

04;12

Локализация плазмы в протяженном полом катоде плазменного источника ленточного электронного пучка

© Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, 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 27 февраля 2006 г.)

Представлены результаты исследования распределения плотности плазмы в щелевидной апертуре протяженного полого катода прямоугольной формы, применяемого в источнике ленточного электронного пучка. Установлено, что при уменьшении ширины щели ниже некоторого порогового значения имеет место появление локального максимума, параметры которого определяются разрядным током. Указанный максимум является причиной неоднородности распределения плотности тока в пучке. Показано, что появление локального максимума связано с перекрытием ионных слоев в щелевидной апертуре полого катода.

PACS: 52.27.-h

Введение

Одним из способов генерации плазмы с развитой поверхностью является ионизация газа с помощью электронного пучка ленточной конфигурации [1]. Требуемое для реализации этого способа давление газа (более 1 Па) затрудняет применение электронных источников с накаливаемым катодом. Альтернативой может быть использование плазменного источника, в частности, на основе разряда с протяженным полым катодом [2]. При этом, однако, возникает проблема достижения достаточно высокой (более 0.1 А/см²) плотности тока в пучке, поскольку именно этот параметр ответствен в первую очередь за свойства генерируемой плазмы. Эксперименты с источником цилиндрического пучка показали, что роста плотности тока при сохранении эффективности извлечения можно достичь, уменьшая одновременно размеры эмиссионного окна в аноде и выходной апертуры катодной полости [3] вследствие увеличения отношения площади эмиссионного окна к площади области анода, на которую собирается электронный ток из катодной полости. Указанные обстоятельства вызвали предположение, что и в случае ленточного пучка роста плотности эмиссионного тока можно достичь аналогичным образом. Цель настоящей работы состояла в исследовании возможности повышения плотности эмиссионного тока в источнике ленточного электронного пучка за счет изменения электродной конфигурации, а именно уменьшения ширины щелевидной апертуры полого катода.

Техника эксперимента

Эксперимент проводился на электронном источнике, схема которого приведена на рис. 1. Источник включал в себя прямоугольный полый катод 1 размером 310×60×30 мм, плоский анод 2 с эмиссионным окном размером 310×10 мм, изоляторы 3, 4 для крепе-

ния и фиксации электродов. Высоту полости h в катоде можно было регулировать размещением вкладыша 5, размеры апертуры катодной полости изменялись за счет вставок 6 с различной шириной щели. Разрядное U_d и ускоряющее U_a напряжения прикладывались к соответствующим электродам источника, как показано на рис. 1. Измерение параметров плазмы производилось одиночным зондом 7, вводимым в катодную полость и перемещаемым вдоль нее. При введении зондовых измерений сетка в аноде отсутствовала, и напряжение U_a на ускоряющий электрод 8 не подавалось. С целью фиксирования свечения плазмы катодная апертура фотографировалась со стороны эмиссионного окна. Электронный источник размещался на вакуумной установке. Для откачки вакуумной камеры использовался механический форвакуумный насос. Изменение давления газов в интервале 3–10 Па обеспечивалось напуском воздуха.

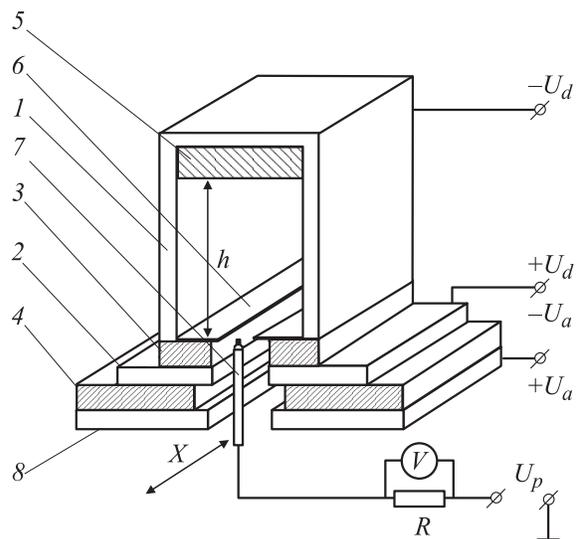


Рис. 1. Схема электронного источника.

