

04

## **Динамика пылевых структур в плазме при модуляции высокочастотного напряжения разряда**

© Л.М. Василяк, С.П. Ветчинин, А.А. Обвивальнева, Д.Н. Поляков

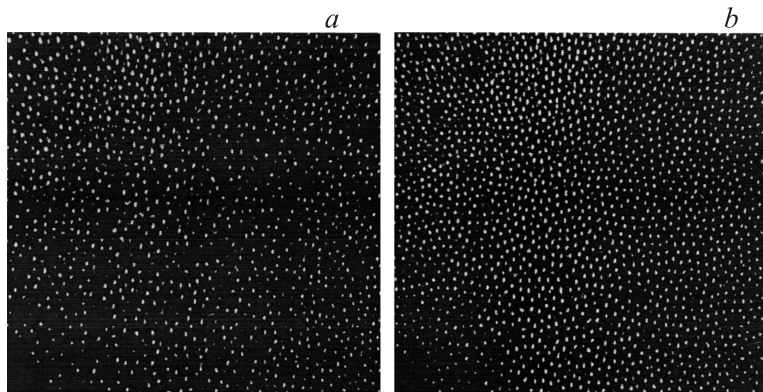
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
E-mail: lab852@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 26 ноября 2007 г.

Экспериментально исследовано параметрическое возбуждение пылевых частиц в приэлектродном слое ВЧ-разряда при низкочастотной модуляции ВЧ-напряжения. В зависимости от глубины модуляции возможны как динамическая стабилизация частиц, которая приводит к перестройке пылевой структуры, так и параметрический резонанс в определенной полосе частот возбуждения. Предложена модель наблюдаемого явления. Показано, что возбуждение колебаний пылевых частиц носит пороговый характер.

PACS: 52.27.Lw

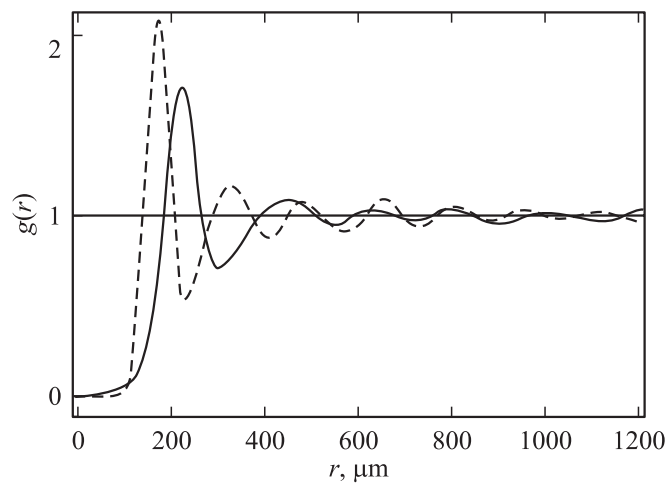
Для эффективного использования плазмохимических технологий с участием твердых частиц необходимо научиться управлять поведением и свойствами облаков заряженных частиц микронного размера в плазме [1]. Одним из методов управления пылевым облаком и изменением его структуры является воздействие изменяющимся электрическим полем [2–4]. Исследование динамики структур при импульсном воздействии позволяет получить новые данные о процессах их формирования и критериях устойчивости. В большинстве работ исследовалась динамика пылевых частиц в приэлектродном слое ВЧ-разряда при воздействии медленно меняющимся напряжением, приложенным к специальному дополнительному электроду [3,4]. При этом обычно предполагают, что происходит в основном силовое электростатическое воздействие на частицы, но в реальности происходит и изменение параметров окружающей плазмы, которое может быть значительным. Вследствие этого при импульсно-периодическом воздействии отделить в отклике вынужденные колебания частиц в нелинейной системе [3] от параметрически возбуждаемых не всегда представляется возможным.



