КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.951

О ИОННО-ЗВУКОВОМ ОТКЛИКЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПЛАЗМЫ

Ю. В. Корпусова, А. А. Кузовников, К. Г. Пукалов, В. С. Свиридкина, А. К. Сухов, В. В. Тарасова

(кафедра электроники)

В настоящей работе изучалось поведение ионно-звуковых волн, возбуждаемых импульсом напряжения, в плазме аргона при давлениях $P=10^{-2}\div10^{-3}$ Тор и влияние пространственной неоднородности плотности плазмы на их распространение.

В эксперименте использовалась плазма положительного столба тлеющего разряда, который создавался в стеклянной трубке диаметром 60 мм и длиной 60 см. Сила разрядного тока изменялась от 5 мА до 20 мА. Для локальных измерений плотности плазмы n_e, электронной температуры T_e и потенциала плазмы $\varphi_{пл}$ использовались цилиндрические зонды. Плотность электронов в плазме $n_e=10^8\div10^9$ см$^{-3}$, температура электронов $T_e=4\div5$ эВ. Для возбуждения ионно-звуковых волн в плазме использовались импульсы напряжения прямоугольной формы (как положительной, так и отрицательной полярности), которые подавались на кольцевой электрод из медной фольги, расположенный поверх стеклянной трубки. Амплитуда подаваемого импульса изменялась от 1 до 60 В, а длительность от 50 до 200 мкс.

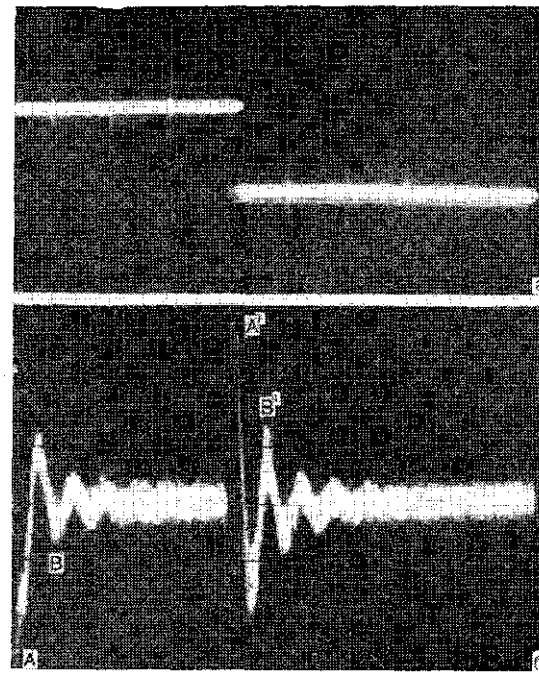

Рис. 1. Осциллограммы прямоугольного импульса напряжения, приложенного к кольцевому электроду (*а*), и переменной составляющей зондового тока (*б*). Одно горизонтальное деление соответствует 10 мкс

Ионно-звуковые возмущения регистрировались цилиндрическими зондами при плавающем потенциале; далее сигналы усиливались и наблюдались на двухлучевом осциллографе, анализаторе спектра.

При наложении прямоугольного импульса напряжения вблизи электрода возникал скачок потенциала в плазме, вызванный передним (или задним) фронтом приложенного импульса — сигнал A (или A')

на рис. 1. В результате этого изменения потенциала возникали возмущения плотности плазмы: разрежение — сигнал B или сжатие — сигнал B'. Сигнал, появляющийся в плазме от переднего фронта импульса, находился в противофазе с сигналом от заднего фронта. Оба сигнала затухали с течением времени. Возбуждение колебаний импульсами различной полярности показало, что в случае приложения импульса отрицательной полярности возмущения в плазме от переднего фронта были аналогичны возмущениям, возникавшим от заднего фронта в случае импульса положительной полярности.

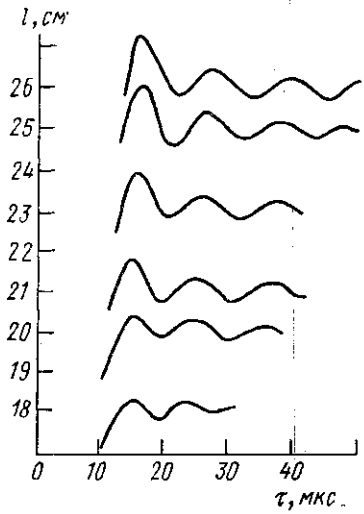

Рис. 2. Развитие и распространение возмущения, возникающего в плазме при наложении прямоугольного импульса напряжения, для разных расстояний между зондом и кольцевым электродом. Длительность возбуждающего импульса $\tau = 80$ мкс, амплитуда 6 В, давление Ar $P = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ Тор, $J_{раз} = 5$ мА

