

КООПЕРАТИВНЫЙ ХАРАКТЕР ОБРАЗОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ПЛАЗМЕ

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

*Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
127412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 6 сентября 2001 г.

Экспериментально исследованы процессы образования и разрушения упорядоченных пылевых структур в тлеющем разряде. Начальная фаза построения упорядоченной структуры связана с построением ее кооперативного поля и определяется количеством частиц и наличием «центров кристаллизации». После построения структуры она сама оказывает влияние на локальные свойства плазмы и вольт-амперные характеристики разряда. Восстановление структуры после слабых воздействий происходит при локальном равновесии, а после интенсивных воздействий высоковольтными наносекундными импульсами определяется величиной флуктуаций и степенью хаотизации в системе.

PACS: 52.25.-b

Плазма с заряженными пылевыми частицами является объектом с сильным кулоновским взаимодействием, который позволяет получать рекордно высокие параметры неидеальности

$$\gamma = Z^2 e^2 n^{1/3} / kT \sim 10^5$$

за счет значительной величины заряда макрочастиц Z . Образование структур из пылевых частиц микронного размера наблюдалось экспериментально в неравновесной плазме низкого давления в высокочастотном и в тлеющем разрядах [1], а также под действием интенсивного УФ и радиоактивного излучений [2]. Частицы приобретают большой отрицательный заряд 10^5 – 10^6 зарядов электрона, соответствующий плавающему потенциалу плазмы, а диссипативные пылевые структуры могут образовать кулоновский кристалл [1]. В настоящее время изучены внешние условия и свойства окружающей плазмы, при которых можно получить упорядоченные плазменно-пылевые структуры. Каким образом происходит упорядочение пылевых частиц с сильным кулоновским взаимодействием и плазменная конденсация пока неизвестно, процесс перехода от хаоса к порядку в таких системах не понят и не исследован ни экспериментально, ни теоретически. Возникающая

устойчивая структура в свою очередь должна изменить локальные свойства окружающей плазмы, распределение параметров в ней, электрические поля и потоки заряженных частиц. Ранее в большинстве работ предполагалось, что свойства фоновой плазмы практически не меняются. Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования образования и разрушения структур заряженных макрочастиц, силового воздействия на эти структуры и изменения свойств плазмы.

Структуры из частиц Al_2O_3 размером 3–5 микрон, полидисперсных частиц MgO размером 5–20 мкм и полых стеклянных сфер размером 20–60 мкм исследовались в тлеющем разряде в гелии, аргоне, азоте, воздухе и их смесях. Эксперименты проводились в цилиндрических разрядных трубках диаметром 1 и 2 см, а также в конической разрядной трубке длиной 50 см с переменным диаметром от 1.5 до 4 см [3]. Поскольку для положительного столба тлеющего разряда выполняется правило подобия, согласно которому приведенная напряженность электрического поля E/P определяется произведением Pd (где d — диаметр разрядной трубки, P — давление газа), в конической трубке продольное электрическое поле меняется по длине, в нижней узкой части оно максимальное и ослабевает по мере подъема по высоте, поэтому частицы

*E-mail: lab852@hedric.msk.su

с различной массой могут найти подходящее поле, в результате чего разные частицы локализируются в разных сечениях разрядной трубки и возникает разделение частиц по размерам, зарядам и массам вдоль трубки. При использовании цилиндрической трубки диаметром 2 см в ее стенки были вклеены два металлических кольца того же диаметра, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга, которые использовались для измерения среднего поля в разряде и на которые подавались наносекундные импульсы высокого напряжения для воздействия на пылевые структуры. Структуры частиц исследовались с помощью видеокамеры при подсветке двумя перпендикулярными лазерными «ножами» с длиной волны 0.63 мкм и каустикой 150 мкм. Фиксировалось изображение частиц в продольном и поперечном сечениях трубки. Структуры также исследовались с помощью оптического микроскопа. Измерялись среднее поле вдоль столба разряда с помощью зондов, напряжение между металлическими кольцами, ток и напряжение на разрядной трубке, геометрические характеристики пылевой структуры в зависимости от тока разряда и давления газа.

Хорошо выраженная трехмерная структура из пыли образуется в стратах при $Pd < 1$ Торр·см. Число частиц в структуре зависит от условий и может варьироваться от нескольких десятков до нескольких тысяч, характерные расстояния между слоями 0.15–0.25 мм, расстояния между частицами в слое в горизонтальной плоскости обычно в 1.5–2 раза больше и увеличиваются с увеличением размера частиц, диаметра трубки и силы проходящего тока. В воздухе условия образования упорядоченного кристалла достаточно жесткие, при давлении 0.2 Торр диапазон разрядного тока составляет 0.3–1 мА, а в смесях воздуха с аргоном при давлениях 0.1–0.5 Торр — 0.3–3 мА. При последующем росте тока до нескольких мА кристалл разупорядочивается и напоминает жидкость. Частицы при этом отходят к стенкам разрядной трубки и наблюдаются кольцеобразные структуры, висящие в стратах [3, 4].

