

04;10;12

Особенности формирования узкофокусированных электронных пучков, генерируемых источником с плазменным катодом в форвакуумном диапазоне давлений

© И.С. Жирков, В.А. Бурдовичин, Е.М. Окс, И.В. Осипов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

634050 Томск, Россия

e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 28 сентября 2005 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования формирования сфокусированного электронного пучка при отборе электронов из плазмы стационарного разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений. На основании измерений энергетического спектра и диаметра электронного пучка, а также параметров и спектров излучения плазмы, возникающей при взаимодействии пучка с газом, сделан вывод о возникновении пучково-плазменного разряда, вызывающего ухудшение условий фокусировки пучка. Минимальная плотность тока в пучке, при которой появляется пучково-плазменный разряд, возрастает как с подъемом ускоряющего напряжения, так и с увеличением давления газа.

PACS: 41.75.Fr

Введение

Способность к генерации электронных пучков в области давлений, на один–два порядка превышающих диапазон рабочих давлений термокатодных пушек, делает плазменные источники сфокусированных электронных пучков привлекательными для использования в технологических процессах электронно-лучевой плавки, сварки и размерной обработки [1]. Это обстоятельство обусловлено отсутствием в плазменных источниках накаливаемых до термоэмиссионных температур электродов. Эффективное функционирование плазменных катодов при повышенных давлениях обеспечивает расширение круга технологических операций, в которых может быть использован электронный пучок [2]. Вместе с тем повышенное давление увеличивает вероятность пробоя ускоряющего промежутка [3], что накладывает ограничения на максимально допустимое ускоряющее напряжение. Очевидно, что увеличение мощности пучка может быть обеспечено увеличением тока. Однако на этом пути существуют ограничения, связанные с взаимодействием электронного пучка с газом [4,5].

Ранее [6,7] была показана возможность расширения рабочего диапазона давлений электронных источников с плазменным катодом в так называемую форвакуумную область, которая достигается использованием только механических средств откачки. На основании проведенных исследований созданы плазменные источники электронов, обеспечивающие стабильную генерацию аксиально-симметричных и ленточных пучков с током уровня 1 А, энергией порядка 10 кВ при давлениях газа вплоть до 10 Па [8,9]. Задачей исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, являлось изучение особенностей формирования в этих условиях узкофокусированных электронных пучков.

Техника эксперимента

Эксперимент проводился с использованием плазменного источника электронов, специально созданного для работы в форвакуумной области давлений [10] (рис. 1). Для генерации плазмы в устройстве используется разряд с полым катодом 1. Отбор электронов из плазмы 2 осуществляется вдоль оси системы через центральное отверстие в аноде 3. Стабильное функционирование источника при повышенных давлениях обеспечивается более сильной экранировкой области генерации плазмы от ускоряющего поля и использованием в устройстве

