

ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ВЫРАБОТКИ МИШЕНИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шекелевский В.В., Бездников М.С.

Котов Д.А. – канд. техн. наук, доцент

В работе представлена методика оценки геометрии профиля зоны эрозии мишени исходя из определения пространственного распределения электронов над поверхностью мишени методом Монте-Карло частиц.

Современная промышленность в производстве изделий микро-, нано- и оптоэлектроники при нанесении тонкопленочных покрытий чаще всего использует магнетронное распыление. Из-за распространенности этого метода в настоящее время является актуальной разработка методик определения равномерности формируемого покрытия, для которых необходимо знать геометрические параметры зоны распыления.

Магнетронное распылительное устройство состоит из электрической, магнитной, охлаждающей, газораспределительной систем. Система электродов нужна для создания разности потенциалов, магнитная – для создания магнитной ловушки, охлаждающая – для предотвращения перегрева магнитной системы и других элементов конструкции, газораспределительная – для подачи рабочего вещества в разрядной зоне.

Локализация плазмы у поверхности мишени с помощью магнитной ловушки зависит от конфигурации магнитного поля системы магнитов [1]. Для определения профиля зоны эрозии мишени необходимо знать профиль распределения плотности ионного тока, который зависит от конфигурации магнитного и электрического полей и давления в камере. Профиль зоны эрозии можно рассчитать по формуле

$$h(r_i, t) = t \cdot g_i(r_i) = t \cdot \frac{\langle Y_i \rangle j_i(r_i) A_i}{e N_A \rho_i} \quad (1)$$

где $\langle Y_i \rangle$ – средняя по энергетическому спектру безразмерная величина коэффициента распыления материала мишени (эффективный коэффициент распыления) на радиусе r , $j_i(r)$ – плотность ионного тока над мишенью на радиусе r , $A/\text{см}^2$, A_i – атомная масса распыляемого материала, г/моль , ρ_i – плотность материала, г/см^3 [2].

Ключевым этапом при расчете профиля зоны эрозии мишени является нахождение профиля распределения плотности ионного тока, который можно оценить исходя из пространственного распределения электронов над поверхностью мишени методом Монте-Карло. Для этого необходимо решить уравнение движения электрона в магнитном и электрическом полях по следующей формуле

$$m \cdot \vec{a} = q(\vec{v} \times \vec{B}) + q \cdot \vec{E} \quad (2)$$

где m – масса частицы, кг , a – ускорение, м/с^2 , q – заряд, Кл , v – скорость, м/с , B – индукция магнитного поля, Тл , E – напряженность электрического поля, В/м .

Это уравнение является дифференциальным уравнением второго порядка, для решения которого в декартовых координатах необходимо разбить на систему из трех уравнений для нахождения проекции вектора скорости на каждую из осей

Для примера на рисунке 1 показана траектория движения электронов в магнитной ловушке планарного магнетрона, рассчитанная с помощью языка программирования Python 3.8 с использованием библиотек SciPy, Matplotlib, Magpylib, Numpy. Расчеты проводятся для электронов, равномерно распределенных над поверхностью мишени и со случайными начальными скоростями, лежащими в интервале от 16 эВ до 300 эВ, что обуславливается необходимостью наличия электронов с энергией выше энергии ионизации аргона. Верхняя граница обуславливается тем, что электроны с высокой энергией не задерживаются в магнитной ловушке и оказывают слабое влияние на процессы ионизации.

Для определения распределения электронов в области над поверхностью мишени для каждого момента времени область расчета разбивалась на объемы одинакового размера, в которых велся подсчет электронов, входящих в него. Далее бралось сечение, проходящее

через ось магнитной системы, и электроны, входящие в объемы, пересекающие плоскость сечения, суммировались вдоль и поперек поверхности мишени.

