].

Расчет распределения давления (рис. 6) в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером выполнен для различных сочетаний величин напуска газа в разрядную камеру и давления в вакуумной камере.

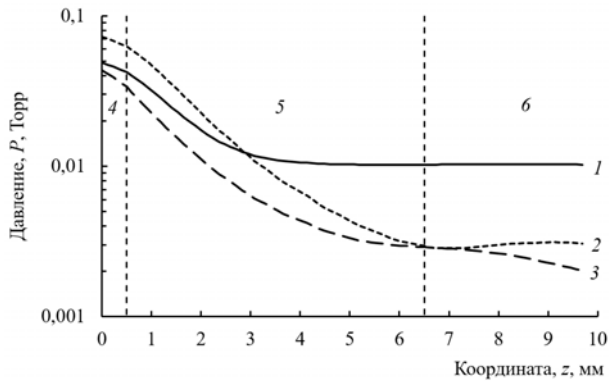


Рис. 6. Распределение давления в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером при давлении в вакуумной камере, Торр, и напуске газа в полый катод, $\text{см}^3\text{атм/ч}$: 1 – 10^{-2} , 5; 2 – 10^{-3} , 10; 3 – 10^{-4} , 15; 4 – эмиссионный канал; 5 – ускоряющий промежуток; 6 – канал в экстракторе

Эти распределения использовались в дальнейших расчетах по оценке влияния газа в ускоряющем промежутке пушки на формирование пучка. Калибровка расчетов производилась при давлении 10^{-4} Торр без напуска газа в разрядную камеру (вакуумный случай).

Распределения рассчитаны для реальных условий генерации электронного пучка пушкой с плазменным эмиттером. Увеличение давления в ускоряющем промежутке, как следует из экспериментов [15], должно сопровождаться снижением напуска газа в разрядную камеру. Снижение напуска необходимо для обеспечения устойчивой работы пушки с плазменным эмиттером, без электрических пробоев в ускоряющем промежутке. При давлении в рабочей камере около 10^{-2} Торр напуск газа в разрядную камеру был минимальным. Приведенные распределения наглядно показывают, что в результате постоянного напуска газа в разрядную камеру пушки и его откачки через отверстие в эмиссионном канале в ускоряющем промежутке всегда существует градиент давления. Вблизи эмиссионного канала и в самом канале величина давления может превышать давление в вакуумной камере на 1–2 порядка. Это означает, что формирование электронного пучка в пушке с плазменным эмиттером происходит в условиях, существенно отличающихся от тех, в которых работают термокатодные пушки.

Моделирование процессов формирования и транспортировки электронного пучка в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером проводилось на вычислительном кластере, состоящем из пяти узлов (Intel Core i5, 8 Gb), четыре из которых дополнительно оборудованы графическим ускорителем (GPU Nvidia Tesla C2050/70), основанным на архитектуре NVIDIA CUDA®. Для моделирования

применялись два программных кода: KOBRA3-INP [16], XООПIC [17].

На рис. 7 представлена расчетная область модельной задачи в программе KOBRA3-INP. На расчетную область накладывалась неоднородная сетка. Размер элементарной ячейки сетки изменялся в направлении распространения электронного пучка от 10^{-5} м вблизи границы плазмы до 10^{-2} м на границе области транспортировки.

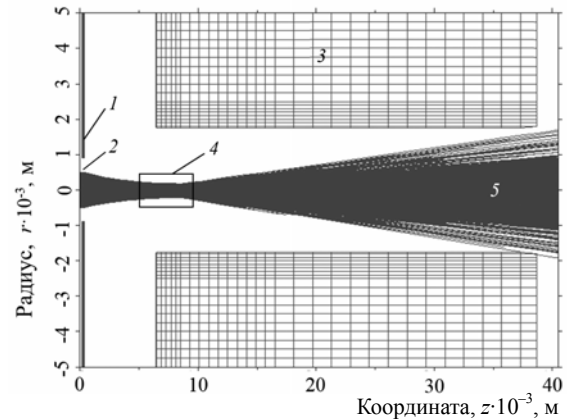


Рис. 7. Траектории электронов в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером. Ускоряющее напряжение 30 кВ. Ток пучка 100 мА. Давление 10^{-4} Торр.

1 – эмиттерный катод; 2 – эмиссионный канал; 3 – экстрактор; 4 – кроссовер электронного пучка; 5 – электронный пучок

Характерные параметры расчетной области, такие как длина ускоряющего промежутка, диаметр и длина эмиссионного канала и отверстия в экстракторе, были аналогичны параметрам пушек с плазменным эмиттером, представленных в [18, 19].

Расчет выполнялся таким образом, чтобы коэффициент токопрохождения электронного пучка был максимальным, как и в реальных условиях работы пушки. Отсутствие утечек контролировалось по разнице тока эмиссии и тока пучка за ускоряющим электродом. Представленные на рисунке траектории получены для типичной геометрии эмиссионной системы и ускоряющего промежутка пушки с плазменным эмиттером. Плазменная граница формируется в глубине эмиссионного канала и имеет вогнутую по форме эквипотенциали соответствующую потенциалу плазмы поверхность. Такое положение и форма эмиссионной поверхности определяют наличие кроссовера в ускоряющем промежутке.

Расчет в программе KOBRA3-INP – расчет вакуумного случая, который необходим для определения начальных условий (положение плазменной границы, ее форма, начальные энергии частиц, их угловое и энергетическое распределение).

Полученные из KOBRA3-INP условия эмиссии накладывались в XООПIC (временной код для моделирования взаимодействия электронного пучка с газом) на аналогичную расчетную область. В нее же «напускался» газ (азот, гелий) с распределением давления, соответствовавшим одной из зависимостей, приведенных на рис. 6. Неупругие взаимодей-

ствия электронов и молекул газа (ионизация) моделировались по методу Монте-Карло. Все расчёты проводились на однородной сетке с шагом 10^{-5} м.

На рис. 8 представлены осевые распределения электронов, ионов, рожденных в результате ионизации, и пространственного заряда в расчетной области. Расчетная область была «заполнена» азотом с распределением давления, соответствующим зависимости 1 на рис. 6.

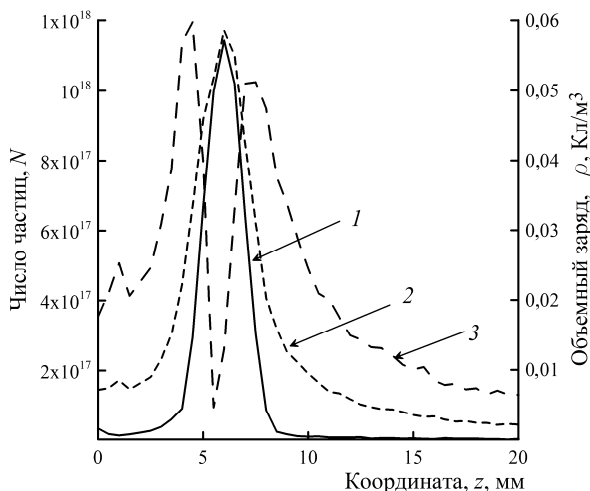


Рис. 8. Распределение электронов (1), ионов (2) и объемного заряда (3) на оси ускоряющего промежутка

Максимум на распределении электронов (зависимость 1) соответствует положению кроссовера электронного пучка (рис. 7). В кроссовере максимальна плотность электронного тока. Из расчетов следует, что здесь также максимальна и концентрация ионов (зависимость 2), которая оказывается сравнимой с электронной. Равенство концентраций электронов и ионов в области кроссовера приводит к нейтрализации объемного заряда пучка (зависимость 3).