**Рис. 1.** Изображение фрагмента пылевой структуры: *a* — без модуляции; *b* — при модуляции импульсом с частотой 50 Hz (поперечное сечение). Размер изображения каждого фрагмента  $2.8 \times 2.7$  см.

В данной работе предлагается воздействовать на структуру заряженных частиц электрическим полем только за счет принудительного изменения параметров плазменной ловушки.

Целью работы являлось исследование параметрического воздействия на пылевые частицы в плазме ВЧ-разряда при низкочастотной модуляции амплитуды ВЧ (13.56 MHz) напряжения, подаваемого на разряд. Такой способ воздействия на пылевую структуру ранее не исследовался. Амплитуда ВЧ-напряжения 100–110 V модулировалась синусоидальным сигналом с частотой от 10 до 500 Hz с глубиной модуляции 0–100%. Разряд горел в воздухе при давлении 0.1–0.5 Torr в цилиндрической разрядной трубке диаметром 5 см с межэлектродным расстоянием 4 см. Структура пылевых частиц диаметром 40 мкм и толщиной около 5 мм наблюдалась на расстоянии 5 мм выше потенциального нижнего электрода. Для частиц алюминия диаметром  $a = 1\text{--}5\ \mu\text{m}$  среднее расстояние между частицами в слое составляло около  $200\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *a*), расстояние между слоями около  $300\ \mu\text{m}$ . Полидисперсные частицы окиси магния с  $a = 5\text{--}20\ \mu\text{m}$  располагались в поперечном слое на разных расстояниях друг от друга, причем в центральной области наблюдалась более плотная структура.

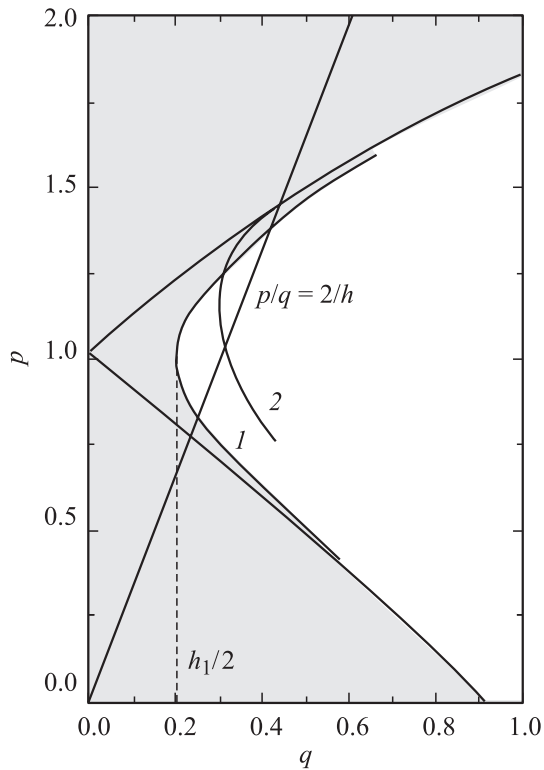


**Рис. 2.** Парные корреляционные функции, соответствующие изображениям пылевой структуры на рис. 1: сплошная линия — *a*, пунктирная линия — *b*.

Эффект НЧ-модуляции ВЧ-напряжения наблюдается уже при глубине модуляции 10%. При всех частотах модуляции частицы совершают малые колебания с амплитудой много меньшей, чем расстояние между слоями в вертикальной плоскости. При частоте модуляции около 50 Hz образуется однородная стабильная структура (рис. 1, *b*), при этом происходит уменьшение среднего расстояния между частицами, хаотическое движение частиц в слое резко уменьшается. Из парных корреляционных функций (рис. 2), построенных для изображений рис. 1, *a* и *b*, видно, что наложение модуляции приводит к примерно удвоению числа частиц в слое, возникновению дальнего порядка и переходу частиц из жидкостного состояния к состоянию, близкому к кристаллическому. При частоте модуляции больше 200 Hz растет расстояние между частицами, порядок нарушается, и дальнейшее увеличение частоты приводит структуру к состоянию, аналогичному без модуляции. При уменьшении частоты модуляции ниже 50 Hz наблюдается резонансное возбуждение частиц, при этом резко возрастает амплитуда вертикальных колебаний частиц. Возбуждение осцилляций частиц начинается не во всем поперечном сечении пылевого облака, а в отдельной ее

