

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЛАЗМЕ

Л. М. Василяк^{a,*}, М. Н. Васильев^b, С. П. Ветчинин^a, Д. Н. Поляков^a, В. Е. Фортвов^a

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

^b *Московский физико-технический институт (технический университет)
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 14 июня 2002 г.

Экспериментально исследованы процессы воздействия электронного пучка на упорядоченные пылевые структуры в тлеющем и ВЧ-разрядах низкого давления. Воздействие приводит к разрушению пылевой структуры или к ее динамическому сдвигу. Электронный пучок с низкой энергией электронов (десятки эВ) при токе до 1 мА, попадая в центр пылевой структуры, вызывает ее разупорядочивание и «плавление» в области воздействия, не возбуждая наружные области кристалла. При локальном воздействии электронного пучка с высокой энергией электронов (25 кэВ) при токах пучка более 10 мА вся пылевая структура под воздействием пучка, деформируясь, смещается в горизонтальном направлении, и сносится из зоны ВЧ-разряда. Эффект сноса пылевого облака можно использовать для локального удаления частиц из плазмы.

PACS: 52.25.-b

Пылевая плазма позволяет получать высокие параметры неидеальности

$$\gamma = Z^2 e^2 n^{1/3} / kT \sim 10^4 - 10^5$$

за счет большого заряда пылевых частиц $Z \sim 10^5 - 10^6$ в высокочастотном или тлеющем разряде. Межчастичное кулоновское взаимодействие оказывается настолько сильным, что вызывает образование упорядоченных пылевых структур, в которых кулоновское взаимодействие на порядки превосходит энергию теплового движения. Реакция упорядоченной структуры на воздействия, а затем ее релаксация к первоначальному состоянию позволяют получить новые данные о свойствах упорядоченных структур [1]. Восстановление пылевой структуры после воздействия зависит от характера воздействия. При медленных слабых воздействиях, например, тепловых [2] или электрических [3], структура сдвигается в пространстве, при этом ее часть может деформироваться или разрушиться. Воздействие мощных импульсных электрических полей наносекунд-

ной длительности вызывает разрушение пылевых структур в плазме [1]. При таком коротком воздействии пылевые частицы не успевают сдвигаться, и воздействие на структуры происходит из-за быстрого изменения параметров плазмы. Разрушение пылевой структуры и разбегание частиц при наносекундном воздействии, по-видимому, связано, в первую очередь, с увеличением их заряда, поскольку в плазме появляется достаточно много высокоэнергетичных электронов с энергией в сотни эВ [4]. Непосредственно на пылевые частицы можно воздействовать с помощью электронного пучка, который может увеличить заряд частиц и передать им импульс. В работах [5, 6] выполнен теоретический анализ процесса зарядки пылевых частиц в несамостоятельном разряде, поддерживаемом электронным пучком при атмосферном давлении для создания радиоактивной батареи. Цель настоящей работы — исследование непосредственного воздействия электронного пучка на пылевые частицы в разряде низкого давления.

Эксперименты проводились в цилиндрических разрядных трубках диаметром 2 см с тлеющим разрядом и в камере большого объема (рис. 1) с

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

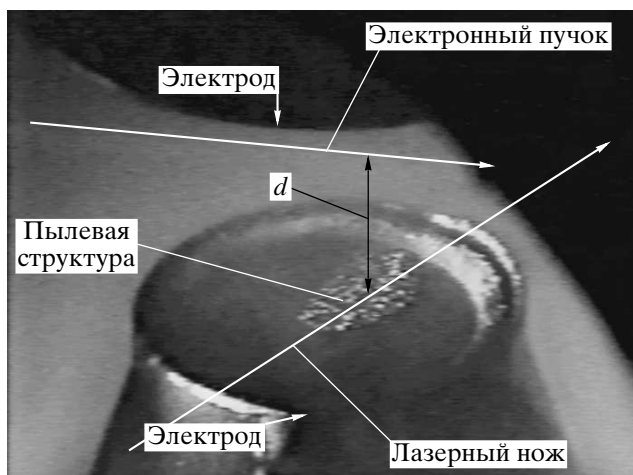


Рис. 1. Схема эксперимента и изображение рабочей ячейки. Диаметр нижнего электрода 10 см, угол между направлением электронного пучка и лазерным лучом 90° , d — расстояние между плоскостью пылевой структуры и электронным пучком. Видеокамера расположена под углом 45° градусов к горизонтальной плоскости электродов