В остальной части расчетной области, слева и справа от кроссовера, как показывают расчеты, суммарный заряд положительный. Следовательно, объемный заряд электронного пучка здесь перекомпенсирован. Наиболее простое объяснение существует для эффекта перекомпенсации в области правее кроссовера. В этой области имеются условия для накопления ионов. Эти условия выражаются в том, что ионы имеют малую подвижность, поскольку находятся в эквипотенциальном пространстве.

Из представленных распределений видно, что ионизация газа происходит на всем протяжении ускоряющего промежутка. Большинство ионов уходят по полю в область плазменной границы. Ионный ток в плазму при этом не превышает 1% от тока электронного пучка для всех распределений давления в ускоряющем промежутке и максимален для условий, соответствующих распределению давления по зависимости 2 (см. рис. 6). Существуют ионы, которые попадают на катод. Относительная доля таких ионов невелика и составляет до 0,1% от тока электронного пучка.

Как известно [20, 21], вероятность ионизации снижается с ростом энергии электронов. Это означает, что основной вклад в ионизацию газа и формирование ионного тока дают электроны с низкой энергией, соответствующей максимуму функции ионизации. Такие условия создаются для эмиттированных из плазмы электронов вблизи эмиссионной поверхности. Поток газа из разрядной камеры приводит к образованию области повышенного давления, локализованной в ускоряющем промежутке вблизи эмиссионного канала.

На рис. 9 представлены энергетические спектры ускоренных до энергии 4800 эВ электронов. Измерения энергетического спектра электронного пучка проводились с использованием анализатора (конденсатор Юза–Рожанского) [22, 23]. Спектры нормированы относительно максимального значения тока коллектора для различных напусков газа в разрядную камеру.

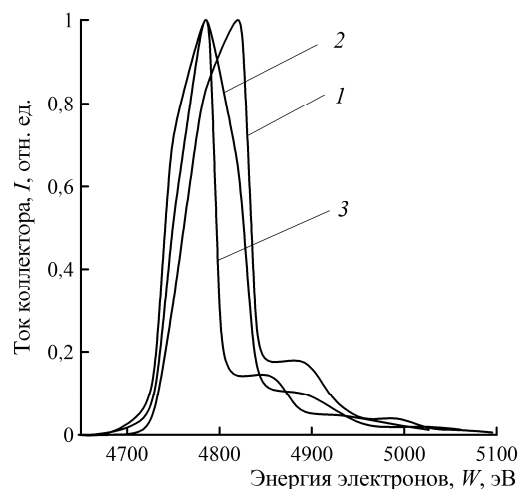


Рис. 9. Энергетические спектры электронов при величине напуска газа в разрядную камеру Q , см³атм/ч: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

Максимальные значения тока коллектора соответствуют на спектрах диапазону энергии электронов около 4780–4820 эВ.

Для всех трех напусков газа левая ветвь энергетического спектра является практически одинаковой. Это связано с тем, что большинство ионизаций ускоренными электронами происходит в непосредственной близости от эмиттирующей границы плазмы. В этой области электроны приобретают необходимую для ионизации энергию, здесь же близко к максимальному сечению ионизации. Ионизованные вторичные электроны ускоряются до энергий, незначительно отличающихся от энергии основной группы электронов. Многократные ионизации в ускоряющем промежутке электронами, набравшими большую энергию, маловероятны даже при максимальном напуске газа. Поэтому левая ветвь спектральной характеристики практически остается неизменной во всем диапазоне давлений газа в промежутке ускорения.

Об этом свидетельствует и вид энергетического распределения ионов (рис. 10), рожденных в ускоряющем промежутке.

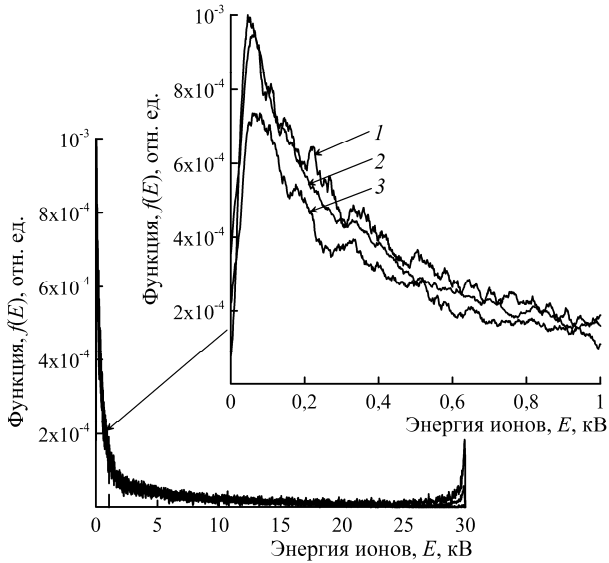


Рис. 10. Распределение рожденных в ускоряющем промежутке ионов по энергиям при давлении в вакуумной камере, Торр, и напуске газа в полый катод, см³атм/ч:
1 – 10⁻², 5; 2 – 10⁻³, 10; 3 – 10⁻⁴, 15.

Распределения ионов по энергиям, рассчитаны для давлений в ускоряющем промежутке, представленных на рис. 6. Максимум на распределениях соответствует энергии порядка 80 эВ. Эту энергию эмитированные из плазмы электроны приобретают на небольшом (десятые доли миллиметра) расстоянии от эмитирующей поверхности. Кроме того, вблизи эмиссионной поверхности максимальна концентрация нейтральных частиц газа, что способствует более интенсивному протеканию ионизационных процессов в этой области.

Таким образом, присутствие газа в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером приводит к образованию положительного ионного объемного заряда при прохождении пучка электронов. Этот заряд способен не только электрически нейтрализовать пучок, но и в отдельных случаях привести к перекомпенсации его электронного заряда. Компенсация объемного заряда в пространстве формирования и ускорения пучка – это принципиальное отличие электронно-оптической системы с плазменным эмиттером от термокатодной системы. Компенсация может существенно влиять на ход электронных траекторий пучка, а перекомпенсация может способствовать дополнительной ионной фокусировке пучка [21]. Перекомпенсация пучка в термокатодной пушке также возможна, однако лишь в пространстве дрейфа, в результате прохождения пучка электронов в среде остаточных газов и паров металлов из нагретого или расплавленного металла. Таким образом, можно утверждать, что наличие более высокого давления в ускоряющем промежутке пушки не является негативным фактором для формиро-

вания электронного пучка, а в большинстве случаев способствует достижению его высокого качества.

Вакуумные электронные пушки с высокой яркостью пучка

Результаты проведенных исследований легли в основу конструкции пушки с плазменным эмиттером, внешний вид которой представлен на рис. 11.



Рис. 11. Внешний вид пушки с плазменным эмиттером

Пушка формирует электронный пучок с энергией до 60 кэВ и мощностью до 12 кВт. При токе пучка около 100 мА его диаметр составляет 0,25–0,2 мм на рабочих расстояниях около 100 мм. Угол сходимости пучка не превышает 0,003 рад.

В работе [24] приведены результаты измерения яркости электронного пучка такой пушки при ускоряющем напряжении 60 кВ и на расстоянии более полуметра от фокусирующей линзы.

Для оценки яркости электронного пучка с гауссовым законом распределения тока по сечению было использовано выражение вида [24]

$$B = \frac{i_b}{\pi^2 \cdot r_f^2 \cdot \theta^2}, \quad (1)$$

где i_b – ток пучка; r_f – эффективный радиус пучка в фокусе, θ – угол сходимости.

По экспериментально полученным значениям r_f и θ с использованием (1) выполнены расчеты яркости.

Для измерения эффективного радиуса пучка и угла сходимости использовался измерительный комплекс, разработанный в компании TWI Ltd. (Кембридж, Великобритания).

