

УДК 537.525

А.С. Климов, А.С. Жигалкина, В.А. Бурдовицин

Особенности функционирования плазменного электронного источника при повышенных давлениях

Представлены результаты исследования возможности повышения рабочего давления плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом. Экспериментально установлено, что при давлениях более 20 Па существенным является ток высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), который растет с повышением давления и приводит к ограничению возможности независимого управления величиной тока и ускоряющего напряжения электронного пучка. Показано, что изменением геометрии ускоряющего промежутка можно повысить его электрическую прочность и добиться уменьшения тока ВТР.

Ключевые слова: разряд с полым катодом, форвакуум, электронный пучок, высоковольтный тлеющий разряд, электрическая прочность.

Традиционные рабочие давления электронных источников с плазменным катодом не превышают 1 Па в области формирования и транспортировки электронного пучка [1]. В то же время существуют задачи, требующие устройств, генерирующих электронные пучки при давлениях газа, на порядки больших. Одна из таких задач – электронно-лучевое испарение металла в кислороде. Повышение давления может осуществить полное окисление испаряемого металла и осаждение на подложке пленки окисла. Таким образом, может быть реализована технология, альтернативная магнетронному распылению, которое, как известно, характеризуется значительной неустойчивостью. Такие процессы, как азотирование металлов, а также плазмохимическое разложение органических и металлоорганических соединений, протекают быстрее именно при повышенных давлениях. В лаборатории кафедры физики ТУСУРа создан электронный источник, сохраняющий работоспособность вплоть до давлений 15 Па [2]. С его помощью оказалось возможным облучение диэлектрических материалов с целью улучшения их поверхностной прочности, износостойкости, а также для осуществления процесса сварки. При этом существенным является уменьшение зарядки облучаемой поверхности. В работе [3] показано, что увеличение давления рабочего газа приводит к заметному снижению потенциала обрабатываемой керамической поверхности, а следовательно, к меньшим потерям мощности электронного пучка. Однако увеличение давления газа вызывает снижение электрической прочности ускоряющего промежутка [4, 5] и затрудняет использование электронного источника для осуществления описанных технологий. Целью настоящей работы являлось детальное исследование факторов, влияющих на возможность повышения предельного рабочего давления плазменного электронного источника на основе разряда с полым катодом.

Техника и методика эксперимента. Эксперименты проводились с использованием макета плазменного электронного источника, схематичное изображение которого представлено на рис. 1. Разрядная система электронного источника состояла из цилиндрического полого катода 1 с водяной рубашкой охлаждения 2, плоского анода 3, эмиссионное окно в котором перекрывалось либо перфорированной пластиной, либо металлической сеткой 4. Ускоряющий электрод 5 (экстрактор) имел конусообразную форму. Все электроды были выполнены из нержавеющей стали. Электрическая изоляция осуществлялась стандартными керамическими изоляторами 6 и 7. Электрическое питание разрядного и ускоряющего промежутка осуществлялось от двух независимых источников постоянного напряжения 9 и 10. Ускорение электронов и первичное формирование пучка производилось в промежутке: анод 3 – экстрактор 5. После извлечения электронный пучок попадал в магнитное поле фокусирующей системы, где и происходило его окончательное формирование. Для измерения тока электронного пучка на расстоянии 25 см от экстрактора по пути следования пучка располагался металлический коллектор. Макет плазменного источника размещался на фланце вакуумной камеры. В качестве рабочих газов использовались гелий и воздух. Рабочая камера предварительно откачивалась до вакуума 3 Па, после чего напускался газ до необходимого давления.

В качестве тока ВТР принимался ток нагрузки источника ускоряющего напряжения в условиях равенства нулю тока I_d в разряде с полым катодом. Пробивное напряжение фиксировалось непосредственно перед резким возрастанием тока в цепи ускоряющего электрода.