области. При уменьшении частоты амплитуда колебаний частиц растет и увеличивается размер области возбуждения. Уменьшение частоты приводит к возбуждению частиц, находящихся на большем расстоянии друг от друга. При частоте около 17 Нз возбуждается вся структура частиц и амплитуда их колебаний максимальна. При дальнейшем уменьшении частоты амплитуда колебаний частиц уменьшается. Такая динамика возбуждения при изменении частоты более ярко выражена для частиц с большей степенью полидисперсности и при увеличении глубины модуляции. Наблюдаемые вертикальные колебания частиц определяются низкочастотными колебаниями электрического поля в приэлектродном слое ВЧ-разряда. Амплитуда колебаний зависит от глубины модуляции. Свойства ВЧ-разрядов низкого давления с коротким разрядным промежутком определяются во многом процессами в приэлектродных слоях объемного положительного заряда, на которые падает значительная часть прикладываемого напряжения. При рассматриваемых давлениях приэлектродный слой является столкновительным, электроны дрейфуют к электродам в усредненном за ВЧ-период поле пространственного заряда, образуя стационарный профиль концентрации. Пылевые частицы удерживаются в слое электрическим полем  $E(z)$ , имеющим почти линейное распределение по направлению нормали  $z$  к электроду:  $\partial E/\partial z = en_i/\epsilon_0$ , где  $e$  — заряд электрона,  $n_i$  — средняя плотность ионов в слое,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость. В радиальном направлении частицы удерживаются амбиполярным электрическим полем. Характер колебаний зависит от пространственного распределения электростатического потенциала. Малые смещения пылевых частиц с зарядом  $Q$  и массой  $M$  относительно положения равновесия в такой электростатической ловушке в первом приближении можно рассматривать как независимые линейные колебания в осесимметричной параболической потенциальной яме  $\varphi(z, r) = M\Omega_z^2(z^2/2) + M\Omega_r^2(r^2/2)$ , с собственными частотами  $\Omega_z$  и  $\Omega_r$ . При низкочастотной модуляции амплитуды ВЧ-напряжения на разряде  $U(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t)$  ( $m$  — глубина модуляции) с той же частотой происходит периодическое изменение электрического поля в слое объемного заряда. Это приводит к периодическому изменению параметров плазменной ловушки  $\Omega_z$  и  $\Omega_r$  и возбуждению параметрических колебаний пылевых частиц. Обычно падение напряжения на слое объемного заряда существенно превышает энергию электронов, измеренную в eV, а толщина слоя меньше радиуса трубки, поэтому продольное электрическое поле в слое намного больше радиального