Принцип действия измерительного комплекса заключается в следующем.

Зонд и цилиндр Фарадея устанавливаются на необходимом расстоянии от фокусирующей линзы. Электронный пучок фокусируется в плоскости зонда и разворачивается. По мере движения электронный пучок последовательно пересекает датчик с X-щелью, цилиндр Фарадея и датчик с Y-щелью. Траектория развертки пучка представляет собой треугольник.

Сигнал с цилиндра Фарадея и датчиков передается в систему сбора и обработки экспериментальных данных. Для точного измерения ширины пучка по обеим координатам необходимым условием является неизменность скорости (частоты) развертки пучка.

В табл. 1 представлены результаты измерений диаметра сфокусированного электронного пучка, а также рассчитанные значения яркости и угла сходимости.

Таблица 1
Характеристики электронного пучка пушки с плазменным эмиттером

| Ток пучка, мА | Диаметр пучка в фокусе, мкм | Угол сходимости, рад | Яркость, $A \cdot m^{-2} \cdot cp^{-1}$ |
|---------------|-----------------------------|----------------------|---|
| 10 | 550 | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | $0,5 \cdot 10^{10}$ |
| 20 | 560 | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{10}$ |
| 40 | 580 | $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $0,8 \cdot 10^{10}$ |
| 60 | 460 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $1,6 \cdot 10^{10}$ |

Из табл. 1 следует, что яркость электронного пучка в пушках с плазменным эмиттером составляет около $1 \cdot 10^{10} A \cdot m^{-2} \cdot cp^{-1}$, что соответствует яркости электронных пучков, полученных с помощью термокатодных пушек с катодом из LaB₆ [25].

Вневакуумная электронно-лучевая система на основе пушки с плазменным эмиттером

Использование плазмы как источника электронов позволяет во многом снизить требования к остаточной атмосфере в области первичного формирования и ускорения электронного пучка. Генерация электронного пучка пушкой с плазменным эмиттером может осуществляться при более высоких давлениях, на 2–3 порядка превышающих рабочее давление пушек с термокатодом. Как показано выше, наличие более высокого давления в ускоряющем промежутке пушки не является негативным фактором для формирования электронного пучка, а в большинстве случаев способствует достижению его высокого качества. Кроме того, в пушках с плазменным эмиттером при изменении тока пучка сохраняется стабильное положение области с минимальным диаметром сфокусированного пучка (положение кроссовера). Указанные особенности позволяют утверждать, что при использовании пушек с плазменным эмиттером в составе вневакуумной электронно-лучевой системы возможно существенное упрощение устройства вывода, предназначенного для транспортировки сфокусированного электронного пучка в атмосферу. Одним из этапов дальнейшего совершенствования пушек с плазменным эмиттером и стали исследования [26] особенностей построения устройства вывода сфокусированного электронного пучка в газ повышенного давления до атмосферного.

Исследования устройства вывода проводились методом компьютерного моделирования в программе Ansys. В качестве исходного принципа транспортировки электронного пучка выбирался известный принцип, основанный на системе газодинамических

окон (ГДО), позволяющих ступенчато повышать давление газа при транспортировке пучка до атмосферного.

На рис. 12 показана геометрическая схема рассматриваемого в задаче устройства вывода электронного пучка в атмосферу, состоящего из двух ГДО. Схема была построена с помощью пакета твердотельного параметрического моделирования SolidWorks. ГДО содержит по две диафрагмы, объем между которыми откачивается вакуумными насосами. Устройство вывода построено таким образом, что ускоряющий промежуток пушки (область между поверхностью эмиттерного катода 1 и экстрактором 2) и лучепровод 3 образуют вторую ступень (второе ГДО) устройства вывода. Отсчет ступеней ведется от атмосферы.

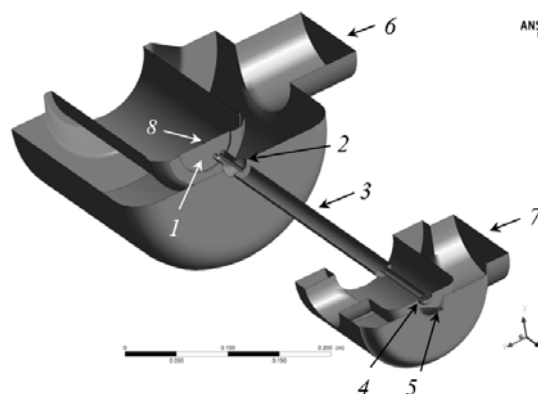


Рис. 12. Геометрическая схема устройства вывода электронного пучка в атмосферу: 1 – эмиттерный катод; 2 – экстрактор; 3 – лучепровод; 4 – выходная диафрагма второй ступени; 5 – выходная диафрагма первой ступени; 6 – патрубок откачки второй ступени; 7 – патрубок откачки первой ступени; 8 – канал в эмиттерном катоде

Первая ступень имеет осевой канал 5 диаметром 2 мм, через который электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. На входе в первую ступень для расчетов задавалось давление в одну атмосферу и температура газа 25 °С. Первая ступень откачивалась со скоростью 500 л/с через патрубок 7 (граница, на которой задавались условия откачки) бустерным насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. Лучепровод, входящий в состав элементов второй ступени, представляет собой канал транспортировки электронного пучка. В канале создается магнитное поле для фокусировки пучка. Откачка второй ступени происходит через патрубок 6 (граница, на которой задавались условия откачки) турбомолекулярным насосом со скоростью 800 л/с. Ускоряющий промежуток и лучепровод разделены экстрактором с каналом длиной 40 и диаметром 3 мм. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени и переходящий в протяженный цилиндрический канал 4 длиной 10 и диаметром 2 мм.

В канале 8 (рис. 12) задавались условия для потока газа, напускаемого в разрядную камеру пушки. Величина напуска задавалась $10 \text{ см}^3 \text{ атм/ч}$.

С помощью модуля CFX Mesh программы Ansys на расчетную область накладывалась неоднородная сетка конечных элементов. Характерные размеры ячеек сетки варьировались в пределах 10^{-5} – 10^{-2} м. Неоднородное задание размеров ячеек сетки позволяет регулировать точность и время выполнения модельных расчетов.

В условиях рассматриваемой задачи моделирование устройства вывода в целом достаточно времяемкий процесс. Для снижения времени счета использовался следующий подход:

- выполнялся расчет некоторой начальной, базовой конструкции двухступенчатого устройства вывода;
- выделялась одна из ступеней системы дифференциальной откачки;
- из результатов, полученных в базовой геометрической схеме, определялись условия на границах выбранной ступени;
- выполнялись модельные расчеты выбранной ступени;
- выполнялся уточненный расчет полной схемы устройства вывода с учетом принятых решений по геометрической схеме каждой ступени.

Такой подход позволил существенно, на три порядка, снизить затраты машинного времени на проведение вычислительных экспериментов. Результаты расчетов по описанному подходу совпали с результатами, полученными при моделировании всей расчетной области.

На рис. 13 представлены поля скоростей газовых потоков в первой ступени (левая часть рисунков) и части второй ступени в лучепроводе пушки, полученные в результате модельных расчетов. Для этих же областей на рис. 14 представлены распределения давления на оси.

