УДК 537.5

**В.А. Бурдовицин, И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, Д.Б. Золотухин,
А.В. Казаков, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, А.В. Тюньков**

Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников

Представлены результаты исследования характеристик и возможных применений электронных источников с плазменным катодом в диапазоне давлений 3–30 Па.

Ключевые слова: разряд, плазма, форвакуум, электронный источник, электронный пучок, формирование и применение.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-5-10

Источники электронов с плазменным катодом прочно заняли свою нишу среди устройств генерации электронных пучков [1]. Отдельный интерес представляют так называемые форвакуумные источники, конструкции, параметры и возможные применения которых описаны в [2]. Вместе с тем к настоящему времени получен ряд результатов, уточняющих и расширяющих представления об особенностях функционирования и возможностях таких источников. Изложению этих результатов посвящена настоящая статья.

Источник сфокусированного электронного пучка

Реализация операций сварки, резки, размерной обработки, а также испарения материалов для нанесения покрытий требует формирования электронного пучка с высокой [3] (не менее 100 кВт/см²) плотностью мощности. Такие величины сравнительно просто достигаются в высоковакуумных электронно-лучевых установках. При этом основная причина дефокусировки пучка – кулоновское расталкивание электронов – преодолевается увеличением ускоряющего напряжения. В форвакууме кулоновское взаимодействие практически сведено к нулю из-за ионной компенсации заряда пучка, но появляются другие обстоятельства, осложняющие фокусировку. Первое состоит в невозможности увеличения ускоряющего напряжения до величин свыше 15–20 кВ из-за высокой вероятности пробоя ускоряющего промежутка. Второе связано с рассеянием электронного пучка на газовых молекулах в результате упругих и неупругих взаимодействий. Для решения вопроса о возможности достижения требуемых параметров пучка были проведены эксперименты на установке, представленной на рис. 1. В экспериментах [4] использовался форвакуумный плазменный источник электронов (рис. 2) на основе разряда с полым катодом 1. Для эффективной фокусировки отбор электронов из плазмы осуществлялся через одиночный эмиссионный канал в аноде 2, диаметр и протяженность которого составляли 0,75 и 1 мм соответственно. При ускоряющем напряжении до 20 кВ, приложенном к аноду 2 относительно заземленного электрода 3, источник обеспечивал генерацию непрерывного электронного пучка 4 с током в

десятки миллиампер. Электроны, извлеченные из плазмы 5, формировались в пучок магнитной фокусирующей системой 6. Развертка электронного пучка производилась с использованием электромагнитной системы отклонения.

Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – форвакуумный источник электронов; 2 – вакуумная камера; 3 – блок питания; 4 – система вакуумной откачки; 5 – термопарный вакуумметр; 6 – квадрупольный масс-анализатор RGA-100; 7 – фланец для ионизационного вакуумметра ПМИ-2

Рис. 2. Электродная схема (а) и фотография общего вида (б) форвакуумного плазменного источника электронов: 1 – полый водоохлаждаемый катод; 2 – анод с перфорированным электродом; 3 – ускоряющий электрод (экстрактор); 4 – цилиндрический электронный пучок; 5 – эмиссионная плазма; 6 – фокусирующая система; 7 – источник питания разряда; 8 – источник ускоряющего напряжения

Измерение диаметра пучка проводилось методом «отклонения», общий принцип которого описан в [4]. При подаче на отклоняющую катушку синусоидального напряжения пучок совершал колебания вдоль прямой линии, попеременно пересекая две протяженные щели, выполненные в металлической пластине системы измерения диаметра пучка. Ширина щелей составляла 0,2 мм, а расстояние между ними – 5,6 мм. Расположенный под пластиной коллектор, подключенный к осциллографу, регистрировал токовый сигнал. Типичная осциллограмма этого сигнала представлена на рис. 3. Диаметр d_b пучка определялся из простого соотношения

$$d_b = \frac{l \cdot \tau}{T}, \quad (1)$$

где T – время между максимумами двух соседних пиков; τ – ширина пика на полувысоте.