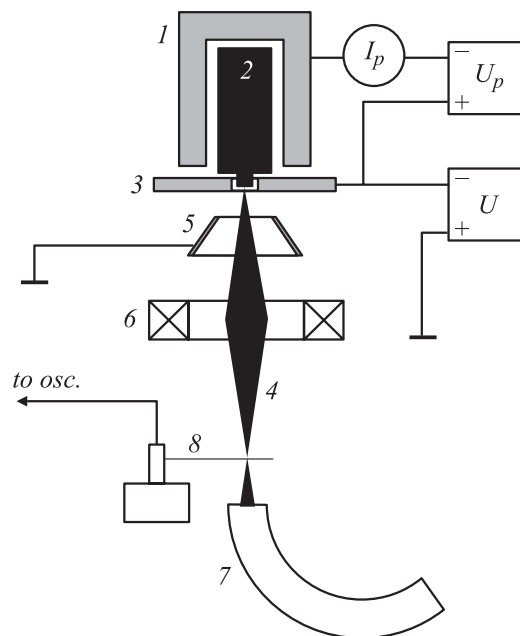


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

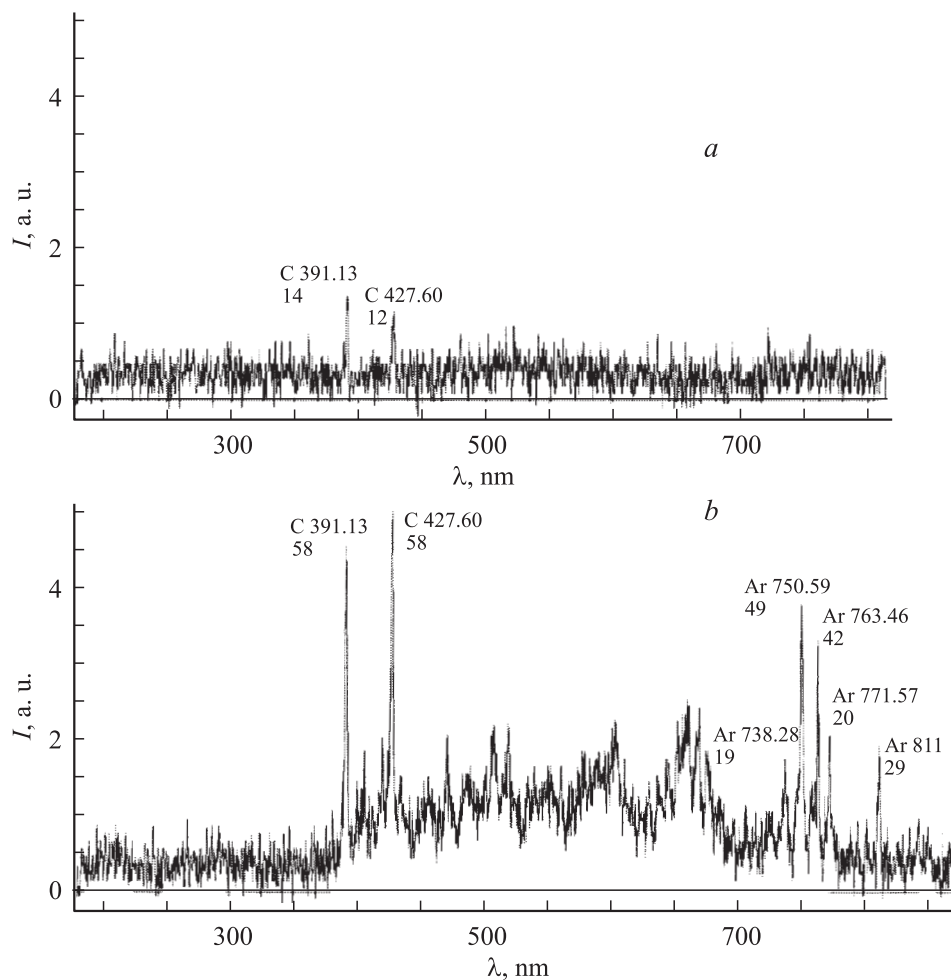


Рис. 2. Спектр свечения пучковой плазмы для токов пучка 20 (а) и 60 мА (б). Газ — аргон, давление 3 Па, ускоряющее напряжение 5 кВ.

особой конструкции высоковольтного изолятора [11], затрудняющей возникновение так называемого периферийного пробоя. Плазменный источник электронов размещен на фланце вакуумной камеры. Для формирования и фокусировки электронного пучка 4 служат ускоряющий электрод 5 и магнитная линза 6. Энергия электронов пучка определяется электростатическим анализатором 7. В качестве анализатора использовался 127° цилиндрический конденсатор Юза–Рожанского [12], изготовленный по чертежам, любезно предоставленный др. Р. Холлингером (R. Hollinger) [13] из Ускорительного центра GSI (Дармштадт, Германия), в рамках программы совместного российско–германского научного сотрудничества. Использование этого типа анализатора вместо анализаторов с задерживающим потенциалом позволило избежать высоких напряжений в аналитической части установки. Диаметр пучка измерялся методом вращающегося зонда [14]. Зонд 8, выполненный из вольфрамовой проволоки диаметром 0.2 мм, вращаясь, пересекает электронный пучок. Возникающий при этом сигнал фиксируется осциллографом. Для измерения спектра свече-

