

УДК 537.52

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙНИЯ МИКРОЧАСТИЦ ПЫЛИ КОЛЛЕКТИВНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ПЛАЗМЫ

С. В. Булычев, А. Е. Дубинов, В. С. Жданов, И. Л. Львов,
К. Е. Михеев, С. А. Садовой, С. К. Сайков, В. Д. Селемир

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров

Разработана, изготовлена и опробована специальная газоразрядная камера для исследования закономерностей броуновского рассеяния пылинок в плазме стационарного тлеющего разряда постоянного тока и стационарного ВЧЕ-разряда. Разработана методика проведения экспериментов по броуновскому рассеянию. Приведены примеры регистрации рассеяния пылинок в плазме. Математическая обработка большого числа отпечатков пылинок позволила установить, что зависимость ширины функции распределения пылинок на отпечатках на половине расстояния от разряда до предметного столика от силы тока разряда хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с коэффициентом пропорциональности, приближенно равным 16 мм/А. Показано, что рассеяние обусловлено коллективными колебаниями плазмы — пульсациями ионизационного типа.

В последнее время в физике плазмы интенсивно развивается новое направление — физика запыленной плазмы (плазмы, в которой взвешены мелкие частицы или капельки конденсированного вещества), что обусловлено двумя факторами. Во-первых, малая добавка пыли в плазму (например, $10^3 \div 10^4 \text{ см}^{-3}$) может существенно изменить коллективные свойства самой плазмы, во-вторых, пылевая фракция, всегда присутствующая в составе плазмы в таких приборах, как магнитные ловушки термоядерных реакторов и установки плазменного травления микросхем, часто оказывает вредное воздействие на работу этих устройств.

Для установления закономерностей движения пылевой фракции в плазме и определения способов управления этим движением (например, для удаления пыли из технологических установок) необходимы соответствующие экспериментальные исследования. Целью данной работы является разработка и создание специальной газоразрядной камеры для изучения стохастического индивидуального движения пылинок в плазме — их броуновского рассеяния, а также исследование характеристик и механизмов этого рассеяния.

Конструкция разработанной камеры показана на рис. 1. Камера, представляющая собой цилиндрический вертикально установленный и закрепленный на лабораторном столе стакан с внутренним диаметром 100 мм и высотой 220 мм, изготовленный из капролона, закреплялась с помощью специальной опоры, позволяющей регулировать вертикальность установки камеры с помощью уровня бытового назначения. В опоре имелись технологические отверстия для подключения вакуумного насоса, установки датчика — измерителя давления (использовался датчик типа ПМИ-10, подключенный к вакуумметру ВИТ-3) и осуществления герметичного ввода контактов к зондам, диагностирующим плазму.

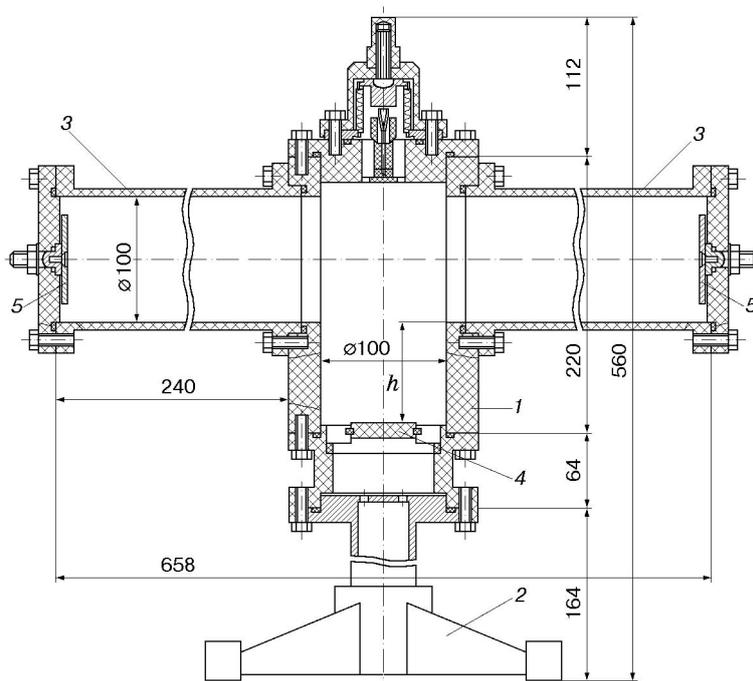


Рис. 1. Конструкция газоразрядной камеры:

1 — стакан; 2 — опора; 3 — патрубки; 4 — предметный столик; 5 — электроды; h — диапазон регулировки высоты предметного столика

В верхней части камеры к стакану подсоединены два патрубка, также выполненные из капролона и имеющие следующие размеры: внутренний диаметр 100 мм, длина 240 мм. На концах патрубков закреплены электроды, выполненные из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и отполированные по разрядной поверхности. Электроды подключались к источнику питания стационарного разряда постоянного тока. Вынесение электродов из основного стакана в патрубки вызвано необходимостью исключить инжекцию пылинок в приэлектродные слои разряда, где имеются квазистационарные области объемного заряда, способные вызвать существенные односторонние отклонения движения пылинок.

В верхней части камеры закреплен узел инжекции пылинок в плазму, в нижней части расположен предметный столик, позволяющий регистрировать падающие на него пылинки. Высота столика могла изменяться в широких пределах.

Общий вид камеры показан на рис. 2. Для питания разряда к электродам подключался специально разработанный источник высоковольтного питания, принципиальная схема которого показана на рис. 3. Источник позволяет получить на выходе постоянное напряжение в диапазоне 500–5000 В при токе в нагрузке не более 0,5 А. В случае превышения максимально допустимого тока в нагрузке блок защиты отключает источник питания от питающей сети. Для повышения напряжения в схеме использовался высоковольтный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 20. Регулировка выходного напряжения осуществлялась изменением напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора с помощью тиристорного регулятора переменного тока РОТ-63-380-50УХЛ4. Выпрямление осуществлялось диодным мостом, собранным из цепочек диодов КД210 (в каждом плече по 10 шт.), и фильтром на базе конденсатора большой емкости C_1 . В качестве балластного использовалось сопротивление R_2 .

При достижении необходимого давления в вакуумной камере (примерно 13,3 Па) напряжение на электродах камеры повышалось до пробойного. После зажигания тлеющего

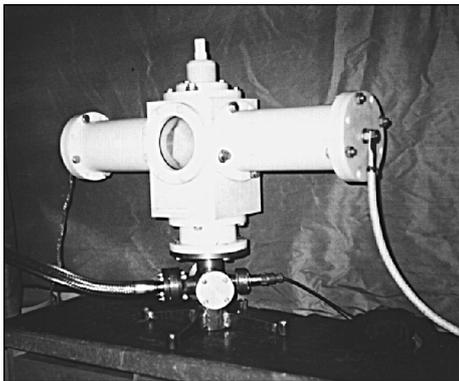


Рис. 2

Рис. 2. Общий вид газоразрядной камеры

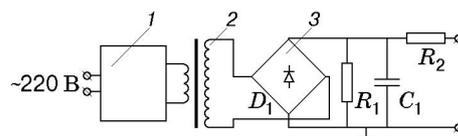


Рис. 3

Рис. 3. Принципиальная схема высоковольтного блока питания:

1 — тиристорный регулятор переменного тока; 2 — высоковольтный повышающий трансформатор; 3 — диодный мост; $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 600$ Ом; $C_1 = 200$ мкФ

разряда регулировкой выходного напряжения устанавливалось требуемое значение разрядного тока (контроль осуществлялся с помощью встроенного амперметра).

В экспериментах помимо высоковольтного источника питания использовался также ВЧ-генератор медицинского назначения ИКВ-4, работающий на частоте 13,56 МГц с максимальной выходной мощностью 200 Вт. Таким образом, имелась возможность проводить исследования не только в стационарном тлеющем разряде постоянного тока, но и в стационарном ВЧЕ-разряде.

Камера снабжена системой подвижных двойных зондов с соответствующими источниками питания, которые используются для определения параметров плазмы.

