

Управление реакционным объемом в установках, предназначенных для плазменной обработки порошков в условиях низкого вакуума

Т.М. Васильева, Йе Хлайнг Тун, М.Н. Васильев
г. Долгопрудный, Московская обл., Московский физико-технический институт,
Институтский пер., д. 9
E-mail: tmvasilieva@gmail.com

Исследована возможность управления поведением частиц плазменно-пылевых структур, левитирующих в газовом ВЧ-разряде (13,6 МГц), посредством воздействия на них непрерывных и импульсно-периодических электронных пучков. Выявлены закономерности воздействия таких пучков на расположение плазменно-пылевой структуры в объеме разряда, пространственное распределение пылевых частиц в различных зонах структуры и характер движения пылевых частиц внутри структуры. Разработана теоретическая модель управляющего воздействия электронных пучков на свойства плазменно-пылевых структур.

The control of the reaction volume in reactors for plasma treatment of powders under low vacuum conditions. T.M. Vasilieva, Ye Hlaing Tun, M.N. Vasiliev. The control of particles behavior in plasma-dust structures levitating in the RF-discharge (13.6 MHz) by means of continuous and pulsed electron beams was studied. The beams impact at the location of the plasma-dust structures in the discharge volume, the spatial distribution and the movement of dust particles over the structure was revealed. A theoretical model of the control was developed.

Возможность осуществлять плазменную модификацию порошков различных материалов, которые находятся в реакционном объеме в виде устойчивых плазменно-пылевых структур, в частности – в виде плазменно-пылевых кристаллов, уже достаточно давно привлекает внимание исследователей. Интерес в частности обусловлен тем, что такой способ оказался перспективным для получения наноматериалов, синтеза гибридных материалов с уникальной функциональностью, агрегирования новых биоактивных комплексов и т.п. [1].

Узким местом с точки зрения практического применения плазмохимических реакторов рассматриваемого типа являются трудности, связанные с управлением реакционным объемом: основные характеристики (размеры плазменно-пылевых структур, их локализация в пространстве, взаимное расположение пылевых частиц в структуре и их распределение по слоям в пространственных структурах) полностью определяются параметрами плазменной ловушки, в которой левитируют частицы порошка, и, в определенной мере – размерами и материалом частиц.

Настоящая работа была выполнена для того, чтобы экспериментально доказать возможность управления поведением частиц плазменно-пылевых структур посредством воздействия на них электронного пучка (ЭП). На основе накопленных экспериментальных данных была построена теоретическая модель управляющего воздействия электронных пучков различной геометрии на свойства плазменно-пылевых структур, левитирующих в газоразрядной плазме (плазменной ловушке). В ходе выполнения работы изучались также релаксационные процессы в плазменно-пылевой среде при динамическом воздействии на нее сканирующего непрерывного или импульсно-периодического электронного пучка.

Экспериментальная установка и методика экспериментов

Эффект воздействия ЭП на пылевую структуру в первую очередь зависит от энергии электронов: действие низкоэнергетичного пучка (менее 1 кэВ) носит локальный характер и сопровождается плавлением отдельных областей плазменно-пылевого кристалла, в то время как действие пучка электронов с более высокой (десятки кэВ) энергией приводит к динамическому сдвигу и разрушению плазменно-пылевой структуры [2]. Таким образом, с помощью ЭП можно управлять пылевой структурой, сдвигать ее или разрушать. Подбором режимов генерации пучка и способов формирования плазменной ловушки можно создать управляемый реакционный объем. Исследования выполнялись с плазменно-пылевыми

структурами частиц оксидов (MgO , Al_2O_3), металлов (Al), углерода и ацетилсалициловой кислоты, формирующимися в высокочастотном газовом разряде в воздухе при давлении $P_m = 0,1 - 1$ Торр. Размер частиц варьировался в диапазоне 5-20 мкм.