ния плазмы в области распространения пучка применяется оптический спектрометр USB 2000 Ocean Optics, сигнал к которому передается по световоду. Концентрация и температура электронов в плазме определялись с помощью двойного ленгмюровского зонда. Только механический форвакуумный насос использовался для откачки камеры, газовой средой являлась ее остаточная атмосфера. Для оптических измерений использовался аргон.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Визуальные наблюдения показали, что при превышении током пучка некоторого порогового значения в области фокуса возникает яркое белое свечение, в то время как остальная траектория пучка имеет фиолетовую окраску. При этом свечение плазмы в видимой области обогащается линиями с низким энергетическим порогом возбуждения (рис. 2), а энергетический спектр пучка расширяется (рис. 3). Диаметр пучка в фокальной

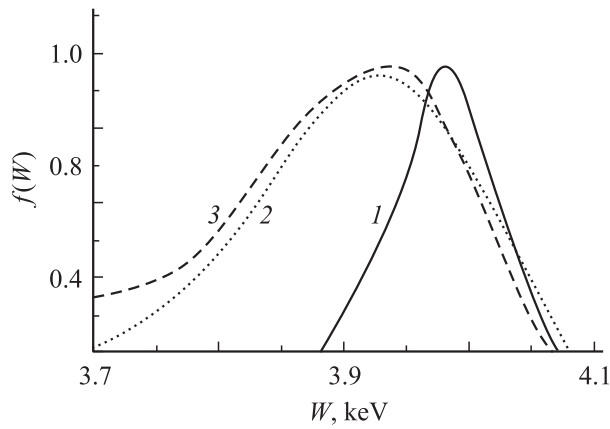


Рис. 3. Функция распределения электронов по энергии для различных токов пучка: кривая 1 — 30; 2 — 42; 3 — 64 mA (ускоряющее напряжение 4 kV, давление 3 Pa).

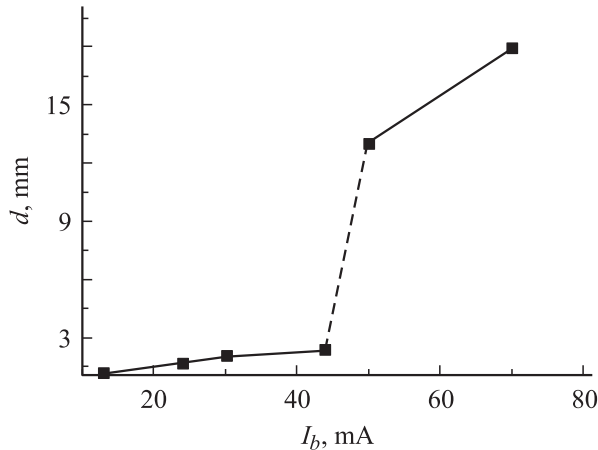


Рис. 4. Зависимость диаметра d пучка от его тока I_b . Параметры те же, что и на рис. 1.

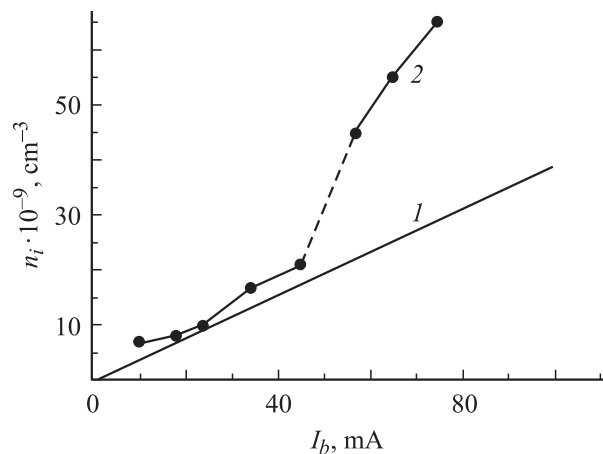


Рис. 5. Концентрация n_i пучковой плазмы как функция тока I_b пучка: кривая 1 — расчет, 2 — эксперимент. Параметры те же, что и на рис. 1.

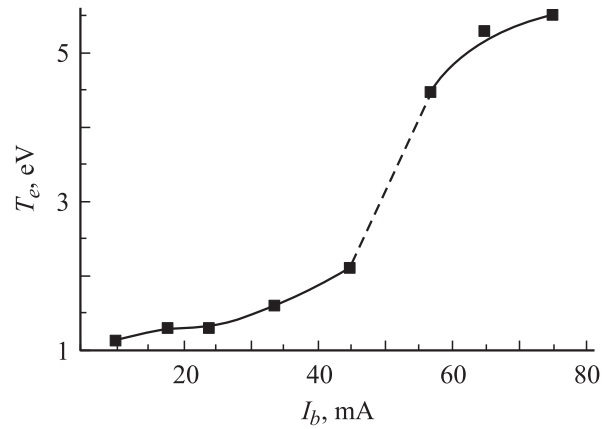


Рис. 6. Зависимость температуры T_e плазменных электронов от тока I_b пучка. Параметры те же, что и на рис. 1.

