

04;10;12

Особенности формирования однородного ленточного пучка электронов плазменным источником в форвакуумной области давлений

© В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

634050 Томск, Россия

e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2003 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования формирования электронного пучка ленточной конфигурации при отборе электронов из плазмы стационарного разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений. Показано, что основная причина неравномерности распределения плотности тока обусловлена усилением локальной неоднородности концентрации эмиссионной плазмы обратным потоком ионов из ускоряющего промежутка. Учет данной особенности при создании системы извлечения пучка обеспечивает генерацию ленточного пучка с неравномерностью плотности тока по его длине менее 10%.

Введение

Одним из привлекательных применений электронных пучков ленточной конфигурации является возможность формирования с их помощью так называемого „плазменного листа“ большой (до 1 м^2) площади для его использования в различных технологических процессах, таких, например, как плазмохимическое и ионное травление, осаждение различных покрытий за счет реакций разложения и синтеза в создаваемой плазме, а также в качестве подвижного зеркала для микроволнового излучения [1]. Для генерации такой плазмы требуется наличие газа достаточно высокого (10–100 Па) давления. Указанное обстоятельство существенно затрудняет использование для этих целей источников с термокатодом и делает практически безальтернативным применение плазменных источников электронов, основанных на отборе электронов из плазмы разрядов низкого давления с безнакальными электродами [2–4]. При формировании электронного пучка ленточной конфигурации проблема достижения высокой однородности плотности тока представляется едва ли не наиболее значимой. Указанная проблема рассмотрена в [5], где проведен анализ основных причин неоднородности эмиссионного тока для пучков большого сечения и предлагаются пути их преодоления. Вместе с тем в этой работе рассматривались в основном „стандартные“ плазменные источники электронов, рабочая область давлений которых, как правило, ниже 0.1 Па. Для таких давлений степень равномерности распределения плотности тока извлеченного из плазмы электронного пучка обусловлена главным образом достигнутой однородностью параметров эмиссионной плазмы. Переход в форвакуумную область давлений приводит к возрастанию влияния на эмиссионные свойства плазмы обратного потока ионов, образованных в ускоряющем промежутке и области транспортировки электронного пучка [6]. Поэтому для плазменных источников электронов, работающих в форвакуумном

диапазоне давлений, достижение исходной однородности эмиттирующей плазмы представляется недостаточным. Как было показано нами ранее [6,7], повышение рабочего давления вызывает необходимость учета процессов ионизации газа в ускоряющем промежутке, а также сопутствующих этому явлений.

В настоящей работе представлены результаты исследований формирования в форвакуумном плазменном источнике электронов на основе разряда с протяженным полым катодом [8] ленточного электронного пучка с высокой однородностью распределения плотности тока.

Техника эксперимента

Экспериментальный макет форвакуумного плазменного источника электронов для генерации ленточного пучка содержал те же основные элементы, что и источник цилиндрического электронного пучка, описанный нами ранее в [6], а именно полый катод, плоский анод с эмиссионным отверстием, ускоряющий электрод и коллектор. Прямоугольный полый катод 1 (рис. 1) размером $300 \times 80 \times 40 \text{ мм}$ обеспечивал поддержание стационарного разряда с током до 1.5 А. Эмиссион-

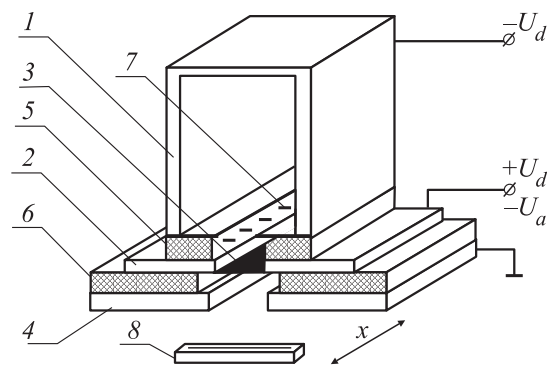


Рис. 1. Схема электронного источника.

