

04;10

©1995 г.

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Е.М.Окс, А.А.Чагин, П.М.Шанин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, Томск, Россия
(Поступило в Редакцию 8 сентября 1994 г.)

Показано, что в плазменных источниках заряженных частиц комбинация пеннинговской и магнетронной разрядных систем обеспечивает все преимущества использования разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях и отличается возможностью создания источников электронных и ионных пучков цилиндрической и ленточной конфигураций с высокой однородностью распределения плотности эмиссионного тока.

В работах [1–5] показана принципиальная возможность эффективного использования для генерации сильноточных электронных пучков разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, возбуждаемого в системе цилиндрических электродов типа “обращенный магнетрон”. На основе детальных исследований условий зажигания разряда и его стабильного горения в области давлений, приемлемых для устойчивого функционирования диода с плазменным катодом, а также изучения особенностей эмиссии электронов из плазмы такой разрядной системы, были созданы источники электронов с рекордной для плазменных катодов плотностью тока в импульсном режиме 75 А/см^2 и общим током в непрерывном режиме до 10 А. Показано также [6], что этот разряд может быть применен и в ионных источниках, поскольку доля ионного тока, извлекаемого из плазмы магнетронного разряда, достигала нескольких процентов от величины тока разряда.

В магнетронном разряде обеспечивается высокая азимутальная однородность параметров плазмы. Этот факт в сочетании с локализацией разряда в кольцевом зазоре при существенном градиенте концентрации плазмы между катодом и анодом делает наиболее целесообразным использование магнетронного разряда для генерации пучков трубчатой конфигурации. Хотя трубчатые электронные пучки нашли применение в СВЧ электронике и плазмохимии, потребность в пучках такой конфигурации все же достаточно мала. Ограниченность области использования трубчатых пучков обусловила поиск возможностей созда-

ния на основе магнетронной разрядной системы источников цилиндрических и ленточных пучков, применяемых в технологии модификации поверхности конструктивных материалов, а также во многих других областях. Развивая идею использования магнетронной разрядной системы в источниках заряженных частиц, авторам работы [7] в результате уменьшения диаметра анода до минимально возможной величины, оптимизации размеров электродов и конфигурации магнитного поля удалось получить цилиндрический электронный пучок с приемлемым значением эффективности извлечения электронов. Однако при таком способе генерации пучков заряженных частиц здесь явно просматривается ряд проблем, которые достаточно сложно решить в рамках данного подхода. Так, в результате преобладания диффузионного механизма токопереноса на анод для магнетронного разряда характерен ярко выраженный радиальный градиент концентрации плазмы. Это всегда приводит к неравномерности распределения плотности эмиссионного тока по сечению пучка. Хотя уменьшение диаметра анода несколько сглаживает эту неоднородность, из-за минимизации площади анода и повышения на нем плотности разрядного тока возрастает вероятность возникновения анодных пятен, приводящих к контракции разряда и обуславливающих его переход в дуговой режим горения. Это ограничивает величину стабильного тока разряда, а следовательно, и значение тока пучка.

Для формирования на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях цилиндрических или ленточных пучков заряженных частиц с высокой радиальной однородностью плотности тока наиболее оптимальным решением представляется нам использование принципа комбинации магнетронного и пеннинговского разрядов в электродной системе плазменного источника заряженных частиц. Одним из возможных примеров реализации данного принципа является плазменный источник электронов и ионов, схема которого представлена на рис. 1. Устройство содержит полый цилиндрический анод 1, конструктивно выполненный в виде "белчьего колеса", расположенные у торцов анода 1 два плоских противостоящих катода 2 и 3, в одном из которых вы-

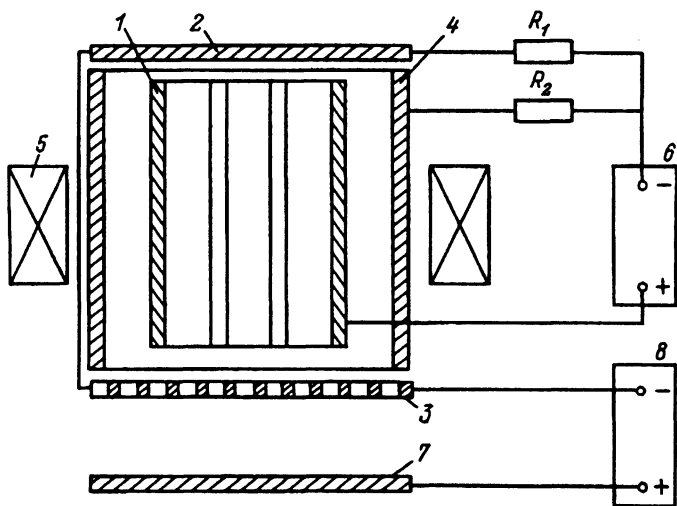


Рис. 1. Электродная схема экспериментального устройства.

