

04;10;12

Расширение рабочего диапазона форвакуумных плазменных источников электронов в область более высоких давлений

© В.А. Бурдовицин, А.К. Гореев, А.С. Климов, А.А. Зенин, Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2011 г.)

Показано, что в форвакуумном плазменном источнике электронов повышение рабочего давления ограничено доминированием в электронном пучке компонента тока, возникающего в ускоряющем промежутке за счет высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Для электронных источников такого типа расширение рабочего диапазона давления в область более высоких значений возможно при создании специальных условий, ограничивающих ток ВТР в ускоряющем промежутке.

Введение

Генерация стационарных и квазистационарных электронных пучков при повышенных давлениях газа, вплоть до вывода пучка в атмосферу, представляет собой одно из приоритетных направлений дальнейшего развития электронно-лучевых технологий [1]. Наиболее перспективными, с точки зрения реализации этих задач, представляются источники электронов с плазменным катодом [2,3]. Эти источники основаны на эмиссии электронов с поверхности плазмы, генерируемой в системах тлеющего или дугового разряда с „холодным“ (не накаливаемым до термоэмиссионных температур) катодом. Такие устройства обладают рядом принципиальных преимуществ, среди которых одним из наиболее значительных является нечувствительность к остаточной газовой атмосфере. Именно поэтому использование плазменных источников электронов может рассматриваться как один из наиболее эффективных путей для решения проблемы расширения рабочего диапазона генераторов электронных пучков в область более высоких давлений.

Развиваемые в последние годы, так называемые форвакуумные плазменные источники электронов обеспечивают генерацию пучков различной конфигурации в непрерывном и импульсном режимах функционирования в ранее недоступной форвакуумной области давлений вплоть до 10–15 Па [4]. (В данном случае под термином „форвакуумная область давлений“ понимается диапазон давлений, обеспечиваемых при использовании лишь одной ступени механических средств откачки). Выход на столь высокие давления привел к появлению новых возможностей для электронно-лучевой модификации материалов, например обработки электронным пучком непроводящей керамики [5]. Задача дальнейшего продвижения в область более высоких давлений представляет интерес как с точки зрения развития самой техники генерации электронных пучков, так и для их более широкого применения. Очевидно, что предельное давление для генерации электронного пучка обусловлено зажиганием самостоятельного разряда в ускоряющем

промежутке в низковольтной форме, когда ускорение электронов до необходимой энергии не представляется возможным. Такие условия реализуются при достижении параметром pd минимума кривой Пашена. Хотя рабочая точка pd в форвакуумных плазменных источниках электронов все еще находится в левой ветви кривой Пашена, тем не менее, нарушение электрической прочности ускоряющего промежутка является основной проблемой, препятствующей эффективному функционированию таких устройств. Наряду с самим электронным пучком, одним из существенных факторов, способных оказать влияние на устойчивость работы источников электронов, является „паразитный“ высоковольтный тлеющий разряд (ВТР), возникающий в ускоряющем промежутке. Несмотря на очевидность физических причин, ограничивающих рабочее давление форвакуумных плазменных источников электронов, вопрос о величине предельного давления остается открытым. Результаты исследований, приведенные в настоящей работе, представляют собой попытку ответа на этот вопрос.

1. Техника эксперимента

Эксперименты проводились с использованием плазменного электронного источника (рис. 1) на основе тлеющего разряда с полым катодом, специально созданного для генерации пучка в форвакуумной области давлений [6]. Конструктивное исполнение ускоряющего промежутка электронного источника затрудняло пробой по так называемым „длинным путям“ и тем самым обеспечивало генерацию стационарного сфокусированного электронного пучка при повышенных давлениях. Эмиссионная плазма формировалась в разряде с полым катодом 1, диаметром 20 мм и длиной 55 мм. Плоский анод 2 содержал эмиссионное окно 3 диаметром 10 мм. Эмиссионное окно перекрыто тонкой (~ 1 мм) танталовой или молибденовой пластиной с перфорированными отверстиями, диаметром 0.7 мм. Ускоряющий промежуток образован эмиссионным электродом (внешней