ВЧ-разрядом на частоте 13.56 МГц с плоскими электродами диаметром 10 см в воздухе при давлении 0.01–0.20 Торр. Структуры из частиц MgO размером 5–20 мкм исследовались с помощью видеокамеры при поперечной и продольной подсветке лазерным «ножом» с длиной волны 0.63 мкм и каустикой 150 мкм. Для воздействия на пылевую структуру в плазме ВЧ-разряда использовался слаботочный электронный пучок с энергией электронов 25 кэВ. Пучок формировался в ускорителе и выпускался горизонтально в разрядную камеру, в которой предварительно создавалась упорядоченная пылевая структура. Диаметр пучка в камере 2–2.5 мм. При давлениях, характерных для проводившихся экспериментов, выведенный в рабочую камеру электронный пучок практически не рассеивается в окружающем газе. Ток пучка мог быть как непрерывным, так и в виде прямоугольных импульсов с частотой 2–200 Гц. Упорядоченная пылевая структура висела в ВЧ-разряде между двумя плоскими электродами, расстояние между которыми составляло 5 см. Давление в рабочей камере равнялось 0.20 Торр. Структура формировалась в слое объемного заряда над нижним электродом, к которому подводилась ВЧ-мощность. Верхний электрод был заземлен. Для радиального удержания макрочастиц в структуре использовалось кольцо из оргстекла высотой 5 мм, идущее по периметру электродов

да и лежащее на нижнем электроде. Упорядоченная пылевая структура зависала над кольцом и состояла из нескольких слоев заряженных частиц. Электронный пучок падал на структуру сбоку в радиальном направлении. Характер воздействия зависел от тока пучка и расстояния d между осью инъекции электронного пучка и плоскостью упорядоченной плазменно-пылевой структуры. При $d > 10$ мм структура не реагирует на включение пучка при токе пучка менее 10 мА. По мере приближения пучка к плоскости плазменно-пылевой структуры наблюдаются следующие возмущения структуры. При включении пучка с током $I < 5$ мА плазменно-пылевая структура приходит в движение, при этом меняются расстояния между частицами и сдвигаются ее внешние границы. При выключении пучка структура возвращается в исходное состояние. При инъекции импульсно-периодического пучка ($I < 5$ мА) с низкой частотой повторения (около 2–5 Гц) частицы плазменно-пылевой структуры приходят в колебательное движение. При повышении частоты модуляции тока пучка колебательное движение частиц ускоряется и перестает быть различимым. При токах пучка более 10 мА вся пылевая структура под воздействием пучка, слегка деформируясь, смещается в горизонтальном направлении и сносится из зоны разряда. На рис. 2 изображена покадровая видеосъемка сноса заряженного пылевого облака высокоэнергетичным электронным пучком с энергией электронов 25 кэВ (экспозиция кадра 0.04 с, время между кадрами 0.16 с). Пылевая структура сносится не только из зоны воздействия пучка, определяемой его начальным диаметром, но ведет себя аналогично упругому телу, которое прогибается под действием пучка и затем смещается как целое. Структура не восстанавливается после выключения пучка. Разрушение структуры связано в первую очередь с динамическим воздействием электронов пучка на частицы.

Оценки показывают, что при токах порядка 10 мА сила, сообщенная отдельной частице со стороны электронного пучка, превосходит радиальную силу электрического поля, удерживающую частицу в слое. Эта оценка сделана в предположении, что электроны поглощаются частицей, так как длина пробега электронов пучка в материале частиц меньше ее размера, и что они непосредственно передают ей свой импульс. Пучок воздействует на поверхность пылевой частицы, вызывая ее ускорение. Отметим, что величина силы, оцененная из переданного электронами импульса, совпадает с величиной, оцененной по характерному ускорению пылевых частиц на

