

УДК 537.533

А.В. Медовник, Е.Э. Поздеев

Временные характеристики импульсного источника электронов, функционирующего в форвакуумной области давлений

Показано, что в плазменном источнике импульсных электронных пучков, функционирующем в форвакуумном диапазоне давлений ($5\div 15$ Па), на временные характеристики зажигания разряда, а также электрическую прочность ускоряющего промежутка и максимальные параметры электронного пучка значительное влияние оказывает обратный поток ионов из вторичной плазмы, образованной в области транспортировки пучка.

Ключевые слова: разряд с полым катодом, форвакуум, импульсный электронный источник, обратный ионный поток.

Введение

Обработка материалов импульсными электронными пучками привлекает интерес возможностью формирования поверхностных сплавов, что в сочетании со сверхбыстрой закалкой из жидкого состояния при импульсном плавлении позволяет формировать в тонких поверхностных слоях неравновесные структурно-фазовые состояния, обуславливающие, в конечном счете, существенное повышение поверхностной твердости, коррозионной стойкости и снижение коэффициента трения [1]. Для получения импульсных пучков электронов использование устройств, основанных на отборе электронов с поверхности стационарных [2] или нестационарных [3] плазменных образований представляется предпочтительным. Это связано, прежде всего, со способностью газоразрядной плазмы к импульсной эмиссии [4], что заметно отличает ее от твердотельных термокатодов. Кроме того, эти устройства более стойки при работе в области повышенных давлений и в атмосфере химически агрессивных газов, появление которых может сопровождать процесс импульсного воздействия электронного пучка на мишень.

Проводимые в нашей лаборатории в последнее время исследования направлены на получение электронных пучков в системах с плазменным катодом при повышенных давлениях остаточного газа [5, 6]. В результате этих исследований созданы плазменные источники электронов, обеспечивающие генерацию стационарных электронных пучков цилиндрической [7] и ленточной [8] конфигурации в так называемом форвакуумном диапазоне давлений $5\div 15$ Па. Принципиальной особенностью функционирования источников электронов в области повышенных давлений является генерация пучковой плазмы в области транспортировки электронного пучка [9]. С одной стороны, образующаяся пучковая плазма обеспечивает обратный ионный поток, изменяющий эмиссионные параметры электронного источника. С другой стороны, она может оказаться средой, обеспечивающей нейтрализацию зарядки ускоренным электронным пучком изолированной поверхности, что открывает принципиальную возможность электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов [10]. Интерес к изучению особенностей импульсной эмиссии электронов из плазмы в форвакуумной области давлений связан, прежде всего, с модификацией импульсным электронным пучком диэлектрических поверхностей.

Цель настоящей работы состояла в исследовании временных характеристик форвакуумного плазменного источника электронов, обеспечивающих, в конечном счете, параметры импульсного электронного пучка, достаточные для эффективной обработки поверхностей проводящих и непроводящих материалов.

1. Техника эксперимента

Плазменный электронный источник [7], с которым проводился эксперимент, включал в себя следующие основные элементы (рис. 1): полый катод 1 протяженностью 68 мм и диаметром 28 мм, плоский анод 2 с эмиссионным окном 3, диаметр которого 10 мм, перекрытым мелкоструктурной сеткой $0,2\times 0,2$ мм², ускоряющий электрод 4, удаленный от анода на 7 мм, магнитная фокусирующая система 5. Все электроды источника, включая сетку, выполнены из нержавеющей стали.

Импульсный режим горения разряда обеспечивался искусственной формирующей линией PFN с внутренним сопротивлением 55 Ом. Длительность импульса тока разряда со-

ставляла 36 мкс, частота повторения импульсов – 10 Гц. Амплитуда тока разряда ($5\div 35$ А) регулировалась изменением величины постоянного напряжения U_d , заряжающего формирующую линию. В качестве коммутирующего элемента использовался тиратрон T , управляемый генератором импульсов G . Отбор и ускорение электронов осуществлялись при подаче постоянного ускоряющего напряжения U_a до 20 кВ к промежутку анод – ускоряющий электрод. Эмитируемые через ячейки сетки электроны формировались в пучок 7, регистрируемый цилиндром Фарадея 8, удаленным на расстояние 20 см от ускоряющего электрода. Длительность импульса тока электронного пучка практически не отличалась от длительности импульса тока разряда. Для измерения импульсных токов применялись пояса Роговского, сигналы с которых подавались на осциллограф Tektronix TDS 2004B. При этом ток эмиссии измерялся в цепи питания ускоряющего промежутика, а ток пучка – в цепи цилиндра Фарадея.