Применение указанной методики позволило измерить диаметр пучка в зависимости от различных параметров: давления газа, тока и энергии пучка. Основные результаты сводятся к следующему. Снижение давления газа, равно как и повышение ускоряющего напряжения неизменно вызывают уменьшение диаметра пучка, что, скорее всего, обусловлено ослаблением рассеяния электронов. Повышение тока пучка от 5 до 20 мА практически не влияет на диаметр при давлении P газа (гелия) 10 Па и приводит к снижению диаметра при $P = 30$ Па (рис. 4). Причин такого поведения может быть две. Первая причина заключается в самофокусировке за счет взаимодействия электронного пучка с создаваемым им магнитным полем. Вторая связана с образованием пучковой плазмы за ускоряющим электродом и формированием плазменной линзы [4]. Генерация плотной пучковой плазмы и ее заметное влияние на эмиссионные характеристики и условия формирования электронного пучка представляют собой одну из характерных особенностей форвакуумных плазменных источников электронов. Для сравнения следует отметить, что в области высокого вакуума увеличение тока пучка всегда приводит к возрастанию его диаметра.

Рис. 3. Осциллограмма сигнала с коллектора системы измерения диаметра пучка

Увеличение диаметра пучка с повышением давления газа – ожидаемое, и оно может быть связано с рассеянием электронов на молекулах остаточного газа. Тем не менее, как видно из результатов экспериментов, представленных на рис. 4, даже в условиях форвакуума плазменный источник электронов обеспечивает возможность фокусировки электронных пучков до субмиллиметровых размеров. При этом плотность мощности электронного пучка в кроссовере достигает 10^5 Вт/см².

Рис. 4. Зависимость диаметра d_b пучка от тока I_b в пучке: 1 – $U_a = 14$ кВ, $P = 10$ Па; 2 – $U_a = 18$ кВ, $P = 10$ Па; 3 – $U_a = 14$ кВ, $P = 30$ Па; 4 – $U_a = 18$ кВ, $P = 30$ Па

В форвакуумной области давлений плотность мощности электронного пучка, а следовательно, и его яркость, в 3–4 раза ниже соответствующих параметров электронного пучка, генерируемого плазменными источниками в традиционной области давлений 10^{-2} – 10^{-1} Па [5]. Однако достигнутый в форвакуумных плазменных источниках уровень плотности мощности электронного пучка оказывается достаточным для прецизионной обработки диэлектриков, в частности высокотемпературной керамики. На рис. 5 в качестве демонстрационного примера приведен результат использования форвакуумного плазменного источника электронов для прожигания отверстия в кубике с гранью 1,5 см из алюмооксидной керамики.

Рис. 5. Отверстие в алюмооксидной керамике, просверленное электронным пучком (ускоряющее напряжение 18 кВ, ток в пучке 15 мА)

Еще одно перспективное направление применения сфокусированного электронного пучка в форвакууме состоит в послойном спекании керамического порошка. Эксперименты проводились на той же установке (см. рис. 1) в условиях развертки электронного пучка. Растр, состоящий из 25 строк, заполнял площадку размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Частота строчной и кадровой развертки 1,5 кГц и 60 Гц соответственно. В качестве спекаемого материала был взят композитный порошок системы оксид циркония – оксид алюминия с массовым соотношением 6:1 с размером зерен 1–10 мкм. Слой порошка размещался в графитовом тигле. Спекание проводилось при непрерывном сканировании пучком диаметром 1 мм при токе пучка 10 мА и ускоряющем напряжении 14 кВ (плотность мощности пучка 140 Вт/см^2) в течение 15 мин. При этом для предотвращения разлета частиц порошка из-за интенсивного газовыделения при нагреве порошок предварительно обезгаживался в течение 45 мин путем постепенного повышения мощности пучка до требуемого уровня. Результат спекания, представленный на рис. 6, свидетельствует о принципиальной возможности электронно-лучевого спекания керамического порошка.

Поскольку в доступных источниках отсутствуют сведения о применении электронного пучка для указанных целей, то полученный результат следует считать пионерским.