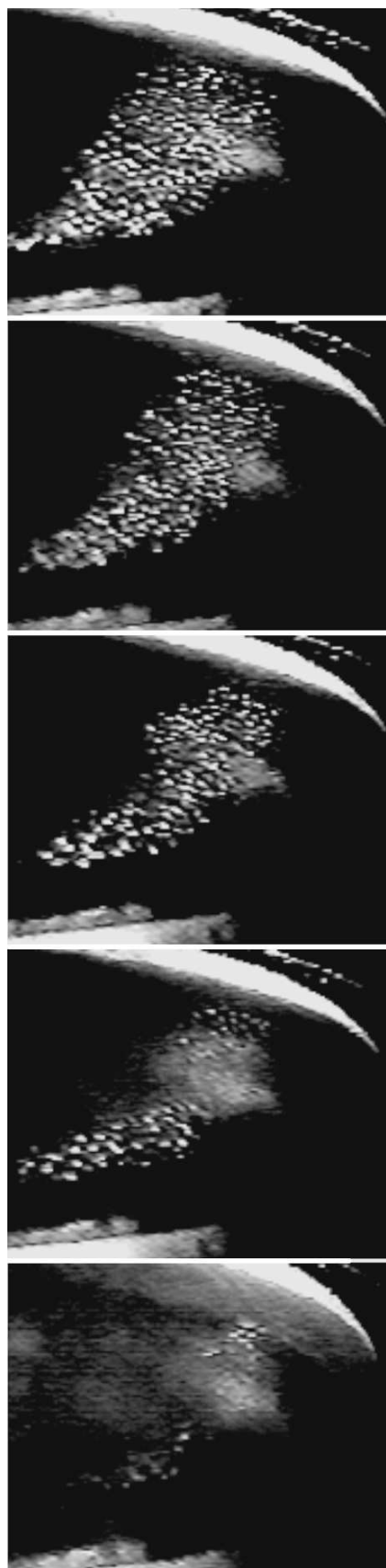


Рис. 2. Снос пылевого облака

основе видеосъемки. Поскольку частицы не выдавливаются пучком из структуры, динамика воздействия пучка, скорее всего, следующая. После включения пучка частицы пыли приобретают большой дополнительный заряд, поскольку энергия электронов пучка и энергия электронов, выбитых с поверхности частиц (~ 100 эВ) [7], существенно превышает энергию плазменных электронов. Это экспериментально наблюдалось ранее при воздействии электронного пучка на единичные частицы в газе низкого давления [8]. Под воздействием пучка частицы улетали из зоны действия пучка, независимо от материала частиц и их эмиссионных свойств. Измеренный потенциал макрочастиц составлял около 100 В [8]. Это приводит к интенсивному рассеянию электронов пучка и вторичных электронов на частичках пыли, поскольку сечение кулоновского рассеяния возрастает пропорционально квадрату заряда и становится соизмеримым с расстоянием между частицами. В результате рассеяния пучка и вторичных электронов может происходить зарядка периферийных частиц, при этом эффективная площадь воздействия пучка на пылевое облако увеличивается. Поскольку частицы в облаке взаимодействуют между собой, пылевое облако смещается как целое. Для проверки этого предположения был выполнен следующий модельный эксперимент. На пути следования электронного пучка помещался металлический шарик диаметром 8 мм. При воздействии пучка на шарик наблюдается свечение газа вокруг шарика, что свидетельствует о рассеянии электронов пучка и эмитированных с поверхности электронов на большую площадь.

В тлеющем разряде в цилиндрической разрядной трубке пылевые структуры образуются в стратах. В воздухе в тлеющем разряде при токе 0.3–1 мА условия образования упорядоченных структур из частиц микронного размера примерно те же, что и в ВЧ-разряде. При давлении 0.2 Торр увеличение тока тлеющего разряда сопровождается увеличением размера пылевой структуры и увеличением расстояния между частицами. При росте тока до нескольких мА кристалл разупорядчивается и напоминают жидкость. При токе разряда 0.6–1 мА наблюдались упорядоченные структуры в виде цилиндра с диаметром, равным приблизительно трети или четверти диаметра трубки. Диаметр упорядоченной структуры растет с ростом тока и достигает $2/3$ диаметра трубки при токах 1–2 мА. Толщина структуры уменьшается с ростом тока, и при токах 1.5–2 мА наблюдались плоские структуры, состоящие из нескольких (5–10) слоев частиц. При даль-

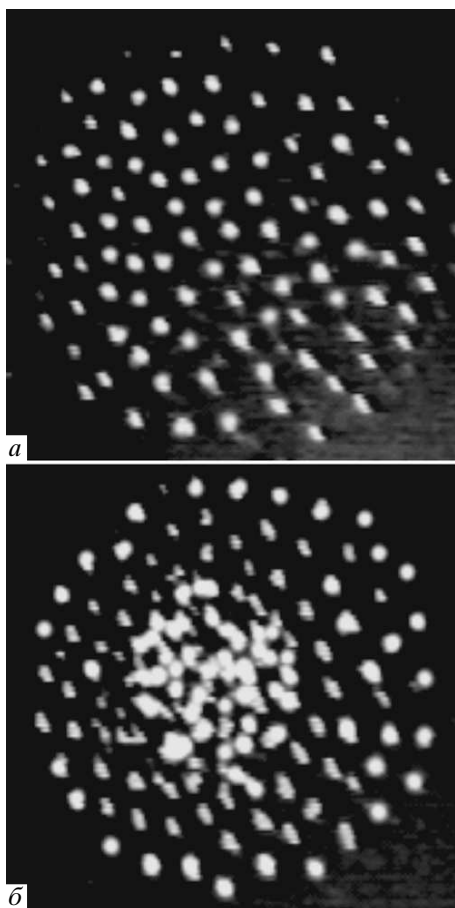


Рис. 3. Воздействие на центральную часть упорядоченной пылевой структуры в тлеющем разряде электронным пучком из полого катода: *a* — пылевая структура (поперечное сечение) без воздействия пучка, *b* — при воздействии пучка

нейшем росте тока образуется кольцевая структура, диаметр которой увеличивался, а ширина уменьшалась с увеличением тока. В приосевой области частицы отсутствовали. Значения токов, при которых происходили переходы между различными формами упорядоченных структур, уменьшаются с увеличением размера пылевых частиц.