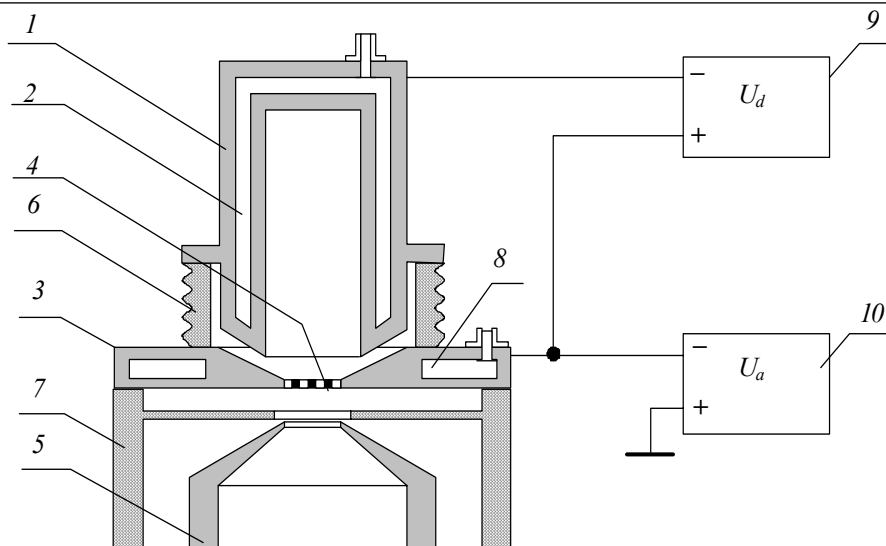


Рис. 1. Электродная схема электронного источника: 1 – полный катод; 2 – водяная рубашка охлаждения катода; 3 – анод; 4 – перфорированный электрод; 5 – экстрактор; 6, 7 – керамические высоковольтные изоляторы; 8 – водяная рубашка охлаждения анода; 9 – источник разрядного напряжения; 10 – источник ускоряющего напряжения

Результаты экспериментов и их обсуждение. Как показали эксперименты, в традиционной эмиссионно-разрядной системе [1] плазменного электронного источника повышение давления до 20 Па и более приводит к существенному росту тока ВТР (рис. 2, 3), причем ВТР формирует электронный пучок. Повышение тока ВТР связано с ростом величины обратного ионного потока из пучковой плазмы на анодный электрод. Эти ионы бомбардируют анод, вызывая тем самым ионно-электронную эмиссию. Выбитые электроны, попадая в область ускоряющего промежутка, и создают, в основном, ток ВТР. Поскольку этот ток является неуправляемым и устанавливается пропорционально ускоряющему напряжению, то следующей задачей при повышении рабочего давления являлось снижение тока ВТР в ускоряющем промежутке.

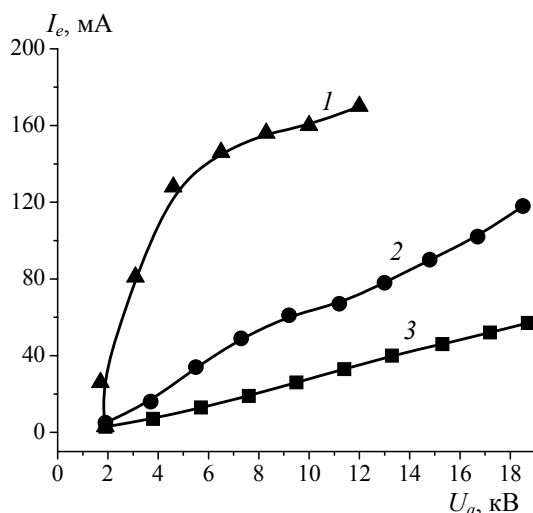


Рис. 2. Зависимость тока I_e ускоряющего промежутка от напряжения для воздуха при различных давлениях: 1 – 6 Па; 2 – 10 Па; 3 – 20 Па ($I_d = 0$)

