Возмущение плазмы отражательного разряда с полым катодом при извлечении из нее электронов

В.Я. Мартенс

Северо-Кавказский федеральный университет
355009, Ставрополь, Россия
e-mail: vmartens@yandex.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-45-49

Экспериментально исследовано возмущения плазмы отражательного разряда с полым катодом при извлечении из нее электронов через канал малой протяженности. Наряду с повышением потенциала плазмы на оси разряда и увеличением напряжения горения разряда наблюдалось расширение спектра извлекаемых электронов. Последнее связывается с возникновением осевого электрического поля в плазме межкатодного пространства разряда по мере повышения внешнего ускоряющего электрического поля.

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 влияние на нее извлечения электронов представлены в работе [11]. Извлечение электронов приводит к снижению кон-

центрации 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 V 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.

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 $\sim 0,2$ мм. Магнитное поле ~ 80 мТ в разрядной камере создается постоянными 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 устанавливался плоский электрод 7 с осевым отверстием диаметром 5 мм. С внешней стороны к нему крепился пятиэлектродный зонда-анализатор 8, который использовался 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.

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 – зонда-анализатор; 9 – термозонд

Предельный вакуум в рабочей камере вакуумной установки $\sim 9,3 \cdot 10^{-3}$ 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 $Q = 5\text{--}7$ м³·мПа/с 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 $< \pm 1\%$ 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 выполнялись из такой же сетки, расстояние между электродами составляло 2

мм. Электроды зонда размещались в цилиндрическом водоохлаждаемом корпусе диаметром 30 мм. В дне корпуса имелись отверстия для дополнительной откачки. На электроды зонда-анализатора подавались постоянные напряжения, 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 на коллектор зонда можно записать как

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

где 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, функция распределения электронов по продольным скоростям определялась методом численного дифференцирования тока на 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 определялась с помощью соотношения, представленного в [15], и в условиях эксперимента 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 проводилось 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 вводился в исследуемую область через щели в боковой поверхности полого цилиндра 6 или в плоском электроде 7 и мог перемещаться в осевом и радиальном направлениях. Термозонд представлял 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.

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 кривых рис 2 характерно наличие двух участков АВ и ВС, отличающихся крутизной указанных зависимостей. Объяснить эти зависимости позволяют результаты измерения осевого распределения потенциала пространства при различных U_2 (рис. 3).

Участок АВ соответствует процессам в

ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа при потенциалах ускоряющего

Рис. 2. Зависимости суммарного тока извлекаемых электронов (1), 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

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

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 катода-отражателя 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

щую катодному падению потенциала [14].

При катодном потенциале ускоряющего электрода (кривая 1 на рис. 3) из ОРПК извлекаются ионы. Кроме того, в ускоряющий промежуток и пространство дрейфа из ОРПК проникают высокоэнергетичные электроны. Рост тока извлекаемых электронов по мере повышения потенциала ускоряющего электрода (участок АВ 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 ВС на кривых 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) и увеличению тока электронов, попадающих на плоском электроде 7 (кривая 3). Такое перераспределение токов связано с уменьшением расходимости потока электронов, извлекаемых из ОРПК, при перемещении границы эмитирующей плазмы в сторону отверстия в катода-отражателе. Интересно отметить, что при этом наблюдается рост тока извлекаемых электронов (участок ВС на кривой 1 рис. 2). Рост тока связан с возмущением плазмы в межкатодном пространстве ОРПК внешним электрическим полем ускоряющего промежутка. В этом случае, также 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 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 несущественны (кривая 4 на рис. 3) и плазма свободно проникает из ОРПК в ускоряющий промежуток и пространство дрейфа. Расширение энергетического спектра электронов (кривые 1 – 3 на рис. 4) можно объяснить, по-видимому, возникновением осевого электри-

ческого поля в плазме межкатодного пространства ОРПК по мере повышения ускоряющего напряжения. Именно это электрическое поле обеспечивает рост тока извлекаемых электронов при $U_2 > U_{p0}$.

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

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 [11, 16], но и в расширении энергетического спектра извлекаемых электронов. Возможной причиной расширения спектра электронов является возникающее в плазме межкатодного пространства разряда осевое электрическое поле.

Литература

- [1]. Жаринов А.В., Коваленко Ю.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 681-686.
- [2]. Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 66-71.
- [3]. Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687-693.
- [4]. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. С. 8-79.
- [5]. Эмиссионная электроника. / Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко. Под ред. Ю.С. Протасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 319-514.
- [6]. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Медовник А.В., Окс Е.М., Юшков Ю.Г. Форваку-

умные плазменные источники электронов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. 288 с.

- [7]. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.

- [8]. Osipov I., Rempe N. Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71. No. 4. P. 1638-1641.

- [9]. Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я., Съедин В.Я., С.В. Гавринцев С.В. Приборы и техника эксперимента. 1982. № 4. С. 178-180.

- [10]. Мартенс В.Я., Шевченко Е.Ф. Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 8. С. 71-78.

- [11]. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / под ред. П.М. Щанина. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. С. 12-41.

- [12]. Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я. // Тез. докл. 5 Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. Томск, 1984. Ч. 2. С. 201-203.

- [13]. Мартенс В.Я. Дис. докт. техн. наук. Ставрополь, 2002. 228 с.

- [14]. Мартенс В.Я. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 11. С. 44-51.

- [15]. Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. № 9. С. 1883-1886.

- [16]. Груздев В.А., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. // Тез. докл. 7 Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. 1. С. 95-97.