Для изучения броуновского движения пылинок необходим прецизионный инжектор, позволяющий достаточно точно вводить частицы в плазму. Рассмотрены различные устройства ввода частиц в плазму:

- механически встряхиваемый сетчатый контейнер частиц, установленный сверху камеры [1, 2];
- вибрирующая мембрана (использовался динамик громкоговорителя), установленная на дне камеры и подбрасывающая частицы;
- вращающийся внутри камеры горизонтально расположенный барабан с лопастями, поднимающий частицы вверх [3, 4].

Первые два устройства исследованы в данной работе. Установлено, что перечисленные способы и устройства не удовлетворяют требуемым условиям, так как наблюдался значительный разброс начальных координат и компонент скорости, с которой пылинки попадают в плазму. Поэтому предложена концепция прецизионного игольчатого инжектора, предназначенного для ввода пылинок в плазму, и разработана его конструкция. Последующие эксперименты подтвердили высокие эксплуатационные качества этого устройства.

Конструкция инжектора показана на рис. 4. Основу инжектора составляла медицинская игла, представляющая собой тонкую металлическую трубку с заостренным под углом примерно 10° срезом с одной стороны и пластмассовым контейнером с другой стороны. Была предусмотрена возможность использования одноразовых медицинских игл различного диаметра и длины. Направляющий элемент инжектора обеспечивал вертикальную установку иглы с погрешностью не более $\pm 0,7^\circ$.

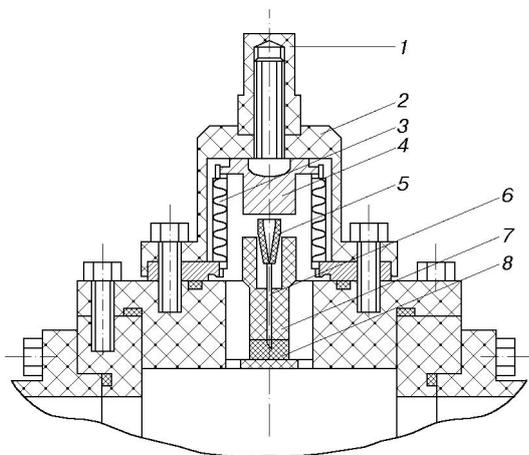


Рис. 4. Конструкция инжектора пылинок:

1 — управляющий клапан; 2 — крышка инжектора; 3 — сильфон; 4 — толкатель иглы; 5 — пластмассовый контейнер; 6 — игла; 7 — направляющий элемент; 8 — резиновая пробка

Инъекция пылинок в плазму осуществлялась следующим образом. Перед сборкой камеры игла накальвалась по направляющему элементу на резиновую пробку в ее геометрическом центре, затем в контейнер иглы засыпалась небольшая порция пылинок, причем заранее было определено, что оптимальная для обработки порция в данных экспериментах должна содержать примерно 10^2 – 10^3 частиц. Сборка из иглы с частицами, пробки и направляющего элемента устанавливалась в посадочное место в верхней части стакана камеры, после чего устанавливалась крышка инжектора. С помощью специальной разметки срез острия ориентировался по азимуту относительно вертикальной оси камеры всегда под одним и тем же углом.

После установки крышки и герметизации камеры производилась ее откачка. Следует отметить, что давление в объеме под крышкой инжектора и объеме камеры всегда было одним и тем же за счет специальных отверстий в посадочном месте иглы с пробкой. В этом случае инъекция пылинок происходит без перепада давления и не приводит к изменению условий горения разряда. По достижении необходимого остаточного давления газа на электроды подавалось высокое напряжение. После установления необходимого режима горения разряда начинали медленно вращать управляющий клапан, который передавал поступательное движение вниз толкателю иглы через сильфон. Как только игла прокалывала пробку, пылинки под действием силы тяжести высыпались из иглы в плазму. Начальная скорость частиц была мала по сравнению с конечной скоростью падения на предметный столик. Поскольку после прокалывания пробки конец иглы контактировал с плазмой разряда и приобретал значительный потенциал, на все металлические части инжектора были надеты диэлектрические колпачки, а гаечный ключ для вращения клапана заземлялся.

