Реакция параметров дугового разряда на отбор электронов из эмиссионной плазмы в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом

М.С. Воробьев, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин

ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН

634055 Томск, Россия

e-mail: vorobyovms@yandex.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-50-57

В электродной системе источника электронов с сетчатым плазменным катодом, позволяющего выводить импульсно-периодический электронный пучок большого сечения из вакуума в атмосферу через выпускное фольговое окно, проведены исследования влияния отбора электронов из эмиссионной плазмы на параметры дугового разряда низкого давления, в котором осуществляется генерация этой плазмы. Проведено сравнение работы плазменного катода в различных режимах генерации электронного пучка, а именно, при использовании как широкоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системы (ЭОС), отличающейся высокими потерями тока пучка на ребрах опорной решетки выпускного фольгового окна, так и многоапертурной двухэлектродной ЭОС, когда на эмиссионную сетку устанавливается металлическая маска с конфигурацией отверстий, повторяющей конфигурацию отверстий в опорной решетке, а электронный пучок представляет собой суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых также стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой. В условиях эксперимента при отборе электронов из эмиссионной плазмы наблюдалось повышение напряжения в межэлектродном промежутке между катодом и анодом (эмиссионным электродом) плазменного эмиттера, «вольтодобавка» которого зависит от условий генерации эмиссионной плазмы (давления и рода рабочего газа, отношения площади анода разряда к площади эмиссии), используемой ЭОС, площади эмиссионных структур и размера ячейки используемой эмиссионной сетки.

Введение

Среди различных применений высокоэнергетических электронных пучков существенное место занимает их использование для облучения электронами больших поверхностей твердых тел и значительных газовых объемов. Эти электронные потоки, выведенные в газ высокого давления, используются для возбуждения электроионизационных лазеров [1-3], отверждения некоторых органических соединений [4,5], стерилизации пищевых продуктов [6] и др. При этом интерес к данной тематике продолжает расти, а для решения таких задач, по-прежнему, требуются надежные и долговечные ускорители электронов со стабильными параметрами. Одним из

важнейших элементов любого источника заряженных частиц, определяющим, во многом, его конструктивные особенности, функциональные возможности и эксплуатационные характеристики, является тип применяемого катода. Плазменные катоды, в которых эмиссия частиц происходит из плазмы различных видов газового и вакуумного разрядов, могут быть альтернативой термо- [7,8] и взрывоэмиссионным катодам [9,10]. По сравнению с термокатадами плазменные эмиттеры обеспечивают более высокие значения плотности эмиссионного тока, а при импульсном режиме работы из-за низкого напряжения горения дуги, генерирующей эмиссионную плазму,

обладают более высокой энергетической эффективностью и малым временем готовности. По сравнению с ускорителями электронов на основе взрывоэмиссионных катодов обеспечивают лучшую равномерность распределения плотности тока в пучке и большую длительность импульса, а также более высокую стабильность при работе в частотно-импульсном режиме. При этом вне зависимости от типа катода, значительное внимание уделяется рационализации затрачиваемой мощности и минимизации потерь ускоренных электронов на ребрах опорной решетки выпускного фольгового окна. Энергетическая эффективность ускорителей в этом случае в основном определяется отношением тока, выведенного в атмосферу через выпускное фольговое окно, к току в вакуумном промежутке. В работах [11–12] было показано, что использование в ускорителях электронов с сетчатым плазменным катодом многоапертурной двух-электродной электронно-оптической системы даже при ускоряющем напряжении 200 кВ позволяет достичь эффективности вывода пучка около 80% и вывести в атмосферу электронный пучок средней мощностью около 4 кВт. Кроме этого, важно отметить, что за счет разделения системы электропитания разряда и ускорения электронов управлять основными параметрами пучка в ускорителях на основе сетчатого плазменного катода можно независимо друг от друга в широких пределах, что сложно реализуемо или невозможно в ускорителях электронов на основе других типов эмиттеров. Однако, увеличение средней мощности пучка за счет увеличения любого из параметров пучка на практике ограничено возникновением электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка. В этом случае природа электрического пробоя

ускоряющего промежутка при росте величины ускоряющего напряжения может быть существенно отличной от природы электрического пробоя, например, при росте эмиссионного тока или длительности импульса тока пучка.

