

АЗИМУТАЛЬНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И СТРУКТУРЫ В ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЕННИНГОВСКОГО ТИПА^{*)}

Смоляков А., Тюшев М., Папан Заде М.

Университет Саскачевана, Саскатун, Канада, andrei.smolyakov@usask.ca

Пеннинговский (или Reflex) разряд — одно из самых первых плазменных устройств, которое в настоящее время находит широкое применение в современных плазменных технологиях, таких как датчики давления, нейтронные детекторы, масс-спектрометрия, системы для разделения изотопов массовых частиц, ионные источники для обработки материалов и другие. В обсуждаемой конфигурации цилиндрический разряд в осевом магнитном поле поддерживается электронным пучком, испускаемым горячим катодом. Электроны удерживаются в радиальном направлении магнитным полем и вдоль оси — электрическим полем двойных слоев на электродах, перпендикулярных магнитному полю — катоду и анти-катоду, которые обычно имеют одинаковый отрицательный потенциал. Стенки камеры служат анодом. Ионы, как правило, незамагничены, и диффундируют радиально и аксиально к стенкам и могут быть извлечены с помощью дополнительных электродов.

Как пример разряда в скрещенных $E \times B$ полях, а также благодаря своей относительной простоте и доступности для диагностики, пеннинговский разряд является полезным тестовым стендом для изучения физики неустойчивостей в $E \times B$ -плазме, актуальной для множества приложений, например, источников ионов для инжекторов нейтральных пучков и физики космической плазмы. Несмотря на длинную историю, физика пеннинговского разряда, особенно природа его неустойчивостей, до конца не изучена и остается предметом активных исследований. Различные неустойчивости, наблюдаемые в таких разрядах, могут негативно влиять на работу устройств.

В этом докладе мы рассматриваем последние теоретические и некоторые экспериментальные результаты по флуктуациям и структурам в пеннинговских конфигурациях. Многие реализации пеннинговских конфигураций работают в режимах, при которых электрический потенциал в центре разряда отрицателен относительно анода. В этом случае электрическое поле направлено внутрь и, таким образом, совпадает с градиентом плотности. Хотя внутреннее электрическое поле благоприятствует удержанию ионов, такая конфигурация подвержена так называемой Simon-Hoh (SH) неустойчивости. Считается, что именно эта неустойчивость в целом отвечает за колебания, наблюдаемые во многих пеннинговских разрядах. Эти неустойчивости могут приводить к неравномерности потока ионов, что отрицательно сказывается на применениях в обработке материалов. Для таких приложений представляют интерес режимы с электрическим полем, направленным наружу, в которых, предположительно, SH неустойчивости подавлены. В этом случае, однако, могут быть активны другие механизмы дрейфово-диссипативных неустойчивостей, в частности, обусловленных градиентами плотности и столкновениями.

Для исследования различных режимов неустойчивости было проведено численное моделирование пеннинговского разряда в рамках 2D3V (радиально-азимутальной) и полной 3D3V PIC/MCC моделями. Разряд самоподдерживается за счет ионизации при осевом впрыске электронов. Проведенное 2D-моделирование показывает, что в стационарном состоянии разряд может поддерживаться в двух различных режимах с разными типами наблюдаемых азимутальных структур: крупномасштабном режиме спиц ($m = 1$) и режиме множества мелкомасштабных спиральных структур ($m > 1$). Переход между этими режимами определяется механизмом подачи энергии в разряд. Переход от спиральных структур к режиму спиц происходит, когда потенциал плазмы в центре изменяется от слабо положительного (или нулевого) до отрицательного. Также переход может быть вызван увеличением магнитного поля, что приводит к ярко выраженному режиму спиц ($m = 1$) с дополнительными мелкомасштабными структурами ($m > 1$) с более высокой частотой внутри и вокруг спицы.

Представлены также результаты 3D- моделирования цилиндрического пеннинговского разряда в режиме, в котором потенциал плазмы в центре разряда положителен. Наблюдались азимутально вращающиеся структуры, перекрывающиеся с аксиальными флуктуациями, которые слабо коррелированы с азимутальными модами, так что азимутальные моды вращаются как единое целое и не проявляют аксиального сдвига. Были изучены пространственные и временные масштабы наблюдаемых структур и флуктуаций. Обсуждаются возможные механизмы неустойчивости.

^{*)} DOI – тезисы на английском