

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РАЗРЯДЕ МАГНЕТРОННОГО ТИПА <sup>\*)</sup>

Есиналин А.А., Желтухин В.С., Лучкин А.Г., Савин А.Ю.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, [esalibek453@gmail.com](mailto:esalibek453@gmail.com),  
[vzheltukhin@gmail.com](mailto:vzheltukhin@gmail.com), [luchkin\\_a.g@mail.ru](mailto:luchkin_a.g@mail.ru), [aysavin01@gmail.com](mailto:aysavin01@gmail.com)

Магнетронное распыление широко применяется для нанесения тонких покрытий. Серьезным недостатком этого метода распыления является низкий коэффициент использования целевого материала [1]. Качество пленки очень чувствительно к воздействию частиц плазмы. Поэтому важно контролировать структуру магнетронного разряда не только вблизи катода, но и перед подложкой. Эффективным инструментом для достижения этой цели является численное моделирование. Для получения адекватных результатов модель должна быть самосогласованной и учитывать весь выброс при как можно меньшем количестве допущений и упрощений. Средством разработки такой модели может быть, в частности, программное обеспечение Comsol Multiphysics [2].

Рассмотрен разряд постоянного тока в перекрещивающихся полях между плоскими электродами в цилиндрической системе координат с размещением постоянных магнитов под катодом. Межэлектродное расстояние 9,4 см, радиус электродов 3,75 см, напряжение на катоде 125 В, индукция магнитного поля 0,8 мТл. Плазмообразующий газ аргон. Давление в расчете варьировалось от 66,7 Па до 0,02 Па.

Для моделирования разряда использованы модули “Plasma” и “Magnetic field” [2]. В модуле Plasma описывается состояние плазмы с помощью уравнений баланса электронов, ионов и метастабильных атомов, сохранения энергии электронов, импульса электронов и уравнения Пуассона. Модуль “Magnetic field” используется для расчета распределения постоянного магнитного поля из уравнений Максвелла.

Выполнены сравнительные расчеты характеристик разряда с магнитным полем и в отсутствии магнитного поля. Получены пространственные распределения концентрации электронов, ионов, метастабильных атомов, электронной температуры, потенциала электрического поля при различных давлениях плазмообразующего газа.

Результаты расчетов показали, что наложение магнитного поля приводит к более равномерному распределению плазмы по объему устройства, увеличению концентрации электронов и уменьшению электронной температуры. Алгоритм расчета с магнитным полем требует почти в 2 раза больше шагов до достижения установившегося состояния. При давлении меньше 0,1 Па расчет расходится, что может быть связано как с тем, что гидродинамическая модель, использованная в модуле «Plasma», не соответствует характеру процессов в разряде при низких давлениях, так и с неустойчивостью численного метода.

### Литература

- [1]. Swann S. Magnetron sputtering //Physics in technology. – 1988. – Т. 19. – №. 2. – С. 67
- [2]. Comsol Multiphysics Simulation Software URL:<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

<sup>\*)</sup> [DOI – тезисы на английском](#)