

ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В ПЛАЗМЕ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ВЫДЕЛЕНИИ ТЕПЛА

Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, Д. Н. Поляков, В. Е. Форттов*

*Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 ноября 2004 г.

Экспериментально исследованы термофоретические эффекты в пылевых структурах при неоднородном тепловыделении в плазме тлеющего и высокочастотного разрядов. Форма плазменно-пылевых структур из полидисперсных частиц микронного размера зависит от тепловыделения в плазме. Силы термофореза, связанные с тепловыделением, могут привести к образованию различных пространственных форм пылевых структур. Предложена теоретическая модель разделения частиц по размерам под действием радиальных электрических и термофоретических сил. Вычисленные по данной модели значения токов тлеющего разряда, при которых происходит разделение частиц, соответствуют экспериментально наблюдаемым.

PACS: 52.25.-b

1. ВВЕДЕНИЕ

Форма плазменно-пылевых структур из частиц микронного размера зависит от тепловыделения в плазме [1, 2]. Было обнаружено, что форма таких структур в тлеющем разряде зависела от протекающего тока [3]. В работе [2] показано, что неоднородное распределение тока разряда приводит к образованию градиентов температуры и к возникновению сил термофореза, действующих на пылевые частицы. Воздействие на плазменно-пылевые структуры сил термофореза, связанных с тепловыделением, может привести к образованию различных пространственных форм пылевых структур: кольцевых [3] либо более сложных структур, состоящих из двух облаков пыли [1]. Форма пылевого облака определяется параметрами потенциальной ловушки, которая образована суперпозицией различных сил. Существование различных плазменно-пылевых форм и структур в основном зависит от условий равновесия в радиальном направлении, так как характерная глубина потенциальной ямы в радиальном направлении существенно меньше, чем в продольном [2]. Радиальное амбиполярное электрическое поле, действующее на заряженные пылевые частицы, направ-

лено к оси разрядной трубки. Силы, толкающие пылевые частицы к стенкам, вызваны ионным трением и силой термофореза, которая пропорциональна градиенту температуры газа и направлена в ту же сторону, что и поток тепла, обусловленный теплопроводностью нейтрального газа. В большинстве экспериментов, в которых пылевые частицы удерживались в заряженных слоях, силы ионного трения существенно меньше сил термофореза. С помощью сил термофореза можно менять положение и форму пылевого облака и удалять пылевые частицы из разряда, а также создавать плазменные термофоретические ловушки, например, при криогенных температурах [1, 4]. В данной работе экспериментально исследованы термофоретические эффекты в пылевых структурах при изменении тепловыделения в плазме тлеющего и высокочастотного (ВЧ) разрядов, связанном с изменением тока и вкладываемой в разряд мощности, и определены условия образования сложных структур при использовании полидисперсных пылевых частиц.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Плазменно-пылевые структуры исследовались в первой страте тлеющего разряда в разрядных труб-

*E-mail: lab852@ihed.ras.ru

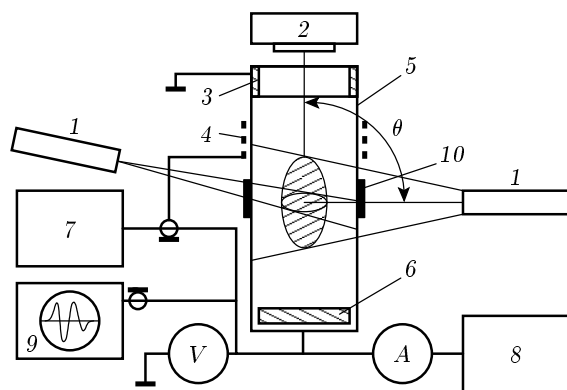


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — полупроводниковый лазер; 2 — видеокамера; 3 — кольцевой анод; 4 — сетчатый электрод; 5 — стеклянная разрядная трубка; 6 — катод; 7 — ВЧ-генератор; 8 — источник постоянного напряжения; 9 — осциллограф; 10 — микрорезервуар; θ — угол видеосъемки; А — амперметр; V — вольтметр