электрического поля и  $\Omega_z \gg \Omega_r$ . Пылевые структуры образуются при давлении, когда частота трения частиц о нейтральный газ  $\nu > \Omega_r$ , поэтому из-за сильного затухания радиальные колебания не раскачиваются. Продольные параметрические колебания частиц описываются линейным уравнением с трением, которое подстановкой  $z = x \exp(-\nu t)$  преобразуется в уравнения Маттье:  $d^2x/dt^2 + (p + 2q \cos 2\tau)x = 0$ , где  $2\tau = \Omega t$ ,  $p = 4\Omega_0^2/\Omega^2$ ,  $q = hp/2$ ,  $\Omega_0^2 = \Omega_z^2 - \nu^2$ ,  $h = m/(1 + \nu^2/\Omega_0^2)$ ,  $M\Omega_z^2 = -\partial(QE)/\partial z = eQn_i/\epsilon_0$ . Вследствие большой массы пылевых частиц  $\Omega_0 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ . Уравнение Маттье имеет два типа решений: устойчивые решения, когда амплитуда колебаний частиц ограничена, и неустойчивые, когда амплитуда экспоненциально нарастает. Существование неустойчивых решений зависит только от параметров  $p$  и  $q$  и не зависит от начальных условий движения частиц. Наличие линейного затухания не стабилизирует неустойчивость, а лишь смещает и сужает границы зон неустойчивости. При наличии трения вершины областей параметрической неустойчивости, соответствующие резонансным частотам  $2\Omega_0/n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), смещаются, и резонанс оказывается возможным не при любой глубине модуляции  $h$ , а лишь начиная с определенного порога  $h_n$  [5]. Для первой зоны неустойчивости  $h_1 = 4\nu/\Omega_0$ . Условия возбуждения в последующих зонах неустойчивости осуществить значительно труднее, так как величина порога  $h_n \sim (\nu/\Omega_0)^{1/n}$ . В наших экспериментах характерные значения  $\nu/\Omega_0 \sim 0.1$ , поэтому параметрический резонанс наблюдается на частотах  $\Omega \approx 2\Omega_0$ . Возбуждение частиц зависит от глубины модуляции. Наличие порога возбуждения резонансных колебаний объясняет экспериментальные данные. При малой глубине модуляции  $m < 0.3$  в области устойчивости, которая на рис. 3 затонирована, когда  $p < 1$ ,  $q < 1$ , т.е. на частотах выше резонансных, происходит динамическая стабилизация частиц в структуре. Движение устойчиво как по  $z$ , так и по  $r$ . Если в эксперименте до воздействия наблюдалось некое хаотическое движение частиц, то при гармоническом возбуждении происходит их динамическая стабилизация (рис. 1, *b*). Частицы, совершая малые вынужденные колебания вдоль оси  $z$  около положения равновесия, жестко привязаны к своему местоположению и выстраиваются в регулярную структуру в поперечном сечении, аналогично тому, как это наблюдалось в эксперименте [6] по пленению заряженных микронных частиц алюминия в квадрупольной ловушке при низкочастотной модуляции напряжения. Увеличение плотности частиц в слое при динамической стабилизации связано с тем, что при  $\Omega > 2\Omega_0$  на пылевые частицы в неоднородном электрическом поле в слое



**Рис. 3.** Диаграмма устойчивости частиц в зависимости от безразмерных параметров  $p$  и  $q$  при наличии трения. Кривые 1, 2 — границы резонансного возбуждения частиц соответственно с меньшей и большей массой.

объемного заряда действует небольшая средняя сила динамического давления

$$F(z) = Q^2 m^2 (dE^2/dz) / 4M\Omega(\Omega^2 + v^2)^{1/2} \sim m^2 Q E \Omega_0^2 / \Omega^2.$$

Эта сила направлена к центру ловушки и обеспечивает устойчивость структуры, она аналогична силе ВЧ-давления, удерживающей ионы в радиочастотной ловушке Пауля [7] или электроны в плазме в неоднородном СВЧ-поле [8]. Сила динамического давления противодей-

стствует силе ионного трения и термофореза, которые вызывают уход частиц из ловушки и разрушение структуры. Нижние слои частиц в приэлектродном слое находятся в более сильном электрическом поле, поэтому на них действует большая сила динамического давления. Это вызывает при гармоническом воздействии перестройку пылевой структуры, перемещение частиц из нижних слоев и увеличение плотности частиц в верхних слоях. Выраженный эффект динамической стабилизации, повышения плотности частиц в слое и возникновение нового динамического равновесия в пылевой плазме ранее не наблюдались.