Однако, как и в любых других источниках электронов, проблемы электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка и эмиссионной способности сетчатого плазменного катода на основе любой формы горения разряда являются крайне актуальными. Теоретическая модель такого катода и анализ его эмиссионных свойств представлены в работах [13–14]. Эффективность извлечения электронов из плазмы разряда, которая определяется отношением тока электронной эмиссии к току разряда, в высоковольтных электронных источниках с плазменным катодом обычно ограничена на уровне 70% во избежание дестабилизации работы плазменного катода [15]. Рабочее давление источников электронов с плазменным катодом также ограничено сверху, что связано не только с пашеновским пробоем ускоряющего промежутка, но и, согласно [16], с нарушением стабилизирующей функции эмиссионной сетки, в результате выхода границы эмитирующей плазмы за сетку в ускоряющий промежуток и переключением разряда с анода на извлекающий электрод. В этом случае происходит неконтролируемая интенсивная ионизация газа в ускоряющем промежутке, рост обратного ионного потока в эмитирующую плазму, повышение концентрации плазмы, а, соответственно, дальнейшее увеличение электронной эмиссии. Поскольку все эти процессы носят лавинообразный характер, завершаются они так называемым «плазменным» пробоем промежутка. Также эти процессы

накладывают жесткие требования к выбору размера ячейки эмиссионной сетки. При этом авторы работы [16] отмечают, что существуют и другие механизмы возникновения электрического пробоя ускоряющего промежутка, например, электрический пробой, связанный с зажиганием низковольтного разряда между электродами ускоряющей системы. Такой механизм пробоя отмечен также и в работах [17, 18]. Такой пробой, чаще всего связан с тем, что значительная геометрическая прозрачность эмиссионных электродов приводит к равенству давлений в ускоряющем промежутке и плазменном эмиттере, поэтому работоспособность источников электронов обеспечивается благодаря тому, что ускоряющий промежуток делают достаточно длинным для предотвращения вакуумного пробоя и в то же время достаточно коротким, чтобы избежать в нем самостоятельного газового разряда [17]. Основным же механизмом электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов такого типа считается зарядка обратным ионным потоком диэлектрических пленок на поверхности эмиссионной сетки, обращенной в сторону ускоряющего промежутка. Накопление электрического заряда в этом случае приводит к росту напряженности электрического поля в пленке, при достижении определенного значения которого происходит пробой пленки. Ток пробоя приводит к инициированию на поверхности эмиссионной сетки катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью и, как следствие, к электрическому пробую ускоряющего промежутка. Естественно, что единственным «спасением» от таких пробоев является высокая чистота высоковольтных электродов, а также сухие средства вакуумной откачки.

Необходимо отметить, что наличие нескольких механизмов электрических пробоев не означает, что электронные пушки с плазменным катодом не способны стабильно генерировать пучки, а только показывает необходимость исследования эмиссионной способности таких катодов и механизмов электрических пробоев ускоряющего промежутка для дальнейшего развития ускорительной техники, где за основу берется отбор электронов из плазмы дугового разряда низкого давления.

Экспериментальная установка

Исследования проводились на модернизированном импульсном широкоапертурном источнике электронов «ДУЭТ» с сетчатым плазменным катодом (рис.1), более подробное описание которого приведено в [11]. Плазменный катод ускорителя представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали, на торцах которого закреплены два катодных узла на основе дугового разряда низкого давления [19]. Инициирование катодного пятна в данном случае происходит в результате «прямого» электрического пробоя в газе, что исключает промежуточные электроды и изоляторы, необходимые для инициирования катодного пятна и подверженные запылению материалом катода. При подаче высоковольтного импульса напряжения амплитудой ≈ 3 кВ от трансформатора TV (рис. 1) между полым катодом 3, выполненным из магния, и поджигающим электродом 4, играющим роль полого анода для данной разрядной системы, в газе, напускаемом через отверстие в поджигающем электроде, зажигается тлеющий разряд. Поскольку схема электропитания данной ячейки выполнена без стабилизации тока разряда, это приводит к росту плотности тока на катоде и

инициированию на его внутренней поверхности катодного пятна. При этом наблюдается резкое уменьшение напряжения горения разряда, и

тлеющий разряд переходит в другую стадию горения – дуговую с катодным пятном.