Рис. 6. Внешний вид слоя порошка системы оксид циркония – оксид алюминия, спеченного электронным пучком (деления миллиметровые)

Испарение материалов и газометаллическая плазма

Как отмечалось выше, уникальность форвакуумного электронного источника состоит в его способности генерировать газовую пучковую плазму. Причем этот эффект может рассматриваться не только как побочный, но и как результат действий, направленных на создание плазмы с параметрами, достаточными для различных применений [2]. Дальнейшим развитием этих работ стали эксперименты по генерации газометаллической плазмы. Схема эксперимента показана на рис. 7. Форвакуумный электронный источник 1, установленный на

фланце вакуумной камеры 2, генерировал электронный пучок 3 с током до 100 мА и энергией 2–15 кВ.

Рис. 7. Схема экспериментальной установки:

- 1 – плазменный источник электронов; 2 – вакуумная камера; 3 – пучок электронов; 4 – фокусирующая система; 5 – пучковая газовая плазма; 6 – медная мишень; 7 – графитовый тигель; 8 – металлическая плазма; 9 – коллектор; 10 – масс-анализатор ионов; 11 – одиночный зонд Ленгмюра; 12 – генератор; 13 – компьютер

Сфокусированный магнитной фокусирующей системой 4 до диаметра 4–6 мм пучок транспортировался через пространство вакуумной камеры, заполненное газом (воздух, гелий) при давлении 2–12 Па, и создавал плотную газовую плазму 5 на пути к мишени 6, изготовленную из испаряемого металла. Мишень располагалась в подвижном графитовом тигле 7. Конструкция тигля позволяла подводить мишень под пучок для ее испарения. Под воздействием электронного пучка производился нагрев мишени, испарение и частичная ионизация испаренного материала с образованием плазмы 8 металла. Масс-зарядовый состав пучковой плазмы определялся с помощью модифицированного квадрупольного масс-спектрометра 10 RGA-100, функционирующего в режиме анализатора ионов пучковой плазмы [6,7]. Параметры плазмы исследовались плоским одиночным зондом 11. Зондовая характеристика снималась с зонда с использованием специально разработанного генератора 12, сопряженного с персональным компьютером 13.

Масс-спектры (рис. 8, а, б) указывают на наличие в плазме ионов газов, в том числе молекулярных (OH , H_2O), и металла, т.е. меди и цинка соответственно, причем сигнал спектрометра для ионов металла превышает сигнал ионов газа. Это означает, что в пучковой плазме концентрация ионов испаряемого металла выше, чем концентрация ионов газа. Таким образом, предложенный в работе метод позволяет получить поток ионов металла, достаточный для применения в технологиях. Как показали результаты зондовых измерений, повышение давления гелия, а также испарение меди приводят к возрастанию концентрации и электронной температуры

плазмы. Возрастание концентрации представляется ожидаемым результатом, в то время как повышение температуры требует пояснений.

Рис. 8. Масс-зарядовый спектр ионов плазмы при испарении меди (а) и цинка (б) ($P = 7$ Па, $U_a = 10$ кВ, $I_e = 100$ мА)

С нашей точки зрения разумной представляется аргументация, основанная на обнаруженном в [8] экспериментальном факте, показывающем, что добавка молекулярного газа к атомарному снижает температуру пучковой плазмы. Указанный эффект обусловлен затратами энергии на возбуждение колебательных степеней свободы. Поскольку в газовой атмосфере вакуумной камеры присутствуют пары воды, то увеличение давления гелия снижает относительное содержание водяных паров, а следовательно, может быть причиной повышения электронной температуры. Появление в газовой фазе паров металла оказывает более сильное воздействие, поскольку наряду с возрастанием содержания атомов вызывает сорбцию паров воды осаждающимися слоями металла. Приведенные результаты свидетельствуют о возможности применения плазменного электронного источника для генерации газометаллической плазмы с контролируемыми параметрами. До выполнения настоящей работы единственный способ создания газометаллической плазмы заключался в использовании дугового разряда.

Источник ленточного пучка

Важное достоинство источников с плазменным катодом состоит в возможности генерации электронных пучков с различной формой поперечного

сечения, определяемой, по сути дела, лишь эмиссионным окном. В частности, в [2] описан источник электронного пучка ленточной конфигурации. При транспортировке такого пучка возникает проблема его расширения, что затрудняет использование пучка. В существующих работах указанная проблема решалась применением продольного магнитного поля, создаваемого катушками, размещаемыми непосредственно в вакуумной камере. В целях предотвращения перегрева такие катушки приходилось размещать в боксы, охлаждаемые трансформаторным маслом, в результате чего существенно сокращался полезный объем и ограничивались возможности размещения диагностического оборудования. В связи с этим была поставлена задача разработки устройства, обеспечивающего генерацию и транспортировку ленточного электронного пучка без сопровождающего магнитного поля. Эта задача была успешно решена оптимизацией электродов ускоряющего промежутка [9].