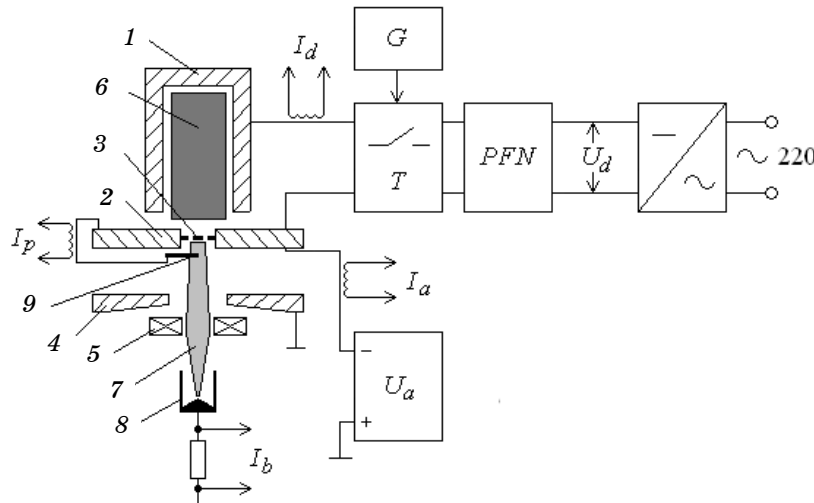


Рис. 1. Плазменный источник электронов.

- 1 – полный катод;
- 2 – анод;
- 3 – эмиссионное отверстие;
- 4 – ускоряющий электрод;
- 5 – фокусирующая система; 6 – плазма;
- 7 – пучок;
- 8 – цилиндр Фарадея;
- 9 – коллектор ионов;
- G – генератор импульсов;
- T – тиратрон;
- PFN – формирующая линия

Регулирование рабочего давления в интервале $5\div 15$ Па осуществлялось напуском газа (воздуха) непосредственно в вакуумную камеру, которая откачивалась только механическим насосом АВЗ-20. Давление измерялось теплоэлектрическим вакуумметром Пирани. Для измерения обратного ионного тока использовался плоский коллектор 9, размещенный непосредственно на аноде 2 со стороны ускоряющего промежутика (см. рис. 1). Коллектор 9 выполнен из медной фольги толщиной 1 мм в виде сектора круга ($51,4^\circ$) радиусом 20 мм, достаточным для перехвата всех обратных ионов в этом секторе. Центр круга совпадал с осью пучка. Коллектор 9 отделен от анода керамической пластинкой. Ток I_c коллектора также регистрировался поясом Роговского. Полный ионный ток I_i оценивался в предположении аксиальной симметрии ионного потока и с поправкой на ионно-электронную эмиссию с коллектора, $I_i = 7I_c / (1 + \gamma)$, где γ – коэффициент ионно-электронной эмиссии меди. В нашем случае принималось, что γ изменяется линейно от 0,1 до 2,0 при изменении энергии ионов от 1 до 20 кэВ [11]. Момент пробоя ускоряющего промежутика фиксировался по скачкообразному росту эмиссионного тока, сопровождающемуся резким спадом ускоряющего напряжения.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Типичные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке катод–анод, а также тока разряда приведены на рис. 2. Обратим прежде всего внимание на тот факт, что при практически постоянном разрядном токе напряжение разряда растет в течение всего импульса.

Существует временная задержка τ_d между передним фронтом импульса напряжения, приложенного к промежутку катод–анод, и моментом зажигания разряда. Наряду с ожидаемым снижением времени τ_d задержки при увеличении U_d и (или) повышении давления p в вакуумной камере, на величину τ_d оказывает влияние напряжение на ускоряющем промежутке U_a . Приложение этого напряжения существенно снижает время, необходимое для зажигания разряда в плазменном источнике электронов (рис. 3). Как видно из представленных на рис. 3 результатов эксперимента, напряжения U_a в несколько киловольт оказалось достаточно для практически полного исчезновения запаздывания зажигания разряда. В случае расположения в эмиссионном отверстии непрозрачной пластины разряд не зажигался вплоть до 30 Па.