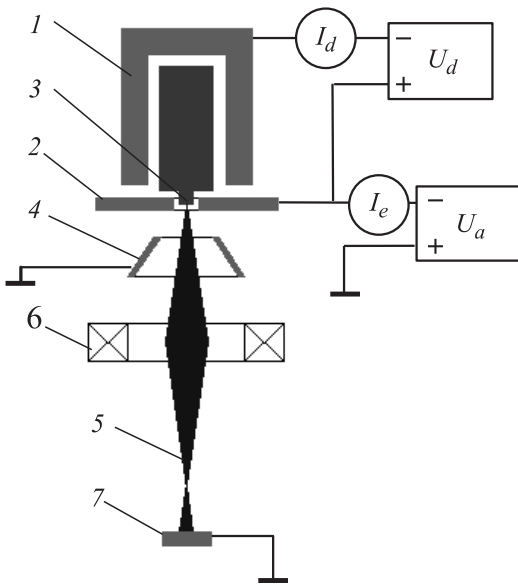


Рис. 1. Плазменный источник электронов: 1 — полый катод, 2 — анод, 3 — эмиссионное окно, 4 — ускоряющий электрод, 5 — электронный пучок, 6 — фокусирующая система, 7 — коллектор.

поверхностью анода 2) и заземленным ускоряющим электродом 4. Электронный пучок 5, сфокусированный магнитной системой 6, принимался на коллектор 7. За исключением перфорированной пластины, все электроды электронного источника выполнены из нержавеющей стали. Источник электронов функционировал в непрерывном режиме при следующих основных параметрах: ток разряда — 0,05–0,3 А, ток пучка — до 0,2 А, ускоряющее напряжение — 5–20 кВ, диаметр пучка на коллекторе 5–10 мм.

В форвакуумном диапазоне практически невозможно создать перепад давлений между разрядным и ускоряющим промежутками (как это обычно делается в плазменных источниках электронов, функционирующих в традиционной для этих устройств области давлений 10^{-2} – 10^{-1} Па [7]). Изобарический режим работы форвакуумных плазменных источников электронов также можно отнести к их основной специфике, напрямую влияющей на электрическую прочность ускоряющего промежутка. В экспериментах в качестве рабочих газов использовались воздух и гелий. Выбор воздуха во многом был обусловлен моделированием процессов практического применения форвакуумных плазменных источников электронов, тогда как использование гелия представлялось перспективным с точки зрения расширения рабочего диапазона давлений. Давление в электронном источнике регулировалось напуском газа непосредственно в вакуумную камеру и изменялось от единиц до десятков паскалей.

Проводимые эксперименты были направлены на достижение предельного рабочего давления форвакуумных

плазменных источников электронов. Они проводились следующим образом. В рабочую камеру напускался газ до достижения определенного давления, после чего в плазменном источнике электронов между полым катодом 1 и анодом 2 зажигался разряд, обеспечивающий генерацию эмиссионной плазмы. Затем производился подъем напряжения U_a на ускоряющем промежутке и формирование электронного пучка. При достижении напряжением U_a некоторой критической величины наблюдался пробой ускоряющего промежутка. Пробой фиксировался по резкому падению напряжения и возрастанию тока I_e в цепи нагрузки высоковольтного выпрямителя, питающего ускоряющий промежуток. Момент пробоя также сопровождался исчезновением электронного пучка на коллекторе. В ряде экспериментов разрядное напряжение на электроды 1 и 2 не подавалось. В этом случае исследовалась электрическая прочность ускоряющего промежутка в так называемом „холодном“ режиме (без электронного пучка).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Типичные вольтамперные характеристики электронного источника для воздуха и гелия приведены на рис. 2, *a* и *b* соответственно. Следует обратить внимание на тот факт, что даже в отсутствие тока разряда, а следовательно, и тока эмиссии из плазмы, при подаче высокого напряжения в ускоряющем промежутке генерируется электронный пучок с заметным значением тока. Зажигание разряда с полым катодом в электродной системе форвакуумного плазменного источника электронов, естественным образом увеличивает ток пучка в промежутке, но снижает предельное ускоряющее напряжение, при котором еще наблюдается устойчивая работа электронного источника. Чем больше ток разряда, тем при меньшем ускоряющем напряжении наблюдаются пробой промежутка (рис. 2, *a*). Ожидаемыми являются также более высокая электрическая прочность и более устойчивая работа форвакуумного плазменного источника при замене воздуха на гелий (рис. 2, *b*). Увеличение давления газа также ограничивает предельное значение напряжения на ускоряющем промежутке, а, следовательно, и максимальную энергию электронного пучка (рис. 3). И в этом случае использование гелия в качестве рабочего газа предпочтительнее. Как видно из результатов, представленных на рис. 3, напуск гелия обеспечивает возможность устойчивой генерации электронного пучка в области более высоких давлений вплоть до 30 Па.

