

04

Параметрическое возбуждение и стабилизация пылевых структур в тлеющем разряде при воздействии электрическими импульсами наносекундной длительности

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

Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур РАН, Москва
E-mail: lab852@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 24 августа 2006 г.

Экспериментально исследованы параметрическое возбуждение резонансных колебаний пылевых частиц вследствие импульсного нагрева плазменных электронов, пространственная стабилизация частиц за счет локальной ионизации и разупорядочивание пылевой структуры из-за разрушения плазменной ловушки при повышении остаточной ионизации в разряде с ростом частоты воздействия.

PACS: 52.27.Lw, 52.80.Nc

Заряженные пылевые структуры с сильным взаимодействием в плазме являются новым объектом, который активно исследуется [1]. Эффективным методом изучения свойств является воздействие внешним электрическим полем и наблюдение за релаксацией системы к равновесному состоянию [2,3]. Реакция системы зависит от длительности и интенсивности электрического поля. Воздействие медленно меняющимися слабыми электрическими полями [2] приводит как к непосредственному силовому воздействию на граничные пылевые частицы, что вызывает их движение и частичную деформацию структуры, так и к слабому возмущению плазменной ловушки, удерживающей частицы. Уменьшая длительность импульса, можно реализовать условия, когда пылевые частицы не сдвигаются во время действия импульса, и воздействие на структуру будет определяться изменением параметров фоновой плазмы. В работе [3] для воздействия на пылевую структуру в страте тлеющего разряда (ТР) использовались высоковольтные импульсы напряжения

наносекундной длительности, подаваемые на дополнительные кольцевые электроды, внесенные в плазму внутри трубки. Такое интенсивное воздействие приводило к разрушению структуры и разбеганию пылевых частиц. Релаксация неупорядоченного пылевого облака к первоначальному состоянию позволила исследовать кооперативные эффекты при образовании плазменного кристалла. Для исследования свойств структуры без ее разрушения интенсивность воздействия в настоящих экспериментах была уменьшена, для чего использовался наносекундный разряд емкостного типа с изолированными внешними электродами, которые были расположены снаружи разрядной трубки диаметром 2 см напротив исследуемого объема. Исследовались упорядоченные структуры из полидисперсных частиц из алюминия размером $3\text{--}10\ \mu$ в стратах ТР и неустойчивые пылевые образования в положительном столбе ТР в воздухе при давлении $0.1\text{--}0.5\ \text{Torr}$. Импульсы напряжения отрицательной полярности длительностью 40 ns, амплитудой $10\text{--}20\ \text{kV}$ и с частотой следования импульсов $1\text{--}100\ \text{Hz}$ подавались либо на два кольцевых электрода, расстояние между которыми составляло 5 см, либо две металлические пластины шириной 1 см и длиной 10 см, расположенные вдоль разрядной трубки, что позволяло создавать дополнительное продольное либо поперечное электрическое поле. Наносекундные импульсы вызывают нагрев электронов и дополнительную ионизацию. При низкой частоте следования импульсов и низкой амплитуде можно нагревать электроны, что приведет к увеличению заряда на частицах без существенного увеличения средней концентрации электронов и ионов и без изменения структуры разряда. При увеличении интенсивности воздействия дополнительная ионизация будет оказывать дополнительное влияние на параметры плазмы и плазменную ловушку. Достаточно сильная ионизация может привести как к разрушению существующей плазменной ловушки, так и к образованию новой. Экспериментально были реализованы обе эти ситуации. Для проверки возможности образования новой ловушки и пространственной стабилизации пылевых частиц в ней был выполнен следующий эксперимент. Частицы инжестировались в положительный столб тлеющего разряда с быстро бегущими стратами, при этом они распределялись вдоль всего столба разряда без образования стабильной пылевой структуры. Мелкие частицы преимущественно двигались вверх, а крупные медленно падали вниз. На видеокадре их движение фиксируется как светящиеся треки (рис. 1, 1). Воздействие наносекундными импульсами в продольной