ная щель в аноде 2 (250×10 mm), задающая размер пучка, перекрывалась мелкоструктурной металлической сеткой 3. Катод 1, анод 2 и ускоряющий электрод 4 были электрически отделены друг от друга капролоновыми изоляторами 5 и 6. Для измерения параметров эмиттирующей плазмы в изоляторе 5 были устроены каналы, сквозь которые в плазму были введены одиночные цилиндрические зонды 7. Зонды были устроены таким образом, чтобы быстрые ионы из ускоряющего промежутка не могли попасть на их собирающие поверхности. В качестве рабочего газа использовался воздух. На рис. 1 показано также подключение к электродам источников электрического питания разрядного U_d и ускоряющего U_a напряжений. Для измерения распределения электронного тока по длине ленточного пучка использовался перемещаемый коллектор 8, выполненный из молибдена и расположенный за заземленным экраном со щелью шириной 1 mm и длиной, превышающей размер пучка. Расстояние от эмиссионной сетки до коллектора составляло 15 cm.

Результаты эксперимента

Для установления характера распределения концентрации плазмы по длине полого катода измерялись токи на зонды 7 (рис. 1) на ионном участке вольт-амперной характеристики. В отсутствие эмиссии электронов неоднородность концентрации плазмы по длине полости не превышает 5–10%, за исключением максимумов плотности на краях. В то же время извлекаемый при подаче ускоряющего напряжения электронный пучок существенно неоднороден и, как показывают визуальные наблюдения, оказывается состоящим из не менее чем десятка мелких пучков — „струй“. Распределения линейной плотности тока $i(x)$ на перемещаемый коллектор для различных условий представлены на рис. 2. При этом значительно меньшее количество максимумов, регистрируемое в эксперименте, обусловлено влиянием отдельных струй в области измерения распределения тока электронного пучка. Снижение давления приводило к исчезновению неоднородностей в пучке. Неоднородности существенно ослаблялись и при уменьшении размеров ячейки сетки.

Для установления более четкой взаимосвязи между плотностью тока пучка и концентрацией эмиттирующей плазмы был поставлен специальный эксперимент с использованием составной сетки. Средняя часть длиной 6 cm представляла собой сетку с ячейкой 0.8×0.8 mm, остальная часть — сетку с ячейкой 0.4×0.4 mm. Влияние эмиссии электронов на распределение плотности плазмы в полости для данной ситуации иллюстрируется результатами, представленными на рис. 3. На рис. 4 приведены соответствующие распределения плотности тока $i(x)$ по длине пучка. Очевидным является факт, что в отсутствие эмиссии неоднородность концентрации плазмы по длине полости не превыша-

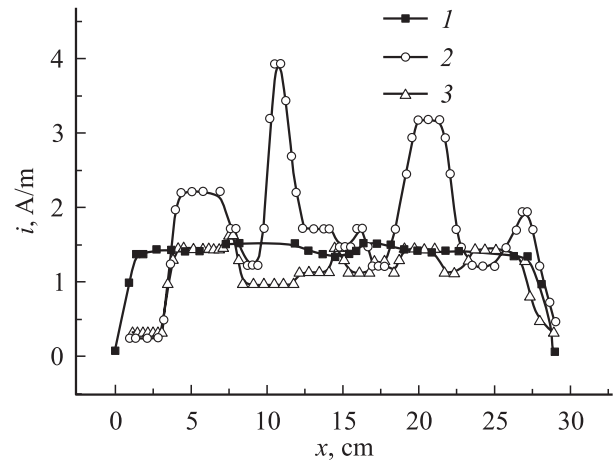


Рис. 2. Распределение электронного тока по длине пучка для различных давлений p : 1, 3 — 4; 2 — 1 Pa и размеров ячейки сетки: 1, 2 — 0.8×0.8 , 3 — 0.4×0.4 mm.

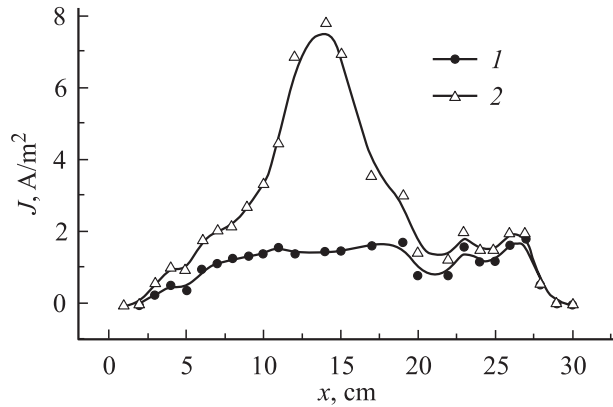


Рис. 3. Распределение плотности зондового тока в прианодной плазме для ускоряющих напряжений $U_a = 0$ (1), 3 kV (2). Давление $p = 4$ Pa.