Образование четкой пространственной структуры происходит, как правило, когда в страте сначала выстраиваются несколько частиц, а затем к ним последовательно подстраиваются остальные. Начальные частицы играют роль «центров кристаллизации». Они локализируются в невозмущенном поле страты и выстраиваются в ее потенциальной яме [4]. При постепенном увеличении числа пылевых частиц они последовательно заполняют весь объем страты. В результате образуется простран-

ственно упорядоченная структура, коллективное поле которой является суперпозицией электрического поля страты и пространственных полей отдельных пылевых частиц. Добавление нескольких частиц слабо искажает это коллективное поле, и они достраиваются к структуре. Пространственный порядок расположения частиц в уже образовавшейся плазменно-пылевой структуре определяется кулоновскими силами, несмотря на то что радиус экранирования Дебая, рассчитанный по параметрам «фоновой» плазмы, в несколько раз меньше расстояния между частицами. Кооперативное поле пылевой структуры по величине соизмеримо с полем страты, поэтому если в страту ввести сразу много хаотически движущихся пылевых частиц, среднее поле которых сильно флуктуирует и искажает локальное поле в страте, то упорядоченные стабильные структуры не образуются. При этом частицы хотя и удерживаются в страте, но хаотически перемещаются по всему ее объему.

Кооперативное поведение, способствующее возникновению плазменно-пылевой структуры, согласуется с известными принципами неравновесной термодинамики, когда возникновение и самоорганизация диссипативных структур носят пороговый характер [5]. При термодинамическом равновесии вероятность того, что макроскопическое число частиц спонтанно организуется в регулярный поток или сфазированный коллектив, пренебрежимо мала. Система может образовать упорядоченные структуры только вследствие того, что внешние ограничения (градиент температуры, электрическое поле, поле излучения) удерживают систему в неравновесном состоянии. Новая структура является результатом развития неустойчивости и возникает из флуктуаций [5].

Коллективное действие поля пылинок на процессы, происходящие в страте, может быть весьма значительным, так как заряд пылинок в единице объема сравним с концентрацией электронов в самой страте (10^8 – 10^9 см⁻³). Упорядоченный кристалл изменяет не только электрические поля в самой страте, но и свойства прилегающей плазмы на расстояниях, сравнимых с размером кристалла. При прохождении тока через макрокристалл наблюдается образование светящихся плазменных «струй» над кристаллом со стороны анода (рис. 1). По-видимому, электроны при движении вдоль «каналов», образованных соседними параллельными цепочками заряженных макрочастиц, испытывают скользящие столкновения и зеркальные отражения и удерживаются в этих каналах. Канализованные электроны

Рис. 1. Светящиеся «струи» над упорядоченной пылевой структурой. Продольное сечение, тлеющий разряд в воздухе, ток — 0.5 мА

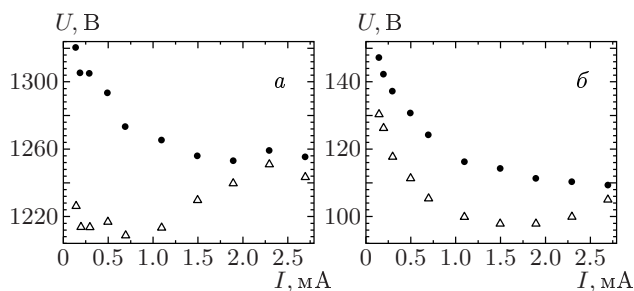


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда (а) и стратифицированного столба разряда между кольцами (б) со стеклянными микросферами (точки) и без них (треугольники). Давление воздуха 0.2 Торр

ускоряются при прохождении через кристалл аналогично тому, как это происходит в твердом теле [6], и вызывают дополнительное возмущение плазмы в виде светящихся нитей над кристаллом.

Образовавшиеся пылевые структуры влияют и на другие свойства разряда, в частности, на вольт-амперные характеристики. ВАХ положительного столба с неподвижными стратами при давлении воздуха 0.2–0.5 Торр со структурами из стеклянных микросфер и без них измерялась между металлическими кольцами в разрядной трубке диаметром 2 см. При всех давлениях напряжение

между кольцами в присутствии макрочастиц больше, чем в разряде без частиц (рис. 2а, б). Разница между двумя ВАХ при фиксированном токе при малом количестве частиц в структуре составляет 5–10 В, при большом количестве частиц в структуре она увеличивалась до 20–30 В, что, по-видимому, связано с дополнительной гибелью электронов на частицах. Большая гибель электронов на макрочастицах при малых токах может привести к погасанию разряда. При минимально возможном разрядном токе был обнаружен релаксационный режим горения разряда, когда разряд периодически тухнет и зажигается с периодом около секунды. Период колебаний уменьшается с повышением тока разряда. Эти колебания можно объяснить так: при попадании частиц в разряд появляется дополнительный канал гибели электронов на частицах, для поддержания разряда требуется большее напряжение, чем имеется, и разряд гаснет. Пылевые частицы падают и уходят на стенки. Разряд зажигается снова. В разряде происходит зарядка частиц, пылевая структура восстанавливается и процесс повторяется.