плоскости также возрастает с увеличением тока пучка (рис. 4). Обратим внимание на тот факт, что начиная с некоторого порогового значения тока электронного пучка наблюдается резкий рост концентрации пучковой плазмы (рис. 5) и температуры плазменных электронов (рис. 6).

В предположении парного характера взаимодействия электронов пучка с газом уравнение баланса ионов в простейшем одномерном приближении может быть записано в виде

$$\frac{j}{e\lambda} \pi r^2 = 2\pi r n_i v, \quad (1)$$

где j — плотность тока пучка, r — радиус пучка, λ — ионизационная длина свободного пробега электронов, n_i — концентрация ионов, v — тепловая скорость ионов. Полученная из этого уравнения зависимость n_i от тока пучка является линейной при условии постоянства r (рис. 5). Резкое отличие экспериментальной зависимости от расчетной указывает, по нашему мнению, на изменение характера взаимодействия электронного пучка с плазмой при достижении порогового значения тока пучка. Это отличие, наряду со скачкообразными измерениями спектра свечения (рис. 2), функции распределения электронов пучка по энергии (рис. 3), температуры плазменных электронов (рис. 6), позволили прийти к выводу о коллективном характере взаимодействия пучка с плазмой и возникновении плазменно-пучкового разряда (ППР) [15]. Минимальный ток электронного пучка, необходимый для возникновения ППР возрастает как с ростом ускоряющего напряжения, так и с увеличением давления газа (рис. 7).

Пороговая плотность тока может быть рассчитана на основе критерия возникновения ППР в виде [15]:

$$\omega \left(\frac{n_e}{n_i} \right)^{1/3} = 5v_{en}, \quad (2)$$

где ω — плазменная частота электронов плазмы, n_e и n_i — концентрация электронов в пучке и плазмы со-

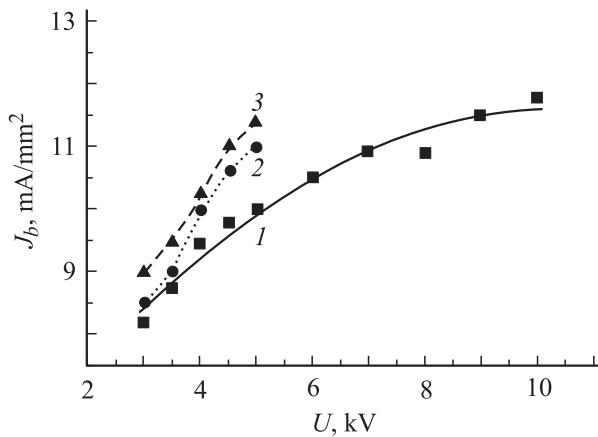


Рис. 7. Пороговая плотность тока электронного пучка j_b как функция ускоряющего напряжения U для различных давлений газа: кривая 1 — 2, 2 — 3, 3 — 4 Па.

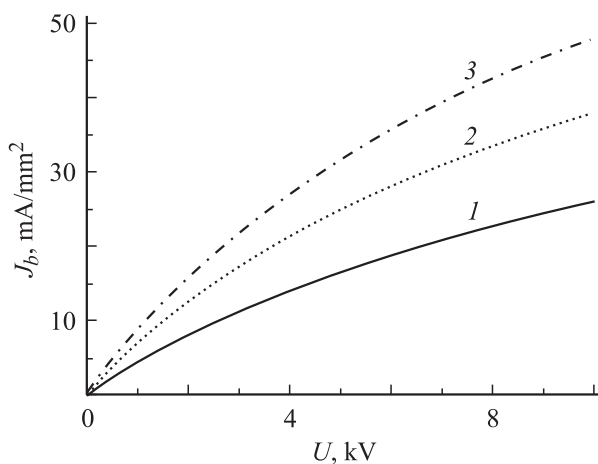


Рис. 8. Расчетные зависимости пороговой плотности тока j_b от ускоряющего напряжения U для разных давлений газа: кривая 1 — 3, 2 — 5, 3 — 7 Па.