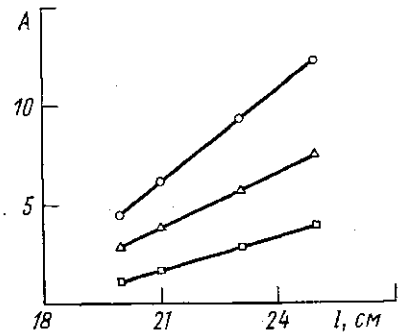

Рис. 3. Зависимость амплитуды ионно-звукового возмущения от расстояния между принимающим зондом и кольцевым электродом в разные моменты времени от начала приложения импульса, $\Delta\tau = 20$ (○), 30 (△) и 35 (□) мкс

Возможность изменения расстояния между зондом и кольцевым электродом позволяла наблюдать развитие и распространение ионно-звуковых возмущений (рис. 2). По мере удаления принимающего зонда от возбуждающего электрода амплитуда ионно-звуковых возмущений, которые распространялись в направлении анода, росла и приобретала осцилляторную структуру. Возмущения носили характер бегущей волны. Перемещая кольцевой электрод вдоль оси трубки, измеряли длину волны. Частоту волны определяли по осциллографу и анализатору спектра, а фазовую скорость — по времени задержки сигнала ионно-звукового возмущения на зонд относительно импульса возбуждения. Измеренные значения фазовой скорости сравнивались со значениями скоростей, рассчитанных по данным зондовых измерений. Рассчитанные ($v_{s\,рас} \sim (3—4) \cdot 10^5$ см/с) и определенные из эксперимента ($v_{s\,экс} \sim (5—7) \cdot 10^5$ см/с) значения скоростей находились в удовлетворительном согласии. Частота исследуемых колебаний ($f \sim 100—180$ кГц) и длина волны ($\lambda \sim 3—7$ см) не зависели от амплитуды и длительности приложенного импульса.

Изучение пространственной зависимости амплитуды ионно-звуковых возмущений в различные моменты времени показало, что в фикси-

рованной точке пространства она уменьшается с течением времени (рис. 3). Наблюдаемый рост амплитуды ионно-звуковых возмущений в пространстве вдали от источника и ее затухание в фиксированной точке пространства с течением времени указывают на конвективный характер ионно-звуковой неустойчивости в наших экспериментах. Возмущения, нарастая в пространстве, сносятся по потоку, а в фиксированной точке пространства они исчезают при $t \to \infty$ [1, 2].

С помощью дополнительного кольцевого электрода из медной фольги на поверхности трубки, к которому прикладывалось ВЧ напряжение частотой от 1 до 10 МГц и амплитудой от 5 до 30 В, на пути распространения ионно-звуковой волны создавалась неоднородность плотности плазмы. Измерение радиального распределения концентрации электронов в плазме при воздействии высокочастотного поля, полученное с помощью подвижного зонда, показало, что по мере увеличения амплитуды и частоты высокочастотного поля при постоянном давлении и величине разрядного тока концентрация электронов в области кольцевого электрода уменьшалась. Для определения продольного распределения концентрации электронов использовали тот же метод, что и при исследовании радиального распределения. Однако вследствие того что передвижение зонда вдоль оси трубки технически трудно осуществимо, при измерении концентрации вдоль оси столба перемещался не зонд, а кольцевой электрод, к которому прикладывалось высокочастотное напряжение, создающее неоднородность плотности плазмы. Эксперименты показали, что и в этом случае концентрация электронов в области кольцевого электрода уменьшалась.

В наших экспериментах при распространении ионно-звуковых волн из области с большей концентрацией заряженных частиц плазмы в область с меньшей концентрацией амплитуда волны уменьшалась, отраженной волны не наблюдалось. При увеличении амплитуды ВЧ поля до 30 В плотность плазмы уменьшалась так, что образовавшийся профиль неоднородности приводил к эффекту непропускания ионно-звуковых волн. Такое поведение связано с тем, что при понижении концентрации заряженных частиц плазмы значение ионной ленгмюровской частоты $\omega_и$ в области неоднородности становилось соизмеримым со значением частот возбуждаемых ионно-звуковых волн ($\omega_и \sim \omega_s \sim 1$ МГц). В этой области частот существенно бесстолкновительное затухание Ландау для ионно-звуковых волн. Эксперименты показали, что при распространении ионно-звуковых волн в плазме с током из области с большей плотностью в область с меньшей ее пространственное нарастание, обусловленное током, сменялось пространственным затуханием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Федорченко А. М., Коцаренко Н. Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах. М.: Наука, 1981. [2] Fenneman D. B., Raecther M., Yamada M. Phys. Fluids, 1973, 16, p. 871.

Поступила в редакцию
03.04.84