Формирование реакционного объема в виде левитирующей в ВЧ-разряде плазменно-пылевой структуры с возможностью инжекции в реакционный объем высокоэнергетичного ЭП показано на рис. 1. Разряд зажигался между горизонтально расположенным плоским сетчатым электродом 1 и стенкой разрядной камеры 2. Пылевые частицы 6 отдельными порциями вводились в зону газового разряда с помощью вибратора 7, а плазменно-пылевая структура 4 формировалась над электродом 1. Для создания радиального профиля электрического поля, удерживающего частицы в плазме, по периметру электрода 1 накладывалось металлическое кольцо 5. Моноэнергетический ($E_b = 25$ кэВ) электронный пучок 3 с углом расхождения 0,6 - 1,5 градусов инжектировался над поверхностью плазменно-пылевой структуры таким образом, чтобы он не пересекал видимую область свечения ВЧ-разряда.

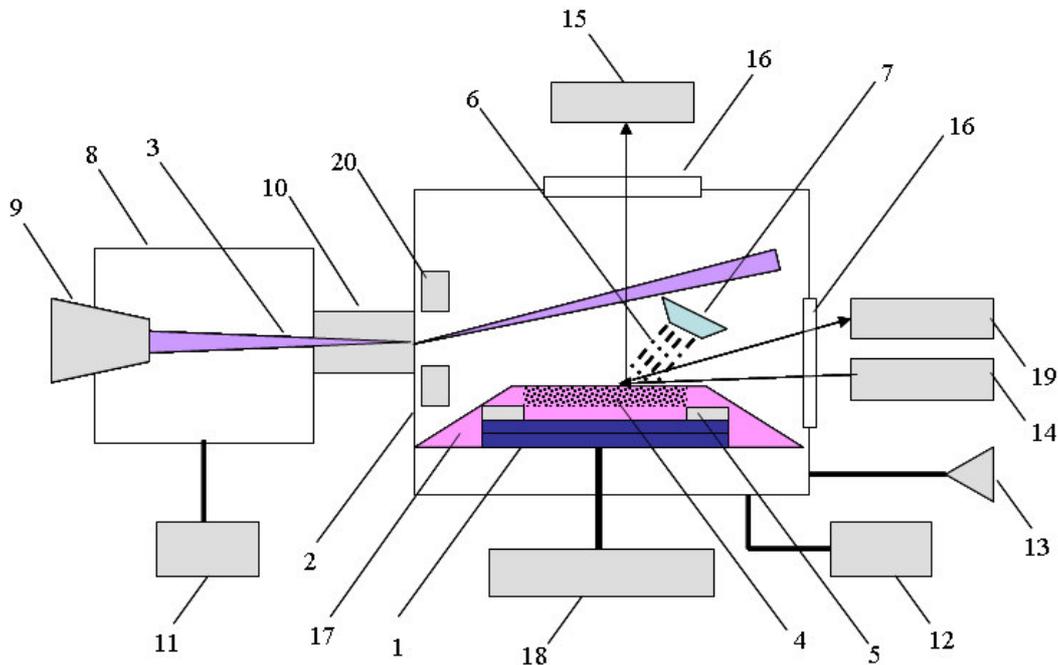


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – электрод; 2 – разрядная камера; 3 – электронный пучок; 4 – плазменно-пылевая структура; 5 – металлическое кольцо; 6 – пылевые частицы; 7 – вибратор; 8 – высоковакуумная камера; 9 – электронно-лучевая пушка; 10 – выводное устройство; 11, 12 – независимые системы вакуумирования; 13 – натекатель; 14 – полупроводниковый лазер; 15, 19 – видеоконференция; 16 – оптическое окно; 17 – зона ВЧ-разряда; 18 – ВЧ-генератор; 20 – отклоняющая система.

Системы формирования тонкого цилиндрического ЭП и конструкции выводных окон, использовавшихся для его проводки из высоковакуумного объема в реакционную камеру, описаны нами в [3]. После ввода в реакционную камеру ЭП может отклоняться по двум направлениям (параллельно и перпендикулярно плоскости плазменно-пылевой структуры) с помощью электромагнитной отклоняющей системы 20. Эта же система обеспечивает развертку ЭП по заданному закону.