должно эмиссионное отверстие, а также цилиндрический электрод 4. Форма эмиссионного отверстия определяется необходимой конфигурацией формируемого пучка и в данном случае она может быть как цилиндрическая, так и ленточная. Диаметры анода 1 и цилиндрического электрода 4 составляли 5 и 8 см соответственно, а их протяженность 10 см. Все электроды выполнены из нержавеющей стали. Магнитное поле (5–20 мТл) создается с помощью электромагнита 5. Как видно из этого рисунка, анод 1 в сочетании с катодами 2 и 3 представляет собой при наличии продольного магнитного поля ячейку Пеннинга. Этот же анод 1 вместе с цилиндрическим электродом 4 и катодами 2 и 3 образует в магнитном поле ячейку магнетронного разряда. Электроды 2 и 3 через резистор R_1 , а электрод 4 через резистор R_2 подключены к отрицательному полюсу источника питания разряда 6. Ускоряющее заряженные частицы поле создается между эмиттерным электродом 3 и коллектором 7 с помощью источника питания 8. Таким образом, в данном устройстве реализована возможность одновременного возбуждения двух разновидностей разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях с осциллирующими электронами.

В эксперименте был реализован непрерывный режим горения разрядов с общим током до 1 А. При подаче напряжения от источника питания 6 и напуске плазмообразующего газа, обеспечивающего давление в разрядной камере порядка 0.1 Па, в области между катодами 2 и 3 и внутренней поверхностью анода 1 зажигается пеннинговский разряд. Одновременно в промежутке между катодом 4 и внешней поверхностью анода 1 возбуждается магнетронный разряд. В каждой из разновидностей разряда реализуется осцилляция электронов, обеспечивающая эффективную ионизацию газа. Несмотря на наличие магнитного поля возможна взаимная диффузия плазмы из обоих разрядных промежутков через анод. Кроме того, из-за существования положительного анодного падения потенциала часть электронов, ускоренных анодным падением, проникает через анод 1 и попадает в тормозящее поле анодного слоя другого разряда. Это обеспечивает дополнительную осцилляцию электронов вблизи анода и генерацию в этой области плазмы. О взаимосвязи и взаимовлиянии разрядов свидетельствует меньшее значение напряжения зажигания в комбинированной разрядной системе по сравнению со случаем отдельного инициирования только пеннинговского или только магнетронного разрядов. На это же указывает и измеренный профиль установившегося распределения концентрации плазмы в области эмиссионной границы (рис. 2), который не

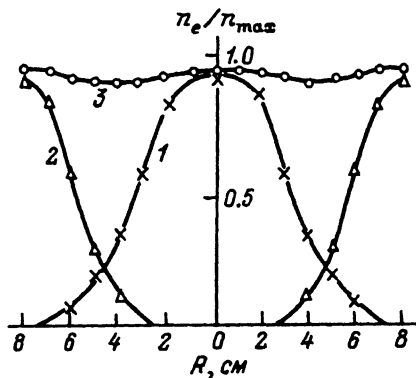


Рис. 2. Радиальный профиль распределения концентрации плазмы в области эмиссионной поверхности для пеннинговского разряда (1), магнетронного разряда (2), комбинации магнетронного и пеннинговского разрядов (3); $n_{\max} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