Внизу камеры располагался предметный столик с регулируемой высотой. На столике размещался регистрирующий элемент, позволяющий получать изображения пылевого облачка, падающего на столик. При падении скорость пылинки достаточно велика, поэтому необходимо исключить рикошет от регистрирующего элемента. В качестве регистрирующих элементов использовались предметные стекла фирмы “Star Frost”, на которые предварительно наносился тонкий слой прозрачного клея (конторский силикатный, ПВА, дикстриновый и др.). Обнаружено, что при длительном нахождении в условиях вакуума (до 10 мин в течение одного опыта) тонкий слой клея обезвоживается и пылинки на предметном стекле не закрепляются. Поэтому в окончательном варианте в качестве регистрирующего элемента использовалась прозрачная целлофановая пленка с нанесенным с одной ее стороны клеевым слоем (скотч бытового назначения фирмы “Rusi Star”). После разборки камеры по окончании каждого опыта пленка с наклеенными частицами плотно, без складок, приклеивалась к предметному стеклу (рабочее поле 60×25 мм, толщина

1 мм) и маркировалась, после чего образцы можно было хранить в течение длительного времени. Тем не менее полностью приклеить пленку с пылинками к предметному стеклу не удавалось, так как в месте локализации пылинок между стеклом и пленкой оставались тонкие воздушные пузыри, которые хорошо видны на приведенных ниже фотографиях. Однако эти пузыри не усложняют обработку изображений.

В данной работе использовались частицы корунда диаметром (60 ± 5) мкм. При этом учитывалось, что для исследования броуновского движения масса пылинок (а также их размер) должна быть не слишком большой (чтобы диффузия была регистрируемой) и в то же время не слишком малой (чтобы исключить возможную левитацию частиц в плазме). Плотность частиц составляла $3,7 \cdot 10^3$ кг/м³, объем — $1,1 \cdot 10^{-13}$ м³, масса — $4,28 \cdot 10^{-10}$ кг (от $3,2 \cdot 10^{-10}$ до $5,3 \cdot 10^{-10}$ кг).

Экспериментально установлено, что для частиц размером 60 мкм больше подходит медицинская игла с внутренним диаметром канала (900 ± 50) мкм, так как в иглах меньшего диаметра происходит закупоривание канала, а в иглах большего диаметра возникает большой разброс начальных скоростей частиц.

Ниже приведены результаты экспериментов в воздухе при давлении 13,3 Па. База полета пылинок из иглы к предметному столику равна 100 мм. При этом время свободного падения составляет примерно 140 мс, конечная скорость падения 1,4 м/с. Увеличенное изображение пылевого облачка в неионизованном воздухе, полученное регистрацией оптическим сканером с разрешением 1000 dpi, показано на рис. 5. Изображение пылевого облачка, рассеянного плазмой при разрядном токе 0,3 А, что соответствует концентрации электронов $5 \cdot 10^7$ см⁻³ (по результатам зондовых измерений), показано на рис. 6. При визуальном осмотре отпечатков обнаружено, что в пределах небольшой статистической погрешности “центр тяжести” пылевого облачка во всех режимах практически не смещался от вертикальной оси иглы, а форма отпечатка не изменялась. Это можно объяснить тем, что в условиях эксперимента тепловые скорости электронов и ионов плазмы больше, чем их направленные скорости. Вместе с тем отмечено, что с увеличением разрядного тока площадь распыления частиц увеличивалась. Соответствующую количественную зависимость можно получить с помощью математической обработки изображений.

После оцифровки большого числа изображений рассчитывались зависимости числа пылинок от расстояния от “центра тяжести” изображений (рис. 7). Видно, что увеличение тока разряда и соответственно концентрации электронов плазмы приводит к расширению функции распределения. Зависимость ширины функции распределения на полувысоте от тока разряда хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с коэффициентом пропорциональности примерно 16 мм/А (рис. 8).

Первоначально предполагалось, что столь значительное рассеяние пылинок вызвано их столкновениями с газовыми молекулами и ионами, причем в отсутствие разрядного тока ионного рассеяния не наблюдалось.

