

УДК 537.5,621.384

ВОЗМУЩЕНИЕ ПЛАЗМЫ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ИЗ НЕЕ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2019 г. В. Я. Мартенс*

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Северо-Кавказский федеральный университет”, Ставрополь, Россия*

**E-mail: vmartens@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Экспериментально исследовано возмущение плазмы отражательного разряда с полым катодом при извлечении из нее электронов через канал малой протяженности. Наблюдалось расширение энергетического спектра извлекаемых электронов по мере повышения внешнего ускоряющего электрического поля, что может быть обусловлено возникновением осевого электрического поля в плазме межкатодного пространства разряда.

DOI: 10.1134/S0367676519110164

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] исследованы общие закономерности процесса отбора электронов из газоразрядной плазмы. Вместе с тем, эмиссионные свойства конкретных плазменных эмиттеров во многом зависят от типа используемого в них газового разряда [4–6]. В плазменных источниках электронов [7, 8], генерирующих сфокусированные пучки, широкое применение находит отражательный разряд с полым катодом (ОРПК). Эта же разрядная система является составной частью плазменных эмиттеров большой площади для формирования непрерывных электронных пучков большого сечения [7, 9, 10].

Специфика использования ОРПК в источниках сфокусированных электронных пучков с высоко яркостью состоит в том, что извлечение электронов из приосевой плазмы осуществляется через цилиндрический эмиссионный канал в катод-отражателе диаметром 2–3 мм и примерно такой же длины. Использование эмиссионного канала определенной формы и размера обеспечивает требуемые параметры сфокусированного пучка, т.к. катод-отражатель с эмиссионным каналом является элементом электронно-оптической системы источника электронов. Результаты теоретического и экспериментального исследования плазмы ОРПК в этих условиях и влияния на нее извлечения электронов представлены в работе [11]. Извлечение электронов приводит к снижению концентрации плазмы и повышению ее потенциала на оси в межкатодном пространстве ОРПК. В плазме эмиссионного канала при этом наблюдается

уменьшение осевого электрического поля, препятствующего выходу электронов из разрядного промежутка. Однако, как показывают расчеты, даже при самой высокой эффективности извлечения, тормозящая для электронов разность потенциалов порядка нескольких десятых долей вольта в плазме эмиссионного канала сохраняется.

При использовании ОРПК в качестве составной части плазменных эмиттеров электронов большой площади [7, 9, 10] осевой канал в катод-отражателе уже не является элементом электронно-оптической системы источника. Через этот канал осуществляется инжекция электронов из ОРПК в полый электрод (формирователь) для создания в нем объемной плазмы при низких давлениях газа. С точки зрения однородности объемной плазмы высокая расходимость инжектируемого электронного пучка является положительным фактором. С учетом этого, а также для повышения эффективности извлечения электронов из ОРПК в эмиттерах такого типа, протяженность канала в катод-отражателе необходимо сократить до минимума. Этим действием мы фактически устраняем область с тормозящим для электронов электрическим полем между плазмой межкатодного пространства и ускоряющим промежутком. При этом, по-видимому, должно усилиться возмущение плазмы ОРПК при извлечении из нее электронов. Целью данной работы является исследование возмущения плазмы ОРПК при извлечении из нее электронов через канал малой протяженности.

