**КОАГУЛЯЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО ВЧ РАЗРЯДА**

Паль А.Ф. 1,2, Рябинкин А.Н. 1,2, Серов А.О. 1,2, Филиппов А.В.1

1НИИ ядерной физики имени Д. В.Скобельцына, МГУ имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Москва

2 ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Российская Федерация, 142190, ул. Пушковых, владение 12, г.Троицк, Москва

[ASerov@mics.msu.su](mailto:ASerov@mics.msu.su)

**Введение**

Частицы, зарождающиеся и растущие в плазме напылительных установок, влияют на свойства получаемых покрытий. В [1] экспериментально показано, что частицы, зародившиеся в плазме магнетронного ВЧ разряда из распыленного металла, захватываются плазменной ловушкой. Благодаря этому существенно продлевается процесс их роста. Наблюдались несколько стадий роста частиц в ловушке, связанных с изменением расположения частиц по отношению к источнику атомов, формирующих покрытие. Достигнув размера в несколько микрон, частицы обычно коагулируют, объединяясь в протяженные цепи. В данной работе предпринята попытка объяснения наблюдаемой коагуляции одноименно заряженных частиц на основе полученных экспериментальных данных о расположении ловушек, средних скоростях и размерах агломерирующих частиц и теоретического рассмотрения электростатического взаимодействия двух частиц в разрядной плазме**.**

**1. Электростатическое взаимодействие двух частиц в плазме**

Исследовано электростатическое взаимодействие двух сферических заряженных пылевых частиц с учетом неоднородности распределения поверхностного заряда и с учетом однородного внешнего электрического поля. Для решения задачи использовалась бисферическая система координат, в которой уравнение Лапласа может быть решено методом разделения переменных, а поверхности двух сферических частиц являются координатными поверхностями. На рис.1 в качестве примера приведена зависимость потенциала взаимодействия двух макрочастиц в условиях экспериментов [2], вычисленная на основе [3,4]. На рисунке *R* –расстояние между центрами пылевых частиц.

В [2] определялось произведение зарядов двух частиц и радиуса экранирования, левитирующих в приэлектродном слое ВЧ-разряда. При давлении неона 20 Па было получено, что для частиц радиусами *a*1 = 0.9 мкм, *a*2 = 6.35 мкм произведение приведенных зарядов равно *q*1*q*2 = 23×106, а радиус экранирования *RD* = 160 мкм. Для уравновешивания силы тяжести малой частицы нужно заметно меньшее поле, чем для большей. Поэтому можно ожидать, что на высоте левитации меньшей частицы плотности электронов и ионов были примерно равны друг другу и приближение ограниченных орбит (ПОО) для них должно давать правильное значение заряда. Заряд больших частиц тогда определим из экспериментального значения произведения и получим, что *q*1 = −5400 и *q*2 = −4300. Для левитации тяжелой частицы в этом случае необходимо поле *Е*0 = 230 В/см. Расчеты проведены для двух углов между направлением однородного электрического поля *Е*0 и осью, соединяющей центры частиц: *θ*0 = 0 и *θ*0 = π/2. Из рис. 1 видно, что учет поляризации поверхностного заряда приводит к снижению энергетического барьера при сближении двух одноименно заряженных одинаковых частиц с 2083 эВ до 1843 эВ; во внешнем поле для *θ*0 = 0 барьер снижается до 1775 эВ (примерно при *L* = R – *a*1 – *a*2 = 0.1 мкм) и до 1516 эВ с учетом экранирования (при *L* = 0.079 мкм). Это показывает, что коагуляция в ВЧ-разряде пылевых частиц с тепловой энергией сильно подавлена, но эксперимент говорит о том, что коагуляция имеет место (см. ниже). Поэтому необходим самосогласованный расчет заряда пылевых частиц и действующих на них сил с учетом свойств плазмы в месте их левитации.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Рис. 1.** Потенциал взаимодействия в плазме ВЧ-разряда двух заряженных макрочастиц с радиусами *a*1 = 0.9 мкм, *a*2 = 6.35 мкм, зарядами *q*1 = –5400, *q*2 = –4300 (левая панель) и двух одинаковых частиц с *a*1 = *a*2 = 6.35 мкм и *q*1 = *q*2 = –4300 (правая панель). | |