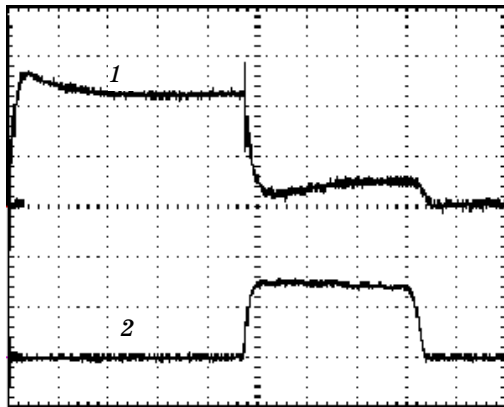


Рис. 2. Типичные осциллограммы напряжения (1) и тока (2) разряда (1000 В/дел.; 20 А/дел.; 10 мкс/дел.)

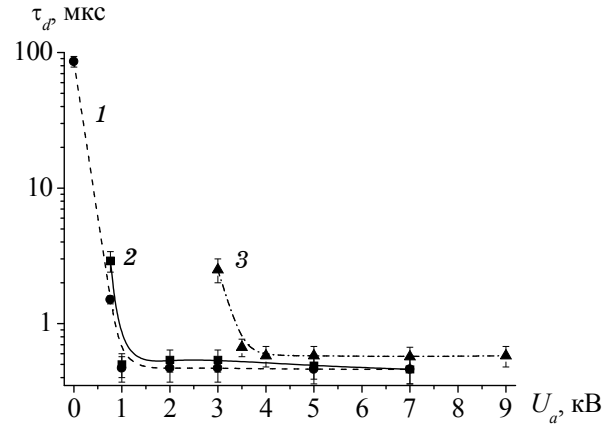


Рис. 3. Время запаздывания разряда τ_d как функция ускоряющего напряжения для различных давлений p и напряжений U_d : 1 – $p = 16$ Па, $U_d = 1200$ В; 2 – $p = 16$ Па, $U_d = 860$ В; 3 – $p = 10$ Па, $U_d = 860$ В

Проведенные параллельно измерения ионного тока на коллектор 9 (см. рис. 1) в отсутствие импульсов разрядного напряжения показали возрастание этого тока как с увеличением U_a так и с повышением давления p (рис. 4). Это дало основания объяснить влияние ускоряющего напряжения на запаздывание зажигания разряда (см. рис. 3) в форвакуумном плазменном источнике электронов в рамках представлений об иницирующей роли ионов из ускоряющего промежутка. Эти ионы генерируются в «паразитном» слаботочном высоко-вольтном тлеющем разряде (ВТР), возникающем в форвакуумной области давлений уже при ускоряющем напряжении в несколько киловольт. Впервые на эту роль ускоряющего напряжения было обращено внимание при исследовании работы форвакуумных плазменных источников электронов в непрерывном режиме [12]. Особенность импульсного режима состоит в том, что время задержки разряда имеет значение для обеспечения стабильных параметров плазменного источника электронов. Повышение ускоряющего напряжения приводит к росту тока ВТР, что в свою очередь обуславливает возрастание обратного ионного потока (см. рис. 4). Заметная доля этих ускоренных ионов проникает через эмиссионное отверстие в разрядный промежуток плазменного источника, создавая в результате ионно-электронной эмиссии со стенок катодной полости дополнительные электроны. Очевидно, что чем больше иницирующих ионов, тем большее количество вторичных электронов выбивается из стенок катодной полости и тем быстрее происходит процесс формирования разрядной плазмы.

Вторая группа экспериментов была проведена с целью измерения времени τ_b задержки момента наступления пробоя ускоряющего промежутка относительно переднего фронта импульса эмиссионного тока. Цель указанных экспериментов состояла, во-первых, в обнаружении причин пробоя и, во-вторых, в установлении предельных значений энергии в импульсе. Результаты, представленные на рис. 5, свидетельствуют о возрастании τ_b с увеличением ускоряющего напряжения, в то время как при увеличении давления газа и эмиссионного тока τ_b снижается. Эти результаты, прежде всего, указывают пути повышения энерговклада электронного пучка в поверхность обрабатываемого объекта за один импульс. Выполненные параллельно измерения обратного ионного тока в зависимости от давления газа, ускоряющего напряжения и тока электронного пучка (рис. 6) дают основания для установления корреляции между временем τ_b и обратным ионным током.

