

Свойства цилиндрических частиц, левитирующих в приэлектродном слое ВЧ газоразрядной плазмы

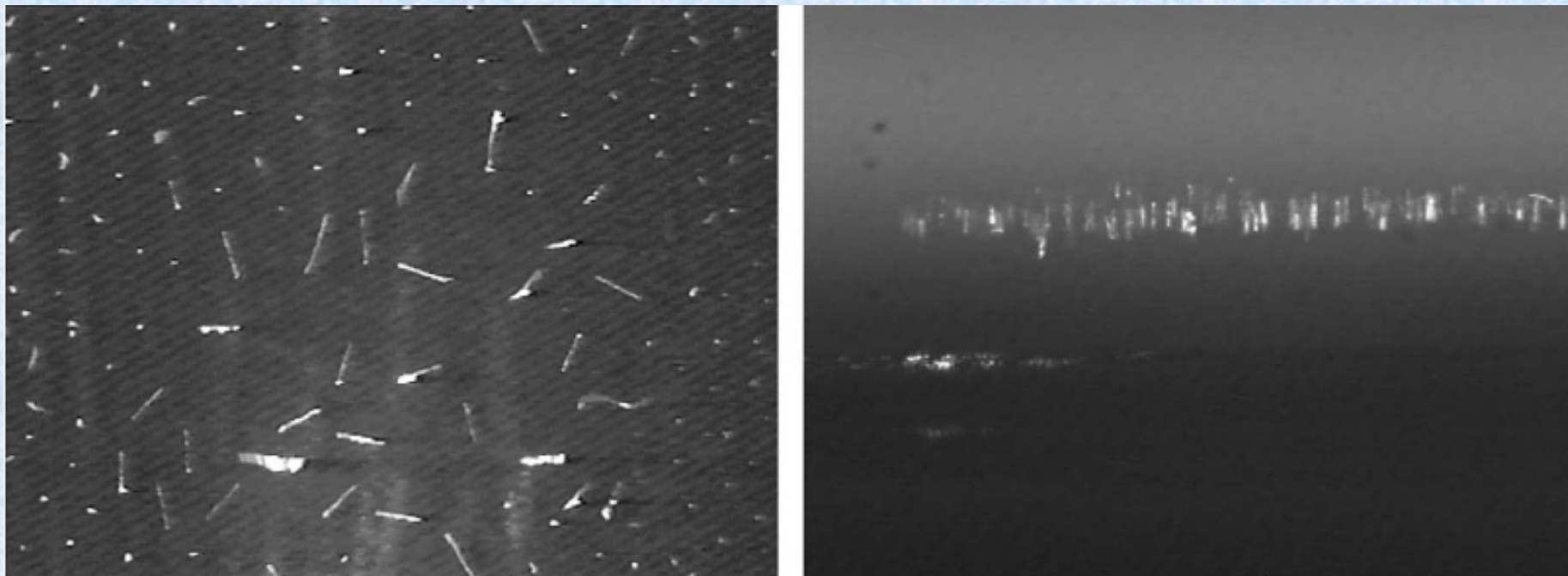
А. Г. Храпак

*Объединенный институт высоких
температур РАН, Москва, Россия*

Б. М. Аннаратоне

*Институт внеземной физики Общества
Макса Планка, Гархинг, Германия*

Ориентация левитирующих цилиндрических частиц



Типичные изображения структуры, образуемой цилиндрическими частицами, левитирующими вблизи границы приэлектродного слоя ВЧ разряда в криптона при давлении 52 Па и мощности 80 Вт.

Ориентация левитирующих цилиндрических частиц

Потенциальная энергия взаимодействия цилиндрической частицы со слабо неоднородным электрическим полем E как функция угла α и высоты h [Ivlev *et al.*, Phys. Rev. E **68**, 026403 (2003)].

$$U(h, \alpha) \cong mgh + eZ\varphi(h) - \frac{dE(h)}{2} \cos^2 \alpha - \frac{DE'(h)}{12} (3 \cos^2 \alpha - 1) + \dots$$

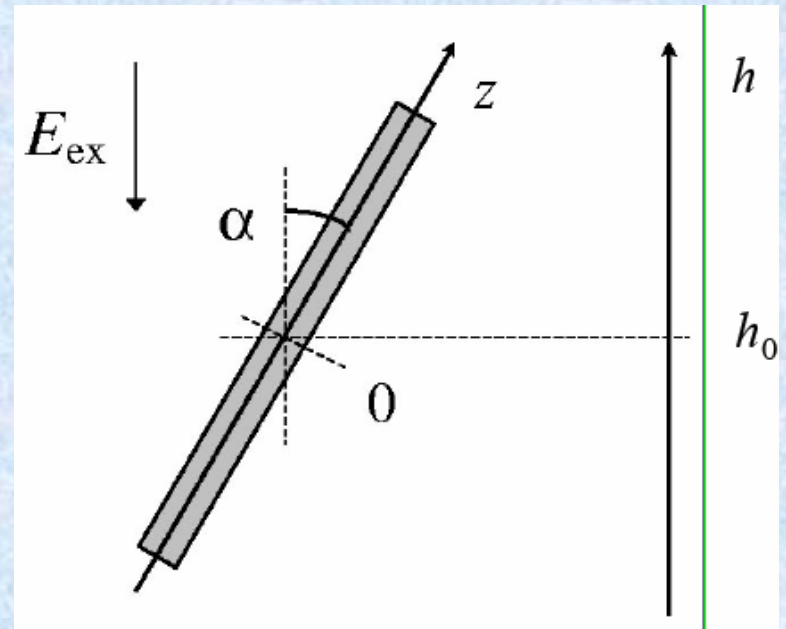
$$E < 0, \quad E' > 0$$

Дипольный момент

$$d \cong \frac{1}{24} \frac{EL^3}{\Lambda} < 0, \quad \Lambda = \ln \frac{L}{a}$$