Плазменно-пылевая структура визуализировалась подсветкой лазерными «ножами» 14 с каустикой 150 мкм в продольном и поперечном сечении структуры. Видеозапись процессов, происходящих в плазменно-пылевой структуре, осуществлялась черно-белыми и цветной ПЗС-камерами 15 через радиационно-защитные окна в стенках рабочей камеры установки. Производились также регистрация спектра оптического излучения ЭПП в видимой области, измерения распределения электрического потенциала плазмы вблизи ЭП и радиальное распределение тока инжектированного пучка, прошедшего через пылевое облако.

Динамика плазменно-пылевой структуры под воздействием непрерывного ЭП: экспериментально наблюдаемые факты

Плазменно-пылевая структура, состоящая из нескольких слоев заряженных частиц, формируется над электродом в слое объемного заряда (Рис. 2). Концентрация электронов в слое $n_e \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$, характерная плотность электронов в пучке $n_b = 10^8\text{-}10^9 \text{ см}^{-3}$. Реакция пылевого образования на электронный пучок, зависела от тока пучка и расстояния d от электронного пучка до плазменно-пылевой структуры. При $d > 50$ мм структура слабо реагирует на включение пучка при токе пучка менее 5 мА. По мере приближения пучка при токе пучка $I_b \approx 1$ мА плазменно-пылевая структура приходит в движение, при этом в поперечном сечении наблюдается притяжение структуры к пучку. В горизонтальной плоскости наблюдается, что частицы группируются под пучком, а при движении пучка они сдвигаются за пучком. После выключения тока пучка частицы возвращаются в исходное состояние. Пылевые частицы в горизонтальной плоскости достаточно легко приходят в движение, так как радиальные силы, удерживающие их в слое, существенно меньше, чем сила, удерживающая их в равновесии в вертикальном направлении. При быстром смещении пучка проявляется инерционность в движении облака заряженных микрочастиц. Таким образом, наблюдается дальнедействующее управление электронным пучком плазменно-пылевого кристалла, несмотря на то, что пространственный заряд пучка при этих давлениях полностью скомпенсирован плазмой, нарабатываемой самим пучком. Притяжение частиц к пучку сменяется отталкиванием, при дальнейшем уменьшении расстояния от пучка до пылевой структуры. Когда пучок находится над структурой, то пылевое облако деформируется и смещается вниз, прижимаясь к ВЧ-электроду. При этом пылевые частицы выталкиваются в радиальном направлении от пучка. Зона воздействия существенно больше, чем видимый диаметр пучка.

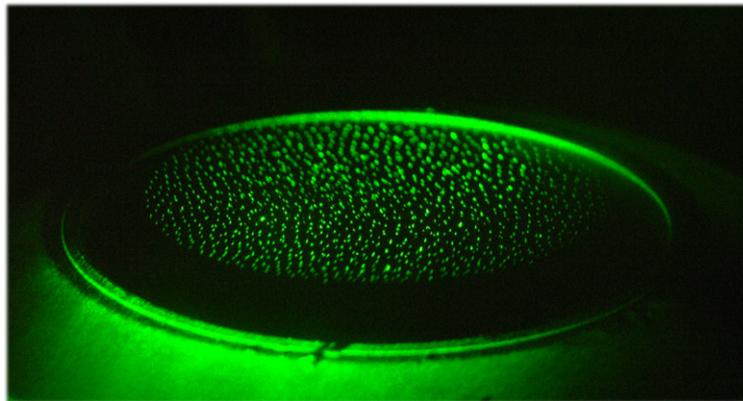


Рис. 2. Фотография плазменно-пылевой структуры, сформированная над ВЧ-электродом в слое объемного заряда.

При прохождении пучка сквозь пылевое образование наблюдается увлечение отдельных частиц структуры вдоль пучка с последующим их ускорением, что хорошо видно по трекам светящихся частиц оксидных порошков. Фотографирование треков производилось в режиме ручной экспозиции ПЗС-камеры, что позволяло точно измерять скорость и ускорение отдельной частицы. Обработка изображений дала оценочное значение ускорения частицы по длине трека $2\text{-}4 \text{ м/с}^2$.