Результаты эксперимента

Измерения показали, что уменьшение ширины щели в апертуре катодной полости приводит к возрастанию концентрации плазмы (рис. 2, *1, b*). Однако, как видно из рисунков, при ширине щели 9 мм и менее однородное распределение плазмы вдоль полости нарушается, и появляется один или несколько локальных максимумов, которые можно наблюдать визуально по интенсивному свечению (рис. 3). Положение этих максимумов спо-

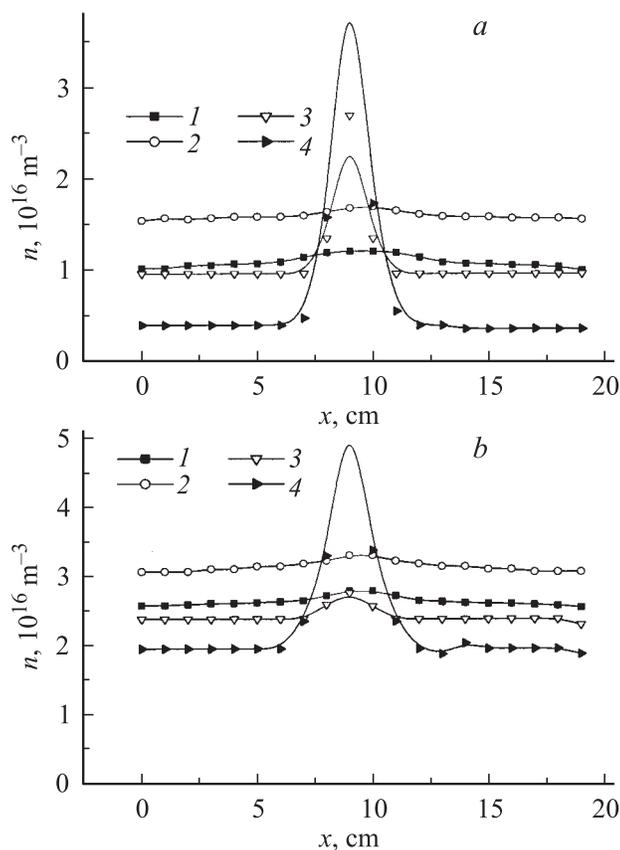


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы n в апертуре катодной полости для разных значений ширины щели: 1 — 13, 2 — 11, 3 — 9, 4 — 8 мм. Ток разряда 400 (*a*), 800 мА (*b*), давление 6 Па.

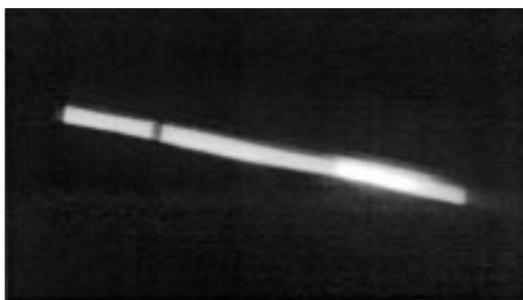


Рис. 3. Свечение плазмы в щелевидной апертуре катодной полости.