Появление электронного пучка в ускоряющем промежутке в отсутствие эмитированных из плазмы электронов, очевидно, связано с зажиганием в промежутке высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). В этом случае истинный ток эмиссии складывается с электронным

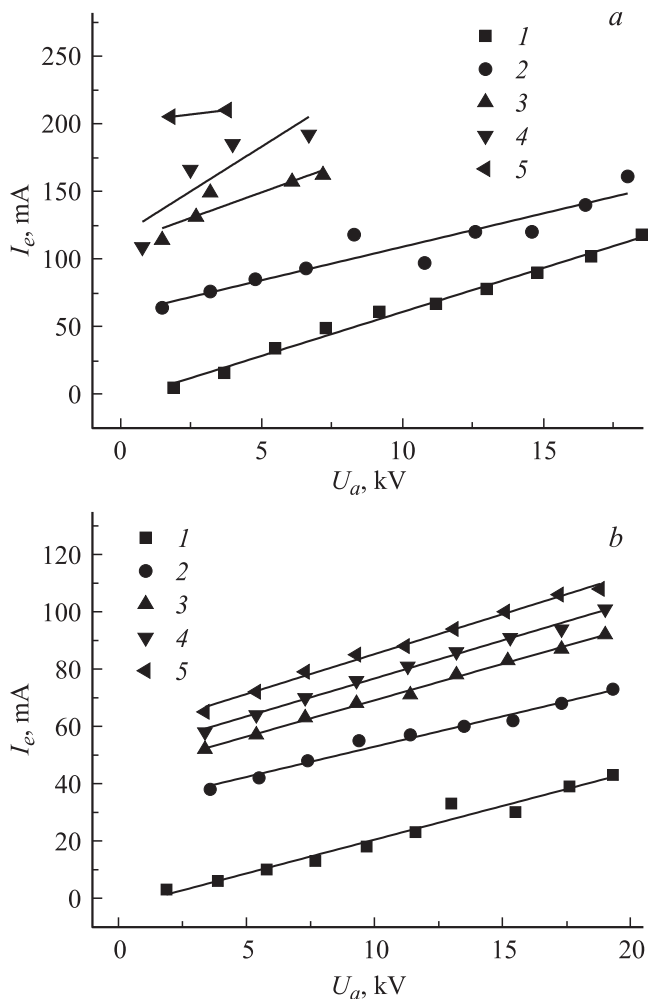


Рис. 2. ВАХ форвакуумного плазменного источника электронов для разных разрядных токов I_d : 1 — 0, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 250, 5 — 300 мА; и газов: а — воздух, б — гелий. Давление $p = 10$ Па.

током ВТР, образуя, таким образом, общий ток электронного пучка. Поскольку электроны ВТР выбиваются с внешней поверхности анода и далее ускоряются полным приложенным напряжением, они не отличаются от электронов, эмитированных из плазмы. Повышение давления приводит к значительному росту тока ВТР в промежутке (рис. 3) и соответственно к возрастанию электронного компонента ВТР в токе ускоренного электронного пучка. При определенных условиях доля электронов ВТР в пучке начинает превышать ток электронов, эмитированных плазмой. Несмотря на то что и в этом случае в ускоряющем промежутке сохраняется высокое напряжение, и формируется ускоренный электронный пучок, такой режим функционирования форвакуумного плазменного источника электронов следует считать нерабочим. Данное заключение основано на том, что доминирование ВТР компонента в электронном пучке затрудняет независимое от энергии регулирование тока пучка, который в данном случае в большей степени

определяется условиями в ускоряющем промежутке, а не параметрами эмиссионной плазмы.

Таким образом, принципиальное ограничение рабочего диапазона давлений форвакуумного плазменного источника электронов состоит в доминировании доли ВТР в общем токе ускоренного электронного пучка. Такое условие может быть достигнуто в области давлений, в которой еще сохраняется электрическая прочность ускоряющего промежутка и формируется электронный пучок. Плавность перехода к ВТР при повышении рабочего давления размывает границу между режимами генерации электронного пучка за счет эмиссии электронов из плазмы или в результате ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода в условиях развитого ВТР. По-видимому, будет правильным разделение режимов генерации электронного пучка по преобладанию плазменного или ионно-эмиссионного компонентов в пучке.