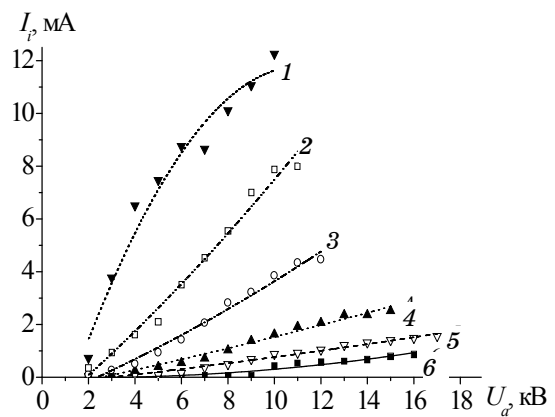


Рис. 4. Полный обратный ток ионов как функция ускоряющего напряжения для различных давлений p : 1 – 16; 2 – 13,6; 3 – 11,1; 4 – 9,4; 5 – 8,2; 6 – 7,4 Па

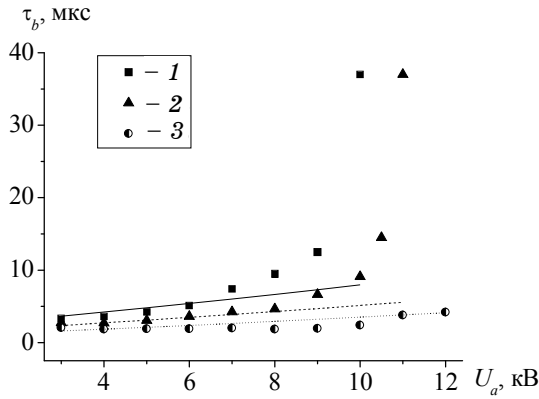


Рис. 5. Время запаздывания пробоя τ_b как функция ускоряющего напряжения U_a для различных токов пучка: 1 – 3 А, 2 – 4,8 А, 3 – 7 А, $p = 8,9$ Па

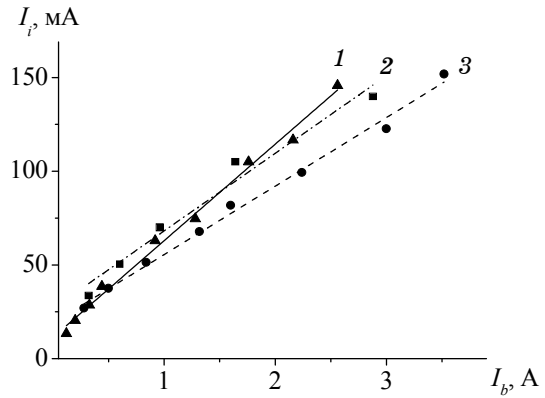


Рис. 6. Обратный ионный ток I_i как функция тока I_b электронного пучка для различных ускоряющих напряжений U_a : 14 кВ (1, 3), 10 кВ (2) и давлений p : 8,2 Па (1), 7,5 Па (2, 3)

Объяснение наблюдаемых зависимостей строится на основе представлений о «плазменном» механизме пробоя [4], т.е. предположений о том, что пробой происходит вследствие проникновения эмиссионной плазмы из разрядной области в ускоряющий промежуток. Для получения расчетных зависимостей была построена одномерная численная модель на основе конечно-разностного метода в одномерном приближении. Суть модели сводилась к следующему:

- Разрядная область разбивалась на элементарные слои одинаковой протяженности. Полагалось, что ионы движутся с тепловыми скоростями. Количество слоев определялось из условия, чтобы за время дискретизации ион преодолел расстояние в один элементарный слой.

- Плотность ионного тока j_i задавалась с учетом измеренных значений.

- В начальный момент времени концентрация ионов (плазмы) во всех слоях одинаковая и определяется величиной разрядного тока.

- Во все последующие временные интервалы концентрация плазмы в каждом слое возрастала за счет перезарядки обратных ионов из ускоряющего промежутка и уменьшалась вследствие теплового перемещения медленных ионов в соседние слои.

- Скорость dn/dt генерации медленных ионов оценивалась в соответствии с выражением

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j_i}{e} \cdot Q_p \cdot n_n \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где e – заряд электрона; Q_p – сечение перезарядки; n_n – концентрация нейтральных молекул; λ – средняя длина свободного пробега обратных ионов; x – координата, отсчитываемая от границы разрядной области.

- Момент пробоя определялся по количеству временных шагов, за которые концентрация эмиссионной плазмы вблизи границы ($x=0$) достигала критического значения $n_{кр}$, соответствующего условию $L_c = h/2$, где L_c – толщина слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от сетки в эмиссионном отверстии, h – параметр сетки. В свою очередь, для оценки толщины слоя может быть использовано выражение [13]

$$L_c = 2\sqrt{\varepsilon_0 U_c^{3/2} (n\sqrt{ekT_e})^{-1}}, \quad (2)$$

где n – концентрация плазмы вблизи сетки; U_c – падение потенциала на слое, зависящее линейно от ускоряющего напряжения [4]; T_e – температура электронов; k – постоянная Больцмана; ε_0 – электрическая постоянная.