Так как осредненная сила увлечения пылинки при рассеянии частицами $f_\alpha \sim m_\alpha n_\alpha v_{T\alpha}$ (m_α , n_α , $v_{T\alpha}$ — масса, концентрация и тепловая скорость частицы сорта α соответственно), а степень ионизации газа приближенно равна 10^{-6} , то для того, чтобы сила ионного увлечения превосходила силу увлечения нейтралами, необходимо, чтобы эффективный диаметр пылинки (т. е. сечение рассеяния) при рассеянии ионами превосходил реальный диаметр примерно в 10^7 раз с учетом тепловых скоростей ионов. Однако это представляется необоснованным, так как, по оценкам, дебаевский радиус составляет примерно 0,1 мм, т. е. сравним с размером пылинки.

На данном этапе гипотеза рассеяния нейтралами и ионами была отвергнута. Рассматривались также другие объяснения: пылинки, заряженные при пролете сквозь плазму, приносят на регистрирующую клейкую пленку существенный электрический заряд,

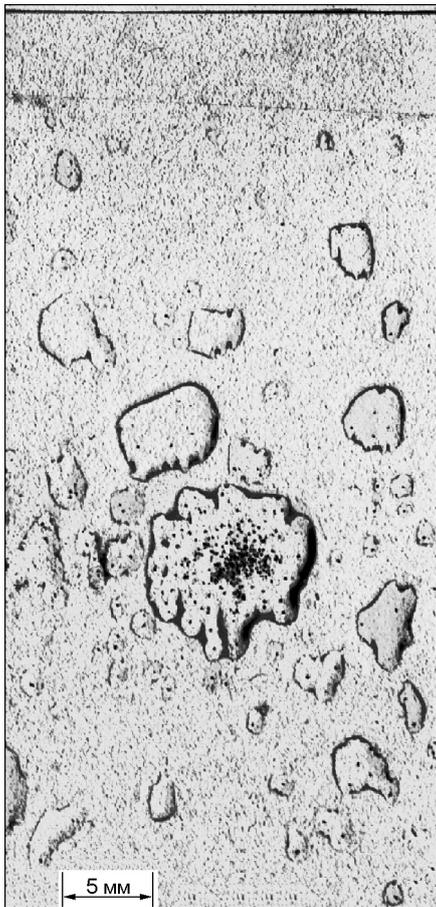


Рис. 5

Рис. 5. Отпечаток пылевого облачка в неионизованном воздухе с остаточным давлением 13,3 Па

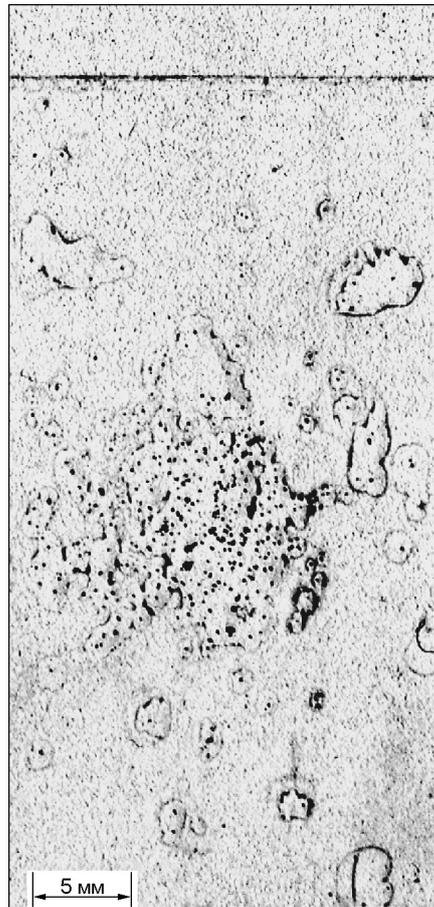


Рис. 6

Рис. 6. Отпечаток пылевого облачка в плазме воздуха при давлении 13,3 Па (ток разряда $I = 0,3$ А)

препятствующий их дальнейшему осаждению и приводящий к рассеянию при подлете к ней. Для проверки этой гипотезы выполнены эксперименты с инъекцией порядка 10^4 пылинок. Установлено, что процесс рассеяния не зависит от количества пылинок, и поэтому гипотеза рассеяния заряженной пленкой также была отвергнута. Близкое расположение друг к другу некоторых пылинок на рис. 6 подтверждает сказанное.

