Генерация узкофокусированных электронных пучков в форвакууме при эмиссии из одиночного отверстия

И.Ю. Бакеев, А.С. Климов, Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, 634050, Томск

e-mail: bakeeviyu@mail.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-82-85

Представлено исследование влияния размеров эмиссионного канала форвакуумного источника на параметры электронного пучка. Показано, что зависимость плотности тока пучка от отношения диаметра эмиссионного канала к его длине D_{em}/H_{em} имеет максимум, значение которого растет и смещается в сторону больших значений D_{em}/H_{em} по мере уменьшения протяженности канала. Также, продемонстрировано повышение плотности мощности пучка при одновременном повышении ускоряющего напряжения и разрядного тока и оптимизации соотношения D_{em}/H_{em} .

Введение

В настоящее время электронные пучки [1] находят широкое применение для локального теплового воздействия на различные металлические материалы в таких операциях как резка, сварка, испарение, наплавка. Причем выгодно среди электронных источников выделяются источники с плазменным катодом [2] ввиду отсутствия в них накаливаемых частей и способностью генерировать пучки с плотностью мощности вплоть до 10^7 W/cm^2 .

Форвакуумные плазменные источники электронов [3, 4], работающие в диапазоне давлений от единиц до сотни паскалей, в отличие от источников, работающих в традиционном диапазоне давлений до 10^{-1} Pa , способны эффективно обрабатывать электрически непроводящие материалы, такие как высокотемпературные марки керамики, стекла. Способность таких источников к эффективной обработке диэлектриков без применения дополнительных средств компенсации отрицательного заряда на обрабатываемой поверхности связана с образованием потока ионов из плазмы, генерируемой за счет ионизацией рабочего газа электронами пучка, а также плазмы разряда между обрабатываемой поверхностью и стенками вакуумной камеры. Поток ионов из этих плазм, устремляющийся на обрабатываемую поверхность, частично нейтрализует накопленный отрицательный заряд, благодаря чему потенциал диэлектрической мишени становится

значительно меньше ускоряющего напряжения.

Повышение качества прецизионной обработки и расширение возможных применений форвакуумного источника требует повышения ранее достигнутого такими источниками уровня плотности мощности 10^5 W/cm^2 [5]. Так как при фокусировке электронного пучка на его параметры в первую очередь оказывают влияние процессы, происходящие в области отбора и ускорения электронов, целью данной работы являлось более детальное изучение влияния на параметры электронного пучка геометрии эмиссионного канала при эмиссии из одиночного эмиссионного канала в форвакуумном диапазоне давлений.

Техника и методика эксперимента

Эксперименты проводились на вакуумной установке, оборудованной одной ступенью механической откачки, обеспечивающей давление в рабочей камере вплоть до 1 Pa . Схематично расположение функциональных элементов форвакуумного источника электронов, систем отклонения и фокусировки, а также схема осуществления измерения параметров электронного пучка представлены на рис. 1.

Генерация электронного пучка 1 производилась форвакуумным электронным источником 2, расположенным на верхнем фланце вакуумной камеры 3. Принцип работы

источника основан на эмиссии электронов из плазмы 4 полого катода 5 через одиночный эмиссионный канал 6 в аноде 7. Ускорение электронов производилось электрическим полем ускоряющего промежутка, образованного анодом 7 и экстрактором 8. Фокусировка электронного пучка обеспечивалась одиночной магнитной линзой 9. Сфокусированный электронный пучок отклонялся при помощи отклоняющей магнитной системы 10. Подробно конструкция форвакуумного источника и особенности его работы изложены в [6]

Рис.1. Схема экспериментальной установки и методики эксперимента: 1 – электронный пучок; 2 – форвакуумный источник электронов; 3 – вакуумная камера; 4 – эмиссионная плазма; 5 – полый катод; 6 – эмиссионный канал; 7 – анод; 8 – экстрактор; 9 – фокусирующая линза; 10 – отклоняющая магнитная система; 11 – цилиндр Фарадея; 12 – измерительные щели; 13 – токоприемный коллектор; 14 – направление распространения пучка при измерении его диаметра

Ток электронного пучка I_b измерялся при его отклонении на отдельно стоящий цилиндр Фарадея 11. Измерение диаметра пучка d_b производилось в фокальной плоскости двухщелевым анализатором, состоящим из плоской заземленной пластины с двумя измерительными щелями 12 шириной 0,1 мм и токоприемной пластины 13. При измерении диаметра d_b пучок непрерывно перемещался по линии 14

перпендикулярно измерительным щелям 12. При пересечении пучком одной из измерительных щелей часть электронов попадала на токоприемную пластину и фиксировалась при помощи осциллографа. Полученный токовый сигнал пересчитывался в радиальное распределение плотности тока пучка, где за диаметр пучка принималась ширина на полувысоте радиального распределения.

Исследование процесса эмиссии электронного пучка производилось при различных диаметрах D_{em} и протяженностях H_{em} эмиссионного канала (рис. 2). Эксперименты проводились при давлении рабочего газа (гелия) $p = 30$ Па. Ток разряда в экспериментах составлял $I_d = 1,5$ и $2,4$ А. Ускоряющее напряжение – $U_a = 20-30$ kV.