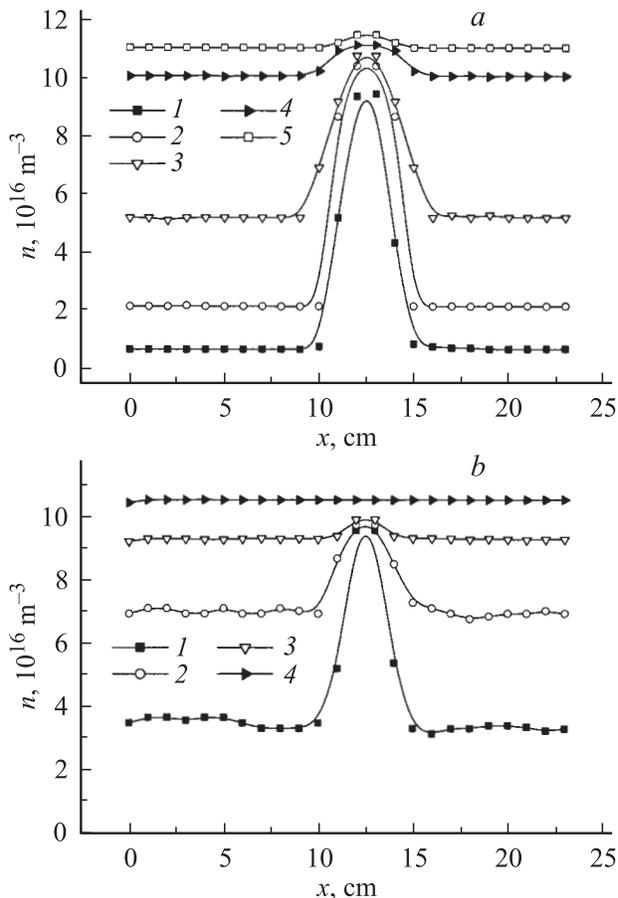


Рис. 4. Распределение концентрации плазмы в апертуре катодной полости для различных токов разряда: 1 — 0.2, 2 — 0.4, 3 — 0.6, 4 — 1, 5 — 1.3 А. Высота полости h равна: 60 (*a*), 44 мм (*b*). Ширина щели 8 мм, давление 6 Па.

собно скачкообразно изменяться во время наблюдения. В настоящей работе фиксация положения области повышенной концентрации (ОПК) была обеспечена путем небольшого (~ 0.5 мм) увеличения ширины катодной щели в ее средней части. Это позволило более детально изучить наблюдаемые закономерности. Локальный максимум оказывается наиболее четко выраженным при малых разрядных токах (рис. 4, *a*). Увеличение разрядного тока приводит к возрастанию концентрации за пределами ОПК. При некоторых значениях разрядного тока локальный максимум концентрации становится практически незаметным. Область яркого свечения также распространяется на всю катодную полость. С сокращением объема и соответственно площади стенок катодной полости, достигаемым уменьшением высоты h (рис. 1), пороговый разрядный ток, при котором исчезает локальный максимум, снижается (рис. 4, *b*). Пороговый ток снижается также с увеличением ширины щели в апертуре катодной полости и возрастанием давления (рис. 5). Распределения концентрации плазмы, снятые при различной глубине погружения зонда в полость

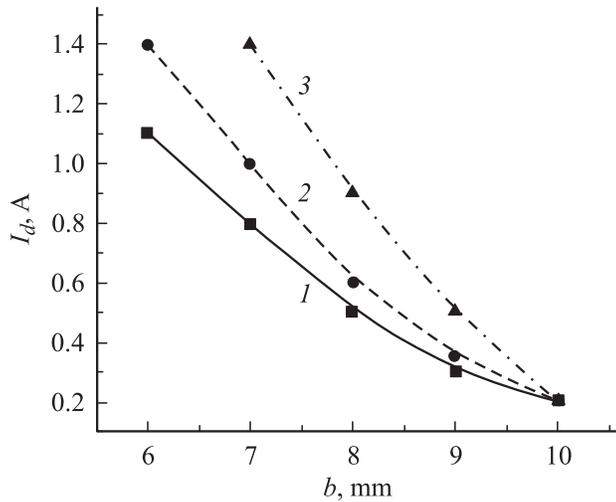


Рис. 5. Зависимость разрядного тока I_d , при котором исчезает неоднородность, от ширины b щели для различных давлений: 1 — 10, 2 — 6, 3 — 4 Па.

свидетельствуют о том, что наиболее четко выраженный максимум имеет место в плоскости щелевидной апертуры.

Обсуждение результатов экспериментов

Сведения о наблюдении локального свечения в выходной апертуре протяженной катодной полости приводились в [4]. Авторы связывают это с контрагированием разряда, однако не приводят экспериментальных результатов измерения падения потенциала. Для объяснения явлений, наблюдаемых в настоящем исследовании, можно было бы привлечь сформулированные в [5] соображения об образовании двойного слоя в апертуре катодной полости при условии, что

$$S_a/S_c < \sqrt{m/M}, \quad (1)$$

где S_a и S_c — площади апертуры и стенок полости соответственно, а m и M — массы электрона и иона. Однако проведенные нами измерения плавающего потенциала зонда не позволили обнаружить сколь-нибудь существенной разности потенциалов между ОПК и остальной плазмой. С другой стороны, отношения S_a/S_c , соответствующие распределениям, приведенным на рис. 4, a, b , равны 0.046 и 0.057. Эти величины на порядок превышают значения $\sqrt{m/M}$ для азота, составляющего в основном атмосферу вакуумной камеры при напуске воздуха, т.е. во всех случаях имело место образование ОПК в условиях, когда критерий (1) образования двойного слоя не выполнялся. Указанные обстоятельства вызвали необходимость поиска альтернативного объяснения наблюдаемых явлений.