ответственно, v_{en} — частота столкновения плазменных электронов с нейтралами.

Для того чтобы воспользоваться этим критерием, рассмотрим токи ниже пороговых. Очевидно, что в этом случае ионизация газа электронным пучком происходит в результате парных столкновений, и в качестве уравнения баланса ионов может быть вновь использовано выражение (1). Принимая, что тепловая скорость ионов равна $\sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}$, из (1) получаем

$$n_i = \frac{4\pi r j}{e\lambda 2\pi} \sqrt{\frac{\pi M}{8kT}}. \quad (3)$$

Используя выражения для концентрации электронов в пучке $n_e = \frac{i}{e} \sqrt{\frac{m}{2eU}}$, плазменной частоты электронов $\omega = \sqrt{\frac{e^2 n_i}{\epsilon_0 m}}$ и частоты столкновений плазменных электронов с нейтралами $v_{en} = \sigma_{en} v_{ep} N_n$, где v_{ep} — тепловая скорость плазменных электронов, σ_{en} — эффективное

сечение столкновений электронов с нейтралами, N_n — концентрация нейтралов, U — ускоряющее напряжение, и подставляя их в (2), получаем после несложных преобразований выражение для пороговой плотности тока

$$j = 25\sqrt{2} v_{en}^2 \epsilon_0 \left(\frac{kT}{\pi M}\right)^{1/6} \left(\frac{m^2 \lambda}{re^2}\right)^{1/3} U^{1/3}. \quad (4)$$

Расчетные кривые (рис. 8) совпадают по форме с экспериментальными зависимостями, что, по нашему мнению, также подтверждает появление ППР в условиях эксперимента. Различия в абсолютных значениях плотности тока могут быть обусловлены как простотой предложенной физической модели, так и усреднением плотности тока по сечению пучка при ее измерениях. Выражение (4) позволяет проанализировать связь между j и параметрами эксперимента. В частности, из (4) следует, что пороговая плотность тока возрастает с увеличением давления газа и ускоряющего напряжения, как и наблюдается в эксперименте.

Заключение

Одна из особенностей формирования сфокусированного электронного пучка в области повышенных (форвакуумных) давлений состоит в том, что при превышении плотностью тока некоторого порогового значения возникает пучково-плазменный разряд в районе фокальной плоскости. Это обстоятельство расширяет энергетический спектр пучка и приводит к дополнительному рассеянию электронов. Результатом оказывается скачкообразное возрастание диаметра пучка, т.е. снижение плотности тока. Вместе с тем увеличение ускоряющего напряжения позволяет повысить пороговые значения плотности тока до значений, приемлемых для использования в технологиях обработки материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-98000-р_объ_а.

Список литературы

- [1] Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом. Томск, 2005. 212 с.
- [2] Белок С.И., Крейнделъ Ю.Е., Ремпе Н.Г. и др. // Автоматическая сварка. 1979. № 3. С. 61.
- [3] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 48–50.
- [4] Абромьян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д. Интенсивные электронные пучки. М., 1983. 231 с.
- [5] Груздев В.А., Крейнделъ Ю.Е., Ларин Ю.М. // ТВТ. 1973. Т. 11. № 3. С. 482–486.
- [6] Белок С.И., Крейнделъ Ю.Е., Ремпе Н.Г. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 1. С. 203–205.
- [7] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 85–89.
- [8] Burdovitsin V., Oks E. // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. N 7. P. 2975–2978.

- [9] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М. и др. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 127–129.
- [10] Burdovitsin V., Zhurkov I., Oks E. et al. // Proc. of 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 68–69.
- [11] Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М. и др. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 1–3.
- [12] Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические анализаторы для пучков заряженных частиц. М., 1978. 215 с.
- [13] Galonska M., Hollinger R., Spaedtke P. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. N 5. P. 1592–1594.
- [14] Белок С.И., Крейндель Ю.Е., Ремпе Н.Г. и др. // Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск, 1983. С. 80–91.
- [15] Иванов А.А., Лейман В.Г. // Физика плазмы. 1977. № 3. С. 780.