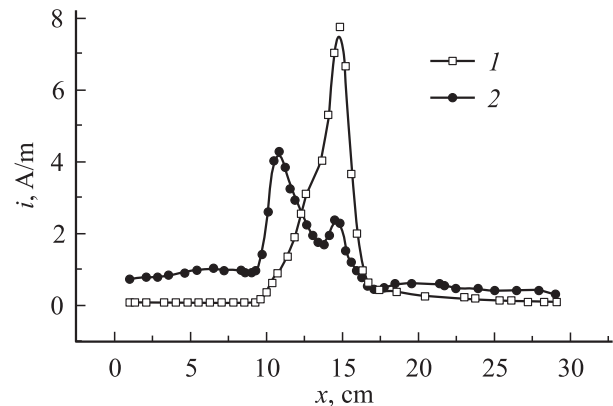


Рис. 4. Распределение плотности тока по длине пучка для различных давлений p : 1 — 4, 2 — 2.4 Pa; $U_a = 3$ kV.

ет 20%. В то же время эмиссия электронов приводит к возрастанию в несколько раз концентрации плазмы в средней части полости. Из представленных на этом рисунке результатов ясно просматривается совпадение положений максимума в распределении плотности тока электронного пучка и максимума плотности плазмы в полости. Отметим также то обстоятельство, что при понижении давления неоднородности в распределениях плотности тока пучка и концентрации плазмы сглаживаются.

Анализ результатов

Основные экспериментальные факты сводятся к следующему. В отсутствие эмиссии электронов неоднородность распределения концентрации плазмы по длине полости не превышает 10%. Отбор электронов из плазмы при повышенных давлениях приводит к возникновению более значительных неоднородностей как в плазме, так и в электронном пучке, причем пространственные положения максимумов плотности эмиссионного тока и концентрации эмиттирующей плазмы совпадают. При этом неоднородность распределения плотности тока пучка электронов превышает соответствующую неоднородность концентрации плазмы. Влияние эмиссии на неравномерность плотности тока и концентрации плазмы существенно ослабляется при снижении давления газа и уменьшении размера эмиссионного отверстия (ячейки сетки). На основании результатов экспериментов можно предположить следующий механизм усиления неравномерности тока эмиссии электронов. В начальной ситуации отбора электронов из плазмы неравномерность плотности тока обусловлена главным образом неоднородностью распределения концентрации плазмы в полости. На распределение плотности тока может оказывать также влияние неоднородность эмиссионной сетки, а именно различная локальная кривизна и разброс размеров элементарной ячейки. Существенная в форвакуумной области давлений ионизация остаточного газа в ускоряющем промежутке и области транспортировки электронного пучка приводит к появлению значительного обратного потока ионов. Поскольку скорость ионизации пропорциональна плотности электронного тока, то распределение плотности обратного потока ионов должно соответствовать исходному распределению плотности тока эмиттированных плазмой электронов. Быстрые ионы, попадая в плазму и перезаряжаясь на газовых молекулах, приносят с собой положительный пространственный заряд, нейтрализуемый плазменными электронами. Результат проявляется в локальном усилении неоднородностей концентрации плазмы и соответствующем повышении неоднородностей эмиссионного тока. Возрастание плотности эмиссионного тока при увеличении концентрации плазмы обеспечивается также в результате увеличения площади открытой плазменной поверхности в пределах каждой ячейки анодной сетки

за счет сужения слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от сетки. Таким образом, небольшое локальное изменение плотности плазмы приводит к непропорциональному увеличению локальной плотности тока эмиссии электронов. Связанный с электронным током обратный поток ионов обуславливает дальнейшее локальное повышение концентрации плазмы и соответствующее дальнейшее непропорциональное увеличение в этом месте плотности тока эмиссии электронов. Процесс положительной обратной связи достигает насыщения и рост концентрации плазмы прекращается, когда скорость образования медленных ионов уравнивается их диффузионным уходом из области возмущения.