как диаметром 2 см и в двойном слое ВЧ-разряда (13.56 МГц) в разрядных трубках диаметрами 2 и 5 см (рис. 1). Анодом в тлеющем разряде служил заземленный цилиндрический электрод, а в ВЧ-разряде — сетка, расположенная снаружи разрядного устройства. Эксперименты проведены в воздухе при давлении 0.1–0.2 Торр. Для образования плазменно-пылевых структур использовались частицы окиси магния диаметром 5–20 мкм и частицы алюминия диаметром 1–5 мкм. Исследования свойств таких структур проводились при изменении тока тлеющего разряда от 0.4 до 4 мА и напряжения в ВЧ-разряде от 100 до 150 В. Измерялись значения напряжения и тока тлеющего разряда и напряжение на активном электроде ВЧ-разряда с помощью осциллографа TDS-3032. Плазменно-пылевые структуры исследовались с помощью ССД-видеокамеры LCL-18 (экспозиция кадра 1/1000 с) под различными углами θ в отраженном лазерном излучении при подсветке пылевого образования взаимно перпендикулярными лазерными «ножами» с каустикой 150 мкм. Камера оснащена оптической системой с 22-кратным увеличением изображения. Регистрация видеоизображения проводилась в поперечном и продольном сечениях трубки через окно, расположенное в торцевой части разрядной трубки. Полученные видеоизображения оцифровывались и подвергались компьютерной обработке для увеличения степени контрастности. Для создания внешнего градиента температурного поля в разрядной трубке диаметром 5 см использовались два микрохолодиль-

ника длиной 2.5 см (термоэлементы Пельтье), которые располагались на боковой поверхности трубки.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Тлеющий разряд

В тлеющем разряде плазменно-пылевые структуры из микрочастиц образуются в стратах. Исследовалась центральная часть первой от катода страты в ее поперечном сечении. Форма образующихся структур зависит от тока разряда, как наблюдалось в работах [2, 3]. При токах разряда $I = 0.4$ –1 мА наблюдалось образование упорядоченной структуры в виде эллипсоида с диаметром примерно треть или четверть диаметра трубки (рис. 2). Диаметр упорядоченной структуры растет с ростом тока и достигает размера светящейся области страты при токе более 4 мА. Толщина структуры в продольном сечении уменьшается с ростом тока (рис. 2). При токе $I > 1.6$ мА, образуется кольцевая структура, диаметр которой увеличивается, а ширина кольца уменьшается с увеличением тока (рис. 3). В присевой области при этом частицы отсутствовали, а толщина кольца слабо менялась с увеличением тока. Значения токов, при которых происходили переходы между различными формами пылевых структур, зависят от давления газа в разрядной трубке и размера пылевых частиц. Как впервые было показано в работе [2], переход от круга к кольцу в поперечном сечении упорядоченной пылевой структуры при повышении тока разряда определяется радиальным градиентом температуры при нагреве газа в трубке протекающим током.

Как видно на рис. 4, наличие частиц в плазме тлеющего разряда влияет на свойства окружающей плазмы и приводит к смещению вольт-амперных характеристик разряда. Напряжение разряда при том же токе при наличии плазменно-пылевых структур может как увеличиваться [5], так и уменьшаться (рис. 4). Повышение напряжения зависит от дополнительных потерь электронов и ионов на поверхности частиц пыли, от процесса зарядки частиц, от доли электронов, находящихся на частицах и не участвующих в переносе тока и в процессах ионизации в объеме. Уменьшение напряжения можно объяснить возникновением эмиссии электронов с поверхности частиц пыли под действием потоков фотонов и ионов, ускоренных в поле заряженной пылинки до энергии электронов T_e .

При увеличении степени полидисперсности частиц в тлеющем разряде можно при понижении дав-