Рис. 1. Схема работы ускорителя электронов «ДУЭТ»: 1 – полый анод основного разряда; 2 – ферромагнитная вставка плазменного источника; 3 – полый катод плазменного источника; 4 – поджигающий электрод плазменного источника; 5 – эмитсионная сетка; 6 – ускоряющий электрод (металлическая заглушка)

После инициирования катодного пятна, используя источники электропитания основного разряда E_1 и E_2 , имеющие индуктивный выход и по сути являющиеся источниками тока, разряд зажигается между полым катодом 3 и полым анодом 1 и эмитсионной сеткой 5, необходимой для стабилизации границы эмитсионной плазмы, генерируемой этим разрядом. Для переключения тока разряда в область эмитсионной сетки 5 в цепь полого анода 1 устанавливалось сопротивление R_{HA} , что, прежде всего, необходимо для повышения эффективности извлечения электронов из эмитсионной плазмы в ускоряющий промежуток. Величина сопротивления в модернизированном ускорителе электронов изменялась без разгерметизации вакуумной камеры.

Под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до $U_0=200$ кВ, обеспечиваемого конденсаторной батареей $C_2=0,26$ мкФ,

приложенного между плазменным катодом и ускоряющим электродом 6, расстояние между которыми равно $d=200$ мм, через ячейки эмитсионной сетки, размер которых изменялся в диапазоне $h=(0,4\div 1)$ мм, осуществляется отбор электронов и их ускорение до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Для исследования эмитсионной способности сетчатого плазменного катода при работе в двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системе (ЭОС) [11], в конструкцию плазменного катода может входить металлическая маска (на рис. 1 не обозначена), перфорированная круглыми отверстиями различного диаметра, которая приваривается к эмитсионной сетке точечной сваркой. Конфигурация отверстий в маске повторяет конфигурацию отверстий в опорной решетке выпускного фольгового окна (устанавливается вместо электрода 6, на

рис. 1 не обозначена). В опорной решетке, используемой в [11], общей геометрической прозрачностью 56% имеется такое же количество соосных отверстий, как и в маске, но несколько большего диаметра, равного 15 мкм. На опорную решетку укладывается фольга 8 из алюминий-магниевого сплава АМг-2н толщиной 30 мкм. При использовании многоапертурной ЭОС широкий электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелко-структурной металлической сеткой.

Путем установки в схему электропитания разряда дополнительных петель, имеющих высоковольтную развязку от потенциала «земли», и используя пояса Роговского, осуществлена возможность измерения следующих токов: токов в цепи катодов I_{c1} и I_{c2} , общего тока в цепи полого анода I_{HA} , общего тока разряда $I_d = (I_{c1} + I_{c2})$, напряжения U_d , и тока в ускоряющем промежутке I_0 . Важно отметить, что данное решение позволяет проводить измерения указанных токов и напряжений как в отсутствии ускоряющего напряжения, так и при его наличии.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В отсутствие ускоряющего напряжения при увеличении сопротивления R величина тока на полый анод I_{HA} снижается (рис. 2а), что позволяет переключать ток разряда в область эмиссионной сетки и увеличивать, тем самым, коэффициент извлечения α электронов из плазменного катода в ускоряющий промежуток. Однако, как это видно из рис. 3а, введение сопротивления R приводит к увеличению напряжения U_d , что, вероятнее всего связано, со снижением эффективной площади анода основного разряда. При этом из рис. 2б видно, что при увеличении

площади анода (путем установки маски) величина тока I_{HA} близка к значениям, полученным в экспериментах без маски, а напряжение U_d в этом случае увеличивается (рис. 3б).

а

б

Рис. 2. Зависимости тока на полый анод I_{HA} от тока разряда I_d при различных сопротивлениях в цепи полого анода R : 1 – $R=0$ Ом; 2 – 1 Ом; 3 – 5 Ом; 4 – 10 Ом. Условия эксперимента $p=40$ мПа (Ar), $U_0=0$ кВ, $h=0,4$ мм: а – без маски, б – с маской.