Схематические изображения электродной системы источника приведены на рис. 9, а и б. Отмеченная выше оптимизация проведена с использованием траекторного анализа при помощи трёхмерного кода KOBRA3-INP.

В качестве варьируемых параметров были взяты поперечный размер d эмиссионного окна в ускоряющем электроде, а также протяженность l ускоряющего промежутка (см. рис. 9, б). Угол между плоскими частями вставок и плоскостью анода был максимально близок к углу для пушки Пирса с параллельным потоком. В эксперименте изменение геометрии ускоряющего промежутка осуществлялось размещением в нем металлических вставок 8, электрически соединенных с ускоряющим электродом. Результат расчета представлял собой набор 500 траекторий электронов (рис. 10), равномерно эмитированных различными участками эмиссионного окна. Расчет проводился в двумерном приближении.

Рис. 9. Схема источника ленточного электронного пучка: 1 – полый катод; 2 – плазма; 3, 5 – изоляторы; 4 – анод; 6 – экстрактор (ускоряющий электрод); 7 – вольфрамовая сетка; 8 – металлические вставки; 9 – перемещаемый коллектор

Результаты моделирования, помимо траекторий в плоскости XOZ (см. рис. 10), позволяли получать нормированные распределения плотности тока (рис. 11), из которых на полувысоте определялся поперечный размер электронного пучка d_p .

Рис. 10. Распределение траекторий электронов ($l = 8$ мм, $d = 20$ мм)

Рис. 11. Нормированные расчетное (1) и экспериментальное (2) распределения плотности тока ленточного пучка ($l = 4$ мм, $U_a = 8$ кВ, $I_b = 100$ мА, $P = 5$ Па)

Импульсный источник на основе дугового разряда

Еще одна отличительная особенность плазменных источников заключается в сравнительной простоте реализации импульсного режима работы путем управления разрядом, создающим эмиссионную плазму. В опубликованной монографии [2] описан форвакуумный источник, в котором для образования эмиссионной плазмы использовался тлеющий разряд с полым катодом. Источник неплохо зарекомендовал себя в экспериментах по модификации органических диэлектриков. В то же время при обработке высокотемпературных неорганических диэлектриков, в частности керамик, обнаружилась нехватка мощности в импульсе. Попытка повышения плотности эмиссионной плазмы путем увеличения тока разряда не привела к положительным результатам, поскольку разряд неконтролируемым образом переходил в дуговую форму, причем катодные пятна возникали хаотично в любом месте катодной полости. Это вызывало появление неоднородностей эмиссионной плазмы и, как следствие, неоднородное распределение плотности тока по сечению пучка и даже пробой ускоряющего промежутка. В связи с этим была поставлена задача реализации импульсного режима с использованием контролируемого дугового разряда. Конфигурация разрядного промежутка

источника показана на рис. 12. Катод 1 источника представлял собой медный стержень. Однородность эмиссионной плазмы обеспечивалась привязкой катодного пятна к торцевой части медного катода 1 и расширением плазмы дугового разряда в полый анод. Рабочая поверхность катода ограничивалась керамической трубкой 2. Анодный электрод 3 имел вид стакана. Эмиссионная граница плазмы формировалась в ячейках сетчатого эмиссионного электрода 4. Поскольку дуговой разряд не имеет принципиальных ограничений по току, то предельный ток пучка определяется лишь пропускной способностью ускоряющего промежутка. Приведенные на рис. 13 радиальные распределения плотности тока свидетельствуют о высокой однородности электронного пучка по его сечению.