Для получения электронного пучка в данном диапазоне давлений в тлеющем разряде плоский катод был заменен полым катодом. В этом случае цилиндрическая упорядоченная структура была получена в страте при токе 0.3–0.6 мА. Дальнейшее увеличение напряжения на разрядной трубке приводит к образованию узкого электронного пучка из полого катода с характерной энергией электронов несколько десятков эВ, а увеличение общего тока разряда в основном определяется увеличением тока электро-

ного пучка. Размер пылевой структуры и формы светящихся областей страт при этом не меняются. Электронный пучок образуется в приосевой области при токе 0.6 мА и, попадая в центр пылевого кристалла, воздействует на него, вызывая «плавление» и разупорядочивание только в области воздействия, не возбуждая наружные области кристалла (рис. 3). С увеличением тока пучка растут диаметр и глубина воздействия, и при токе 2 мА можно получить возбуждение всего кристалла. Общая картина воздействия электронного пучка в тлеющем разряде с полым катодом соответствует экспериментам с ВЧ-разрядом с высокоэнергетичным электронным пучком при малых токах электронного пучка. Разрушение структур как в ВЧ-, так и в тлеющем разряде связано, в первую очередь, с увеличением заряда пылевых частиц. Электронный пучок быстро увеличивает заряд пылевых частиц, который пропорционален энергии электронов. Нейтрализация избыточного отрицательного заряда происходит намного медленнее, поскольку она определяется потоком ионов. В результате действия избыточного заряда происходит их кулоновское расталкивание, выталкивание частиц из плазменной ловушки вверх, затем падение вниз и, как следствие, разупорядочивание. При воздействии электронного пучка частицы испытывают различные колебания. Они могут быть также связаны с возбуждением различного рода плазменно-пучковых неустойчивостей в пылевой среде.

Таким образом, воздействие электронного пучка на пылевые структуры в плазме заключается в увеличении заряда пылевых частиц и передаче импульса электронами пучка при столкновении, что приводит как к разрушению пылевой структуры, так и к ее динамическому сдвигу. Оценки показывают, что сила, сообщенная отдельной макрочастице со стороны электронного пучка, а также сила, вычисленная по ее характерному ускорению, превосходят радиальную силу электрического поля, удерживающую частицу в слое. Это свидетельствует о том, что силы взаимодействия частиц между собой в плазменно-пылевом кристалле существенно больше электрических сил, обеспечивающих радиальное равновесие кристалла в плазменной ловушке. Эффект динамического воздействия электронного пучка на пылевое облако можно использовать для локального удаления частиц из плазмы, например, в устройствах вращения или сепарации частиц по размерам. Таким устройством, обеспечивающим сепарацию частиц, может быть тлеющий разряд в разрядной трубке с переменным сечением, например, в виде конуса [9]. В такой разрядной трубке продольное поле

меняется по длине и частицы разных размеров локализируются в разных сечениях трубки. Удаление частиц нужного размера в определенном сечении можно производить с помощью поперечного электронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортон, ЖЭТФ **121**, 609 (2002).
2. В. В. Балабанов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортон, ЖЭТФ **119**, 86 (2001).
3. D. Samsonov, A. V. Ivlev, and G. E. Morfill, Phys. Rev. E **63**, 025401 (2001).
4. Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, И. В. Филогин, УФН **164**, 263 (1994).
5. А. Ф. Паль, А. О. Серов, А. Н. Старостин, А. В. Филиппов, В. Е. Фортон, ЖЭТФ **119**, 272 (2001).
6. А. Ф. Паль, Д. В. Сивохин, А. О. Серов, А. Н. Старостин, А. В. Филиппов, В. Е. Фортон, Физика плазмы **28**, 32 (2002).
7. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, под ред. В. Е. Фортова, Наука, Москва (2000), кн. 3, стр. 84.
8. V. L. Burchkov and M. N. Vasil'ev, in *Int. Symp. on Theor. and Appl. Aspects of Plasmachemistry*, Riga, Latvia (1991), p. 40.
9. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, ТВТ **38**, 701 (2000).