При появлении ускоряющего напряжения U_0 , приводящего к отбору электронов из эмиссионной плазмы, коэффициент извлечения электронов $\alpha=I_0/I_d$ растет по мере увеличения U_0 (рис. 4), что сопровождается ростом напряжения U_d . Увеличение коэффициента α может происходить в результате роста концентрации эмиссионной плазмы, приводящего к уменьшению притока слоя и снижению потенциального барьера для термализованных электронов

плазмы [15]. Рост напряжения U_d в этом

а

б

Рис. 3. Зависимости напряжения разряда U_d от тока разряда I_d при различных сопротивлениях в цепи полого анода в экспериментах с $h=0,4$ мм и маской (а) и при разных электронно-оптических системах (б): 1 – $h=1$ мм с маской; 2 – $h=0,4$ мм с маской; 3 – $h=0,4$ мм без маски. Условия эксперимента $p=40$ мПа, $U_0=0$ кВ, $R=10$ Ом.

случае может быть объяснен снижением концентрации эмиссионной плазмы в результате отбора из нее электронов [21].

При увеличении давления рабочего газа (рис. 5) наблюдается снижение коэффициента извлечения α (кривые 1, 2), что связано с переключением тока разряда в область полого анода разряда, т.е. ростом тока I_{HA} (кривые 3, 4). Также из рис. 5 видно, что при увеличении давления происходит увеличение напряжения U_d (кривые 5, 6), что может быть связано с дополнительными энергетическими потерями на ионизацию рабочего газа.

Как было отмечено ранее, вне зависимости от типа используемой

Рис. 4. Зависимости коэффициента извлечения α (1, 3) и напряжения U_d (2, 4) от ускоряющего напряжения U_0 . Условия эксперимента $R=5$ Ом, $h=0,4$ мм с маской: $p=40$ мПа. 1, 2 – $I_d=30$ А; 3, 4 – $I_d=10$ А.

Рис. 5. Зависимости коэффициента извлечения α (1, 2), тока на полый анод I_{HA} (3, 4) и напряжения U_d (5, 6) от ускоряющего напряжения U_0 при различных давлениях рабочего газа. Условия эксперимента $R=10$ Ом, $I_d=50$ А, $h=0,4$ мм с маской: 1, 4, 6 – $p=40$ мПа; 2, 3, 5 – $p=70$ мПа.

электронно-оптической системы в экспериментах при наличии ускоряющего напряжения происходит увеличение напряжения U_d . Однако, при переключении тока разряда с полого анода в область эмиссионного электрода наблюдалось снижение напряжения U_d . Например, в экспериментах без маски с сеткой $h=0,4$ мм при $U_0>0$ напряжение U_d возрастало с 63 В до ≈ 130 В, а при введении в цепь полого анода

сопротивления $R=10\text{ Ом}$ наблюдалось некоторое снижение межэлектродного напряжения до $U_d=120\text{ В}$. Снижение напряжения U_d может быть связано с возрастанием концентрации эмиссионной плазмы около сетки, изменением положения границы этой плазмы и, соответственно, с изменением формы электрического поля в ячейках сетки, то есть определяться вкладом последовательного соединения двух источников электропитания: разрядного и ускоряющего.

Рис. 6. Зависимость напряжения U_d от коэффициента извлечения α . Условия эксперимента $I_d=30\text{ А}$, $p=40\text{ мПа}$, $U_0=20\text{ кВ}$ (1) 100 кВ (2) $R=0, 10\text{ Ом}$: I – $h=0,4\text{ мм}$ маска ($U_{d0}=81\text{ В}$); II – $h=1\text{ мм}$ маска ($U_{d0}=83\text{ В}$); III – $h=0,4\text{ мм}$ без маски ($U_{d0}=63\text{ В}$)