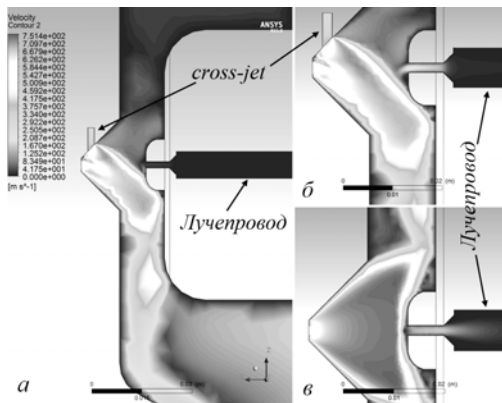


Рис. 13. Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода: а – с cross-jet, 1 атм; б – с cross-jet, 1,5 атм; в – без cross-jet

Представленные на рис. 13 и 14 результаты демонстрируют влияние поперечной струи, направленной перпендикулярно осевому газовому потоку из области с атмосферным давлением.

Рисунки 13, а и б и соответствующие им распределения 1 и 2 на рис. 14 получены для двух давлений на входе в cross-jet. Для сравнения на

рис. 13, в и 14 (кривая 3) показаны поле скоростей газового потока и осевое распределение давления в устройстве без поперечной струи.

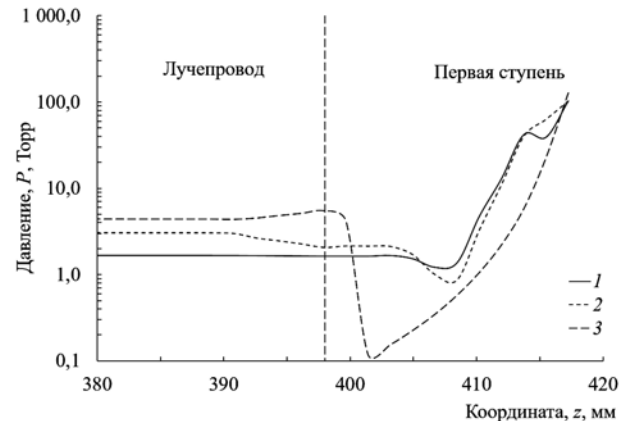


Рис. 14. Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода: 1 – соответствует рис. 13, а; 2 – рис. 13, б; 3 – рис. 13, в

При «пассивном» (давление на входе cross-jet составляет одну атмосферу) обдуве потока газа наблюдается более эффективный отвод потока от оси в сторону откачного патрубка. При этом проникновение во вторую ступень периферийной части поперечной струи в результате ее расширения минимально и не вызывает существенный рост давления в лучепроводе.

Повышение давления на входе cross-jet до 1,5 атм приводит к тому, что значительная часть поперечного потока, перераспределяясь, поступает во вторую ступень.

В случае, когда cross-jet отсутствует, поступающая из атмосферы струя газа равномерно расширяется в объеме первой ступени, повышая давление на оси ступени и в лучепроводе. При этом наблюдается область уплотнения вблизи входа во вторую ступень.

Из представленных на рис. 14 распределений давления видно, что наиболее предпочтительным вариантом является использование поперечной струи, образованной при давлении на входе cross-jet в 1 атм. Удастся понизить давление по всей длине лучепровода примерно в три раза относительно давления в отсутствие cross-jet. При этом существенно уменьшаются неоднородности в распределении давления на оси первой ступени. Отсутствует слой уплотнения вблизи входа во вторую ступень. Давление снижается плавно от атмосферного до давления в лучепроводе. Связано это с уменьшением скорости осевого потока и как следствие снижением вероятности возникновения ударных волн, образующихся при встрече сверхзвуковой струи с конструктивом входной диафрагмы второй ступени.

На рис. 15 и 16 представлены результаты, демонстрирующие влияние ориентации поперечной струи относительно оси системы на скорость потока на входе во вторую ступень и распределение давления, соответствующее разным углам входа поперечной струи.

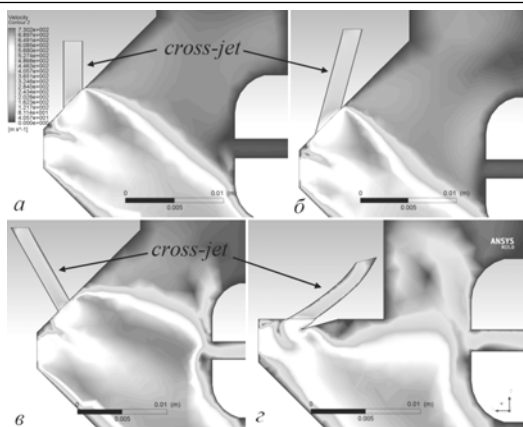


Рис. 15. Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet 1 атм и угле между осью поперечной струи и осью системы: а – 90°; б – 105°; в – 60°; г – 135°

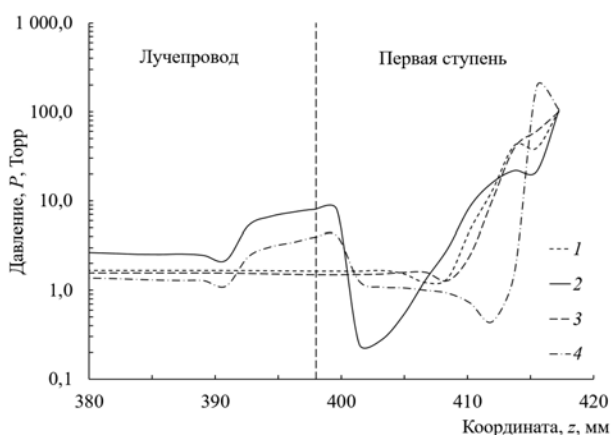


Рис. 16. Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet 1 атм и угле между осью патрубка и осью системы: 1 – соответствует рис. 15, а; 2 – рис. 15, б; 3 – рис. 15, в; 4 – рис. 15, г

Если ввод поперечной струи происходит под углом, меньшим 90° к оси системы, наблюдается увеличение осевого потока, поступающего во вторую ступень. Связано это с тем, что область обдува осевого потока смещается ко входу во вторую ступень. Создаются условия для проникновения рассеянной поперечной струи в лучепровод. Кроме того, распределение давления на оси первой ступени имеет ярко выраженные переходные области с локальными скачками уплотнения и разрежения газовой среды. По-видимому, это связано с отражением потока от входной диафрагмы ГДО. Поперечный поток в этих условиях негативным образом влияет на работу системы. Иные распределения наблюдаются, если угол между осью поперечного потока и осью системы составляет 90° и более. Сдувание осевого потока происходит уже вблизи входной диафрагмы первой ступени. Направления движения рассеянной части поперечного потока вместе с осевым потоком образуют струю, обтекающую диафрагму второй ступени на достаточном удалении от ее осевой час-

ти. Тем самым обеспечивается существенное снижение величины потока газа, входящего во вторую ступень устройства вывода пучка в атмосферу.

Из результатов моделирования также следует, что нежелательно использовать встречный поток газа, направленный под углом 135 град и более. Давление в лучепроводе несколько снижается, однако наблюдается неоднородность в распределении давления в первой ступени с ярко выраженными скачками уплотнения газовой среды.

Таким образом, ориентация поперечного потока в диапазоне 90–105° к оси системы обеспечивает наилучшее распределение давления между атмосферой и входом во вторую ступень устройства вывода.

На рис. 17 и 18 представлены распределения давления и скорости потоков в ускоряющем промежутке пушки при различных вариантах откачки осевого потока.