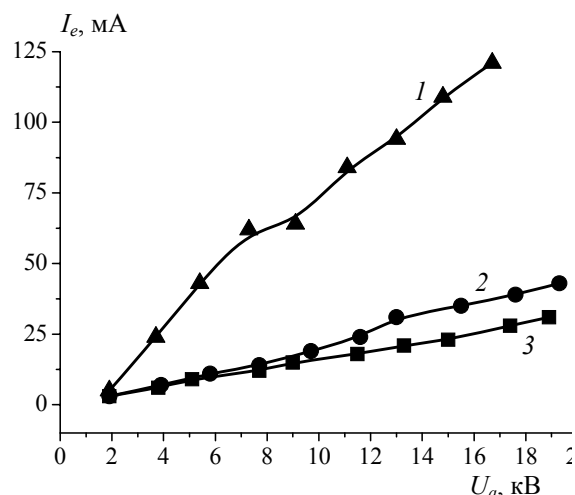


Рис. 3. Зависимость тока I_e ускоряющего промежутка от напряжения для гелия при различных давлениях: 1 – 6 Па; 2 – 10 Па; 3 – 20 Па ($I_d = 0$)

Одним из способов уменьшения тока ВТР является уменьшение величины обратного ионного потока, поступающего из пучковой плазмы на анод. С этой целью к анодному электроду со стороны экстрактора прикладывался керамический диск с отверстием диаметром 10 мм. Диск ограничивал

подвергаемую ионной бомбардировке площадь анода. При давлениях до 20 Па характер зависимостей тока ВТР мало отличался от кривых, представленных на рис. 2, 3, величина же тока оказалась в два раза меньше. Однако с увеличением давления ток резко возрастал и происходил пробой. Основной причиной пробоя в этом случае, вероятнее всего, является ион-электронная эмиссия с поверхности керамики. Несмотря на то, что ток ВТР небольшой, электрическая прочность промежутка при давлениях более 20 Па ухудшилась.

Следующим шагом на пути уменьшения тока ВТР было уменьшение расстояния анод-экстрактор. Простое сближение этих электродов не дало существенного улучшения электрической прочности и уменьшения тока ВТР. Однако использование металлической диафрагмы 1 с диаметром отверстия 10 мм, которое присоединялось к аноду со стороны экстрактора, позволило уменьшить ток ВТР (рис. 4, 5). Выбор диафрагмы обусловлен стремлением снизить расстояние между экстрактором и анодом. Малый (10 мм) диаметр отверстия в диафрагме отсекал часть обратных ионов. Эксперимент проводился для двух различных газов: воздуха и гелия.

При использовании такой конфигурации эмиссионно-разрядной системы возросла электрическая прочность эмиссионного промежутка.

Включение разряда позволило получить больший эмиссионный ток при давлениях вплоть до 40 Па (рис. 6).

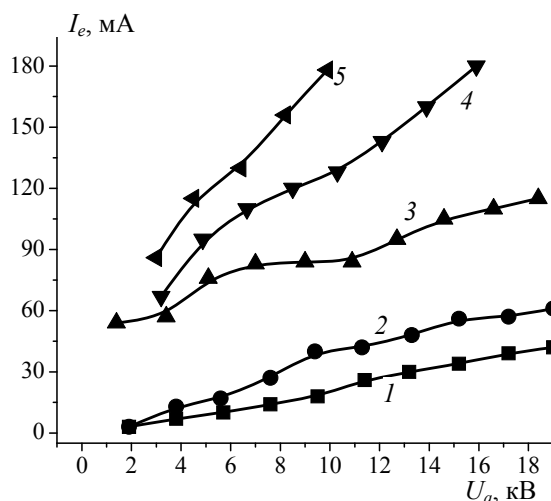


Рис. 4. Зависимость тока I_e ускоряющего промежутка от напряжения для воздуха при различных давлениях: 1 – 6 Па; 2 – 10 Па; 3 – 20 Па; 4 – 30 Па; 5 – 40 Па

