

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ МОДУЛИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПОТОКОМ В ПЛАЗМЕ

Е.Б. Куприянова, С.В. Митько, И.А. Сычев

Приводятся результаты экспериментального исследования волн, возбуждаемых модулированным ионным потоком в неоднородной плазме. Рассматривается их поведение при различном соотношении нелинейных и дисперсионных свойств системы плазма – ионный поток.

Плазма создавалась импульсным плазменно-пучковым разрядом в аргоне при давлении $p_0 \sim 10^{-3}$ торр и удерживалась продольным магнитным полем с напряженностью $H \sim 100$ Э/л. Исследования проводились на стадии распада плазмы через $10 \div 20$ мкс после окончания импульса ионизации. Концентрация и температура электронов плазмы, измеренные с помощью одиночного ленгмюровского зонда, составляли $n_e \sim 10^{11} - 10^9$ см $^{-3}$ и $T_e \sim 5$ эВ. Ионная температура (по оценкам) $\sim 0,1$ эВ.

Формирование ионного потока и возбуждение волн осуществлялось с помощью устройства, состоящего из двух цилиндрических электродов 1 и 2, помещенных в плазму (рис. 1). Заземленная сетка 3 с размером ячейки $l \sim 0,15$ мм создает потенциальный барьер для электронов, осуществляя электрический разрыв плазмы. При этом имеются две независимые по потенциалу области I и II. В области I плазма принимает потенциал электрода 2 – V_I , задаваемый приложенным к нему напряжением $U_{см}$, а в области II устанавливается потенциал плазмы V_{II} (рис. 1б). Ускоряющая ионы разность потенциалов $\Delta V = V_I - V_{II}$ приводит к появлению ионного потока, наблюдаемого в области II с помощью подвижного одиночного ленгмюровского зонда 5. В отсутствие ускоряющей разности потенциалов ток ионов на зонд пропорционален плотности плазмы в области II; при подаче $U_{см}$ наблюдается возрастание ионного тока насыщения, что свидетельствует о появлении ионного потока в области II. Величина потока пропорциональна ΔV и практически не зависит от расстояния до сетки вдоль оси z . Отношение концентрации ионов пучка к плотности плазмы достигает 7% при $\Delta V = 50$ В.

Возбуждение колебаний в системе плазма – ионный поток осуществлялось при подаче на внутренний электрод 2 переменного модулирующего напряжения V_{\sim} (рис. 1). Величины ΔV и V_{\sim} варьировались в пределах $\Delta V = 20 - 100$ В, $V_{\sim} = 1-15$ В при частоте модуляции $f_0 = 4$ МГц. Исследование колебаний проводилось с помощью одиночного подвижного ленгмюровского зонда 5, а также методом рассеяния лазерного излучения [2]. Было обнаружено существование двух различных режимов распространения колебаний, зависящих от плотности плазмы.

С помощью зондовых фазовых измерений и измерений методом рассеяния излучения CO_2 лазера при $n_e \sim 10^{11}$ см $^{-3}$ установлено, что исследуемые колебания представляют собой плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси z на расстояние нескольких сантиметров от сетки 3 (рис. 1). Фазовая скорость волны $v_{ф}$ практически совпадала со скоростью ионного потока $v_0 = \sqrt{2e\Delta V/M_i}$ (M_i – масса иона) в широком диапазоне ΔV . Длина волны задавалась частотой возбуждения f_0 и величинами ΔV и V_{\sim} . В диапазоне изменения этих величин она менялась от 0,5 до 5 мм при $f_0 = 4$ МГц, $\Delta V = 50$ В, $V_{\sim} = 10$ В, $\lambda = 4$ мм.

На рис. 2 представлены типичные зависимости амплитуды колебаний ионного тока насыщения на зонд от расстояния по оси z . Характерной чертой этой зависимости является наличие максимума, положение которого зависит от величины ускоряющей разности потенциалов ΔV , величины V_{\sim} и частоты модулирующего напряжения. Кроме колебаний на основной частоте $f_0 = 4$ МГц в сигнале рассеянного излучения и в ионном токе на зонд были обнаружены колебания на частотах гармоник (вплоть до шестой). Наличие гармонических составляющих основного сигнала и зависимость положения максимума амплитуды колебаний от ΔV , V_{\sim} и f указывает на нелинейность исследуемой волны.

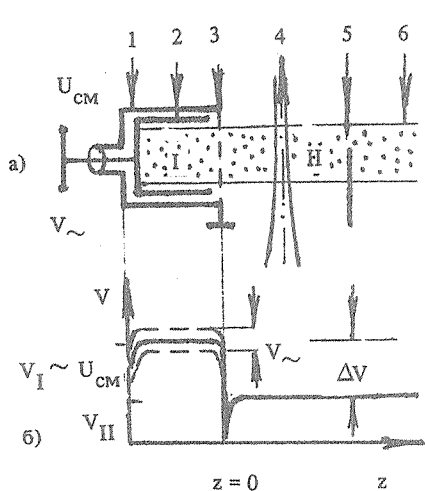


Рис. 1.

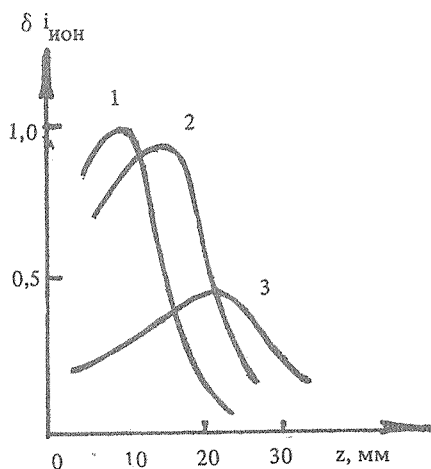


Рис. 2.