**2. Экспериментальное исследование движения частиц в плазме**

Исследование роста и коагуляции частиц в плазме проводилось на установке, схема которой приведена на рис.2. В середине вакуумной камеры располагался аксиально-симметричный планарный магнетронный распылитель. В распылителе поддерживался ВЧ разряд с частотой 5.28 МГц и удвоенной амплитудой ВЧ напряжения 400–480 В. Рабочим газом служил аргон при давлении 21 Па. После включения разряда в плазме зарождались частицы, которые на протяжении нескольких часов удерживались и росли в определенных областях плазмы (ловушках). Облака частиц в плазме визуализировались методом рассеяния лазерного излучения, изображения записывались на фото- и видеокамеру. Проводились эксперименты с разной продолжительностью горения разряда. Образовавшиеся в разряде частицы собирались на подложку *2*. Подложка с частицами исследовалась СЭМ, элементный состав частиц изучался с помощью рентгеноспектрального анализа. В отдельных опытах в плазму при тех же разрядных условиях извне инжектировались частицы из других материалов с другими размерами. В плазме удерживались стеклоуглеродные шары диаметром в диапазоне 10 - 16 мкм или стеклянные микросферы диаметром в диапазоне 30 - 100 мкм.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Alex\Desktop\pauk\fig1.bmp  **Рис. 2**. Схема электродной системы и облака частиц в плазме: 1 – распыляемая мишень (маленькие стрелки показывают направления движения распыляемых атомов), 2 – подложка, 3 – заземленный экран, 4 – магнитная система, 5 – область свечения разряда в форме кольца, 6, 7 – пылевые облака | C:\Users\Serov\Documents\Аттестация порошков\Рост частиц в ВЧ разряде\2013.01.28\26Cu-centre-3.tif  **Рис. 3.** Агломераты частиц, образовав-шиеся в плазме. |

Выросшие в плазме частицы меди размерами 0.1–1 мкм имели форму, типичную для ГЦК решётки. В работе [1] на поздней стадии роста в плазме обнаружена агломерация частиц размером несколько микрон с образованием цепей длиной порядка 500 мкм и с дальнейшим объединением этих цепей в гелеобразные структуры (см. рис.3). Частицы стеклоуглерода диаметром более 12 мкм формировали цепи из нескольких звеньев.

При помощи макрофотосъемки были получены профили свечения плазмы и треки частиц. Измерена высота левитации инжектированных частиц и толщина слоя. На основании полученных значений и оценок в разделе 1 можно заключить, что частицы с массой более 10-10 г в широком диапазоне разрядных условий левитируют в области электрического поля напряженностью на уровне 100 В/см. Поэтому в качестве оценки барьера электростатического отталкивания *U*отт можно взять результат теоретического рассмотрения, изложенного в разделе 1.

Частицы двигаются непрерывно вдоль разрядного кольца в направлении дрейфа **E×B** и одновременно совершают вертикальные колебания, в результате их траектории напоминают синусоиду. Колебательные скорости частиц определялись по измеренной амплитуде и частоте колебаний с использованием макрофотоснимков. Результаты измерений максимальных скоростей частиц в лабораторной системе координат и соответствующая кинетическая энергия *E*кин приведены в таблице. Видно, что в случае больших частиц, левитирующих в слое с измеренными колебательными скоростями, электростатическое отталкивание может быть преодолено, *E*кин > *U*отт. Это может служить объяснением наблюдаемой в эксперименте коагуляции.

**Таблица.** Сравнение кинетической энергии *E*кин и энергетического барьера коагуляции *U*отт.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| №№ | 1 | 2 | 3 | 4 |
| *a*, мкм1 | 0.5 | 2.5 | 6 | 15 |
| Материал и форма частиц | Кристаллит меди | Медный шар | Cтеклоугле-родный шар | Полая стеклянная сфера |
| Масса, г | 4.7×10-12 | 5.9×10-10 | 2×10-9 | (1.6 – 3)×10-9 |
| Скорость, см/с | 4 | 2 | 1.8 | 1.9 – 2.8 |
| *U* отт, эВ | 1100 | 650 | 1500 |  |
| *E* кин, эВ | 24 | 735 | 2000 | 1800 – 7350 |

1 *a -* половина среднего размера частиц

**Заключение**

Экспериментально получены характеристики движения частиц различного размера, удерживаемых в плазме магнетронного ВЧ разряда. Частицы с массой более 10-10 г в широком диапазоне разрядных условий левитируют в области электрического поля напряженностью на уровне 100 В/см. Наличие электрического поля указанной величины в области взаимодействия существенно снижает энергетический барьер, который должен быть преодолен для коагуляции двух одноименно заряженных сферических частиц близкого размера. Частицы с размерами в несколько микрон и более, удерживаемые в предслое магнетронного ВЧ разряда, обладают кинетической энергией, достаточной для преодоления этого барьера, что может служить причиной наблюдаемого характера коагуляции частиц с близкими размерами.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-02-01161-a.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. A.V. Filippov, A.F. Pal, A.N. Ryabinkin, A.O. Serov. *Physics of Extreme States of Matter.* Moscow, 2013, ed. by Fortov V.E. et al., pp.175-178.

2. V. E. Fortov, O. F. Petrov, A. D. Usachev, and A. V. Zobnin. *Phys. Rev. E* **70** (2004) 046415.

3. В.Р. Муниров, А.В. Филиппов. *ЖЭТФ* **142** (2012) 594-602.

4. В.Р. Муниров, А.В. Филиппов. *ЖЭТФ* **144 (**2013) 931-942.