

МИНУС-РАЗБРОС В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ
С НЕУСТОЙЧИВЫМ ПРОТЕКАНИЕМ
ЭЛЕКТРОННОГО ТОКАА.А. Плюто, А.А. Кансузян,
И.С. Коротков, Г.Р. Дjobава

Энергетическое распределение ионов, извлекаемых из источника плазмы, относится к его важнейшим характеристикам. Изучение высокочастотных ионных источников [1, 2] показало, что $\sim 90\%$ всех извлекаемых ионов имеет разброс энергии 40–50 эВ, изменяющийся в зависимости от экспериментальных условий. Применение для изучения энергетического распределения масспектроскопической методики привело к регистрации ускоренных ионов в плазменно-пучковом разряде [3]. При формировании сильноточных пучков из плазмы вакуумных искр и дуг был обнаружен разброс ионов по энергии в сторону удельных энергий, больших ускоряющего напряжения – плюс-разброс, и меньших – минус-разброс [4]. Плюс-разброс связан с ускорением ионов электронным газом расширяющейся плазмы [5]. Исследования плюс-разброса привели к обнаружению эффекта ускорения ионов в электронных пучках [6]. Природа минус-разброса оставалась неясной, в связи с чем было предпринято его дальнейшее изучение.

Пучок ионов, извлекаемых из плазмы импульсного дугового источника с титановым катодом, исследовался на стенде (рис. 1). Импульсный дуговой разряд ($\tau = 100$ мкс), инициируемый под действием высоковольтного импульса, прикладываемого между катодом 1 и поджигающим электродом 2, протекает в промежутке анод 3 и катод 1. С границы расширяющейся через отверстие в экспандере 4 в ускоряющий промежуток 5 плазмы отбирается ионный ток разностью потенциалов 20 кВ, приложенной между электродами 4 и 6. Состав и энергии ионов анализируются масспектроскопом Томсона [7]. С целью определения момента возникновения минус-разброса применена методика, позволяющая, благодаря использованию импульсов напряжения $U_{отк}$ прямоугольной формы амплитудой 120 В и длительностью 10 мкс для питания электрических полюсов масспектроскопа, проводить экспонирование на различных участках тока дуги. Импульс $U_{отк}$ и ток I_d дуги (рис. 2) регистрировались двухлучевым осциллографом. Из осциллограмм следует, что при переходе инициирующего разряда в дуговой в течение времени Δt возникают неустойчивости и колебания электронного тока. На рис. 2 приведены также масспектрограммы состава ионов, полученные при экспозиции 10^3 импульсов. Ускоряющее напряжение под-

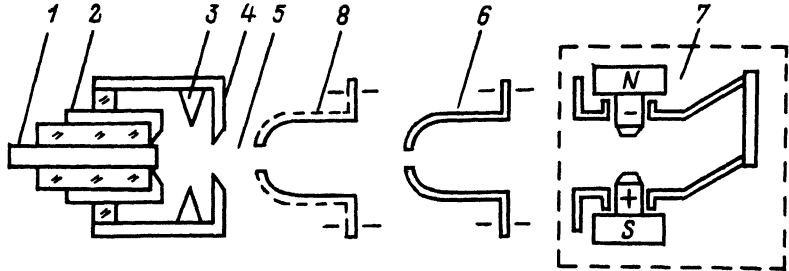


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

держивалось постоянным с точностью 5% и изменение его не могло быть причиной наблюдаемого минус-разброса. Масспектр (б) получен экспонированием в течение первых 10 мкс разряда, что совпадает по времени с областью неустойчивости и колебаний тока дуги. На фотопластине на линиях T_i^{+1} , T_i^{+2} , T_i^{+3} заметна область (К) минус-разброса с энергией ионов, меньшей приложенной разности потенциалов. Отсутствие минус-разброса на масспектре (а), экспонированном в течение 10 мкс с задержкой 50 мкс относительно начала процесса, а также на отдельно экспонированном масспектре иницирующего разряда указывает на то, что его возникновение связано с колебаниями тока дуги. Область минус-разброса на масспектре (б) по-разному представлена для линий различных ионов, отличающихся по интенсивности и величине минимальной энергии. В этом проявляется избирательный для ионов с различными A/Z характер процессов, приводящих к появлению минус-разброса. На уровне центрального пятна в спектрах (а) и (б) рис. 2. регистрируются ионы, приходящие в масспектрометр при напряжении на его полюсах, равном нулю.

Для детального изучения минус-разброса стенд (рис. 1) дополнялся вторым анодом 8, обозначенным на рисунке пунктирной линией, благодаря чему из плазмы дугового источника с катодом из Bi в течение всего времени ($\tau = 100$ мкс) формировался неустойчивый электронный пучок, в стадии максимумов и срывов тока которого развивался процесс коллективного ускорения ионов. При этом наблюдались ускоренные ионы (плюс-разброс), ионы, отражающие состав плазмы и ионы минус-разброса, регистрируемые в течение всего времени существования неустойчивости.