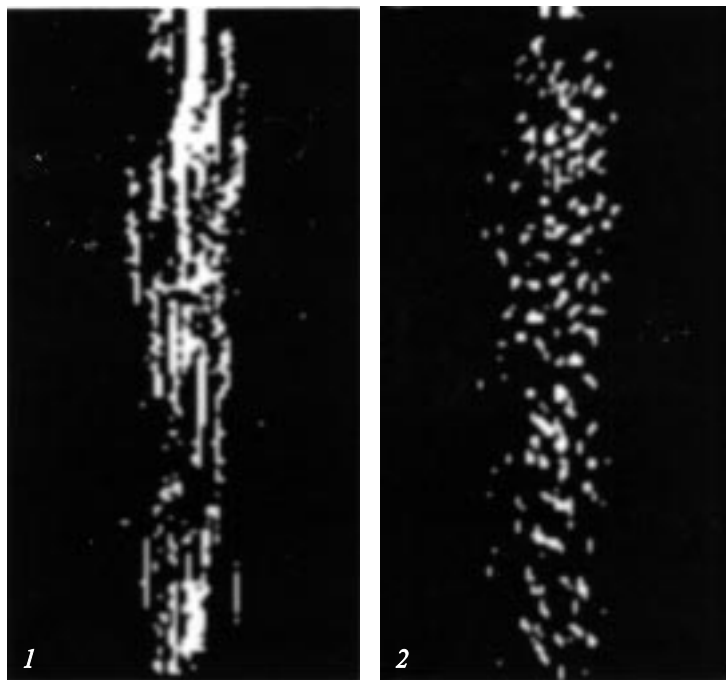


Рис. 1. Фотографии частиц в продольном сечении разрядной трубки (ширина изображения равна диаметру трубки): 1 — до воздействия в положительном столбе ТР, 2 — при воздействии наносекундными импульсами.

или поперечной конфигурации электродов стабилизирует частицы и уменьшает скорости их движения. При частоте следования импульсов выше 50 Hz наблюдается зависание частиц в области разряда между дополнительными электродами (рис. 1, 2). Наложение наносекундного разряда приводит к дополнительной локальной ионизации плазмы, локальным изменениям электрических полей и образованию плазменной ловушки в виде искусственной страты с продольным электрическим полем, достаточным для удержания и стабилизации частиц.

В других экспериментах наносекундные импульсы воздействовали на предварительно созданную пылевую структуру в страте ТР. Можно подобрать параметры наносекундных импульсов и частоту их следо-

вания таким образом, чтобы дополнительная ионизация не вызывала локального сильного возмущения плазмы. Воздействие на пылевые частицы в основном будет связано с увеличением их заряда Q за счет увеличения энергии электронов. Зарядка пылевых частиц электронами со средней энергией $\varepsilon \sim 10 \text{ eV}$ происходит за несколько микросекунд [1], а уменьшение отрицательного заряда частицы происходит за время $\tau \sim 10^{-4} \text{ s}$ под действием потока тепловых ионов. Это время определяет характерное время действия электрической силы QE со стороны локального электрического поля E ТР на пылевую частицу. Импульсы подавались на кольцевые электроды, и изменялась частота следования импульсов. При определенных частотах наблюдаются колебания пылевой структуры по направлению продольного электрического поля тлеющего разряда (рис. 2). При резонансной частоте амплитуда колебаний максимальна и наблюдалась в диапазоне 10–20 Hz. Отметим, что значения резонансных частот колебаний, полученные в работе [2] в плазме ВЧ-разряда при воздействии на структуру низкочастотными импульсами напряжения, лежат в этом же диапазоне. Обнаружено, что значение резонансной частоты колебаний зависит от размера частиц и величины тока тлеющего разряда. Обнаружены два пика резонансных колебаний различной ширины, возникновение которых определяется максимумами дисперсионного распределения пылевых частиц по размерам, а ширина определяется функцией дисперсионного распределения частиц. При увеличении частоты следования импульсов амплитуда колебаний уменьшается, и они исчезают при частотах выше 25 Hz (рис. 2). Такое воздействие является параметрическим, поскольку под действием внешнего возмущения меняются свойства ловушки. В простейшем приближении заряженные пылевые частицы можно рассматривать как независимые осцилляторы, колеблющиеся с частотой ω_0 в параболической потенциальной яме, образованной неоднородным распределением электрических полей в страте. Когда изменение параметров ловушки происходит намного быстрее, чем время движения частицы в ней, т.е. при $\omega_0 \tau \ll 1$, параметрическое воздействие на частицу можно представить в виде дельта-функции времени. Можно считать, что пространственное распределение электрических полей ловушки сохраняется, электроны за время τ приобретают среднюю энергию ε , а пылевые частицы с массой M приобретают импульс по направлению продольного электрического поля $E(z)$ и дополнительную энергию. Если энергия электронов пропорциональна