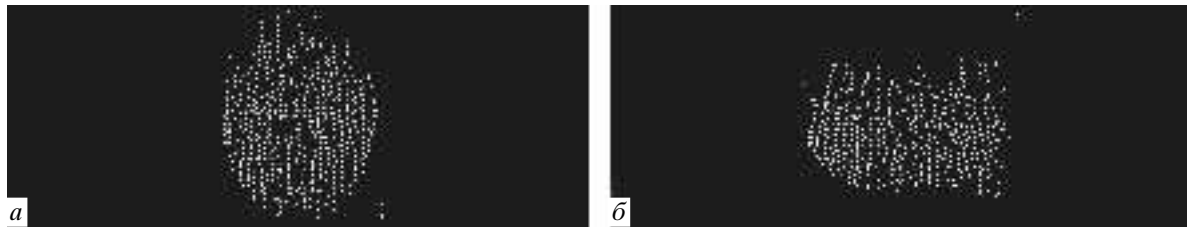


Рис. 2. Продольное изображение плазменно-пылевой структуры из частиц Al ($\theta = 0^\circ$) в тлеющем разряде: $a - I = 0.4$ мА; $b - I = 0.8$ мА. Поперечный размер кадра соответствует наружному диаметру разрядной трубки

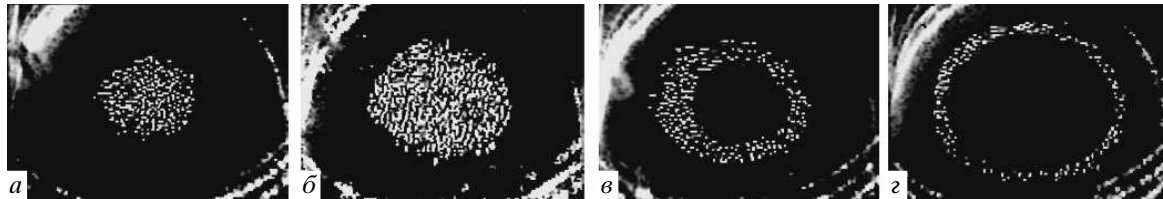


Рис. 3. Поперечное изображение плазменно-пылевой структуры из частиц Al ($\theta = 45^\circ$) в тлеющем разряде: $a - I = 0.4$ мА; $b - I = 1.2$ мА; $v - I = 1.6$ мА; $z - I = 3$ мА. Поперечный размер кадра соответствует внутреннему диаметру разрядной трубки

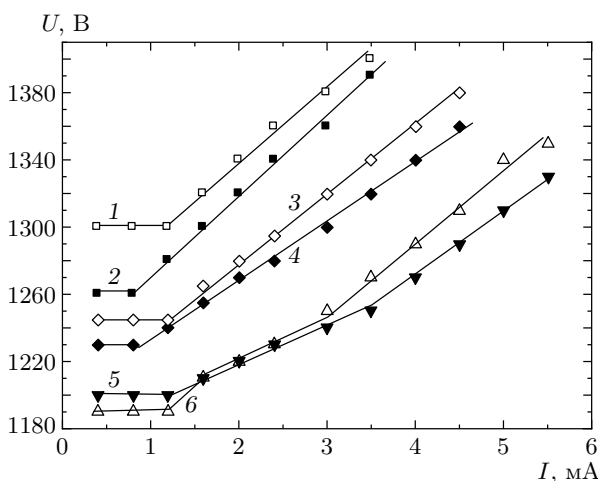


Рис. 4. Влияние пылевых структур из частиц Al на вольт-амперные характеристики тлеющего разряда при различном давлении воздуха: 1, 2 — $P = 0.1$ Торр; 3, 4 — $P = 0.15$ Торр; 5, 6 — $P = 0.2$ Торр. Темные значки соответствуют разрядам с частицами пыли, светлые значки — без частиц пыли

ления газа получить сложную плазменно-пылевую структуру, форма которой определяется величиной тока разряда, где наблюдается разделение частиц в поперечном сечении по радиусу трубки. Например,

для частиц MgO, которые имели максимумы распределения по размерам (дисперсионного распределения) в областях 5 и 15–20 мкм, при токах тлеющего разряда 0.4 мА наблюдается почти однородная пылевая структура в центре трубки. С увеличением тока разряда до 1.6 мА одна часть частиц остается в центре трубки, а другая часть частиц смещается к стенкам, в результате чего образуются два пылевых облака (рис. 5). При дальнейшем повышении тока до 2.4 мА все частицы уходят к стенкам и образуют кольцевую структуру. Возникновение такой сложной структуры пылевого облака в разряде имеет очень узкий диапазон по току, составу и давлению плазмообразующего газа и зависит от полидисперсности применяемых частиц.