Полученные результаты позволили установить однозначную связь между релаксационными колебаниями электронного тока на промежутке, в котором происходит формирование электронного пучка, с регистрацией медленных ионов минус-разброса. Наблюдается зависимость минимальных энергий ионов от энергии электронного пучка и отбирающего напряжения. Изменение тока дуги, вызывающее изменение концентрации плазмы и величины электронного

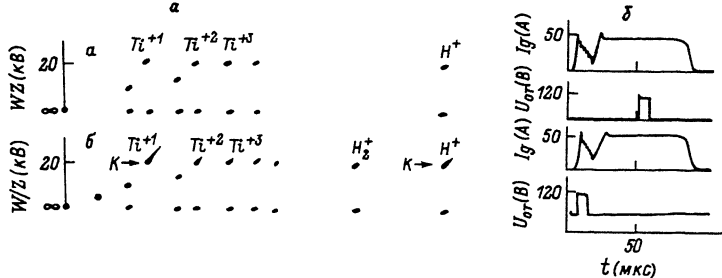


Рис. 2. а) Масспектрограмма ионов, регистрируемых в течение 10 мкс с задержкой 50 мкс относительно начала процесса и типичная осциллограмма тока дуги с осциллограммой прямоугольного импульса напряжения, питающего электрические полюса анализатора Томсона. б) Масспектрограмма ионов, регистрируемых в течение первых 10 мкс.

тока, приводит к тому, что минус-разброс может наблюдаться на линиях ионов с различными A/Z , причем с увеличением тока электронного пучка область минус-разброса перемещается на линии ионов Bi^{+2} , Bi^{+3} , с меньшими A/Z . Установка сетки на выходе промежутка 3 не влияет на результаты эксперимента.

Процесс коллективного ускорения сопровождается турбулентными явлениями в плазме [7]. Минус-разброс также связан с турбулентными явлениями, а возможно, с коллективным ускорением ионов в электронных пучках.

Необходимо отметить, что плюс-разброс и минус-разброс не всегда проявляются одновременно, как это видно на масспектрограмме (рис. 2), где плюс-разброс не наблюдается. Это может указывать на относительную автономность процессов, приводящих к их регистрации.

В результате развития турбулентности могут возникнуть неоднородности по плотности (плазменные сгустки), которые, проникая в промежуток, где происходит электростатический отбор, разрушаются на эквипотенциалах, соответствующих разности потенциалов, меньшей приложенного напряжения, что и приводит к появлению ионов минус-разброса.

Возможно и другое объяснение, основанное на том, что при развитии ускорительного процесса ускоренные ионы проникают во внутрь вытягивающего электрода. На некоторой стадии электрическое поле в ускоряющем промежутке восстанавливается и разделяет

плазму источника и ускоряющего электрода. В последней наблюдаются быстрые ионы, ускоренные в направлении электронного потока и относительно медленные ионы, зафиксированные в экспериментах [9], движущиеся против электронного пучка. Эти ионы задерживаются отбирающим напряжением 20 кВ и могут образовывать минус-разброс. В этом случае находит объяснение избирательный характер минус-разброса в связи с обнаруженным эффектом избирательного ускорения ионов в электронных пучках [8]. В искровых источниках [4] отмеченные явления турбулизации и неустойчивости при формировании электронных пучков могут развиваться в результате появления небольшой колебательной разности потенциалов, обусловленной колебательным током разряда источника.

Таким образом установлено, что причиной возникновения медленных ионов минус-разброса в плазменных системах являются неустойчивость электронного тока, турбулизация плазмы и развитие процесса коллективного ускорения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Thoneman P.C., Moffatt L., Rof O., Landers J.H. // Proc. Phys. Soc. 1948. V. 61. P. 483-487.
- [2] Кучеренко Е.Т., Федорус А.Г. // Радиотехника и электроника. 1959. № 4. С. 1233-1235.
- [3] Незлин М.В., Солнцев А.М. // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. С. 840-842.
- [4] Плюitto А.А., Кварцхава И.Ф., Кервалидзе К.Н. // Атомная энергия. 1957. Т. 3. № 8. С. 153-158.
- [5] Плюitto А.А. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. В. 6. С. 1589-1591.
- [6] Плюitto А.А., Суладзе К.В., Темчин С.М., Короп Е.Д. // Атомная энергия. 1969. Т. 27. В. 5. С. 418-423.
- [7] Плюitto А.А., Капин А.Т. // ЖТФ. Т. 45. В. 12. С. 2533-2543.
- [8] Плюitto А.А., Джобавва Г.Р., Коротков И.С., Кансузян А.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 23. С. 1444-1446.
- [9] Суладзе К.В. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. В. 11. С. 648-652.

Поступило в Редакцию
10 октября 1989 г.
В окончательной редакции
11 марта 1990 г.