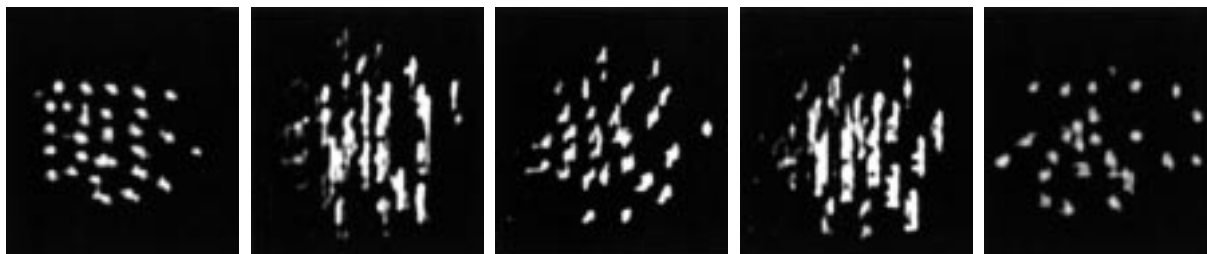


Рис. 2. Фотографии структуры при различных частотах следования наносекундных импульсов. Кадры расположены в порядке увеличения частоты следования импульсов 0, 14, 16, 18 и 30 Hz.

продольному электрическому полю, что наблюдается в стратах в молекулярных газах, то малые колебания частиц относительно положения равновесия описываются уравнением

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \omega_0^2 \left[1 + \gamma \tau \sum_n \delta(t - t_n) \right] z = 0,$$

где $M\omega_0^2 = -d(QE(z))/dz|_{z=0}$, $\gamma = \varepsilon^2/T_e^2$, T_e — температура электрона в плазме, t_n — момент времени внешнего воздействия. Внешнее воздействие в данном случае сводится к изменению во времени частоты колебаний $\omega(t)$. Механическим аналогом такой системы является маятник, точку подвеса которого дергают в вертикальном направлении. Периодическое параметрическое воздействие позволяет не только раскачать колебания, но и повысить устойчивость системы осцилляторов, аналогично тому, как это происходит в квадрупольной радиочастотной масс-спектрометрической ловушке. Это уравнение осциллятора с переменной частотой. Его решения можно найти, используя функцию Грина для незатухающего осциллятора. При каждом воздействии в момент времени $t = t_n$ возникает скачок импульса ΔP пылевой частицы $\Delta P = -M\gamma\omega_0^2\tau z(t_n)$, в результате чего осциллятор приобретает от электрического поля дополнительную энергию $\Delta E = \Delta P^2/2M$. Если потери кинетической энергии частиц меньше чем ΔE и направление скачка импульса ΔP совпадает с направлением импульса частицы, то можно раскачать колебания. В случае импульсно-периодического воздействия с частотой f резонанс на основной частоте наступает при условии $\omega_0 = 2\pi f$, что и зафиксировано экспериментально. При амплитуде колебаний около 0.2 мкм энергия, приобретаемая пылевой частицей за один импульс, $\Delta E \approx 0.1$ эВ, что достаточно для резонансной раскачки колебаний за несколько импульсов при отсутствии потерь. При данном способе параметрического воздействия заряд изменяется на всех частицах и продольное поле действует на все частицы, поэтому можно раскачать колебания всей пылевой структуры. Это принципиально отличается от случая воздействия на пылевую структуру медленно меняющимися низкочастотными электрическими полями, при котором происходит смещение только граничных слоев пылевых частиц в возмущающем поле.