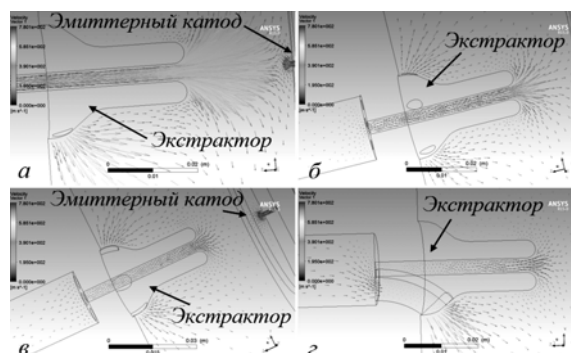


Рис. 17. Распределение скорости потока газа во второй ступени устройства вывода: а – откачка через осевой канал в экстракторе и два периферийных канала диаметром 3 мм; б – откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 3 мм; в – откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 5 мм; г – откачка через осевой канал в экстракторе и один периферийный канал диаметром 10 мм

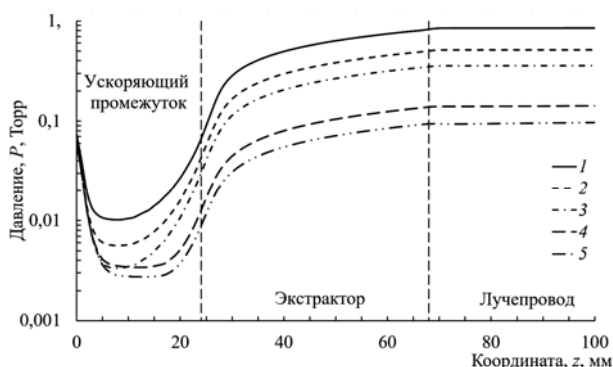


Рис. 18. Распределение давления во второй ступени устройства вывода: 1 – откачка через осевой канал в экстракторе; 2 – соответствует рис. 17, а; 3 – рис. 17, б; 4 – рис. 17, в; 5 – рис. 17, г

Как было отмечено выше, пушки с плазменным эмиттером работают при непрерывном напуске газа в разрядную камеру с откачкой через ускоряющий промежуток. Наличие двух встречных потоков в ускоряющем промежутке создает область разреже-

ния с давлением на два порядка ниже, чем давление в ускоряющем промежутке и в канале ускоряющего электрода. Длина области разрежения практически совпадает с длиной ускоряющего промежутка.

Как видно из рис. 18, откачка газа из второй ступени устройства вывода лишь через осевой канал в экстракторе не обеспечивает нужное для работы пушки давление в ускоряющем промежутке. Для снижения давления необходимо отводить часть потока непосредственно из лучепровода. В связи с этим были выполнены расчеты течения газа через различное количество дополнительных откачных каналов в лучепроводе. Расчеты показали, что важным является не количество каналов, а общая площадь их поперечных сечений и ориентация. Приемлемый результат получен при использовании каналов, ориентированных в сторону откачного патрубка, с площадью поперечного сечения, примерно в 6 раз превосходящей площадь осевого отверстия в ускоряющем электроде.

На рис. 19 показан внешний вид разработанного устройства вывода электронного пучка в атмосферу с двумя ступенями откачки. Устройство вывода построено таким образом, что ускоряющий промежуток пушки (область между поверхностью эмиттерного катода и экстрактором) и лучепровод, разделенные экстрактором, образуют вторую ступень. Отсчет ступеней ведется от атмосферы.

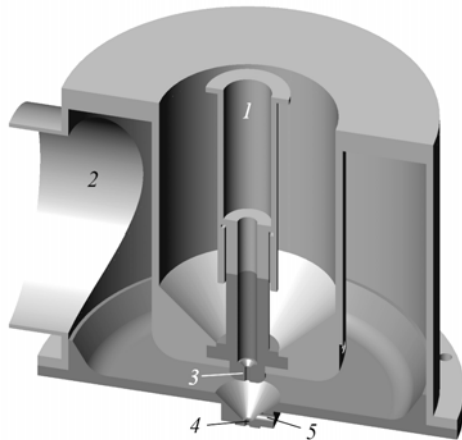


Рис. 19. 3D-модель устройства вывода электронного пучка в атмосферу: 1 – лучепровод; 2 – откачной патрубок первой ступени; 3 – диафрагма второй ступени; 4 – диафрагма первой ступени, 5 – cross-jet

Канал транспортировки электронного пучка 1 (лучепровод) входит в состав элементов второй ступени откачки. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени, переходящее в протяженный цилиндрический канал 3 длиной 10 мм и диаметром 2,5 мм.

В канале транспортировки магнитным полем фокусирующей линзы создаются условия для фокусировки электронного пучка в плоскости выходной диафрагмы 4 первой ступени. Фокусирующая линза имеет скользящую посадку, которая позволяет настраивать коэффициент увеличения, от которого

зависит минимальный диаметр электронного пучка в плоскости фокусировки. Откачка второй ступени происходит турбомолекулярным насосом, скорость которого составляет 800 л/с по азоту.

Первая ступень имеет выходную диафрагму диаметром 2 мм, через которую электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. Ступень откачивается со скоростью 500 л/с через патрубок 2 насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. В первой ступени выполнен канал для создания поперечной струи (cross-jet), расположенный перпендикулярно оси выходной диафрагмы.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований формирования и фокусировки электронного пучка в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером, а также модельные расчеты устройства вывода электронного пучка в атмосферу позволили создать вневакуумную электронно-лучевую систему на основе пушки с плазменным эмиттером (рис. 20) [27], обеспечивающую генерацию сфокусированного электронного пучка и его последующую транспортировку в область с атмосферным давлением.

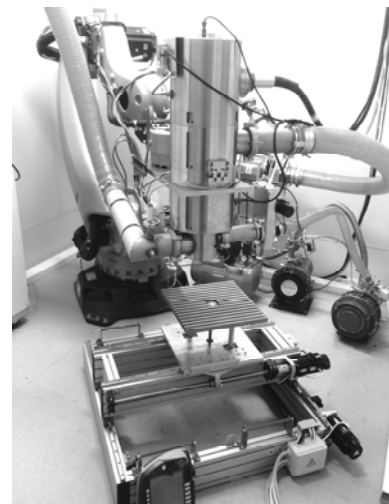


Рис. 20. Внешний вид пушки и устройства вывода, установленных на работе

Пушка с устройством вывода располагается на работе-манипуляторе, позволяющем легко перемещать их по заданной траектории и тем самым обеспечивать реализацию таких технологических процессов в атмосфере, как сварка, резка, наплавка, в том числе послойная. Характеристики оборудования, отражены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики вневакуумной электронно-лучевой системы на основе пушки с плазменным эмиттером

| Параметр | Значение |
|--|--------------------------------|
| Ускоряющее напряжение, кВ | 120 |
| Ток электронного пучка, мА | 1–200 |
| Количество ступеней откачки | 2 |
| Перепад давления, Торр | От $5 \cdot 10^{-4}$ до 760 |
| Коэффициент токопрохождения, не менее, % | 86 |
| Рабочее расстояние в атмосфере, мм | 5–15 |

Особенностью разработанного оборудования является то, что перепад давления между областью генерации электронного пучка и атмосферой обеспечивается двумя ступенями откачки. Устройство вывода обеспечивает транспортировку электронного пучка в область с атмосферным давлением без существенной потери мощности электронного пучка на выводных диафрагмах. Кроме того, решения, заложенные в конструкцию, позволяют использовать высоковольтную пушку отдельно от устройства вывода. Например, для выполнения прикладных исследований и технологических операций в вакуумной камере.

Некоторые применения пушек с плазменным эмиттером

Электронно-лучевая сварка. Основным применением пушек с плазменным эмиттером является электронно-лучевая сварка [1]. Уникальное сочетание пространственных и энергетических параметров электронного пучка, их высокая стабильность и повторяемость позволяют обеспечить качественные сварные соединения.

На Новосибирском заводе химконцентратов (ОАО «НЗХК») пушки с плазменным эмиттером эксплуатировались на автоматических поточных линиях герметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) атомных станций. Оболочки ТВЭЛов изготавливаются в основном из сплавов циркония или алюминия. Герметичность оболочки является основным показателем, определяющим работоспособность ТВЭЛа при его эксплуатации в реакторе.