Анализ результатов. Рассмотрим модель разделения частиц по размерам под действием радиальных электрических и термофоретических сил, которая описывает наблюдаемые экспериментальные данные. При низком давлении газа сила термофореза равна

$$F_T = -4PLa^2\nabla T/T,$$

где P — давление нейтрального газа, T — температура газа, L — длина свободного пробега молекул, a — радиус пылевой частицы, причем $L \gg a$. В плазме тлеющего разряда сила радиального амбиполярного

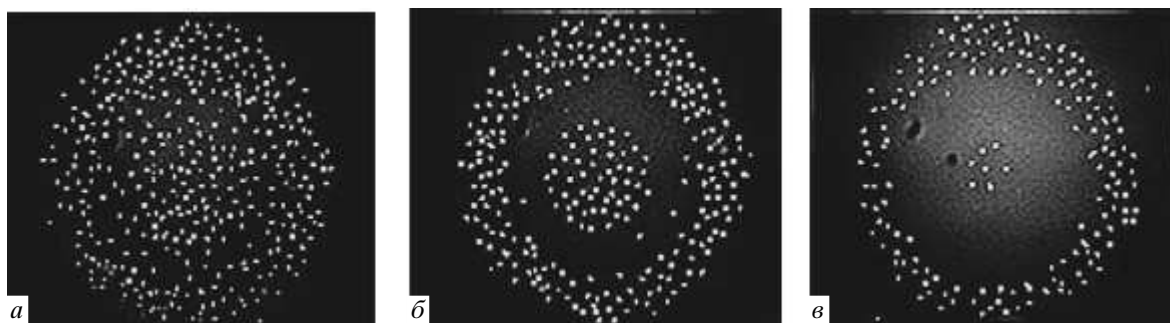


Рис. 5. Фотографии поперечного сечения плазменно-пылевой структуры из частиц MgO в тлеющем разряде ($\theta = 90^\circ$): а — $I = 1$ мА; б — $I = 1.4$ мА; в — $I = 1.8$ мА

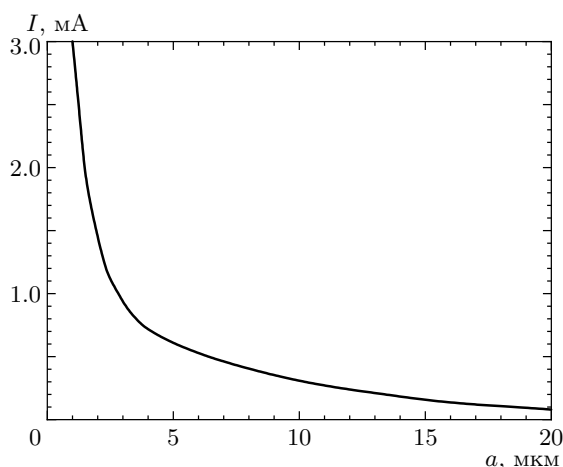


Рис. 6. Граница перехода частиц в кольцевые структуры в поперечном слое тлеющего разряда

электрического поля, удерживающего заряженные пылевые частицы, равна

$$F_E = ZkT_e \nabla n/n,$$

где n — концентрация электронов, eZ — заряд частицы. Равновесие пылевых частиц определяется их потенциальной энергией, которая зависит от размера частиц. Потенциальная энергия определяется силами радиального амбиполярного электрического поля и силами термофореза, которые пропорциональны соответствующим градиентам, поэтому потенциальная энергия может быть записана в виде [2]

$$U(r) = -\alpha [1 - J_0(2.4r/R)] - \beta \ln J_0(2.4r/R),$$

где $\alpha = PLa^2IE/(2\lambda T_w)$, $\beta = ZT_e$, λ — коэффициент теплопроводности газа, E — напряженность продольного электрического поля в страте, T_w — тем-