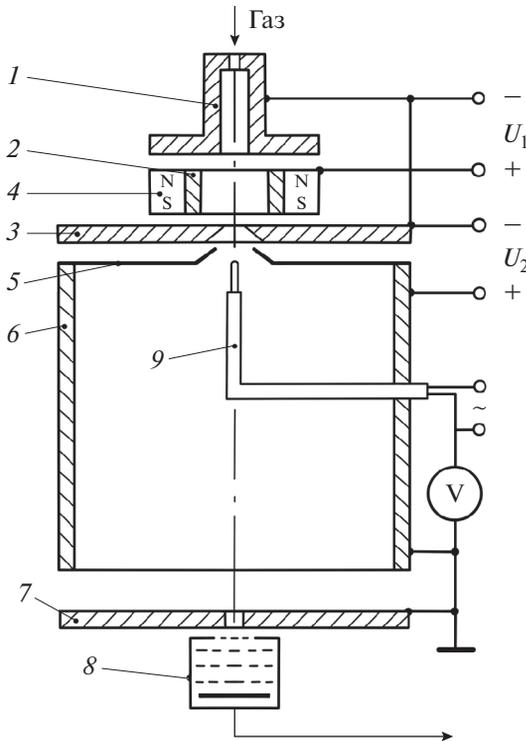


Рис. 1. Схема экспериментального макета: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – катод-отражатель; 4 – кольцевой магнит; 5 – ускоряющий электрод; 6 – полый цилиндр; 7 – плоский электрод; 8 – зонд-анализатор; 9 – термозонд.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментального макета представлена на рис. 1. Плазма генерируется в разрядной камере, образованной полым катодом 1, цилиндрическим анодом 2 с внутренним диаметром 10 мм и катодом-отражателем 3 с осевым каналом диаметром 2.8 мм и протяженностью ~0.2 мм. Магнитное поле ~80 мТл в разрядной камере создается постоянным кольцевым магнитом 4. Извлечение электронов из ОРПК осуществляется электрическим полем при подаче ускоряющего напряжения U_2 между катодом-отражателем 3 и ускоряющим электродом 5. Длина ускоряющего промежутка 3 мм, диаметр отверстия в ускоряющем электроде 5 мм. Ускоряющий электрод крепится на заземленном полом цилиндре 6 диаметром 110 мм. На расстоянии 130 мм от катода-отражателя и 20 мм от торца цилиндра 6 установлен плоский электрод 7 с осевым отверстием диаметром 5 мм. С внешней стороны к нему прикреплен пятиэлектродный зонд-анализатор 8, который используется для измерения энергетического спектра электронов, извлекаемых из ОРПК при различных ускоряющих напряжениях. С учетом расходимости потока электронов, извлекаемых из ОРПК,

такое расположение зонда-анализатора позволяет снизить его тепловую нагрузку. Вместе с тем, как показывают оценки [12, 13], удаление зонда-анализатора на указанное расстояние от ускоряющего электрода не может внести существенных искажений в исследуемые энергетические спектры, поскольку потери электронного пучка вследствие упругих и неупругих столкновений электронов с нейтральными частицами пренебрежимо малы. Кроме того, оценки и экспериментальные результаты [13] показывают, что взаимодействия пучка с плазмой в пространстве дрейфа в рассматриваемых экспериментальных условиях нет.

Предельный вакуум в рабочей камере вакуумной установки составляет $9.3 \cdot 10^{-3}$ Па. Рабочий газ – гелий подается в полый катод и откачивается через кольцевые щели между катодом-отражателем 3 и ускоряющим электродом 5 и между цилиндром 6 и плоским электродом 7. При потоке гелия $Q = 5-7 \text{ м}^3 \cdot \text{мПа} \cdot \text{с}^{-1}$ парциальное давление гелия в разрядной камере составляет 0.6–0.7 Па, а в пространстве дрейфа – $2.4 \cdot 10^{-2}$ Па. Электрическое питание разрядной камеры осуществляется от управляемого стабилизатора тока. Ускоряющее напряжение U_2 с нестабильностью менее $\pm 1\%$ задается от отдельного источника напряжения, включенного между катодами разрядной камеры и ускоряющим электродом. Разрядный (катодный) ток I_d в большинстве экспериментов составлял 0.8 А.

Первый электрод зонда-анализатора представляет собой медный диск толщиной 1 мм с осевым отверстием диаметром 1.5 мм, затянутым молибденовой сеткой с шагом 0.15 мм. Второй, третий и четвертый электроды зонда выполнены из такой же сетки, расстояние между электродами составляло 2 мм. Электроды зонда размещаются в цилиндрическом водоохлаждаемом корпусе диаметром 30 мм. В дне корпуса имеются отверстия для дополнительной откачки. На электроды зонда-анализатора подавали постоянное напряжение с нестабильностью не более $\pm 0.5\%$. Уход электронов на боковые стенки зонда незначителен, т.к. энергия, приобретаемая электронами в промежутке сетка 1–сетка 2 ($U_{g1-g2} = 200$ В), существенно больше средней энергии плазменных электронов. В этом случае ток через коллектор зонда можно записать как

$$I_{col} = en_e S_o \int_{(2eU/m_e)^{1/2}}^{\infty} f(v_z) v_z dv_z, \quad (1)$$

где e и m_e – заряд и масса электрона; n_e – концентрация электронов в плазме; S_o – площадь отверстия в первом электроде зонда; $f(v_z)$ – функция распределения электронов по продольным скоростям v_z ; U – задерживающий потенциал.