На рис. 21 показана автоматическая линия сварки ТВЭЛов, оснащенная пушками с плазменным эмиттером.

Интенсивный поток высокотемпературных паров циркония способен вызвать изменение эмиссионных свойств термокатода после сварки небольшого числа изделий. Пушки с плазменным эмиттером обеспечили более высокий ресурс, что позволило в целом увеличить производительность сварочного процесса.



Рис. 21. Автоматическая линия электронно-лучевой сварки ТВЭЛов атомных станций, оснащенная пушками с плазменным эмиттером

С осени 2009 г. на одном из предприятий атомной промышленности оборудование на основе пушки с плазменным эмиттером используется для заварки и дегазации заготовок для промышленного производства сверхпроводящих материалов обмоток

соленоидов термоядерного реактора в рамках программы ИТЭР.

В составе установки работают две пушки с плазменным эмиттером. Одна предназначена для предварительного разогрева (дегазации) медных заготовок, являющихся оболочкой для сверхпроводника. Электронный луч мощностью 6 кВт разворачивается по поверхности заготовки, разогревая ее.

Вторая пушка используется для герметизации (заварки) заготовки, прошедшей стадию разогрева и дегазации. Заготовка заполнена стержнями из ниобий-титанового сплава и меди, размещенными определенным образом. Продолжительность сварочного цикла составляет 40–50 мин, величина тока пучка 140–150 мА при ускоряющем напряжении 40 кВ. В таких режимах разогревая до высокой температуры заготовка и сама зона сварки с жидкометаллической ванной являются источниками интенсивной тепловой нагрузки для пушки. Кроме того, электроды разрядной камеры при генерации плазмы в предельных по мощности режимах выступают источниками теплового излучения [28]. Разработанное оборудование обеспечило стабильную работу установки в условиях интенсивной тепловой нагрузки [28] на электроды пушки с плазменным эмиттером.

На рис. 22 представлены шлифы проплавлений в нержавеющей стали 12Х18Н10Т (а) и титане ВТ14 (б) электронным пучком с энергией 120 кэВ при давлении в вакуумной камере 10^{-4} Торр. Проплавление получено при мощности электронного пучка 12 кВт для нержавеющей стали и 6 кВт для титана. Для генерации электронного пучка использовалась высоковольтная пушка с плазменным эмиттером, разработанная для вневакуумной электронно-лучевой системы (см. рис. 20).

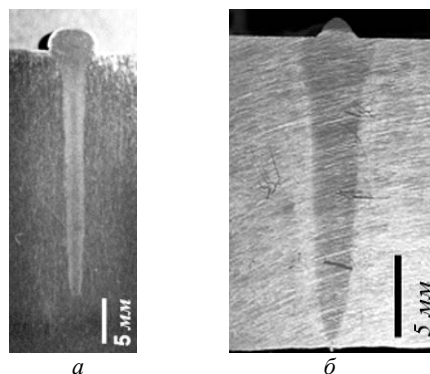


Рис. 22. Шлифы проплавлений в нержавеющей стали 12Х18Н10Т (а) и титане ВТ14 (б) электронным пучком с энергией 120 кэВ

Для представленных шлифов характерен узкий и глубокий профиль проплавления с параллельными стенками, что характерно для электронного пучка с малым углом сходимости.

Электронно-лучевая вакуумная и вневакуумная наплавка защитных покрытий [29] с целью увеличения эксплуатационной стойкости, а также восстановления изношенных деталей машиностроения и металлургического оборудования.

Суть вакуумной наплавочной технологии заключается в том, что по поверхности обрабатываемой детали перемещается сфокусированный электронный пучок, создавая на этой поверхности жидкометаллическую ванну. В образовавшийся расплав дозированно подается наплавляемый порошок. Таким образом создается защитное покрытие. Необходимая толщина наплавленного слоя достигается путем изменения скорости подачи наплавляемого материала или увеличения числа проходов пучка по детали [30].

Пушки с плазменным эмиттером без специальных мер защиты эмиссионной системы способны сохранять стабильными параметры в условиях несовершенного («технического») вакуума, при резких перепадах давления и наличии химически активной атмосферы остаточного газа. Такие уникальные свойства пушек позволяют создавать на их основе новые лучевые технологии обработки материалов. Например, успешно применять их для электронно-лучевой наплавки [1, 30], характеризующейся неконтролируемым изменением давления и состава газовой атмосферы в рабочей камере.

С 2006 г. в металлургической промышленности эксплуатируется установка для наплавки доменных фурм [30] (рис. 23). В составе установки работают две электронные пушки с плазменным эмиттером. За одну смену работы установки обрабатывается несколько фурм. Наплавка одной фурмы длится около четырех часов при токе пучка 100 мА и ускоряющем напряжении 30 кВ. При таких режимах работы пушки с плазменным эмиттером срок ее эксплуатации до первой замены изнашиваемых деталей составил около шести месяцев.

Режимы работы пушек и их перемещение внутри камеры задаются индивидуально для каждой пушки автоматизированной системой управления.

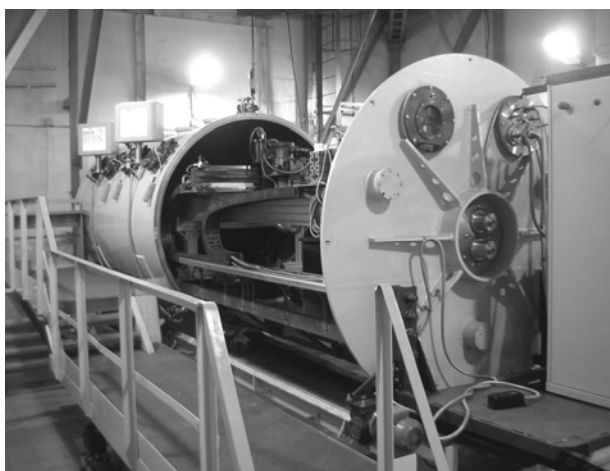


Рис. 23. Внешний вид установки для нанесения термоизносостойких покрытий и пушки с плазменным эмиттером в составе установки

В процессе наплавки давление в рабочей камере может повышаться до 10^{-3} – 10^{-4} Торр. Эксплуатация пушек с плазменным эмиттером в тяжелых вакуумных условиях показала их высокую надежность и стабильность.

В экспериментах по вневакуумной электронно-лучевой наплавке использовали реакционные обмазки, в состав которых входили стехиометрические смеси оксида TiO_2 , оксида Cr_2O_3 , углерод и органическое связующее. Состав реакционных обмазок получен в результате термодинамического моделирования в программе TERRA [31]. Наплавка производилась на подложки из нержавеющей стали в среде гелия. Для вывода электронного пучка в атмосферу использовалась вневакуумная электронно-лучевая система на основе пушки с плазменным эмиттером, представленная на рис. 20. Электронным пучком запускалась реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Затем сканирующим пучком производилась наплавка. В итоге на поверхности подложки формировался слой карбида титана или (и) хрома толщиной 120–200 мкм. Стрoение слоя TiC на 12X18H10T из реакционной обмазки $TiO_2+2,1C$ показано на рис. 24.