пература стенки. В ионизационно-диффузной модели распределение концентрации электронов как в положительном столбе, так и в страте описывается функцией Бесселя $J_0(2.4r/R)$, где R — радиус трубки, поэтому сила F_E вблизи оси пропорциональна радиусу и растет более резко при приближении частицы к стенке трубки. Если тепловыделение в плазме осесимметрично, то сила термофореза вблизи оси также пропорциональна радиусу. Разделение на две структуры связано с наличием частиц разных размеров, на которые действуют различные по величине силы термофореза и электрические силы. Радиальное пространственное разделение частиц на фракции связано с различной зависимостью сил термофореза и электрических сил от размера частиц. Сила термофореза пропорциональна сечению пылевой частицы, а сила электрического поля — заряду частицы или ее радиусу. Минимум потенциальной энергии для частиц большего размера расположен ближе к стенке трубки. При заданных давлении газа и токе разряда пылевые частицы, размер которых больше некоторого значения, переходят в кольцо. Частицы меньшего размера сосредоточены вблизи оси трубки. Частицы большего размера выталкиваются силами термофореза из потенциальной ямы, которая имеет конечную глубину, и уходят на стенку. Из условия появления минимума потенциальной энергии определена граница перехода частиц в кольцевые структуры в поперечном слое тлеющего разряда. На рис. 6 показана вычисленная зависимость тока тлеющего разряда в воздухе, при котором частицы переходят в кольцо, от размера частиц. Значения напряженности продольного электрического поля в страте взяты из экспериментов. Кольцевая структура наблюдается при значениях плотности тока, лежащих выше кривой. Если размер частиц и значения тока находятся ниже этой кривой, то час-

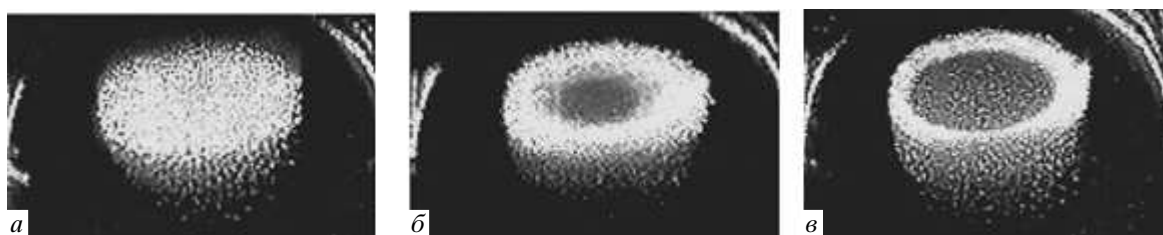


Рис. 7. Фотографии поперечного сечения плазменно-пылевой структуры ($\theta = 45^\circ$) в ВЧ-разряде в разрядной трубке диаметром 2 см (поперечный размер кадра равен диаметру разрядной трубки). Кадры *a*, *b*, *c* соответствуют амплитудам напряжения 100, 110, 120 В

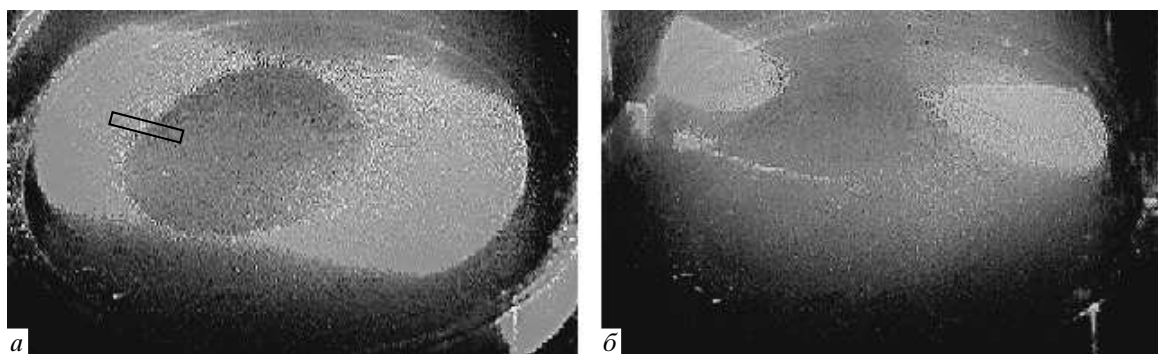


Рис. 8. Фотографии плазменно-пылевой структуры с центральной зоной, свободной от частиц (напряжение 150 В, $\theta = 45^\circ$) в ВЧ-разряде в разрядной трубке диаметром 5 см (поперечный размер кадра соответствует диаметру разрядной трубки): *a* — поперечное сечение; *b* — продольное сечение