При разрушении пылевой структуры ее повторное восстановление зависит от характера воздействия. При медленных слабых воздействиях, например, тепловых [4] или электрических [7], структура сдвигается в пространстве, при этом ее часть может деформироваться или разрушиться. После воздействия разрушенная часть структуры постепенно достраивается к сохранившейся части. Если возмущающие процессы менее интенсивны, чем процессы, которые формируют равновесие пылевой структуры, то в системе сохраняется с определенной степенью точности локальное равновесие. В противоположном случае при интенсивных воздействиях структура полностью разрушается и хаотизируется. Восстановление структуры из хаоса уже не будет определяться только локальным равновесием. Если нет начальной «затравки», к которой достраивается структура, то образование упорядоченной структуры будет зависеть от уровня флуктуаций. Нужна одна или несколько достаточно мощных макроскопических флуктуаций, чтобы вслед за неустойчивостью возникла новая упорядоченная структура.

Для интенсивного воздействия на упорядоченную пылевую структуру мы использовали наносекундные высоковольтные импульсы напряжения. Так как длительность импульсов очень мала, то за время воздействия импульсного электрического поля смещение частиц в структуре пренебрежимо мало. Пылевая структура создавалась в стра-

те между двумя металлическими кольцами в цилиндрической разрядной трубке (рис. 3а). На кольца через разделительные конденсаторы подавались импульсы напряжения отрицательной полярности, длительностью 40 нс и амплитудой 10 кВ с частотой следования 1–100 Гц. После воздействия одного импульса происходило небольшое колебание частиц около своего устойчивого состояния. При импульсно-периодическом воздействии с частотой около 10 Гц порядок в структуре нарушался, а при большей частоте частицы разбегались по всему объему и начинали хаотически двигаться с большими скоростями (рис. 3б). После снятия наносекундного напряжения частицы в течение нескольких секунд собираются в страте. Число частиц в новой структуре всегда превышало начальное, что связано с увлечением большего числа частиц в процесс построения. Количество возвращающихся частиц растет с ростом интенсивности воздействия. В том случае, когда число частиц после окончания воздействия наносекундных импульсов оказывалось меньше некоторого критического числа, частицы постепенно в течение нескольких секунд образовывали упорядоченную структуру (рис. 3в, г). Если их количество было слишком велико, то частицы удерживались в страте, но не выстраивались в упорядоченную структуру, при этом вид пылевого образования напоминал кипящую жидкость с хаотически двигающимися частицами. Такое хаотическое состояние могло быть устойчивым в течение длительного времени.

Разрушение структуры и разбегание частиц при наносекундном воздействии связано в первую очередь с увеличением их заряда. Высоковольтные наносекундные импульсы нарабатывают в плазме достаточно много высокоэнергетичных электронов с энергией в сотни эВ [8], которые быстро увеличивают заряд пылевых частиц, пропорциональный энергии электронов. Нейтрализация избыточного отрицательного заряда происходит намного медленнее, поскольку она определяется потоком ионов. В результате действия этого избыточного заряда происходит их кулоновское расталкивание. Хаотизация происходит постепенно от импульса к импульсу. Если за время между импульсами система пылевых частиц не успевает полностью вернуться к первоначальному упорядоченному состоянию, а это время зависит от величины разрушения структуры и составляет несколько секунд при полной хаотизации, то структура разваливается, что и наблюдается в эксперименте.

Таким образом, начальная фаза построения упорядоченной структуры связана с построением ее ко-

Рис. 3. Воздействие наносекундных импульсов на пылевой кристалл в тлеющем разряде в воздухе (поперечное сечение): *а* — до воздействия, *б* — во время воздействия при частоте следования импульсов 40 Гц, *в* — восстановление структуры после воздействия, *г* — упорядоченная структура после восстановления

оперативного поля и определяется начальным распределением электрического поля в плазме, количеством частиц, степенью их хаотизации и наличием «центров кристаллизации». После построения структура сама оказывает влияние на локальные свойства плазмы и разряда. Восстановление структуры после слабых воздействий происходит при локальном равновесии, а после интенсивных воздействий определяется величиной флуктуаций и степенью хаотизации в системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Нефедов, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, УФН **167**, 1215 (1997).
2. V. E. Fortov, V. I. Molotkov, A. P. Nefedov, and O. F. Petrov, Physics of Plasmas **6**, 1759 (1999).
3. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, ТВТ **38**, 701 (2000).
4. В. В. Балабанов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, ЖЭТФ **119**, 86 (2001).
5. А. И. Осипов, *Самоорганизация и хаос*, Знание, Москва (1986).
6. М. Томпсон, УФН **99**, 297 (1969).
7. A. Melzer, T. Trottenberg, and A. Piel, Phys. Lett. A **191**, 301 (1994).
8. Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, И. В. Филюгин, УФН **164**, 263 (1994).