

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.533

DOI: 10.17223/00213411/68/10/3

О влиянии начальной скорости инжекции катодной плазмы на кинетику электронного и ионного потока в вакуумном разряде*А.В. Козырев¹, В.Ю. Кожевников¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

В рамках кинетического приближения проведен теоретический анализ бесстолкновительного механизма расширения катодной плазмы, инжектируемой в вакуумный промежуток в режиме импульсно-периодического режима эмиссии, при вариации среднего импульса потока. Показано, что придание ненулевого среднего импульса инжектируемому потоку на уровне тепловых импульсов существенно изменяет скорость расширения эмиссионной границы, которая кратно превышает тепловые скорости ансамблей частиц в катодной плазме. Полученные результаты позволяют глубже понять физические процессы, определяющие основные параметры разлета бесстолкновительной плазмы.

Ключевые слова: вакуумный разряд, бесстолкновительная плазма, кинетическое уравнение Власова, виртуальный катод.

Введение

Электрический разряд в вакууме лежит в основе работы таких устройств, как импульсные генераторы высокой мощности, ускорители электронов и ионов, микроволновые установки, импульсные рентгеновские генераторы и многие другие [1]. Последовательное изучение стадий протекания разряда, в том числе стадии вакуумного пробоя, искрового разряда и дугового процесса, является ключевым для обеспечения высокой эффективности и надежности данных систем.

Для понимания физического механизма развития электрического разряда в вакууме решающее значение имеет изучение начальной стадии инициирования пробоя промежутка. На этой стадии формируется поток катодной плазмы из области меньшего значения электрического потенциала (от катода) в область более высокого значения электрического потенциала (к аноду). Накопленная обширная экспериментальная база свидетельствует, что скорости расширения плазмы превышают 10^6 см/с, а ионы вносят до 12% общего заряда, переносимого через коллектор (анод) [2]. Кинетическая энергия ионов в вакуумных диодах составляет от десятков до сотен электрон-вольт.

До сих пор ведутся дискуссии о том, какие физические механизмы оказывают ключевое влияние на расширение катодной плазмы [2–5]. Была высказана гипотеза о том, что расширение катодной плазмы носит взрывной характер [5], и ускорение происходит при высоких плотностях (неидеальная плазма или газ с металлической плотностью) в области гидродинамических и электромагнитных разрывов при фазовых переходах. Энергетические потоки в эмиссионном центре обеспечивают условия для почти полной ионизации паров металла, что приводит к расширению катодной плазмы в вакуум со скоростями, значительно превышающими типичные экспериментальные значения [1–3].

Однако за последние годы был достигнут значительный прогресс в теоретическом понимании явления благодаря современным методам вычислительной физической кинетики. Использование кинетического описания многокомпонентной катодной плазмы позволило построить модели расширения катодной плазмы в различных геометрических и электрофизических конфигурациях диодов [6–9]. Было установлено, что основным механизмом нетеплового расширения катодной плазмы и аномального ускорения ионов является электрополевой эффект, обусловленный образованием локализованной области немонотонного распределения электрического потенциала, представляющего собой нестационарный виртуальный катод. Удалось рассчитать средние скорости расширения плазмы и выявить далеко не главную роль рассеивающих столкновений в этом про-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам № FWRM-2021-0007, FWRM-2021-0014.