Для количественной оценки возможности существования локального максимума в соответствии с вышеприведенным механизмом запишем уравнения баланса для медленных ионов, образующихся в катодной полости в результате перезарядки быстрых ионов, поступающих в плазму из ускоряющего промежутка. При этом образование ионов уравнивается их уходом из области возмущения плазмы за счет диффузии. В одномерном случае уравнение баланса выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}} n_n^2 Q_e Q_r d \int_0^l \exp(-Q_r n_n y) dy \times \int_{-X_b}^{X_b} n(x) dx = -D_i \left. \frac{dn(x)}{dx} \right|_{X_b} l, \quad (1)$$

где D_i — коэффициент диффузии ионов; $n(x)$ — концентрация плазмы в области возмущения; $\pm X_b$ — координаты границ области возмущения; $dn(x)/dx|_{X_b}$ — градиент концентрации на краю области возмущения; l — глубина полости, меньшая длины свободного пробега перезаряжающихся ионов, что позволяет использовать одномерную модель; n_n — концентрация нейтральных частиц; Q_e — эффективное сечение ионизации газа электронами; d — длина ускоряющего промежутка; Q_r — эффективное сечение перезарядки ионов.

Для учета изменения площади эмиттирующей поверхности в левой части (1) введен коэффициент $K(x)$

$$K(x) = \frac{(h - 2l_s(x))^2}{h^2}, \quad (2)$$

где h — внутренний размер ячейки сетки; $l_s(x) = 2\sqrt{\varepsilon_0 U^{3/2} (n(x) \sqrt{ekT_e})^{-1}}$ — толщина ионного слоя, отделяющего плазму от сетки [2]; U — потенциал плазмы относительно анода.

В проведенных расчетах предполагалось, что зависимость концентрации от координаты x в пределах локальной области имеет вид гауссовой функции. При этом, как следует из эксперимента, величина X_b остается неизменной. Значение $dn(x)/dx|_{X_b}$ определяется из условия равенства возмущенной n и невозмущенной n_0 концентраций при $x = X_b$.

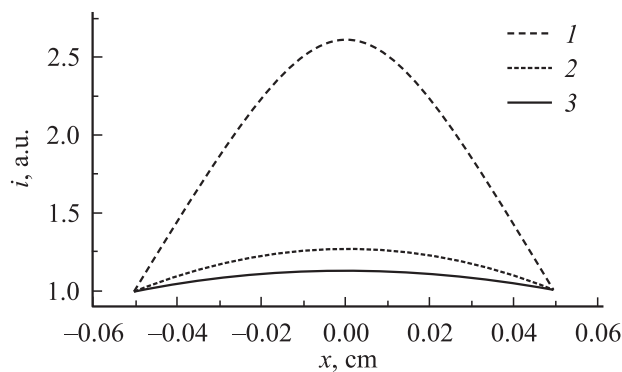


Рис. 5. Расчетные зависимости плотности электронного тока от координаты x в области возмущения для различных давлений p : 1, 2 — 6.6; 3 — 4 Па и размеров ячейки сетки h : 1, 3 — 0.8×0.8 , 2 — 0.4×0.4 mm.

Представленные на рис. 5 результаты расчета демонстрируют локальное возрастание плотности эмиссионного тока $i(x)$ как с повышением давления газа, так и с увеличением размера ячейки эмиссионной сетки. Таким образом, проведенные расчеты качественно подтверждают возможность существования локальных неоднородностей эмиссионного тока за счет предложенного физического механизма.

Заключение

Особенностью формирования ленточного пучка электронов плазменным источником в форвакуумном диапазоне давлений является повышенная вероятность появления неоднородности в распределении эмиссионного тока по длине пучка. Проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что появление указанной неоднородности обусловлено обратным потоком ионов из ускоряющего промежутка в эмиттирующую плазму. Возникающая при этом положительная обратная связь между током эмиссии электронов и обратным потоком ионов непропорционально усиливает первичную неоднородность пучка, обусловленную локальными неоднородностями концентрации плазмы, а также различием в размерах ячеек и ее локальными искривлениями. Ослабление влияния обратного ионного потока может быть достигнуто, например, его расфокусировкой достигаемой изменением формы сетки в эмиссионном электроде. Это позволяет получить ленточный электронный пучок с неоднородностью, не превышающей 10%. Результаты проведенных исследований позволяют более обоснованно подходить к созданию плазменных источников электронов, генерирующих электронные пучки в форвакуумном диапазоне давлений.

Список литературы

- [1] Manheimer W.M., Fersner R.F., Lampe M. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. P. 370–386.
- [2] Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. М., 1977. 143 с.
- [3] Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М., 1989. 256 с.
- [4] Oks E.M. and Schanin P.M. // Phys. Plasmas. 1999. Vol. 7. N 5. P. 1649–1654.
- [5] Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М., 1984. 110 с.
- [6] Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 48–50.
- [7] Бурдовицин В.А., Куземченко М.Н., Окс Е.М. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 134–136.
- [8] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М. и др. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 1–3.