Анализ поведения электронного источника в момент, предшествующий пробое ускоряющего промежутка, не выявил принципиальных различий между случаями наличия и отсутствия разрядного тока, обуславливающего плазменный эмиссионный компонент в токе пучка. Всякий раз в момент пробоя происходил скачок тока в цепи источника питания ускоряющего промежутка без какого-либо влияния на разрядный промежуток. Это дало основания полагать, что пробоем ускоряющего промежутка форвакуумного плазменного источника электронов связан с пучковой плазмой, образованной в области транспортировки электронного пучка, непосредственно прилегающей к ускоряющему электроду. В отличие от условий, рассмотренных в [9], когда пробоем возникал в результате выхода плазмы через эмиссионное отверстие в ускоряющий промежуток, в данном случае имеет место пробоем между пучковой плазмой и находящимся под отрицательным потенциалом эмиссионным электродом ускоряющего промежутка. Это, в свою очередь,

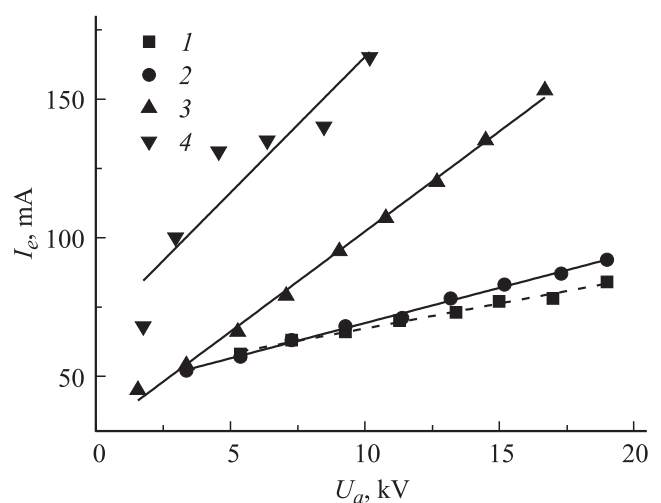


Рис. 3. ВАХ для разных давлений: 1 — 6, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30 Па. $I_d = 200$ мА, газ — гелий.

означает, что в иницировании пробоя первостепенное значение имеют эффекты на поверхности этого электрода. Естественно полагать, что по мере возрастания давления газа и эмиссионного тока происходит увеличение напряженности E поля вблизи поверхности электрода за счет повышения концентрации пучковой плазмы и приближения ее границы к эмиссионному электроду. Следствием этого становится появление центров эмиссии с последующим развитием катодных пятен и формированием дугового разряда.

Количественные оценки могут быть проведены с использованием следующих допущений. Для определения концентрации n пучковой плазмы воспользуемся уравнением баланса ионов

$$\sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} n = \sigma n_0 \frac{j_e D}{q}, \quad (1)$$

где T_e — электронная температура плазмы, M_i — масса иона, σ — сечение ионизации газа электронами пучка, j_e — плотность тока пучка, n_0 — концентрация нейтральных молекул газа, D — характерный продольный размер плазмы, равный ее диаметру, при котором еще возможно одномерное приближение.

В форвакуумном диапазоне давлений j_e состоит из двух компонентов:

$$j_e = \alpha U_a + j_{pl}, \quad (2)$$

где первое слагаемое соответствует ВТР, а второе обусловлено эмиссией электронов из плазмы разряда. Коэффициент α , учитывающий зависимость тока j_e от ускоряющего напряжения U , был определен экспериментально. В предположении одного знака зарядов в слое между пучковой плазмой и эмиссионным электродом его толщина d может быть оценена по известному соотношению [9]

$$d = \frac{\epsilon_0^{1/2} U_a^{3/4}}{n^{1/2} (qkT_e)^{1/4}}, \quad (3)$$

где U — падение потенциала на слое, равное в данном случае ускоряющему напряжению.

Делая замену $d = U_a/E$, выражая n из (1) и подставляя его в (3), получаем после преобразований

$$\alpha U_a + j_{pl} = \left(\frac{\epsilon_0 q^{1/2} E^2}{\sigma n_0 D M^{1/2}} \right) \frac{1}{U_a^{1/2}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) может быть использовано для анализа зависимости напряжения U_b пробоя от давления и тока эмиссии из плазмы при условии задания значения критической напряженности поля E_{cr} , соответствующего образованию центров эмиссии на эмиссионном электроде. Понятно, что величина E_{cr} может быть задана лишь ориентировочно, тем не менее при $E = E_{cr} = 2 \cdot 10^4$ В/см получается зависимость, неплохо согласующаяся с результатами эксперимента (рис. 4). Это дает дополнительные аргументы в пользу предлагаемого механизма пробоя.