Выражение для функции распределения электронов по продольным скоростям $f(v_z)$ можно получить из (1) в виде

$$f(v_z) = -\frac{m_e}{e^2 n_e S_o} \frac{dI_{col}}{dU}. \quad (2)$$

При анализе кривых задержки электронов, извлекаемых из ОРПК, функцию распределения электронов по продольным скоростям определяли методом численного дифференцирования тока, протекающего через коллектор зонда, по задерживающему потенциалу.

Известно [14], что потенциал плазмы в отверстии катода-отражателя составляет 300–350 В (здесь и ниже потенциал отсчитывался относительно катодов разрядной камеры). Протяженность катодной ионной оболочки в отверстии катода-отражателя определяли с помощью соотношения, представленного в [15], и в условиях эксперимента она не превышала 0.5 мм. Поэтому в отсутствие ускоряющего поля плазма должна свободно проникать в ускоряющий промежуток и пространство дрейфа пучка, а при подаче ускоряющего напряжения, превышающего потенциал плазмы в отверстии катода-отражателя, отбор электронов из плазмы должен происходить с открытой плазменной поверхности. Для экспериментального подтверждения указанных процессов, а также для определения реальной ускоряющей разности потенциалов между плазмой и ускоряющим электродом проводили измерение осевого распределения потенциала пространства в ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа с помощью “плавающего” термозонда 9 (рис. 1). Он позволяет с достаточно высокой точностью измерять потенциал пространства при наличии магнитного поля и потоков заряженных частиц. Термозонд вводили в исследуемую область через щели в боковой поверхности полого цилиндра 6 или в плоском электроде 7 и он мог перемещаться в осевом и радиальном направлениях. Термозонд представляет собой полувиток (диаметром 1 мм) вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм. Накал зонда осуществлялся переменным током напряжением до 4 В. Потенциал “плавающего” термозонда измерялся цифровым вольтметром В7-27 с внутренним сопротивлением 10 МОм. Необходимым условием при измерении потенциала плазмы “плавающим” термозондом является $I_t \geq I_p$, где I_t – величина тока термоэмиссии с зонда, I_p – величина тока электронов, поступающих из плазмы на зонд. Для определения мощности накала, необходимой для выполнения этого условия, снималась зависимость потенциала зонда от мощности накала в области с наибольшей величиной I_p . При мощности накала, соответствующей началу насыщения этой зависимости, выполняется указанное выше условие.

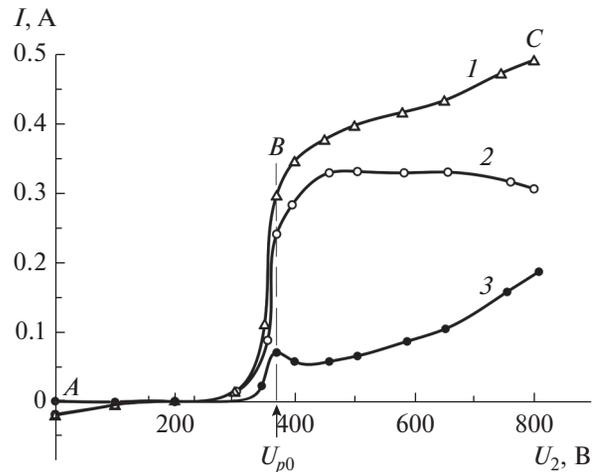


Рис. 2. Зависимости суммарного тока извлекаемых электронов (I), тока на ускоряющий электрод и боковую поверхность цилиндра 6 (2) и тока на плоский электрод 7 (3) от ускоряющего напряжения U_2 . $I_d = 0.8$ А.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена зависимость тока извлекаемых из ОРПК электронов от ускоряющего напряжения U_2 . (кривая 1). Этот ток равен сумме токов электронов, оседающих на ускоряющем электроде 5 и боковой поверхности цилиндра 6 (кривая 2), и на плоском электроде 7 (кривая 3). Увеличение тока извлекаемых электронов сопровождалось эквивалентным уменьшением анодного тока при постоянстве разрядного (катодного) тока I_d . Для указанных кривых на рис. 2 характерно наличие двух участков AB и BC , отличающихся крутизной указанных зависимостей. Объяснить эти зависимости позволяют результаты измерения осевого распределения потенциала пространства при различных U_2 (рис. 3).