Изучался также другой механизм рассеяния пылинок. Считалось, что первоначальное рассеяние пылинок вызвано нерегулярным заполнением иглы пылинками и их движением по игле после прокалывания пробки, когда они двигались, контактируя друг с другом и с внутренними стенками иглы. После того как частицы выходили из иглы, расстояния между ними увеличивались, столкновения прекращались, а заметного рассеяния на нейтралах не происходило. Повышенное рассеяние пылинок в плазме вызвано взаимодействием заряженных пылинок с коллективными колебаниями плазмы. Для проверки этого предположения проведено следующее контрольное исследование: пылинки инжестировались в неионизованный газ давления 13,3, 133 и $1,33 \cdot 10^4$ Па. В этих опытах различия в величине рассеяния не обнаружено. Это свидетельствует о том, что рассеяние нейтралами незначительно, а с учетом приведенных выше оценок ионное рассеяние также мало.

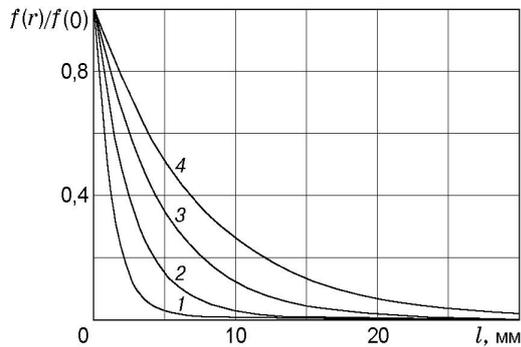


Рис. 7

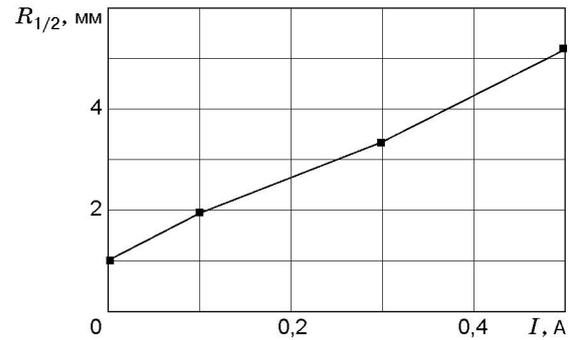


Рис. 8

Рис. 7. Графики нормированных функций распределения пылинок по радиусу по результатам обработки отпечатков пылевого облачка:

1 — неионизированный воздух; 2 — $I = 0,1$ А; 3 — $I = 0,3$ А; 4 — $I = 0,5$ А

Рис. 8. Зависимость ширины функции распределения на полувысоте от тока разряда

Таким образом, поскольку пылинки за время нахождения в плазме приобретают значительный заряд (согласно оценкам по методике [5] заряд составляет $8 \cdot 10^{-14}$ Кл, а время зарядки (примерно 0,5 мс) существенно меньше времени их полета), на динамику частиц должны влиять коллективные колебания плазмы. Для регистрации коллективных колебаний плазмы использовался одиночный зонд, который помещался в центр вертикальной цилиндрической полости вакуумной газоразрядной камеры. Для регистрации зонд подключался к устройству с выводом на цифровой запоминающий осциллограф “Tektronix TDS 3054”. Регистрация зондовых сигналов осуществлялась при различных развертках и соответственно при различных временных шагах дискретизации. Сигналы обрабатывались с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Типичный спектр полученного таким образом сигнала, показанный на рис. 9, содержал две области колебаний: колебания в диапазоне 2–5 кГц, обусловленные нерегулярными ионизационными пульсациями, родственными стратам (т. е. ионизационной турбулентностью, описанной в [6]), и колебания с частотой около 400 кГц, что соответствует ионно-звуковым колеба-