тицы сосредоточены вблизи оси трубки. Данная модель описывает разделение частиц по размерам, наблюдаемое в экспериментах с полидисперсными частицами в тлеющем разряде. Значения токов, вычисленные по данной модели, соответствуют экспериментальным данным. Следует отметить, что на частицы большего размера (15–20 мкм) дополнительно действует сила ионного трения, которая в данном рассмотрении не учитывалась и которая, как и сила термофореза, способствует уходу частиц на стенку. С помощью сил термофореза можно менять положение и форму пылевого облака и удалять пылевые частицы из разряда.

3.2. ВЧ-разряд

Похожая зависимость формы плазменно-пылевой структуры от тепловыделения наблюдается в ВЧ-разряде. Первоначально такая структура формируется над плоскостью активного электрода в слое объемного заряда. Увеличение напряжения ВЧ-разряда приводит к образованию в центре плаз-

менно-пылевой структуры зоны свободной от частиц (рис. 7–9), что связано с увеличением осесимметричного энерговклада в ВЧ-разряде, которое фиксируется по увеличению яркости свечения в этой области. Обнаружено, что когда характерные расстояния между частицами в слое менее 0.2 мм, они растут с увеличением ВЧ-мощности. Аналогичное поведение ранее наблюдалось в тлеющем разряде при увеличении разрядного тока [3]. Последующее увеличение мощности приводит к переходу частиц в кольцевую структуру (рис. 9). Если первоначальное расстояние между частицами более 0.2 мм, то дальнейшего увеличения расстояния между ними не происходит и кольцевая структура при увеличении мощности образуется быстрее. Светлая область изображения на рис. 9 соответствует области повышенного энерговклада (увеличение интегрального свечения плазмы).

Охлаждение стенок разрядной трубки на 20 К в ВЧ-разряде приводит к тому, что пылевая структура, находящаяся между микрохолодильниками, вытягивается под действием сил термофореза в ради-

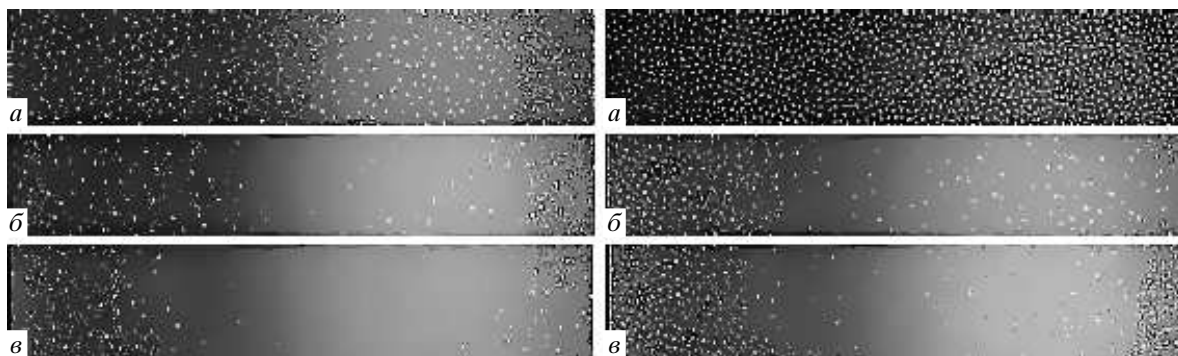


Рис. 9. Фрагменты изображения плазменно-пылевой структуры из частиц Al ($\theta = 90^\circ$) в ВЧ-разряде при напряжениях 100 В (*a*), 105 В (*б*), 110 В (*в*) для разной плотности частиц (правый и левый столбцы). Поперечный размер кадра примерно соответствует выделенной области на рис. 8*a*

