

# Свойства цилиндрических частиц, левитирующих в приэлектродном слое ВЧ газоразрядной плазмы

А. Г. Храпак<sup>1</sup>, Б. М. Аннаратоне<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт внеземной физики Общества Макса Планка, Гархинг, Германия

Исследовалось взаимодействие электростатических диполя/квадруполя цилиндрических частиц и приэлектродного электрического поля ВЧ разряда. Зафиксирована равновесная ориентация микро-цилиндров при различных параметрах плазмы. Эксперименты выполнены в ВЧ реакторе с параллельными электродами в плазме аргона. В этом реакторе нижний электрод диаметром 40 мм находился под ВЧ напряжением частоты 13.56 Гц, а верхний электрод и камера были заземлены. Сильная геометрическая асимметрия реактора усиливалась наложением высокого постоянного смещения на электроде, составляющего около 2/3 от амплитуды ВЧ напряжения. Оказалось, что такой усиленный приэлектродный слой необходим для левитации исследуемых частиц, нейлоновых микро-цилиндров диаметра 5 мкм и длины 300-600 мкм, которые не удавалось повесить над заземленным электродом. Визуализация частиц осуществлялась с помощью лазерного ножа ориентированного в вертикальном направлении и записывалась расположенной сбоку видеокамерой. Параметры плазмы контролировались с помощью зонда Ленгмюра радиуса 87.5 мкм и длины 2 мм. Для восстановления профиля напряжения в приэлектродном слое использовалась параболическая аппроксимация от электрода до плазмы.

При различных давлениях наблюдались различные ориентации 600 микронных цилиндрических частиц инжектированных в плазму. При давлениях меньших 60 Па частицы левитировали вертикально, более того при давлениях меньших 22 Па они располагались в два слоя, и даже в три слоя при очень низких давлениях, предшествующих их падению (около 15 Па). При давлении 60 Па наблюдалось сосуществование вертикально и горизонтально ориентированных частиц, а при более высоких давлениях частицы были обычно ориентированы горизонтально.

Равновесная ориентация стержней определяется конкуренцией между их дипольным  $d$  и квадрупольным  $D$  моментами [1, 2]. Дипольный вращающий момент поворачивает стержень вдоль электрического поля  $E$ , в то время как квадрупольный вращающий момент стремится придать им горизонтальное направление. Только два равновесных положения возможны, вертикальное и горизонтальное. Условие равновесия для угла наклона частицы  $\alpha$  может быть получено с помощью второй производной от потенциальной энергии:  $\partial^2 U / \partial \alpha^2 \sim (K - 1) \cos 2\alpha > 0$ , где  $K$  – «ориентационный параметр»,  $K = 2d\ell_E / D$  ( $\ell_E = |E/E'|$ ). Частицы левитируют горизонтально,  $\alpha = \pi/2$ , когда  $K < 1$ , и вертикально,  $\alpha = 0$ , когда  $K > 1$ . Для сопоставления полученных экспериментальных результатов с теоретической моделью необходимо оценить некоторые параметры частиц и плазмы. Масса частиц  $m = \pi a^2 L \rho = 1.34 \cdot 10^{-11}$  кг. Логарифм соотношения размеров  $\Lambda = 5.48$ . Энергия электронов  $T_e = 3$  эВ. Заряды частиц определяются с помощью измеренных значений напряженности электрического поля,  $Z \cong mg/eE$ . После этого, используя экспериментальные значения  $\ell_E$ , определялся параметр  $K$ . Оказалось, что, в полном согласии с нашей теоретической моделью, вертикальная ориентация цилиндрических частиц имеет место при  $K = 4.3 \gg 1$ , горизонтальная при  $K = 0.1 \ll 1$ , а переход от одной к другой происходит при  $K \sim 1$ .

1. A. V. Ivlev, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, B. M. Annaratone, G. Morfill, and K. Yoshino, Phys. Rev. E, **68**, 026403 (2003).

2. V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak, and G. E. Morfill, Phys. Rep. **421**, 1 (2005).