Рис.2. Схема области извлечения и ускорения электронов форвакуумного источника в увеличенном масштабе: 4 – эмиссионная плазма; 5 – полый катод; 6 – эмиссионный канал; 7 – анод; 8 – экстрактор; 15 – пластина с одиночным каналом

Результаты эксперимента

Характерные зависимости тока пучка I_b и диаметра пучка d_b от диаметра эмиссионного канала D_{em} представлены на рис. 3 и рис. 4. Эти зависимости имеют растущий вид, причем степень роста повышается при больших значениях диаметра канала. Увеличение протяженности эмиссионного канала H_{em} приводит к смещению кривых зависимостей $I_b(D_{em})$ и $d_b(D_{em})$ в сторону больших значений диаметра канала.

Как видно на рис. 5 плотность

эмиссионного тока j_{em} (отношение тока пучка к площади эмиссионного канала) монотонно зависит от отношения диаметра эмиссионного канала к его протяженности D_{em}/H_{em} .

Рис.3. Зависимости $I_b(D_{em})$ при различных H_{em} : 1 - $H_{em} = 1$ мм; 2 - $H_{em} = 2$ мм; 3 - $H_{em} = 3$ мм; 4 - $H_{em} = 4$ мм

Рис.4. Зависимости $d_b(D_{em})$ при различных H_{em} : 1 - $H_{em} = 1$ мм; 2 - $H_{em} = 2$ мм; 3 - $H_{em} = 3$ мм; 4 - $H_{em} = 4$ мм

Рис.5. Зависимости $j_{em}(D_{em}/H_{em})$ при различных H_{em} : 1 - $H_{em} = 1$ мм; 2 - $H_{em} = 2$ мм; 3 - $H_{em} = 3$ мм; 4 - $H_{em} = 4$ мм

Подобный вид зависимостей согласуется с теоретическими зависимостями эффективности извлечения от отношения диаметра канала к его длине, представленными в [7].

Однако, при увеличении соотношения D_{em}/H_{em} , несмотря на рост плотности эмиссионного тока, плотность тока пучка j_b в кроссовере начинает спадать при превышении определенного значения D_{em} (рис. 6) ввиду существенного роста диаметра пучка (рис. 4). По мере уменьшения протяженности эмиссионного канала максимальное значение плотности тока пучка j_b растет и смещается в сторону больших значений D_{em}/H_{em} .

Рис.6. Зависимости $j_b(D_{em}/H_{em})$ при различных H_{em} : 1 - $H_{em} = 1$ мм; 2 - $H_{em} = 2$ мм; 3 - $H_{em} = 3$ мм; 4 - $H_{em} = 4$ мм

На рис. 7 представлены зависимости плотности мощности q электронного пучка от отношения размеров эмиссионного канала D_{em}/H_{em} при повышении ускоряющего напряжения U_a с 20 до 30 кВ, что стало возможным благодаря модернизации геометрии разрядного промежутка для снижения тока «паразитного» высоковольтного тлеющего разряда и, тем самым, повышении электрической прочности ускоряющего промежутка, и тока разряда I_d с 1,5 до 2,4 А.

Данные зависимости свидетельствуют о том, что при повышении ускоряющего напряжения с 20 до 30 кВ (на 33%) плотность мощности пучка повышается в 3 раза (рис. 7 кривые 1-3), что свидетельствует о сопровождаемом при этом повышении

плотности тока пучка, и для $U_a = 30$ kV составляет $2,5 \cdot 10^5$ W/cm². Зависимости плотности тока пучка при токе разряда $I_d = 1,5$ А монотонно растут при исследуемом диапазоне диаметров эмиссионного канала (рис. 7 кривые 1-3). При повышении разрядного тока до $I_d = 2,4$ А (кривые 4-6) значения плотности мощности повышаются и на кривых появляются максимумы.

Рис.7. Зависимости $q(D_{em})$ при различных U_a и I_d : 1 – $U_a = 20$ kV, $I_d = 1,5$ А; 2 – $U_a = 25$ kV, $I_d = 1,5$ А; 3 – $U_a = 30$ kV, $I_d = 1,5$ А; 4 – $U_a = 20$ kV, $I_d = 2,4$ А; 5 – $U_a = 25$ kV, $I_d = 2,4$ А; 6 – $U_a = 30$ kV, $I_d = 2,4$ А

Заключение

В статье представлены основные закономерности влияния размеров эмиссионного канала форвакуумного источника на параметры электронного пучка. Показано, что на зависимости плотности тока пучка от отношения диаметра эмиссионного канала к его длине D_{em}/H_{em} имеется максимум, значение которого растет и смещается в сторону больших значения D_{em}/H_{em} по мере уменьшения протяженности канала. Также, продемонстрировано повышение плотности мощности пучка при одновременном повышении ускоряющего напряжения и разрядного тока и оптимизации соотношения D_{em}/H_{em} .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00305. Оптимизация геометрии разрядного промежутка, применительно к задачам исследований поддерживана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта

№3.9605.2017/8.9.

Литература

- [1] Электронно-лучевая обработка материалов / В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 319 с.
- [2] Получение остроточесфокусированных 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.
- [3] Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников / В.А. Бурдовицин, И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин и др. // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 2. – С. 5–10.
- [4] Бурдовицин В.А, Бакеев И.Ю., Зенин А.А. и др. Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников. Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 2. – С. 5–10.
- [5] О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме/ И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2017. – № 3. – С. 26–30.
- [6] Особенности формирования сфокусированного пучка электронов форвакуумным плазменным источником при повышенных давлениях / Е.М. Окс, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, А.А. Зенин, А.С. Климов // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. № 1. – С. 60–64.
- [7] Груздев В.А., Залесский В.Г. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов // Прикладная физика. – 2009. – Vol. 5. – Р. 82-90.