сводится к простому суммированию распределений при раздельном горении пенningовского (кривая 1) или магнетронного (кривая 2) разрядов. Поскольку условия генерации и ухода заряженных частиц в этих разрядах все же несколько различаются, то для получения наименьшей неоднородности концентрации плазмы вблизи эмиссионной границы необходимо принудительное перераспределение тока между катодными электродами разрядных систем. Это достигается установлением развязывающих резисторов R_1 и R_2 . Варьируя параметрами этих резисторов и тем самым изменяя соотношение между катодными токами в разрядных промежутках, имея в виду, что в разряде низкого давления концентрация плазмы прямо пропорциональна величине разрядного тока, можно добиться высокой радиальной однородности концентрации плазмы, что в конечном счете обуславливает высокую равномерность отбираемого из плазмы тока электронов или ионов (кривая 3 на рис. 2). Важно отметить, что в предлагаемой электродной системе для достижения равномерности радиального распределения концентрации плазмы нет необходимости в минимизации размеров анода и площадь его поверхности остается, таким образом, достаточно большой. Это снимает проблему возникновения неустойчивости разряда в анодной области и открывает возможность существенного повышения тока разряда, а следовательно, и тока пучка заряженных частиц. Как и в обычной магнетронной разрядной системе, величина максимального диффузного тока ограничена только процессами на катоде, связанными с возникновением катодного пятна и переходом в дуговой режим. Однако, как показано в [5], величина максимального диффузного тока может быть повышена выбором соответствующей пары газ-металл, увеличением магнитного поля и площади катода, а также "тренировкой" электродов.

Эффективность извлечения ионов определяется отношением площади эмиссионной поверхности плазмы к сумме площадей всех электродов, на которые могут уходить ионы из разряда. В предлагаемой разрядной системе из-за возможности значительного расширения площади эмиссионной поверхности при формировании цилиндрического пучка нам удалось извлечь ионный ток, величина которого достигала 10% от общего разрядного тока.

При смене полярности ускоряющего поля устройство функционирует как источник электронов, в котором частицы извлекаются через эмиссионное отверстие в катодном электроде 3 вдоль силовых линий магнитного поля. В случае полного снятия внешним ускоряющим полем потенциального барьера катодного слоя эффективность извлечения электронов α может быть определена из следующего соотношения:

$$\alpha = I_e / I_p = (j_x / j_a)(S_e / S_a). \quad (1)$$

Здесь I_e — ток эмиссии, I_p — ток разряда, j_x — плотность хаотического тока электронов в плазме, j_a — плотность электронного компонента разрядного тока на анод, S_e — площадь эмиссионной поверхности плазмы, S_a — площадь анода. Для магнетронного разряда уход электронов из разряда на анод определяется их диффузией поперек магнитного поля [5]. В этом случае, как показывают простые оценки, $j_x \gg j_a$. Поэтому, как следует из (1), высокие значения эффективности извлечения электронов могут быть достигнуты и при относительно небольших

значениях площади эмиссионной поверхности плазмы. Это делает возможным генерацию в такой разрядной системе наряду с цилиндрическим и ленточного электронного пучка. Для этого в торцевом электроде эмиссионное отверстие выполнялось в виде щели, протяженность и ширина которой соответствовали требуемым размерам электронного пучка. Вследствие высокой радиальной однородности параметров плазмы был получен ленточный пучок электронов ($l = 6$ см, $d = 3$ мм) с неоднородностью линейного распределения плотности электронного тока, не превышающей 5%. Эффективность извлечения электронов составляла величину $\alpha = 0.5$.

Таким образом, предлагаемая концепция построения плазменных источников электронов и ионов на основе использования комбинации пеннинговской и магнетронной разрядных систем обеспечивает все преимущества использования разрядов в скрещенных электрических и магнитных полях в плазменных источниках электронов и ионов и отличается возможностью создания источников сильноточных импульсных и стационарных пучков заряженных частиц цилиндрической и ленточной конфигурации с высокой однородностью распределения плотности эмиссионного тока.

Список литературы

- [1] Окс Е.М., Чагин А.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1191-1193.
- [2] Окс Е.М., Чагин А.А., Шанин П.М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 188-191.
- [3] Chagin A., Oks E., Schanin P. // Proc. of 8th Intern. Conf. on High Power Particle Beams "Beams-90". Novosibirsk, 1990. Vol. 2. P. 866-871.
- [4] Окс Е.М., Чагин А.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 204-206.
- [5] Kozurev A.V., Oks E.M., Chagin A.A. // Proc. of XX Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Piza (Italy), 1991. Vol. 2. P. 498-499.
- [6] Окс Е.М., Чагин А.А., Шанин П.М. // ПТЭ. 1992. № 2. С. 183-187.
- [7] Гаприлов Н.В., Завьялов М.А., Никулин С.П., Пономарев А.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 21. С. 57-60.