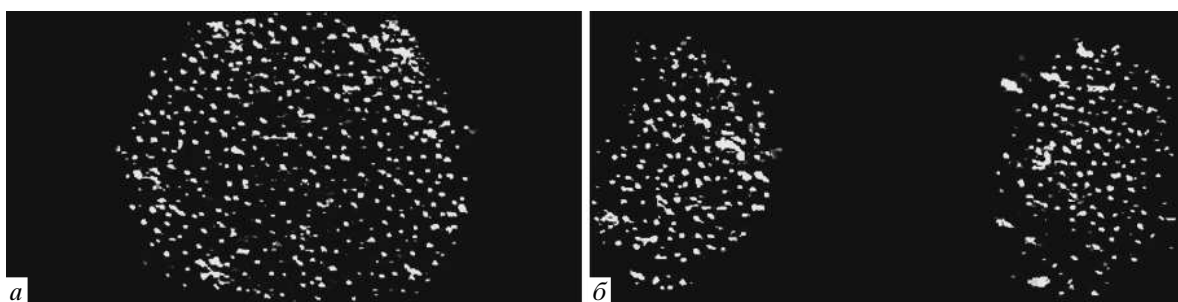


Рис. 10. Разделение плазменно-пылевой структуры в ВЧ-разряде при охлаждении разрядной трубки с двух сторон: *a* — до охлаждения; *б* — после охлаждения

альном направлении (рис. 10). В поперечном сечении она превращается в эллипс, вытянутый к холодным стенкам, а затем облако из пылевых частиц разделяется на два образования, которые притягиваются к холодным стенкам. Ранее аналогичный эффект был обнаружен нами в стратах тлеющего разряда при охлаждении разрядной трубки с двух сторон [1]. Частицы под действием радиального температурного градиента удерживаются в новом равновесном состоянии. В результате суперпозиции сил термофореза и продольного электрического поля образуется новая ловушка. Подбирая температурное поле, можно создать пылевые облака с разными объемными формами. Используя экспериментальные данные по разделению пылевого облака на две части, можно оценить энергию связи между частицами в структуре. Предположим, что исходное пылевое заряженное облако имеет форму шара и под действием сил термофореза разделяется на две равные сферические части и расходится в радиальном амбиполярном электрическом поле. Энергию связи оценим из разницы

потенциальных энергий заряженных облаков и произведенной работы сил термофореза по перемещению облаков в электрическом поле. Примем, что при разделении облака потенциалы обеих частей одинаковы и равны плавающему потенциалу φ плазмы. Изменение электростатической энергии равно

$$\Delta W = 0.5\Delta C\varphi^2 + 0.4R_C\varphi^2,$$

где ΔC — изменение емкости системы сфер, R_C — радиус исходного облака. Из эксперимента получено, что диаметр исходного облака равен 5 мм, число частиц в нем $N \approx 6000$, а расстояние, на которое расходятся сферы, примерно равно их диаметру d . Число разорванных связей $\Delta N \approx 400$ примерно равно количеству частиц в поперечном сечении в момент разрыва. Произведенная работа состоит из работы по перемещению избыточного заряда $\Delta C\varphi^2$ на двух сферах в электрическом поле и работы A сил термофореза,

$$A = \frac{N\alpha\Delta T d^2}{4T_w\Lambda^2},$$

где $\Lambda = R/2.4$. Эта работа расходуется на изменение электростатической энергии ΔW и на энергию $\Delta N\epsilon$ разрыва связей:

$$\Delta C\varphi^2 + A = \Delta W + \Delta N\epsilon.$$

Вычисленная энергия связи $\epsilon \approx 3$ кэВ. Полученная величина сопоставима с энергией связи пылевой молекулы, вычисленной в работе [6].

4. ВЫВОДЫ

Силы термофореза, связанные с тепловыделением в разряде, приводят к образованию сложных пространственных пылевых структур. Можно создавать тепловые ловушки, которые могут быть использованы для создания плазменно-пылевых образований различной конфигурации. Измеренные вольт-амперные характеристики показывают, что пылевые частицы изменяют свойства разряда. Действие сил термофореза приводит к разделению частиц по размерам, что может быть использовано в практических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. С. Зимнухов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **123**, 493 (2003).
2. В. В. Балабанов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **119**, 86 (2001).
3. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ТВТ* **38**, 701 (2000).
4. В. Е. Фортов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. С. Зимнухов, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ДАН* **382**, 50 (2002).
5. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **121**, 609 (2002).
6. Г. Е. Морфилл, В. Н. Цытович, Х. Томас, *Физика плазмы* **29**, 3 (2003).