

Условия формирования плазмы дугового разряда в вакууме и её использование для упрочнения поверхности сталей и сплавов

Иванов И.А.

Белорусский национальный технический университет

Среда для поддержания стабильного горения вакуумного дугового разряда формируется из материала катода, испаряемого в катодных пятнах. Размер зоны разряда составляет доли миллиметра, а время жизни катодного пятна порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с. Новый эмиссионный центр формируется на расстоянии радиуса катодного пятна. Эта смена положения эмиссионных центров называется движением катодного пятна. В течении времени своего существования катодное пятно перемещается на расстояние $\Delta r = \left(1/D_m\right) \ln(1 - \xi)$, где ξ – случайное число от 0 до 1, D_m – величина характеризующая дрейф катодного пятна по поверхности катода. Координаты центра нового катодного пятна: $X_1 = X_0 + \Delta r \times \cos(\varphi)$, $Y_1 = Y_0 + \Delta r \times \sin(\varphi)$. Направление движения катодного пятна всегда перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора силы тока и тангенциального магнитного поля. Угловая координата локального перемещения будет определяться из соотношения: $\varphi = \left(\frac{\pi}{b}\right) \times (rand - 1/2)$, где константа b – это некоторая численная величина, характеризующая силу внешнего магнитного поля, $rand$ – число получаемое генератором случайных чисел.

Ионы и капли являются основными продуктами эрозии катода. Доля нейтрального пара не превышает 1%. Основное количество капель, движется под малыми углами к плоскости торцевой поверхности катода. Пространственное распределение ионной компоненты плазменного потока имеет ярко выраженную осевую направленность при разлете относительно оси испарителя в пределах $\pm 40^\circ$. Поток плазмы электрически нейтрален. Концентрация ионов в единице объема составляет 10^{16} м^{-3} . Ионы в потоке двигаются без столкновения друг с другом. Пройдя расстояние, равное длине свободного пробега ион может: попасть на поверхность изделия, попасть на стенки камеры, столкнуться с молекулой технологического газа. В точке столкновения ион меняет направление вектора скорости. Новое направление вектора выбирается случайным образом и будет определяться двумя углами в сферической системе координат. Ион будет двигаться со скоростью v под углом θ_1 к первоначальному направлению, а частица газа – со скоростью V под углом θ_2 . Углы θ_1 и θ_2 называют углами рассеяния частиц.

Сумма углов рассеяния частиц θ_1 и θ_2 это угол разлета частиц после столкновения, $\theta_1 + \theta_2 < \frac{\pi}{2}$. Угол рассеяния иона определяется отношением массы частицы газа к массе иона. Для случая столкновения иона титана с частицей азота этот угол равен 30° .

При упругих взаимодействиях величина энергии, теряемой заряженной частицей в момент ее соударения, будет равна энергии, приобретаемой молекулой газа. Для ионов титана ($m_1 = 47,87$ а.е.м.) и молекулы азота ($m_2 = 28,004$ а.е.м.): $E = \mu \cdot E_{cp} \cdot \sin^2(\varphi/2)$, где $\mu = 4m_1m_2/(m_1 + m_2)^2$ – приведенная масса сталкивающихся частиц; E_{cp} – средняя энергия иона перед столкновением с молекулой газа; φ – угол. Энергия, теряемая ионом титана за однократный акт взаимодействия с молекулой технологического газа составляет: 2.325 эВ.

Основное количество ионов, достигших подложки, теряют 25... 43% первоначальной энергии. Это говорит о значительном вкладе процессов упругих столкновений в потери энергии ионами потока. Среднее расчетное значение энергии иона составляет 65,34% от его первоначальной энергии. Порядка 1,1 % ионов не испытывают столкновений в вакуумной камере и достигают подложки сохраняя свою первоначальную энергию.