При повышении частоты следования наносекундных импульсов выше 25 Нз, когда колебания пылевых частиц отсутствуют, наблюда-

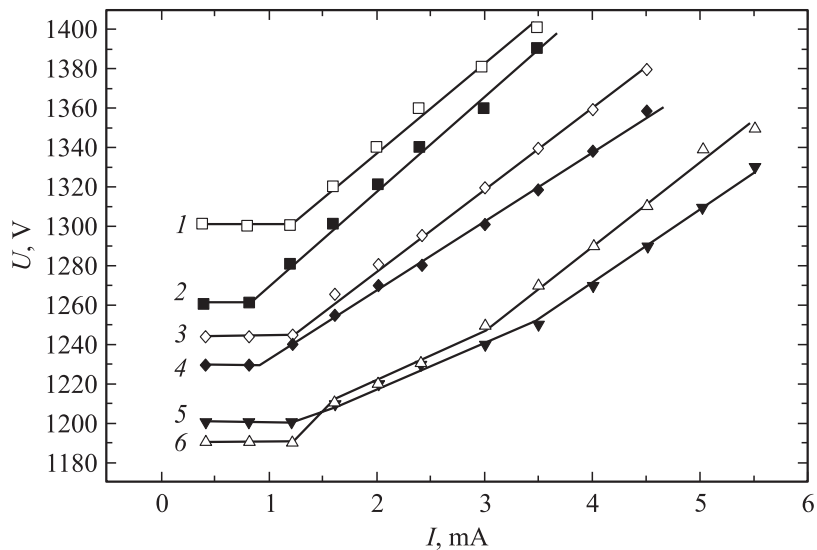


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики разряда при различном давлении воздуха: 1, 2 — $P = 0.1$ Torr; 3, 4 — $P = 0.15$ Torr; 5, 6 — $P = 0.2$ Torr. Залитые знаки соответствуют разрядам с частицами.

лись расталкивание частиц и разупорядочивание пылевой структуры. Увеличение заряда частиц приводит к их кулоновскому расталкиванию. При дальнейшем повышении частоты следования импульсов (100 Hz) наблюдались разрушение структуры и разбегание частиц вследствие разрушения плазменной ловушки при повышении остаточной ионизации в разряде с ростом частоты воздействия наносекундных импульсов. Хаотизация происходит постепенно от импульса к импульсу. В отличие от [3], после окончания воздействия структура возвращается к первоначальному состоянию, и релаксация структуры происходит за более короткие времена (около секунды). Образование пространственной структуры после воздействия происходит, как и в [3,4], когда сначала выстраиваются несколько частиц, а затем к ним последовательно подстраиваются остальные. Начальные частицы локализуются в невозмущенном поле страты и играют роль „центров кристаллизации“. При дальнейшем увеличении числа пылевых частиц они последовательно

заполняют весь объем страты. В результате образуется пространственно упорядоченная структура, коллективное поле которой является суперпозицией электрического поля страты и пространственных полей заряженных пылевых частиц. Упорядоченный кристалл изменяет не только электрические поля в самой страте, но и свойства прилегающей плазмы, что фиксируется по изменению вольт-амперных характеристик разряда (рис. 3).

Таким образом, воздействием наносекундными импульсами на фоновую плазму можно создавать новую ловушку для удержания частиц, вызывать возмущение в имеющихся структурах без их разрушения и раскачивать колебания во всей структуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке по грантам РФФИ № 06-08-00499-а и 06-02-08100-офи.

Список литературы

- [1] *Фортон В.Е.* и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
- [2] *Piell A.* et al. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2003. V. 36. P. 533–543.
- [3] *Василяк Л.М.* и др. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. № 3. С. 609–613.
- [4] *Василяк Л.М.* и др. // ТВТ. 2000. Т. 38. № 5. С. 701–705.