

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 621.384

DOI: 10.17223/00213411/68/9/6

**Генерация многозарядных ионов в плазме  
субмикросекундного сильноточного вакуумного дугового разряда\***А.Г. Николаев<sup>1</sup>, В.П. Фролова<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Многозарядные пучки ионов металлов находят применение как в фундаментальных исследованиях в области ядерной и атомной физики, так и в решении прикладных задач, таких как ионная модификация поверхности. Эффективным и простым в реализации методом получения ионов высоких зарядовых состояний является использование сильноточного вакуумного дугового разряда с длительностью импульса в единицы микросекунд и менее. В работе представлены экспериментальные результаты по генерации многозарядных ионов проводящих материалов в плазме вакуумной дуги с амплитудой тока около 3.5 кА и длительностью импульса 0.9 мкс. Исследован широкий спектр различных материалов катодов: свинец, гадолиний, лантан, олово, серебро, молибден, ниобий, цирконий, медь, титан, магний и углерод, обладающих различными физическими свойствами. Обсуждается зарядовый состав ионов в плазме дуги для различных материалов и факторы, влияющие на генерацию многозарядных ионов.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга, многозарядные ионы, ионный пучок, средняя зарядность ионов.

## Введение

Импульсные вакуумные дуговые ионные источники обеспечивают генерацию пучков твердотельных проводящих материалов [1], которые находят применение как в фундаментальных исследованиях, например, в качестве инжекторов ускорителей тяжелых ионов [2, 3], так и при решении прикладных задач, таких как модификация поверхности различных материалов [4–6]. При типичных для таких ионных источников параметрах вакуумного дугового разряда, т.е. при амплитуде импульса тока дуги в сотни ампер и длительности импульса в сотни микросекунд [7, 8], плазма дуги, а следовательно, и генерируемый ею пучок содержат ионы материала катода с максимальными зарядовыми состояниями от 1+ для углерода до 5+ для вольфрама [8–10], а среднее зарядовое состояние ионов не превышает 3+ [10]. Увеличение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги в таких источниках является актуальной задачей, поскольку расширяет их технологические возможности. С одной стороны, увеличение зарядовых состояний ионов позволяет увеличить энергию ионов в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения, а с другой, делает возможным получение пучков ионов с требуемой энергией при существенно меньшей величине ускоряющего напряжения, что положительно влияет на массогабаритные характеристики устройства, снижает затраты на его изготовление и уменьшает поток неиспользуемого рентгеновского излучения.

Для повышения зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги использовались различные подходы, такие как создание в катодной области дугового разряда сильного магнитного поля, принудительная импульсная модуляция тока дуги, инжекция в плазму дуги дополнительного пучка электронов, дополнительный нагрев электронов плазмы микроволновым излучением гиротрона в условиях электронного-циклотронного резонанса. Однако наиболее простой и эффективной из этих методик на данный момент является реализация сильноточной дуги с амплитудой тока несколько килоампер и с короткой длительностью импульса микросекундного уровня [11–13]. При этом к разрядному промежутку прикладывается напряжение уровня 10–15 кВ и на дистанции около 1 см от поверхности катода происходит пинчевание плазмы дуги под действием собственного магнитного поля [13], что приводит к росту температуры электронов плазмы и многократному увеличению зарядовых состояний ионов.

В данной работе представлены результаты исследования особенностей генерации многозарядных ионов широкого спектра материалов катодов, представляющих практически все периоды и

\* Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 24-29-00249 (<https://rscf.ru/project/24-29-00249/>).