Участок AB соответствует процессам в ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа при потенциалах ускоряющего электрода, не превышающих потенциала плазмы в отверстии катода отражателя U_{p0} (кривые 1–3 на рис. 3). Измерения [14] энергетического спектра электронов, свободно выходящих через отверстие в катоде-отражателе ОРПК, показали наличие двух групп электронов. Основная доля электронов имеет распределение по продольным скоростям, близкое к максвелловскому, с температурой 14–20 эВ. Вторую группу составляют высокоэнергетичные электроны. Их максимальная энергия может превышать энергию, соответствующую катодному падению потенциала [14]. При катодном потенциале ускоряющего электрода (кривая 1 на рис. 3) из ОРПК извлекаются ионы (отрицательные значения токов на кривых

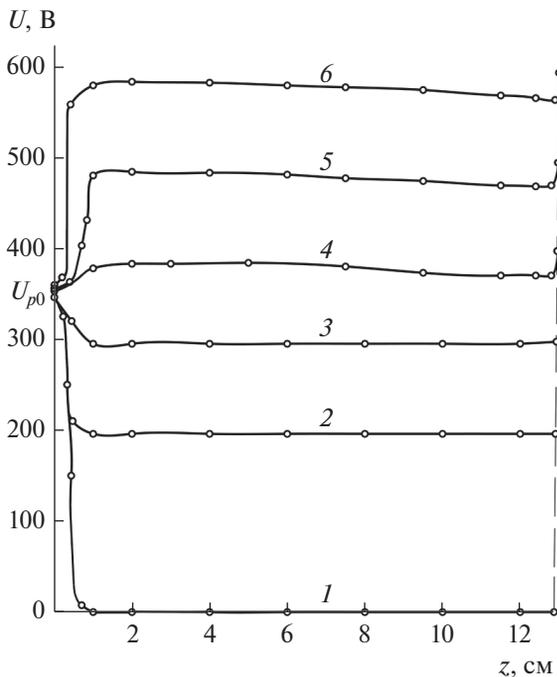


Рис. 3. Осевое распределение потенциала пространства. $I_d = 0.8$ А. U_2 , В: 1 – 0; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500; 6 – 600.

рис. 2). Кроме того, в ускоряющий промежуток и пространство дрейфа из ОРПК проникают высокоэнергетичные электроны. Рост тока извлекаемых электронов по мере повышения потенциала ускоряющего электрода (участок AB на рис. 2) связан с уменьшением потенциального барьера для электронов вблизи катода-отражателя (кривые 1–3 на рис. 3).

Повышение потенциала ускоряющего электрода при $U_2 > U_{p0}$ (участок BC на кривых на рис. 2; кривые 5 и 6 на рис. 3) приводит к уменьшению тока электронов, оседающих на ускоряющем электроде 5 и боковой поверхности цилиндра 6 (кривая 2 на рис. 2), и увеличению тока электронов, попадающих на плоский электрод 7 (кривая 3 на рис. 2). Такое перераспределение токов связано с уменьшением расходимости потока электронов, извлекаемых из ОРПК, при перемещении границы эмитирующей плазмы в сторону отверстия в катоде-отражателе. Интересно отметить, что при этом наблюдается рост тока извлекаемых электронов (участок BC на кривой 1 на рис. 2). Рост тока связан с возмущением плазмы в межкатодном пространстве ОРПК внешним электрическим полем ускоряющего промежутка. В этом случае, так же, как и в работах [11, 16], наблюдалось повышение потенциала плазмы на оси ОРПК и напряжения горения разряда. Помимо этого, наблюдалось увеличение ширины энергетического спектра электронов, извлекаемых из