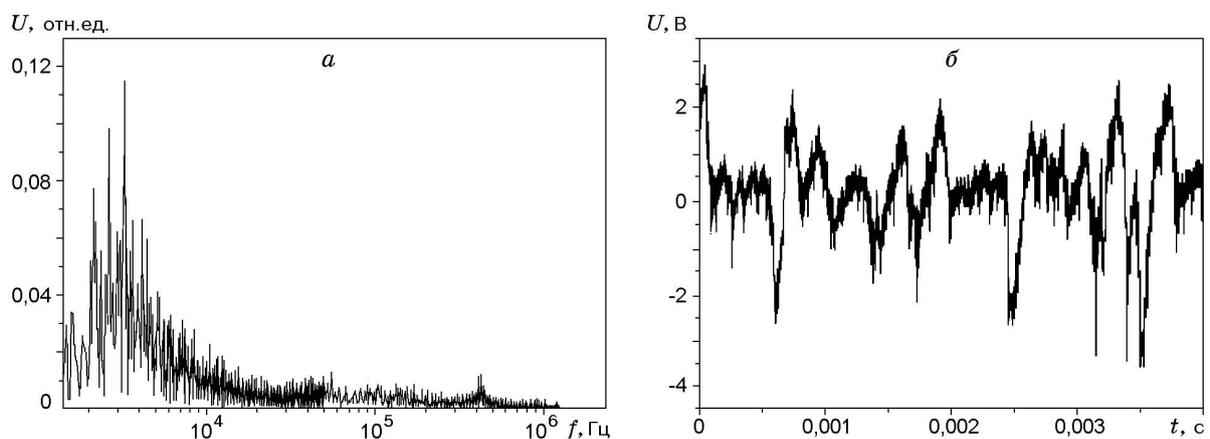


Рис. 9. Типичный спектр коллективных колебаний плазмы (а) и фрагмент записи плазменных колебаний (б)

ям. Поскольку указанные типы колебаний существенно различаются по частоте (величина рассеяния обратно пропорциональна квадрату частоты) и инерция пылинок достаточно высока, можно сделать вывод, что основной вклад в рассеяние пылинок вносят нерегулярные ионизационные пульсации.

Так как рассеяние пылинок при движении в игле инжектора и рассеяние на колебаниях плазмы статистически независимы (поскольку они происходят на разных участках движения), то величина рассеяния аддитивна по этим факторам. Следовательно, разность ширин функций распределения в плазме и неионизованном газе определяет вклад рассеяния в плазме. По результатам этих вычислений с учетом рассчитанной величины заряда пылинки можно оценить амплитуду электрического поля в ионизационных пульсациях. Она составляет несколько киловольт на сантиметр при разрядном токе 0,5 А, что характерно для условий данных экспериментов.

Таким образом, разработанная газоразрядная камера с инжектором пылинок, оснащенная средствами регистрации изображений пылевого облачка, позволила определить закономерности броуновского рассеяния пылинок в плазме на коллективных колебаниях плазмы. Насколько известно авторам данной работы, рассеяние пылинок на коллективных колебаниях плазмы наблюдается в лабораторных экспериментах впервые.

Авторы выражают благодарность П. Шраму (Эйндховенский технологический университет, Нидерланды) за критические замечания, позволившие улучшить статью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fortov V. E., Nefedov A. P., Torchinsky V. M., et al.** Crystalline structures of strongly coupled dusty plasmas in dc glow discharge strata // *Phys. Lett. A.* 1997. V. 229, N 5. P. 317–322.
2. **Misconi N. Y.** New technique for levitating solid particles using a proton beam // *Laser Particle Beams.* 1996. V. 14, N 3. P. 501–510.
3. **Xu W., D'Angelo N., Merlino R. L.** Dusty plasmas: the effect of closely packed grains // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, N A5. P. 7843–7847.
4. **Barkan A., D'Angelo N., Merlino R. L.** Charging of dust grains in a plasma // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73, N 23. P. 3093–3096.
5. **Дубинов А. Е., Садовой С. А., Селемир Д. В.** Затухание и неустойчивость низкочастотных электростатических волн в запыленной плазме с несферическими частицами пыли // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1998. Т. 62, № 6. С. 1122–1126.
6. **Velikhov E. P., Golubev V. S., Dykhne A. M.** Physical phenomena in a low-temperature non-equilibrium plasma and in MHD generators with non-equilibrium conductivity // *Atom. Energy Rev.* 1976. V. 14, N 2. P. 325–386.

*Поступила в редакцию 4/IV 2001 г.,
в окончательном варианте — 17/VII 2001 г.*