Как следует из результатов экспериментов, решающим параметром для появления ОПК оказывается ширина щели. Это позволяет предположить механизм, базирующийся на представлении о самопроизвольном „стягивании“ разряда в локальную область. Последовательность явлений может быть следующей. При малых разрядных токах и, следовательно, низких концентрациях плазмы щель в апертуре катодной полости оказывается перекрытой ионными слоями. Случайное отклонение от установившегося значения концентрации или потенциала плазмы, приводящее к уменьшению толщины ионных слоев, вызывает рост электронного тока в этой области, влекущий за собой повышение интенсивности ионизационных процессов и, следовательно, концентрации плазмы. Это означает дальнейшее снижение толщины ионных слоев. Процесс развивается лавинообразно и заканчивается формированием локальной области, обеспечивающей прохождение практически всего электронного тока. Увеличение разрядного тока вызывает возрастание концентрации плазмы и раскрытие ионных оболочек за пределами локальной области, что и приводит к изменению характера распределения концентрации плазмы по длине полости. Элементарные оценки толщины ионных слоев, соответствующие измеренным концентрациям плазмы дают значения, сравнимые с шириной щели в апертуре полости (см. таблицу). Это может служить дополнительным аргументом в пользу предлагаемого механизма. Очевидно также, что уменьшение площади стенок полости при сохранении разрядного тока означает возрастание концентрации плазмы, что и проявляется в снижении порогового тока (рис. 4).

В работе [6] нами отмечалась одна из причин возникновения неоднородностей в ленточном электронном пучке, заключающаяся в существовании положительной обратной связи между плотностью плазмы и обратным ионным потоком из ускоряющего промежутка в разрядную область. Результаты настоящей работы указывают на еще одну возможную причину появления таких неоднородностей.

Измеренная концентрация плазмы и оцененная толщина ионного слоя для различных размеров полости и разрядных токов I_d

Концентрация, 10^{16} м^{-3}	Толщина слоя, мм	I_d , мА	S_a/S_c
0.7	9.0	200	0.046
2.1	5.4	400	
5.3	3.6	600	
10	2.8	1000	
3.6	4.1	200	0.057
7.0	3.0	400	
9.3	2.8	600	
10.5	2.7	1000	

Заключение

В разряде с протяженным полым катодом имеет место образование ОПК плазмы в щелевидной апертуре при условии, что ширина щели меньше некоторого значения, определяемого площадью стенок полости. С увеличением разрядного тока ОПК расширяется и может распространиться на всю длину щели. Вероятной причиной возникновения ОПК является локальное лавинообразное раскрытие ионных оболочек в щелевидной апертуре катодной полости, сопровождающееся „стягиванием“ разряда и ростом концентрации плазмы в области локализации. Устранение ОПК может быть обеспечено снижением толщины ионных слоев в апертуре катодной полости, достигаемым повышением разрядного тока, либо уменьшением площади стенок полости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты: 05-02-98000-р_объ_а, 05-08-01319-а.

Список литературы

- [1] Leonhardt D., Muratore C., Walton S.G. et al. // Proc. of 16th Int. Symp. on Plasma Chemistry. Taormina, Italy, 2003. ISPC-144.pdf.
- [2] Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Федоров М.В. // Изв. вузов. Физика. 2004. № 3. С. 74–77.
- [3] Burdovitsin V., Oks E. // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. N 7. P. 2975–2978.
- [4] Гаврилов Н.В., Осипов В.В., Буреев О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 3. С. 72–78.
- [5] Метель А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–247.
- [6] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М., Федоров М.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 104–107.