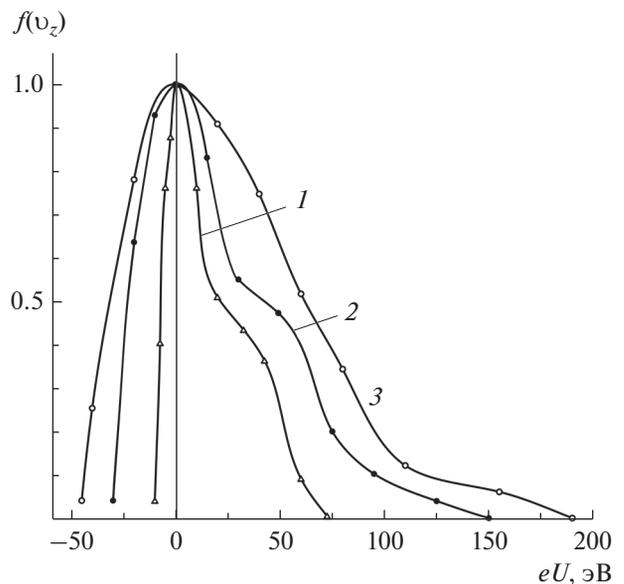


Рис. 4. Нормированные энергетические спектры электронов, извлекаемых из ОРПК при различных ускоряющих напряжениях U_2 . $I_d = 0.8$ А. U_2 , В: 1 – 400; 2 – 500; 3 – 600.

ОРПК, по мере повышения ускоряющего напряжения (рис. 4). Энергетический спектр 1, измеренный при $U_2 = 400$ В на расстоянии 130 мм от катода отражателя, в пределах погрешности измерений совпадает со спектром, измеренным в [14] в отверстии катода-отражателя при свободном выходе электронов. Это объясняется тем, что при $U_2 = 400$ В в рассматриваемом случае изменения потенциала в ускоряющем промежутке и в пространстве дрейфа незначительны (кривая 4 на рис. 3) и плазма свободно проникает из ОРПК в ускоряющий промежуток и пространство дрейфа. По мере роста ускоряющего напряжения U_2 (кривые 2 и 3 на рис. 4) увеличивается доля электронов, обладающих большими значениями составляющей скорости в направлении извлечения. По-видимому, это можно объяснить тем, что при $U_2 > U_{p0}$ на хаотическое тепловое движение плазменных электронов накладывается направленное движение (дрейф) в сторону эмитирующей поверхности плазмы. Если принять, как это сделано в [11], неизменность концентрации плазмы вдоль оси межкатодного пространства ОРПК, то единственной причиной появления дрейфа и расширения энергетического спектра плазменных электронов, по-видимому, следует считать возникновение осевого электрического поля в этой области разряда. Именно это электрическое поле в плазме межкатодного пространства ОРПК обеспечивает рост тока извлекаемых электронов при $U_2 > U_{p0}$ (участок BC на кривой 1 на рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, возмущение плазмы ОРПК при извлечении из нее электронов через канал малой протяженности может проявляться не только в снижении концентрации плазмы и повышении ее потенциала на оси разряда, но и в расширении энергетического спектра извлекаемых электронов. Возможной причиной расширения энергетического спектра электронов является возникающее в плазме межкатодного пространства разряда осевое электрическое поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жаринов А.В., Коваленко Ю.А.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 4. С. 681.
2. *Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С. и др.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 1. С. 66.
3. *Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С. и др.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 4. С. 687.
4. *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: НТЛ, 2005. 216 с.
5. *Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С. и др.* Эмиссионная электроника. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 319.
6. *Бурдовицин В.А., Климов А.С., Медовник А.В. и др.* Форвакуумные плазменные источники электронов. Томск: Томск. ун-т, 2014. 288 с.
7. *Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А. и др.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
8. *Osipov I., Rempe N.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. № 4. P. 1638.
9. *Крейнделъ Ю.Е., Мартенс В.Я., Съедин В.Я. и др.* // ПТЭ. 1982. № 4. С. 178.
10. *Мартенс В.Я., Шевченко Е.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 8. С. 71.
11. *Бурдовицин В.А., Галанский В.Л., Груздев В.А. и др.* Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. Екатеринбург: Наука, 1993. С. 12.
12. *Крейнделъ Ю.Е., Мартенс В.Я.* // Тез. докл. 5 Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. (Томск, 1984). Ч. 2. С. 201.
13. *Мартенс В.Я.* Объемная стационарная плазма малой плотности и ее использование для получения электронных и ионных пучков большого сечения. Дис. ... докт. техн. наук. Москва: ВЭИ им. В.И. Ленина, 2002.
14. *Мартенс В.Я.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 11. С. 44.
15. *Груздев В.А., Крейнделъ Ю.Е., Мартенс В.Я.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. № 9. С. 1883.
16. *Груздев В.А., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // Тез. докл. 7 Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. (Томск, 1988). Ч. 1. С. 95.