Рис. 12. Схема экспериментального макета: 1 – катод; 2 – керамический изолятор; 3 – анод; 4 – эмиссионное окно; 5 – поджигающий электрод; 6 – экстрактор; 7 – фланец вакуумной камеры; 8 – капролоновый изолятор; 9 – импульсный блок питания разряда; 10 – блок питания ускоряющего напряжения; 11 – генератор поджигающих импульсов

Рис. 13. Радиальные распределения приведенной величины плотности j_e тока электронного пучка при различном токе I_b пучка (расстояние от экстрактора $L = 75$ мм, $U_a = 8$ кВ, $P = 3$ Па, рабочий газ – воздух)

Заключение

Основные результаты сводятся к следующему. Достигнутые параметры форвакуумных электронных источников позволили расширить область воз-

можных применений. В частности, с использованием развертки остроточечного пучка удалось спечь слой порошковой системы оксид циркония – оксид алюминия, что в перспективе сулит создание 3D-технологии изделий из диэлектрических материалов. Ленточный пучок был успешно применен для генерации плоского плазменного образования в отсутствие сопровождающего магнитного поля. Создаваемая пучковая плазма пригодна для применения в плазмохимии, а также для обработки поверхностей. Успешное применение импульсного пучка было продемонстрировано при модификации поверхности керамики.

Работа выполнена в рамках Договора № 02.G25.31.0189 с Министерством образования и науки РФ.

Литература

1. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
2. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 287 с.
3. Электронно-лучевая обработка материалов / В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.И. Гордиенко, И.Л. Пობоль. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 319 с.
4. Особенности фокусировки электронного пучка плазменного источника в форвакуумном диапазоне давлений / А.А. Зенин, И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, А.С. Климов, Е.М. Окс // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 13. – С. 104–110.
5. О параметрах электронного пучка пушки с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, А. Beniyash, N. Murray, T. Hassel, C. Ribton // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 19. – С. 1–8.
6. Modified quadrupole mass analyzer RGA-100 for beam plasma research in forevacuum pressure range / D.B. Zolotukhin, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, E.M. Oks // Rev. Sci. Instrum. – 2015. – Vol. 86, No. 12. – P. 123301.
7. Генерация ионов магния в пучковой плазме форвакуумного электронного источника / А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков, Д.Б. Золотухин, К.П. Савкин // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4(34). – С. 60–62.
8. Lock E.H. Experimental and theoretical evaluations of electron temperature in continuous electron beam generated plasmas / E.H. Lock, R.F. Fernsler, S.G. Walton // Plasma Sources Sci. Technol. – 2008. – Vol. 17, No. 2. – P. 025009.
9. Формирование ленточного электронного пучка форвакуумным плазменным источником электронов / А.С. Климов, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, Е.М. Окс, А.А. Зенин, Ю.Г. Юшков // Прикладная физика. – 2015. – № 1. – С. 35–39.

Бурдовицин Виктор Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. физики ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: burdov@fet.tusur.ru

Бакеев Илья Юрьевич

Аспирант каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: bakeeviyu@mail.ru

Зенин Алексей Александрович

Ст. науч. сотрудник каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: zenin1988@gmail.com

Золотухин Денис Борисович

Аспирант каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: ZolotukhinDen@gmail.com

Казakov Андрей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: andrykazakov@gmail.com

Климов Александр Сергеевич

Докторант каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Медовник Александр Владимирович

Доцент каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: MedovnikAV@mail.ru

Окс Ефим Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-47-12
Эл. почта: oks@fet.tusur.ru

Тюньков Андрей Владимирович

Доцент каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: andrew71@sibmail.com

Burdovitsin V.A., Bakeev I.Yu., Zenin A.A., Zolotukhin D.B., Kazakov A.V., Klimov A.S., Medovnik A.V., Oks E.M., Tyunkov A.V.
Experience in the development and application of fore-vacuum plasma electron sources

Experimental results on research and possible application of electron beams created by plasma sources in fore-vacuum are presented. The sources forming the continuous and pulse beams of various configurations are considered: focused, cylindrical, ribbon. The presence of gas in a vacuum chamber promotes formation of beam plasma which provides charge leakage from the isolated targets and does possible electron beam processing of dielectrics. Experimentally confirmed possible application of electron beams are shown: drilling and dimensional processing of ceramics, evaporation of ceramics and coatings deposition, sintering of ceramic powder, modification of ceramic and polymer surfaces.

Keywords: plasma sources, development, electron beams, application, fore-vacuum, dielectric treatment, beam plasma generation.