В рассматриваемом случае продольная сила, действующая на частицу со стороны ЭП, превосходит радиальную силу, удерживающую частицу в слое объемного заряда, поэтому частица увлекается вдоль пучка. После того, как частица приобретает дополнительный заряд и уходит из зоны ВЧ-разряда, происходит ее отталкивание от пучка. Была сделана оценка силы действия электронов пучка на частицу в предположении, что попавшие на поверхность частицы электроны полностью ею поглощаются. Это означает, что бомбардирующие частицу электроны непосредственно передают ей свой импульс и вызывают ускорение частицы. Величина силы, оцененной из закона сохранения импульса, достаточно близка к оценке, полученной на основании видеосъемки.

Модель дальнего действия воздействия электронного пучка на плазменно-пылевую структуру

Рассмотрим однородный слаботочный цилиндрический ЭП, распространяющийся в воздухе умеренного давления (0,1-1 Торр), и найдем радиальное распределение вторичных электронов плазмы, вблизи пучка. Поскольку в рассматриваемых условиях неустойчивости, связанные с раскачкой ленгмюровских колебаний, не развиваются. ЭП теряет свою энергию, в основном, в неупругих парных столкновениях и создает вокруг себя область ионизации, степень которой существенно выше, чем степень ионизации в ВЧ-разряде. Энергии основной части вторичных электронов распределены в области энергий, меньших потенциала резонансного возбуждения молекул N_2 , равного $\varepsilon^* = 6,6$ эВ. Более быстрые электроны каскада за счет процессов ионизации и возбуждения за короткое ($\tau_{ны} \sim 10^{-7}$ с) время уменьшают свою энергию до значений ε^* . За это время они продиффундируют на расстояние $(D_e \tau_{ны})^{1/2}$, сравнимое с диаметром самого пучка, где D_e - коэффициент диффузии электронов. Таким образом, характерная энергия электронов плазмы, нарабатываемых пучком, $\varepsilon \leq \varepsilon^*$. Энергетический спектр этих электронов не зависит от энергии электронов пучка, и можно считать, что они равномерно распределены по энергиям в интервале $[0-\varepsilon^*]$. Уход этих электронов из области пучка в радиальном направлении приводит к поляризации плазмы и возникновению амбиполярного электрического поля $E(r)$. Поле E определяется условием равенства радиального электронного потока из области пучка ионному потоку, то есть электрическая сила, действующая на электроны, должна почти полностью скомпенсировать градиент электронного давления ($T_e n_e$), где T_e температура или средняя энергия плазменных электронов. Отсюда следует, что амбиполярное поле $eE(r) = -\nabla(T_e n_e)/n_e$.

Амбиполярное электрическое поле притягивает пылевые частицы на значительном расстоянии. Существование радиального электрического поля на расстояниях, значительно превышающих диаметр электронного пучка, подтверждается измеренными значениями электрического потенциала, который отрицателен во всей области. При приближении пучка к плазменно-пылевому облаку на расстояние $d \sim 1$ см амбиполярный поток ионов за счет силы ионного трения выталкивает заряженные пылевые частицы в радиальном направлении из зоны действия пучка.

Вне пучка, ионизацией можно пренебречь, при этом потоки электронов и положительных ионов, созданных пучком, будут убывать с расстоянием в радиальном направлении за счет рекомбинации. Ионизация газа, производимая электронами пучка и быстрыми вторичными электронами, сосредоточена в узкой области порядка диаметра пучка $2r_b$, а область рекомбинации при давлениях $P_m \sim 0,1-1$ Торр, как показывают оценки, может достигать нескольких сантиметров. В связи с этим рассматриваемая задача является сильно неоднородной. Радиальная структура плазмы вокруг ЭП определяется в основном процессами переноса заряженных частиц плазмы в амбиполярном поле и их зарядовой кинетикой.

Решение системы уравнений, которая описывает баланс сил, действующих на частицы плазменно-пылевой структуры, при некоторых упрощающих предположениях позволяет получить количественные оценки величины этих сил и сделать ряд важных выводов относительно физики наблюдаемых явлений. В частности, показано, что дальнее действие ЭП на динамику плазменно-пылевой структуры обусловлено действием сил ионного увлечения, возникающих в рассматриваемых пучково-плазменных системах.