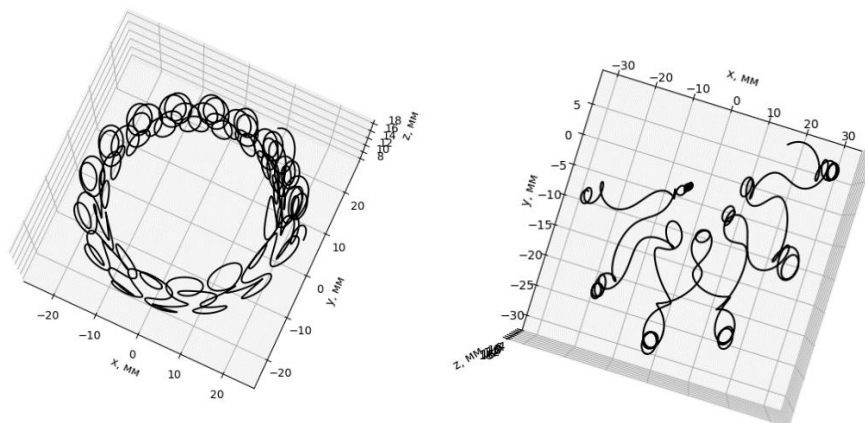


Рисунок 1 – Примеры траектории движения электрона в магнитной ловушке планарного магнетрона диаметром 80 мм для разных начальных координат

Примеры расчета распределения электронов в плоскостях, проходящих через ось z и ось x, показаны на рисунке 3.5 и рисунке 2.

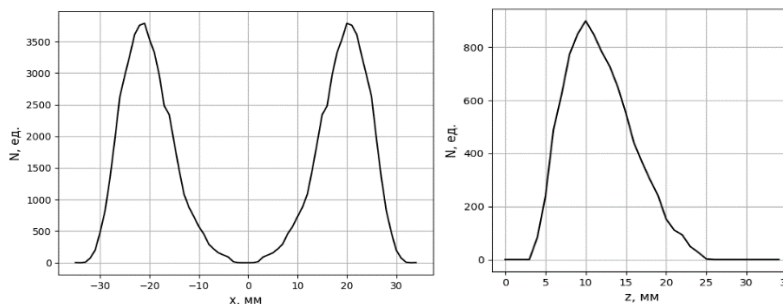


Рисунок 2 – Рассчитанный профиль концентрации электронов при суммировании вдоль z и x соответственно

Результат вычисления дает выраженные максимумы и минимумы, наблюдающиеся экспериментально. После определенного количества рассчитанных траекторий картина распределения перестает изменяться, что говорит о нецелесообразности дальнейших расчетов.

Следует заметить, что рассчитанный профиль описывает лишь качественное, а не количественное распределение, которое зависит от числа тестовых частиц, количество которых в проводимых расчетах было от 12000 до 100000.

Для определения плотности ионного тока над поверхностью мишени используется аппроксимация полученного ранее профиля распределения электронов. В нашем случае кривая распределения плотности тока разряда аппроксимировалась с использованием гауссового распределения. При данном методе моделирования профиль распределения плотности ионного тока в зоне разряда задается аналитически с помощью формулы

$$j(r_i) = \frac{I_{dc}}{\pi(R_{max}^2 - R_{min}^2)} \cdot \frac{f(r_i)}{\int_0^{\infty} f(r_i) dr_i} \quad (3)$$

где R_{min} – минимальный зоны эрозии мишени, м, R_{max} – максимальный радиус зоны эрозии мишени, м,

$f(r_i)$ – функция распределения, полученная путем аппроксимирования расчетного профиля концентрации электронов.

В нашем случае используется модуль библиотеки SciPy для аппроксимации точечных кривых, полученных при расчете профиля распределения электронов, заданной функцией.

57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, 2021 г.

Таким образом приведен метод расчета профиля зоны эрозии мишени исходя из пространственного распределения электронов над поверхностью мишени, рассчитываемого методом Monte-Carlo.

Список использованных источников:

1. Данилин, Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин – М.: Радио и связь, 1982. - 72с.
2. Голосов, Д.А., Мельников, С.Н., Кундас С.П., Достанко А.П. // Проблемы физики, математики и техники. – Т. 2. –
3. – 2010. – С. 62-67.