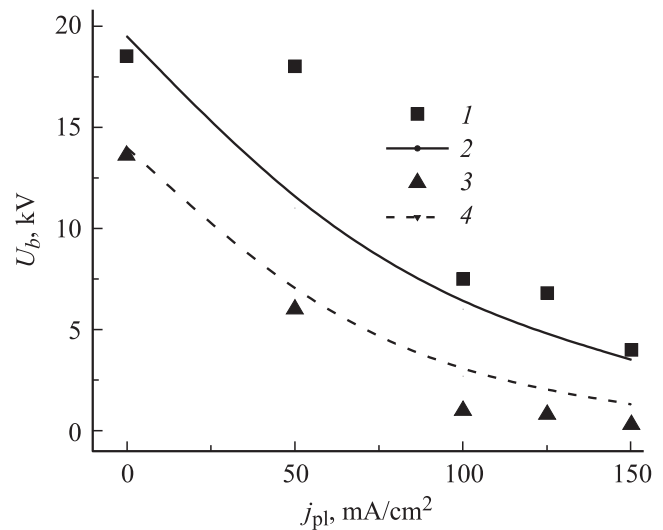


Рис. 4. Напряжение U_b пробоя как функция тока I_e эмиссии из плазмы для разных давлений воздуха: 1, 2 — 10 Па, 3, 4 — 20 Па. 1, 3 — эксперимент, 2, 4 — расчет.

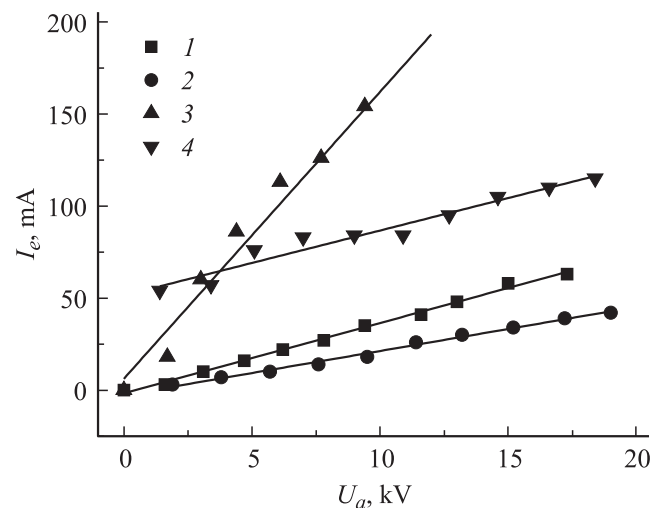


Рис. 5. Сравнительные ВАХ до (1, 3) и после (2, 4) размещения диафрагмы в ускоряющем промежутке. Газ — воздух, $p = 6$ Па (1, 3), 20 Па (3, 4).

Резонно предположить, что дальнейшее повышение рабочего давления форвакуумного плазменного электронного источника возможно при создании условий, снижающих напряженность поля на эмиссионном электроде. Это будет означать возможность повышения критического значения E_{cr} средней напряженности поля, а следовательно, и предельного ускоряющего напряжения U_b . В настоящей работе такой эффект был достигнут размещением между ускоряющим и эмиссионным электродами диафрагмы, электрически соединенной с эмиссионным электродом. Как следует из рис. 5, это привело к заметному снижению тока ВТР и повышению предельного давления. Одновременно наблюдалось и увеличение предельных ускоряющих напряжений.

Заключение

Таким образом, для форвакуумного плазменного источника электронов повышение рабочего давления приводит к появлению в ускоренном электронном пучке заметной доли тока, обусловленного электронным компонентом возникающего в ускоряющем промежутке ВТР. При определенном давлении электронный ток ВТР становится доминирующим в общем токе ускоренного электронного пучка. Несмотря на то, что при этом еще сохраняется электрическая прочность ускоряющего промежутка и формируется электронный пучок, такое давление следует считать предельно допустимым для функционирования форвакуумных плазменных источников электронов. Расширение рабочего давления давлений в область более высоких значений давлений возможно при создании специальных условий, ограничивающих ток ВТР в ускоряющем промежутке.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Грант № 11-08-00074-а.

Список литературы

- [1] *Hershcovitch A.* // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. N 9. 1995. P. 5283–5288.
- [2] *Крейндель Ю.Е.* Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат. 1977. 144 с.
- [3] *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. М.: НТЛ, 2005. 216 с.
- [4] *Burdovitsin V.A., Oks E.M.* // Laser Part. Beams. 2008. Vol. 26. Iss. 04. P. 619–635.
- [5] *Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 61–66.
- [6] *Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М., Осипов И.В., Федоров М.В.* // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66–68.
- [7] *Osipov I., Rempе N.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. N 3. P. 1–4.
- [8] *Крейндель Ю.Е., Никитинский В.А.* // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 11. С. 2378–2382.
- [9] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.