Эта модель качественно правильно описывает экспериментальные данные. На малых расстояниях от пучка $r \leq R_0$, где R_0 - длина прилипания электронов в пучковой плазме воздуха, сила ионного увлечения отталкивает частицы пыли. На больших расстояниях сила притяжения электрического амбиполярного поля становится больше, чем сила воздействия потока ионов, что вызывает притяжение пылевых частиц к пучку.

Воздействие импульсно-периодического пучка.

Согласно предложенной модели воздействие модулированного ЭП на пылевую структуру определяется модуляцией амбиполярного электрического поля, возникающего в плазме около пучка. Модуляция пучка может осуществляться либо за счет пространственного перемещения пучка, либо за счет модуляции тока. В экспериментах использовался импульсно-периодический пучок с частотой следования импульсов 2-200 Гц. Время нарастания тока пучка

от нуля до максимального значения ≈ 50 мкс, спада ≈ 300 мкс. Обнаружено, что воздействие такого пучка может приводить к раскачке низкочастотных резонансных колебаний в структуре.

Модуляция ЭП, находящегося над структурой на расстоянии 15-20 мм, приводит к колебаниям частиц. Колебания наиболее интенсивны при низкочастотной модуляции пучка 5-20 Гц. При токе пучка ($I_b = 1$ мА) амплитуда колебаний достигает 1,5-2 мм, но частицы не покидают слой объемного заряда. Повышение частоты модуляции пучка приводит к тому, что колебательное движение частиц ускоряется, амплитуда колебаний падает, а сами колебания перестают быть различимыми. При этом движение пылевых частиц в структуре стабилизируется и упорядочивается в горизонтальном сечении. Без модуляции пучка частицы плазменно-пылевой структуры хаотически двигаются около положения равновесия, при наличии модуляции частицы жестко привязаны к своему местоположению.

При изменении условий импульсно-периодического воздействия ЭП поведение структуры может стать хаотичным: увеличение тока пучка выше 1 мА или приближение пучка к структуре вызывает разрушение структуры на резонансной частоте. Количество частиц, оставшееся после воздействия пучка, много меньше количества частиц в исходном состоянии.

Выводы

1. Проведены эксперименты по дальнедействующему воздействию непрерывных и импульсно-периодических электронных пучков на плазменно-пылевые структуры, левитирующие в газовом ВЧ-разряде (13,6 МГц). Выявлены общие закономерности воздействия таких пучков на:

- расположение плазменно-пылевой структуры в объеме разряда,
- пространственное распределение пылевых частиц в различных зонах структуры,
- характер движения пылевых частиц внутри структуры.

2. Разработана теоретическая модель, связывающая величины сил, действующих на пылевую частицу (в первую очередь – силы ионного увлечения), со свойствами плазмы, образующейся вблизи пучка.

3. Количественные оценки, проведенные с использованием предложенной модели, показывают, что в условиях проводившихся экспериментов модель адекватно описывает динамику плазменно-пылевых структур и отдельных частиц, образующих эти структуры.

Работа поддержана грантом РФФИ 15-08-05724_a.

Литература

1. О.Ф. Петров, М.Н. Васильев Плазменно-пылевые наноструктуры: генерация, диагностика, биомедицинские приложения // RUSNANOTECH, Международный форум по нанотехнологиям, 3-5 декабря 2008 г., Москва, Сб. тезисов докладов научно-технологических секций, 2, 477-478.
2. V.E. Fortov, O.S. Vaulina, O.F. Petrov, M.N. Vasiliev, A.V. Gavrikov, I.A. Shahova, N.A. Vorona, Yu. V. Khrustalev, A.A. Manohin, A.V. Chernyshev Experimental study of the heat transport processes in dusty plasma fluid // Phys. Rev., 2007, E 75(1), 026403.
3. T. Vasilieva Self-organization of regular dusty structures in plasma traps // Int. J. Nanotechnology, 2014, 11(5/6/7/8), 669-675.