Квадрупольный момент

$$D \cong \frac{eZL^2}{6} < 0$$



Ориентация левитирующих цилиндрических частиц

Использованные допущения:

- заряд не зависит от h и α
- экранировка мала
- слабо неоднородное поле

$$E(h) \cong E(h_0) + E'(h_0)(h - h_0)$$

$$\ell_E = |E_0 / E'_0| \gg L \gg a$$

$$\frac{\partial U}{\partial h} = 0 \rightarrow mg \cong eZE_0$$

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha} = 0 \rightarrow \left(\frac{E_0^2 L}{2\Lambda} + eZE'_0 \right) \sin 2\alpha = 0 \rightarrow \alpha_0 = 0, \pi/2$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \alpha^2} \sim (K - 1) \cos 2\alpha > 0, \quad K = \frac{2d\ell_E}{D}$$

$K > 1 \rightarrow \alpha_0 = 0 \rightarrow$ вертикальная ориентация

$K < 1 \rightarrow \alpha_0 = \pi/2 \rightarrow$ горизонтальная ориентация

Левитация цилиндрических нейлоновых частиц в плазме ВЧ разряда в аргоне

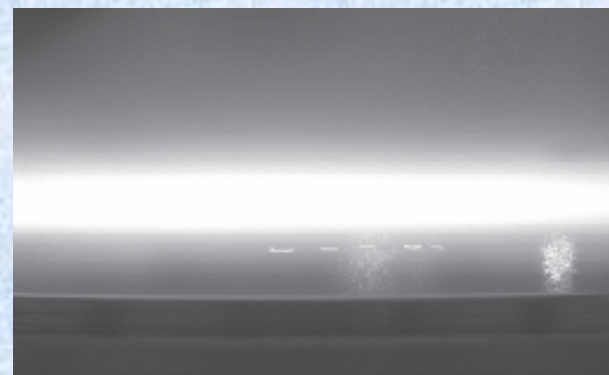


32 Па, 124 В



60 Па, 95 В

Длина 300 мкм, диаметр 5 мкм,
“pick-to-pick” амплитуда 430 В



98 Па, 82 В

Ориентация левитирующих цилиндрических частиц

	Вертикальная ориентация	Смешанная ориентация		Горизонтальная ориентация
		Больше вертикальных	Больше горизонтальных	
-Z	$9.8 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$
-E, кВ/м	8.4	5.0	3.8	3.0
ℓ_E , мм	1.27	0.53	0.38	0.23
K	4.3	0.63	0.26	0.10

Многочастичные комплексы вблизи нижнего электрода



Нейлоновые цилиндрические частицы длиной 300 мкм и диаметром 5 мкм покрытые проводящим полимером в аргоновой плазме ВЧ разряда при давлении 100 Па и “pick-to-pick” напряжении 300 В

Многочастичные комплексы вблизи нижнего электрода



Нейлоновые цилиндрические частицы длиной 300 мкм и диаметром 5 мкм покрытые проводящим полимером в аргоновой плазме ВЧ разряда при давлении 22 Па и “pick-to-pick” напряжении 300 В

Многочастичные комплексы вблизи нижнего электрода

$$U(h, \alpha) \cong mgh + eZ\varphi(h) - \frac{dE(h)}{2} \cos^2 \alpha - \frac{DE'(h)}{12} (3 \cos^2 \alpha - 1) + \dots$$

$$\cos \alpha = 2h / L$$

$$U(h) \cong mgh + eZ\varphi(h) - \frac{LE^2}{12\Lambda} h^2 + \frac{DE'}{12} - \frac{DE'}{L^2} h^2$$

Для параболического потенциала ($E(h) = E_0 + E'_0 h$) условие экстремума имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dh} \cong mg - eZE_0 - eZE'_0 h - \frac{2DE'_0}{L^2} h - \\ - \frac{L}{12\Lambda} (2E_0^2 h + 6E_0 E'_0 h^2 + 4E_0'^2 h^3) = 0 \end{aligned}$$

Многочастичные комплексы вблизи нижнего электрода

В слабонеоднородном электрическом поле $E'_0 \ll 2E_0 / L < E_0 / h_0$

$$h_0 \cong \frac{mg - eZE_0}{\frac{E_0^2 L}{6\Lambda} + \frac{2DE'_0}{L^2} + eZE'_0}$$

$$\alpha_0 \cong \arccos \left[\frac{2(mg - eZE_0)}{L \left(\frac{E_0^2 L}{6\Lambda} + \frac{2DE'_0}{L^2} + eZE'_0 \right)} \right]$$

Многочастичные комплексы вблизи нижнего электрода



Нейлоновые цилиндрические частицы длиной 300 мкм и диаметром 5 мкм покрытые проводящим полимером в аргонной плазме ВЧ разряда при давлении 100 Па и “pick-to-pick” напряжении 100 В через 10 мин после начала травления

Спасибо за внимание