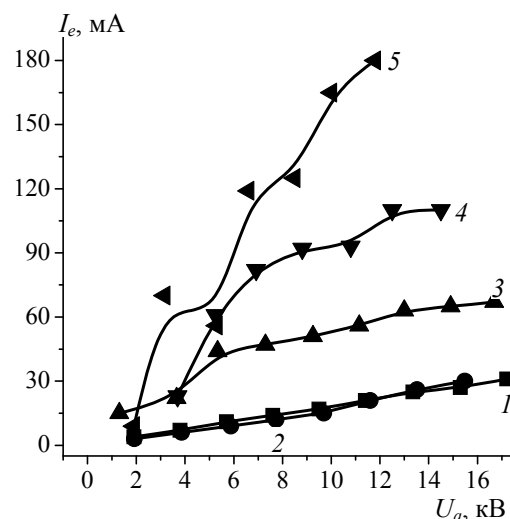


Рис. 5. Зависимость тока I_e ускоряющего промежутка от напряжения для гелия при различных давлениях: 1 – 6 Па; 2 – 10 Па; 3 – 20 Па; 4 – 30 Па; 5 – 40 Па

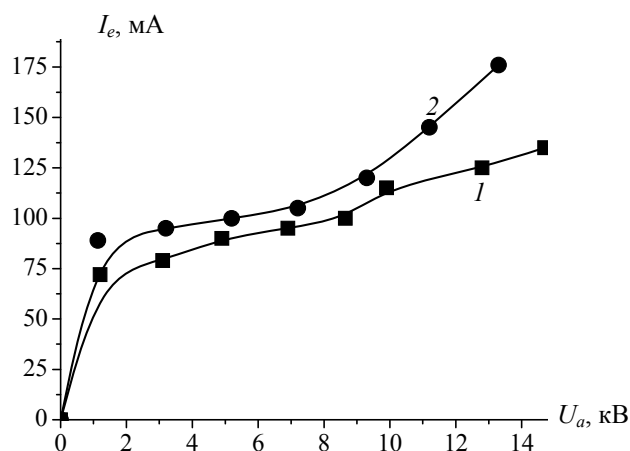


Рис. 6. Зависимость тока I_e ускоряющего промежутка от ускоряющего напряжения для гелия при давлении 40 Па, ток разряда: 1 – 0 мА, 2 – 50 мА

Заключение. В результате проведенных исследований показано, что при увеличении рабочего давления плазменного электронного источника существенно возрастает ток ВТР, что сказывается на уменьшении электрической прочности эмиссионного промежутка. Снизить ток ВТР возможно использованием дополнительной конусной вставки, присоединяемой к анодному электроду со стороны экстрактора. Использование вставки и уменьшение расстояния анод–экстрактор позволило поднять рабочие давления электронного источника до 40 Па.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 11-08-00074 и № 11-08-98004.

Литература

1. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. – Томск: НТЛ, 2005. – С. 37.
2. Burdovitsin V.A. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources / V.A. Burdovitsin, E.M. Oks. – Laser and particle beams. – 2008. – Vol. 26. Iss. 04. – P. 619–635.
3. Бурдовицин В.А. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 11. – С. 61–66.
4. О предельном рабочем давлении плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом / Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.В. Мытников, Е.М. Окс // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 2. – С. 48–50.
5. Гореев А.К. О возможности повышения рабочего давления плазменных электронных источников / А.К. Гореев, А.С. Климов, В.А. Бурдовицин // Электронные средства и системы управления: Матер. докл. Междунар. науч.-практ. конф.: В 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2011. – Ч. 1. – С. 50–52.

Климов Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа
Тел.: 8-905-990-52-41
Эл. почта: Klimov@main.tusur.ru

Жигалкина Арина Сергеевна

Студентка каф. электронных приборов ТУСУРа
Тел.: 8-913-106-57-49
Эл. почта: Ishka90@mail.ru

Бурдовицин Виктор Алексеевич

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

Klimov A.S., Zhigalkina A.S., Burdovitsin V.A.

Features of functioning of plasma electron source at high pressures

In the paper there are given the results of research on the possibility of raising the operating pressure of the plasma electron source based on hollow cathode discharge. It is deduced from experiments that at pressures of 20 Pa the high voltage current of glow discharge is essential, it grows with increasing pressure and leads to restriction of the possibility of independent control of magnitude of the current and accelerating voltage electron beam. It is shown that changes in the geometry of the accelerating gap can increase its dielectric strength and reduce the current of high voltage glow discharge.

Keywords: discharge with hollow cathode, forevacuum, electron beam, high voltage glow discharge, electric strength.