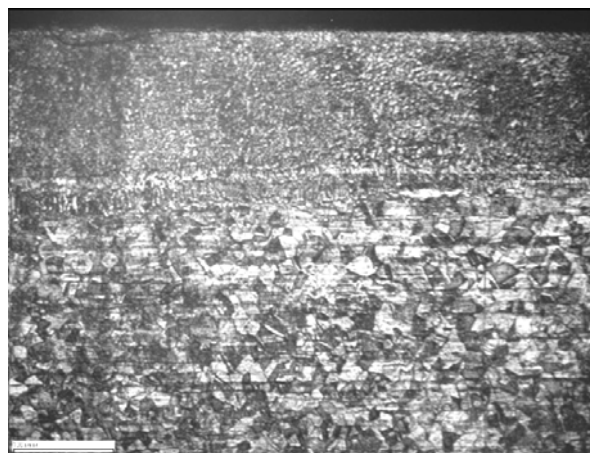


Рис. 24. Стрoение слоя карбида титана (масштаб 100 мкм)

Полученные в результате вневакуумной электронно-лучевой наплавки покрытия обладают высокой микротвердостью (в среднем величина микротвердости составила 12 ГПа) и хорошей жаростойкостью до температуры 900 °С включительно.

Постановка научных экспериментов и отработка новых электронно-лучевых технологий [32]. Электронные пушки с плазменным эмиттером, формирующие сверхтонкие сфокусированные пучки, применяются в устройствах, в которых электронный пучок выводится в область повышенного давления. Так, в одном из институтов Российской академии наук (РАН) пушки используются для исследований свойств пылевой плазмы [32]. Большинство экспериментов по изучению свойств пылевой плазмы проводится в атмосфере инертных газов при давлениях от 10^{-2} до 10 Торр. В то же время для генерации электронного пучка пушкой с плазменным эмиттером необходим вакуум порядка 10^{-4} Торр.

Для обеспечения требуемых давлений создана вакуумная установка (рис. 25), содержащая две камеры: высоковакуумную с присоединённой пушкой и рабочую для проведения экспериментов. Перепад давления между камерами создается газодинамиче-

ским окном (ГДО), отверстие в котором имеет диаметр 1 мм. ГДО располагается на расстоянии 500 мм от области генерации электронного пучка. Такое расстояние необходимо для снижения воздействия обратного потока газа из рабочей камеры на генерацию пучка.

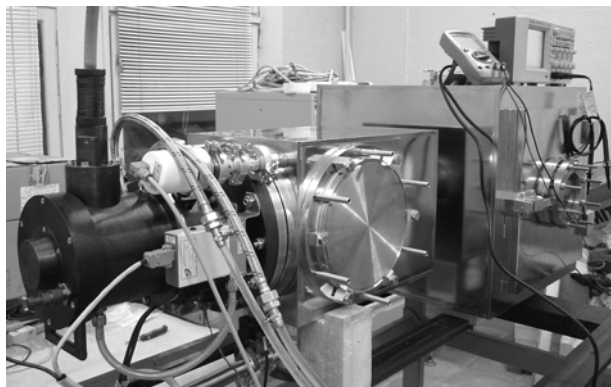


Рис. 25. Экспериментальная установка на основе пушки с плазменным эмиттером для исследования пылевой плазмы

Пылевая плазма создается и удерживается в высокочастотном (ВЧ) емкостном разряде низкого давления [32]. Пылевые частицы подсвечиваются лазерным лучом и становятся видимыми. Рассеянный частицами свет регистрируется видеокамерой.

Созданное электронно-лучевое оборудование применяется также для изучения свойств импульсных сверхзвуковых газовых струй. Импульсные газоструйные источники успешно используются в экспериментах по столкновительному рассеянию пучков [33], в молекулярной спектроскопии и фотохимии [34], для импульсного напуска газа в высоковакуумные ядерные установки [35], при осаждении пленок полупроводниковых материалов для современной электроники [36].

Для проведения исследований используется экспериментальная установка, внешний вид которой показан на рис. 26.

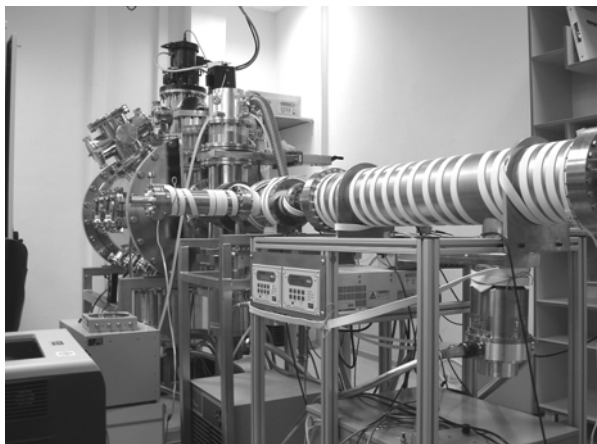


Рис. 26. Экспериментальная установка на основе пушки с плазменным эмиттером для исследования газовых струй

Установка представляет собой суперпозицию вакуумных камер, в объеме которых формируются и

исследуются сверхзвуковые струи и молекулярные пучки. Установка оснащена системами импульсной подачи газа, масс-спектрометрической и электронно-лучевой диагностики характеристик потоков газов и газовых смесей.

Электронно-лучевая диагностика расширяющейся сверхзвуковой струи осуществляется электронным пучком, который сканирует струю в поперечном сечении, ионизируя и возбуждая верхние энергетические уровни атомов и молекул исследуемых потоков. В результате последующая релаксация к равновесному состоянию сопровождается излучением. Регистрация излучения при переходах с короткоживущих состояний позволяет определять плотность излучающего газа, а также заселенность колебательных и вращательных уровней молекул.

Заключение

К настоящему времени достигнут такой уровень разработки пушек с плазменным эмиттером, что во многих применениях они оказываются предпочтительнее термокатодных. В табл. 3 приведено сравнение плазменных и термокатодных источников по некоторым эксплуатационным характеристикам. Сравниваются наиболее распространенные в технологиях пушки для получения сфокусированных электронных пучков.

Таблица 3

Сравнение плазменных и термокатодных пушек

| Пушка с плазменным эмиттером | Термокатодная пушка |
|---|--|
| Не теряют работоспособность при повышенном давлении (порядка 10^{-3} Торр) в области эмиссии | Требуют поддержания давления около $5 \cdot 10^{-5}$ Торр |
| Имеют низкую чувствительность к парам металлов из зоны сварки, в том числе тугоплавких и химически активных | Требуют защиты накаливаемого катода от воздействия паров металлов. Эмиссионные свойства катода могут снижаться из-за запыления |
| Имеют низкую чувствительность к газам из зоны сварки, в том числе содержащим кислород | Требуют защиты накаливаемого катода от окисления |
| Имеют низкую чувствительность к ионизованным металлическим и газовым парам | Требуют защиты накаливаемого катода от распыления и выхода из строя при воздействии ускоренных ионов |
| Имеют большой ресурс из-за отсутствия накаливаемых электродов. Проще в обслуживании, настройке и эксплуатации | Требуются время для выхода на режим катода перед включением источника и охлаждения перед разгерметизацией вакуумной камеры |
| Диодный принцип управления током пучка. При изменении тока пучка сохраняется стабильное положение кроссовера. При возникновении высоковольтных пробоев электронный пучок расфокусируется, ток пучка уменьшается | Для изменения тока применяется специальный прикатодный электрод. Кроссовер смещается при регулировании тока. Из-за короткого замыкания между управляющим электродом и катодом при высоковольтном пробое возможен режим включения полного эмиссионного тока. При сварке пробой может привести к прожогу изделия |

Из табл. 3 следует, что пушки с плазменным эмиттером менее чувствительны к опасным или разрушительным для термокатодных пушек факторам воздействия.

Наиболее важными техническими параметрами пушки являются электронно-оптические характеристики пучка и параметры импульсного управления током (скорость изменения тока). По этим параметрам современные пушки с плазменным эмиттером практически не уступают термокатодным [24].