В этом случае $n_{кр}$ определялось выражением

$$n_{кр} = 16 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0^2 \cdot U_c^3}{L_c^4 \cdot e \cdot k \cdot T_e}}. \quad (3)$$

Результаты расчета представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, начальный участок достаточно хорошо описывается в рамках представленной модели. В то же время при достижении некоторого порогового ускоряющего напряжения, зависящего от j_i , рас-

четные и экспериментальные значения существенно расходятся. Это может означать появление нового механизма, не учтенного в рамках представленной модели. Одно из возможных объяснений может быть построено на учете слоя пространственного заряда, отделяющего эмиссионную плазму от ускоряющего электрода.

Таким образом, поток ионов из вторичной плазмы становится для форвакуумного электронного источника фактором, определяющим предельную энергию в импульсе. Принятие мер, способствующих снижению этого потока, позволит повысить плотность энергии пучка в импульсе до значений, достаточных для модификации поверхностей проводящих и непроводящих материалов.

Заключение

В плазменном источнике импульсных электронных пучков, функционирующем в форвакуумном диапазоне давлений, временные характеристики в значительной степени определяются обратным потоком ионов из вторичной плазмы, образованной в области транспортировки ускоренного электронного пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 10-08-00257-а, 08-08-12005-офи и гранта Рособразования № 2.1.2/1951.

Литература

1. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, Y.F. Ivanov, A.B. Markov // *Surface and Coating Technology*. – 2000. – V. 125, № 1–3. – P. 49–56.
2. Девятков В.Н. Получение сильноточных низкоэнергетичных электронных пучков в системах с плазменным эмиттером / В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин. – Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 36–43.
3. Production and application of low-energy, high-current electron beams / G.E. Ozur, D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, A.B. Markov // *Laser & Particle Beams*. – 2003. – Vol. 21, № 2. – P. 157–173.
4. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во науч.-техн. лит-ы, 2005. – 212 с.
5. Жирков И.С. О влиянии продольного магнитного поля в ускоряющем промежутке на предельные параметры плазменного источника электронов в форвакуумной области давлений / И.С. Жирков, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // *ЖТФ*. – 2007. – Т. 77, вып. 9. – С. 115–119.
6. Использование разряда с неоднородным протяженным полым катодом для повышения плотности тока в форвакуумном плазменном источнике ленточного пучка электронов / А.С. Климов, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // *ЖТФ*. – 2008. – Т. 78, вып. 4. – С. 43.
7. Источник электронов с плазменным катодом для генерации сфокусированного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, И.С. Жирков, Е.М. Окс, И.В. Осипов // *ПТЭ*. – 2005. – № 6. – С. 66–68.
8. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *ПТЭ*. – 2003. – № 2. – С. 127–129.
9. Особенности формирования узкофокусированных электронных пучков, генерируемых источником с плазменным катодом в форвакуумном диапазоне давлений / И.С. Жирков, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, И.В. Осипов // *ЖТФ*. – 2006. – Т. 76, № 6. – С. 106–110.
10. 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.
11. Справочник: таблицы физических величин / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
12. Инициирование разряда в плазменном источнике электронов с полым катодом / И.С. Жирков, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, И.В. Осипов // *ЖТФ*. – 2006. – Т. 76, № 10. – С. 128–131.
13. Окс Е.М. Основы физики низкотемпературной плазмы. – ТУСУР, 1997. – 87 с.

Медовник Александр Владимирович

Аспирант каф. физики ТУСУРа

Тел.: 8-913-802-94-86

Эл. почта: MedovnikAV@mail.ru

Поздеев Евгений Эдуардович

Студент факультета электронной техники ТУСУРа

Тел.: 8-923-606-86-45

Эл. почта: pozdeev_eugene@mail.ru

Medovnik A.V., Pozdeev E.E.

Time characteristics of a pulse electron source, which operates in fore-vacuum pressure range

The back ion stream from secondary plasma, which is formed in the area of beam transportation, makes considerable impact on time characteristics of a discharge ignition of a plasma electron source, which operates in fore-vacuum pressure range (5 – 15 Pa). Also back ion stream influences on electrical strength of an acceleration gap and the maximum parameters of an electron beam.

Keywords: hollow cathode discharge, fore-vacuum, pulse electron source, back ionic stream.