Раскачка параметрических колебаний с большой амплитудой начинается только при глубине модуляции большей 0.3. Экспериментальные значения резонансных частот  $f = \Omega_0/\pi$  лежат в диапазоне 16–24 Hz, что связано с полидисперсностью используемых частиц. Эти значения резонансных частот согласуются с частотами, которые были получены ранее с помощью различных способов электрического возбуждения, а также при периодическом воздействии лазерного излучения на частицы [4]. При заданном давлении буферного газа пороговая глубина модуляции определяется размером или массой частиц:  $h_l \sim a^4$ , так как  $Q \sim a$ ,  $\Omega_0 \sim a^{-2}$ , а  $v \sim a^2$  при  $l \gg a$ , где  $l$  — длина свободного пробега молекул газа. При глубине модуляции  $h > h_l$  возбуждаются все частицы, у которых отношение  $Q/M$  лежит на рабочей характеристике  $p/q = 2/h$  в зоне неустойчивости (рис. 3). Поскольку порог возбуждения частиц с малой массой меньше, чем тяжелых, и на диаграмме лежит левее (рис. 3, кривая 1), то при уменьшении частоты возбуждения при заданной модуляции в первую очередь возбуждаются легкие частицы. Если модуляция достаточно сильная, то затем возбуждаются и тяжелые частицы (рис. 3, кривая 2) с массой  $M_{\max}$ . Таким образом, изменяя частоту  $\Omega$  в пределах расстройки, можно резонансно возбуждать частицы в приэлектродном слое ВЧ-разряда с массой  $M < M_{\max}$ , с определенным разбросом по массе  $\Delta M$ . При увеличении крутизны рабочей характеристики, т.е. уменьшении  $h$ , интервал масс  $\Delta M$  сужается. В горизонтальном слое ВЧ-разряда полидисперсные частицы распределены по массе неоднородно, что связано с наличием градиента плотности заряженных частиц по радиусу и неоднородностью тепловыделения [9]. В центрах находятся более легкие пылевые частицы, а более тяжелые частицы расположены на периферии ближе к стенкам трубки. Поэтому при уменьшении частоты возбуждения вначале раскачиваются колебания легких частиц в центре слоя, а только затем тяжелых частиц на периферии. На резонансной

частоте при глубине модуляции, равной  $m = 0.3$ , амплитуда колебаний достигала 1–1.5 mm, что существенно превышало расстояние между слоями. Ограничение амплитуды колебаний указывает на наличие существенных нелинейностей в системе при значительных отклонениях от положения равновесия. Систему уже нельзя описывать в линейном приближении, потенциальная яма в направлении оси  $z$  не является параболической. Необходимо учитывать зависимость плотности ионов и заряда пылевых частиц  $Q$  от распределения потенциала в слое объемного заряда.

Таким образом, используя низкочастотное параметрическое возбуждение плазмы ВЧ-разряда, можно осуществить при малой глубине модуляции динамическую стабилизацию пылевых частиц, которая приводит к перестройке структуры, увеличению ее плотности и возникновению нового динамического равновесия. При амплитуде модуляции больше критической наблюдается параметрический резонанс в ограниченной полосе частот возбуждения. Порог возбуждения при этом зависит от массы частиц и от плотности газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ № 06-08-00499-а.

## Список литературы

- [1] *Василяк Л.М., Васильев М.Н., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортков В.Е.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 19. С. 35–40.
- [2] *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Обвивальнева А.А., Поляков Д.Н.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 3. С. 87–94.
- [3] *Ivlev A.V. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 4060–4063.
- [4] *Piel A., Melzer A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. V. 44. P. R1–26.
- [5] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Наука, 1965.
- [6] *Wuerker R.F., Langmuir R.V.* // Appl. Phys. 1959. V. 30. P. 342.
- [7] *Пауль В.* // УФН. 1990. Т. 160. В. 12. С. 109–127.
- [8] *Горбунов Л.М.* // УФН. 1973. Т. 109. В. 4. С. 631–665.
- [9] *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортков В.Е.* // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. № 5. С. 1166–1172.