Приведенные характеристики в сочетании с уровнем разработки [19, 24, 27] электронных пушек с плазменным эмиттером позволяют использовать их в большинстве традиционных электронно-лучевых вакуумных технологий, во вновь разрабатываемых термических процессах (например, вневакуумных), в научном эксперименте и иных применениях.

Литература

- Osipov I.V. A plasma-cathode electron source designed for industrial use / I.V. Osipov, N.G. Rempe // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71, № 4. – P. 1638–1641.
- Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – P. 40–53.
- Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
- Крейндел Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 144 с.
- Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / под ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 148 с.
- Коваль Н.Н. Эмиссионная электроника / Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
- Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. вузов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 5. – С. 5–23.
- Эмиссионные характеристики источника электронов с плазмой, ограниченной пристеночным ионным слоем / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, И.В. Осипов и др. // Журнал технической физики. – 1992. – Т. 62, вып. 6. – С. 108–115.
- Корнилов С.Ю. Получение остросфокусированных пучков в электронных источниках с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. вузов. Физика. – 2007. – №9. Прил. – С. 9–12.
- Корнилов С.Ю. Формирование и фокусировка электронных пучков в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером в магнитном поле / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 3. – С. 79–84.
- Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
- Шерстнев Л.Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. – М.: Энергия, 1971. – 368 с.
- Simulation of electron beam formation and transport in a gas-filled electron-optical system with a plasma emitter / A.A. Grishkov, S.Yu. Kornilov, N.G. Rempe et al. // Plasma Physics Reports. – 2016. – Vol. 42, № 7. – P. 713–717.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
- Белюк С.И. Исследование возможности расширения области давлений рабочего газа плазменного источника электронов / С.И. Белюк, Ю.Е. Крейндел, Н.Г. Ремпе // Журнал технической физики. – 1980. – Т. 50, вып. 1. – С. 203–205.
- Spaedtke P. Computer Simulation of high-current DC ion beams // The 1984 Linear Accelerator Conference: Proceedings. – Seeheim, Germany, 1984. – P. 356–358.
- Verboncoeur J.P. An object-oriented electromagnetic PIC code / J.P. Verboncoeur, A.B. Langdon, N.T. Gladd // Computer Physics Communications. – 1995. – Vol. 87. – P. 199–211.
- Корнилов С.Ю. Получение остросфокусированных пучков в электронных пушках с плазменным катодом / С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 3. – С. 104–109.
- Electron-beam facilities based on plasma-cathode guns / T. Hassel, N. Rempe, S. Kornilov, A. Beniyash // Welding and Cutting. – 2012. – Vol. 11, № 2. – P. 122–127.
- Абрамян Е.А. Интенсивные электронные пучки / Е.А. Абрамян, Б.А. Альтеркоп, Г.Д. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 231 с.
- Molokovsky S.I. Intense electron and ion beams / S.I. Molokovsky, A.D. Sushkov. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag; Berlin Heidelberg, 2005. – 281 p.
- Kornilov S.Y. Influence of Gas Flow in Accelerating Gap on Beams Focusing in Electron-Optical System with Plasma Emitter / S.Y. Kornilov, N.G. Rempe // 15th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2010. – P. 76–79.
- Афанасьев В.П. Электростатические анализаторы для пучков заряженных частиц / В.П. Афанасьев, С.Я. Явор. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
- О параметрах электронного пучка пушки с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, А. Beniyash et al. // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 19. – С. 1–8.
- Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. – Киев: Экотехнология, 2004. – 260 с.
- Корнилов С.Ю. Система транспортировки электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, С.В. Шидловский // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, вып. 6. – С. 42–49.
- Устройство вывода электронного пучка в атмосферу на основе плазменного эмиттера / А.И. Аксенов, С.Ю. Корнилов, М.П. Моторин, Н.Г. Ремпе // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 2. – С. 84–88.
- Корнилов С.Ю. Электронный источник с плазменным эмиттером для работы в режиме термически нагруженной разрядной камеры / С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 1 (23). – С. 77–82.
- Belyuk S.I. Industrial Use of Plasma-Emitter Electron Sources / S.I. Belyuk, I.V. Osipov, N.G. Rempe // Russian Physics Journal. – 2001. – Vol. 44, № 9. – P. 987–995.
- Belyuk S.I. Electron-beam equipment based on a plasma-cathode gun/ S.I. Belyuk, A.G. Rau, I.V. Osipov, N.G. Rempe // Elektrotehnika & Elektronika. – 2006. – Vol. 41, № 5–6. – P. 98–100.
- Thermodynamic Modelling of High-temperature Synthesis of the Titan and Chrome Carbides on an Alloyed Steel for Electron-Beam Melting of Modifying Coatings / S. Kornilov, N. Rempe, N. Smirnyagina et al. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – Article number 01033.

32. Kornilov S.Y. Electron-beam equipment based on a plasma-cathode gun for science researches / S.Y. Kornilov, I.V. Osipov, N.G. Rempe // *Elektrotehnica & Elektronica*. – 2009. – Vol. 44, № 5–6. – P. 201–203.

33. Hydrogen exchange reaction $H+D_2$ in crossed beams / L. Schnieder, K. Seekamp-Rahn, F. Liedeker et al. // *Faraday Discuss. Chem. Soc.* – 1991. – Vol. 91. – P. 259–269.

34. Supersonic gas jet target for generation of relativistic electrons with 12TW-50fs laser pulse / T. Hosokai, K. Kinoshita, T. Watanabe et al. // *Proceedings of EPAC 2002*. – Paris: Published by EPS-IGA and CERN, 2002. – P. 981–983.

35. Rotational and electronic relaxation in pulsed supersonic beams of NO seeded in He and Ar / H. Zacharias, M.M.T. Loy, P.A. Roland, A.S. Sudbo // *The Journal of Chemical Physics*. – 1984. – Vol. 81, № 7. – P. 3148–3157.

36. Low temperature silicon epitaxy using supersonic molecular beams / R. Malik, E. Gulari, S.H. Li et al. // *Journal of Crystal Growth*. – 1995. – Vol. 150, Part 2. – P. 984–988.

Kornilov S.Yu., Rempe N.G.

Focused electron beam in guns with a plasma emitter: study and application

The paper presents the results of latest research, devoted to the study of the features of the electron-optical system with a plasma emitter, and aimed at the forming of focused electron beams with a small diameter. It is shown that the beamforming in the electron-optical system with a plasma emitter occurs in a magnetic field penetrating from the discharge chamber. The results of calculations of this field are presented. It is found that the beam focusing can be significantly improved by producing a quasi-uniform magnetic field in the electron-optical system with a plasma emitter. The mechanisms of gas influence on the energy inhomogeneity of the beam and its current in the regions of beam primary formation, acceleration, and transport are described. The measurement results for the brightness of an electron beam from gun with a plasma emitter are presented. The brightness of the focused beam of a gun with a plasma emitter is not inferior to the brightness of beams in guns with a hot cathode. The results of studies aimed at creating a device to extract the electron beam to the atmosphere, for gun with a plasma emitter, are presented. It is shown, that the pressure drop to the atmospheric one in the system of electron beam extraction to the atmosphere, can be ensured by two gas-dynamic window stages evacuated by pumps with optimal performance. The construction of a device for electron-beam transportation to the atmosphere is described and its key characteristics are presented. The experience results of both the technological application of guns with a plasma emitter and in the structure of research facilities are given.

Keywords: gun with a plasma emitter, electron-optical system, electron beam, plasma emitter, focusing, electron-beam technologies.

Корнилов Сергей Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 70-15-07

Эл. почта: kornilovsky@gmail.com

Ремпе Николай Гербертович

Д-р техн. наук, профессор каф. физики

Тел.: +7 (382-2) 41-48-59

Эл. почта: remnik77@gmail.com