Заключение

Проведенные исследования подтверждают полученные ранее результаты о влиянии процессов, происходящих в ускоряющем зазоре на работу сетчатого плазменного катода. Так, при отборе электронов из эмиссионной плазмы может наблюдаться резкое повышение межэлектродного напряжения U_d , предположительно обусловленное снижением концентрации этой плазмы. При этом при переключении разряда с полого анода в область эмиссионного электрода может наблюдаться некоторое снижение напряжения U_d , однако, в данном режиме работы может нарушаться

сеточная (слоевая) стабилизация эмиссионной плазмы, что может приводить к электрическому пробоем высоковольтного ускоряющего зазора. Для снижения такого влияния лучше всего использовать эмиссионные сетки с меньшим размером ячейки эмиссионной сетки, что, однако, приводит к снижению коэффициента извлечения α , а, соответственно, к дополнительной токовой нагрузке на катодные узлы, снижающей их ресурс.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00091).

Литература

- [1]. Е.П. Велихов, В.Д. Письменный, А.Т. Рахимов, Успехи физ. Наук, 1977, 122, вып.3, 419.
- [2]. Ю.И. Бычков, Ю.Е. Крейндель, Г.А. Месяц, А.Г. Филонов. Ж.прикл. мех. и техн. физ., 1974, №2, 162.
- [3]. Alan C. Kolb, Uses of intense electron beams. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.NS-22, №3, June 1975.
- [4]. Э.Н. Абдуллин, Д.И. Вайсбурд, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель, Г.А. Месяц, В.Н. Чмух, П.М. Щанин. Письма в ЖТФ, том 4, вып. 4. 1978 г.
- [5]. K.B. Richter, A.V. McCormick, L.E. Scriven and D.E. Weiss. 13th International coatings science and technology symposium, September 10-13, 2006, Denver, Colorado.
- [6]. S.A. Golblith, Proc. Symp. Radioster. Med. Prod.3, Budapest, 1967.
- [7]. М.А. Аброян, В.В. Акулов, П.М. Богомазов, С.Л. Косоголов, Г.Ш. Манукян, С.А. Мотовилов, В.Я. Шведюк, В.Б. Шапиро. Квантовая электроника, 1996, т.23, №8, с.751
- [8]. В.И. Федоров, Л.П. Шантурин. ПТЭ, 1976, №1, 153.
- [9]. Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. Письма в ЖТФ, 1971, 13, вып. 1, 7.
- [10]. С.П. Бугаев, А.В. Кочкарев, В.И. Манылов, В.М. Пайгин. ПТЭ, 1976, №2, 160.
- [11]. М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин. ПТЭ, 2015, №5, С.112–120.
- [12]. M.S. Vorobyov, N.N. Koval, S.A. Sulakshin, V.V. Shugurov. IOP Journal of Physics: Conference Series Vol. 652 (2015) 012048(1-5).

[13]. А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. I // ЖТФ, 1986. – Т.56. – Вып.1. – С. 66–71.

[14]. А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. II // ЖТФ, 1986. – Т.56. – Вып.4. – С. 687–693

[15]. Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко. Эмиссионная электроника // М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.

[16]. В.А. Бурдовицин, М.Н. Куземченко, Е.М. Окс. Об электрической прочности ускоряющего промежутка плазменного источника электронов в форвакуумном диапазоне давлений // ЖТФ, 2002 – Т.72 – В.7 – С.134–136.

[17]. С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. Электронные пучки большого сечения. // М.: Энергоатомиздат. 1984. 112 с.

[18]. Н.В. Гаврилов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейндель, В.С. Толкачев, П.М. Щанин.

Высоковольтный электронный источник с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения // ПТЭ, 1981. – №3. – С. 152–154.

[19]. M.S. Vorobyov, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, V.V. Shugurov. Modernization of cathode assemblies of electron sources based on low pressure arc discharge. // J. Phys.: Conf. Ser., 2015. – V.652 – 012066(1-6).

[20]. М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров. Исследование стабильности работы плазменного эмиттера для широкоапертурного источника электронов. // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан –Удэ, 2015, С.61–67

[21]. Е.М. Окс. Условия образования и эмиссионные свойства объемной плазмы дугового разряда низкого давления. // Диссертация на соискание к.ф.-м.н. С. 127.