Рис. 1. а) Устройства для возбуждения колебаний: 1, 2 – цилиндрические электроды; 3 – заземленная сетка электрода 1; 4 – зондирующий пучок CO_2 лазера; 5 – подвижный ленгмюровский зонд; 6 – плазменный столб. б) Распределение потенциалов вдоль оси плазменного столба: $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения и V_{\sim} – переменное напряжение, подаваемые на электрод 2; V_{I} и V_{II} – потенциалы плазмы в областях I и II.

Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний ионного тока насыщения на зонд от расстояния по оси z при $n_e \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 2 \text{ эВ}$: 1 – $\Delta V = 40 \text{ В}$; $V_{\sim} = 10 \text{ В}$; 2 – $\Delta V = 40 \text{ В}$, $V_{\sim} = 5 \text{ В}$; 3 – $\Delta V = 60 \text{ В}$, $V_{\sim} = 10 \text{ В}$.

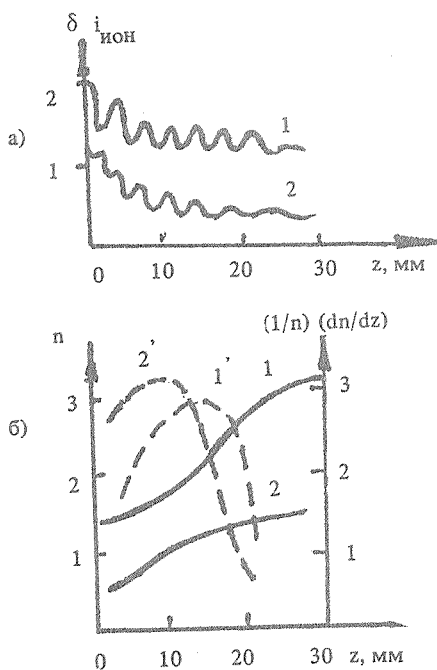


Рис. 3. Амплитуда колебаний ионного тока на зонд вдоль оси при $n_e \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 5 \text{ эВ}$, $\Delta V = 80 \text{ В}$, $V_{\sim} = 10 \text{ В}$. б) Продольный профиль плотности плазмы (сплошные кривые) и его производной (пунктирные кривые). Кривые 1 – через 10 мкс после окончания импульса ионизации, 2 – через 20 мкс.

Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с кинематической теорией фазовой фокусировки частиц, первоначально промодулированных по скоростям [3]. Согласно [3], амплитуда колебаний достигает максимального значения (положение фазового фокуса) на расстоянии

$$z_{\max} = 2(v_0/\omega)\Delta V/V_{\sim}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$. Сравнение экспериментально полученных z_{\max} с рассчитанными по формуле (1) дало хорошее совпадение вплоть до больших значений ΔV . При $\Delta V > 80$ В экспериментально полученный максимум наблюдался раньше расчетного, что говорит об отклонении от простой кинематической теории взаимодействующих частиц. Аналогичное поведение ионов наблюдалось в [4], при изучении распространения высокоэнергетичного ионного пучка, промодулированного по скоростям в радиальном направлении.

При понижении плотности плазмы поведение волны, возбужденной в системе плазма — ионный поток, существенно меняется. На рис. 3 представлены зависимости амплитуды первой гармоники от расстояния по оси z и профиль плотности плазмы через 10 и 20 мкс после окончания импульса ионизации для $n_e = 10^9$ см $^{-3}$. При этом наблюдалась пространственная модуляция амплитуды волны на расстоянии, согласующемся с характерным размером неоднородности продольного профиля плазмы. Период пространственной модуляции оказался равным расчетной длине волны, в то же время с помощью зондовых фазовых измерений определить длину волны не удалось. Эти факты можно объяснить, если предположить, что пространственная модуляция амплитуды возникает в результате отражения волны от зоны неоднородности с последующей интерференцией падающей и отраженной волн.

Параметром, определяющим соотношение между нелинейными и дисперсионными свойствами системы плазма — ионный поток, является отношение $\xi = \tilde{v}/\Delta v_{\phi}/5$, где \tilde{v} — амплитуда переменной составляющей скорости потока, $\Delta v_{\phi} = a c_s r_D^2 k^2/2$ — расстройка фазовой скорости волны за счет дисперсии, $c_s = \sqrt{T_e/M_i}$ — скорость звука, $r_D = \sqrt{T_e/4\pi e^2 n_e}$ — радиус Дебая, $a = \sqrt{n_b/n_e}$.

При $\xi \ll 1$ поведение системы плазма — ионный поток полностью описывается ее дисперсионными свойствами, а при $\xi \gg 1$ — нелинейными. При $n_e \sim 10^9$ см $^{-3}$ параметр $\xi \sim 1$, при $n_e \sim 10^{11}$ см $^{-3}$ $\xi \sim 10$.

Таким образом, в области больших плотностей дисперсия среды слаба и основную роль играют ее нелинейные свойства. В случае малых плотностей плазмы характер распространения волны в большей степени определяется дисперсионными свойствами системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карфидов Д. М., Лукина М. А., Сергейчев К. Ф. Физика плазмы, 7, вып. 1, 136 (1981).
2. Буланов В. В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 18 (1983).
3. Гапонов В. И. Электроника, М., Физматгиз, 1960, ч. 2, с. 295.
4. Кацубо Л. П., Коваленко В. П., Солошенко И. А. ЖЭТФ, 67, вып. 1 (7), 110 (1974).
5. Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме. М., Наука, 1976, с. 107, 111.

Поступила в редакцию 28 января 1986 г.