

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЦЕЗИЕВАЯ ПЛАЗМА В СИЛЬНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Р.А.Демирханов, Г.Л.Хорасанде, И.К.Сидорова

В настоящем письме излагаются результаты экспериментального исследования поведения термической цезиевой плазмы в сильном высокочастотном электрическом поле. Эксперименты проводились на установке типа Q-машины [1] с одним накаливаемым эмиттером плазмы. Термическая цезиевая плазма имела следующие начальные параметры: длина плазменного шнура — 25 см; диаметр шнура — 2,5 см; плотность плазмы $n_e = n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; температура — $T_e = T_i = 0,2 \text{ эв}$; степень ионизации $\eta \sim 10 - 20\%$; продольное магнитное поле — 3500 э; уровень собственных низкочастотных колебаний плазмы — $e\phi/T \sim 10^{-3}$.

Переменное электрическое напряжение, варьируемое в диапазоне частот 0,3 — 15 МГц, прикладывалось к плоскому электроду - коллектору, расположенному на свободном торце Q-машины на расстоянии 25 см от эмиттера, так что в плазме возбуждался продольный высокочастотный ток. При превышении высокочастотного потенциала на коллекторе Q — машины критической величины, порядка 5-10 э, в плазме возбуждались интенсивные низкочастотные колебания потенциала и плотности плазмы. Частоты их лежали в диапазоне характерных частот ионного звука и его гармоник, они не зависели от напряженности магнитного поля и менялись обратно пропорционально длине плазменного шнура. Аналогичные колебания наблюдались авторами работы [2] в термической

плазме при протекании в ней "надкритического" ($j \gg n e c_e$) постоянного тока и были отнесены к ионно - звуковым. Однако, спектр колебаний, возбуждаемых ВЧ током, отличался от спектра, возбуждаемого при пропускании постоянного тока через плазму, существенно большей амплитудой колебаний и сдвигом основной гармонике звука и ее обертонов в сторону больших частот (рис.1). Зависимость амплитуды A_1 и частоты f_1 первой гармоники ионного звука от частоты внешнего высокочастотного поля Ω , амплитуда которого поддерживалась постоян-

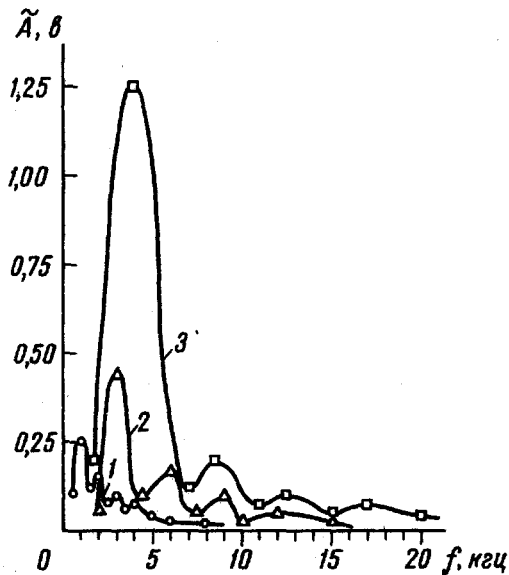


Рис.1. Спектры колебаний потенциала плазмы в центре шнура. $n = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$;
 $H = 3500 \text{ э}$; $V_a = 20 \text{ в}$. 1 - $\Omega = 0$;
 2 - $\Omega = 5 \text{ Мгц}$; 3 - $\Omega = 15 \text{ Мгц}$

ной на уровне 20 в ($V > V_{\text{крит}}$), представлена на рис.2. Она свидетельствует о повышении температуры электронной компоненты плазмы с ростом частоты внешнего поля. В самом деле, увеличение частоты ионного звука в нашем случае может быть связано с нагревом электронов ($f \sim \sqrt{T_e / M_i / L}$). Таким же образом объясняется возрастание амплитуды колебаний потенциала плазмы, если допустить в соответствии с результатами эксперимента [2], что установившаяся амплитуда ионно-звуковых колебаний A_1 порядка T_e / e .

Ранее [3] проведенные нами зондовые измерения температуры электронов в условиях, существенно не отличающихся от условий описываемого эксперимента, удовлетворительно согласуются с приведенными выше результатами. Было установлено, что с ростом частоты внешнего ВЧ поля вольтамперные характеристики одиночного ленгмюровского зонда существенно видоизменяются. Определенная из наклона характе-

ристик температура электронов достигала нескольких электронвольт при частотах 5-15 Мгц.

Можно предполагать, что наблюдаемый нагрев электронов связан с коллективными процессами, развивающимися в плазме при прохождении тока [4]. В самом деле, плазма в наших экспериментах является бесстолкновительной ($\lambda_{ei} \sim L$), а электрические поля, реализуемые в эксперименте, таковы (~ 1 в/см), что в течение каждого полупериода

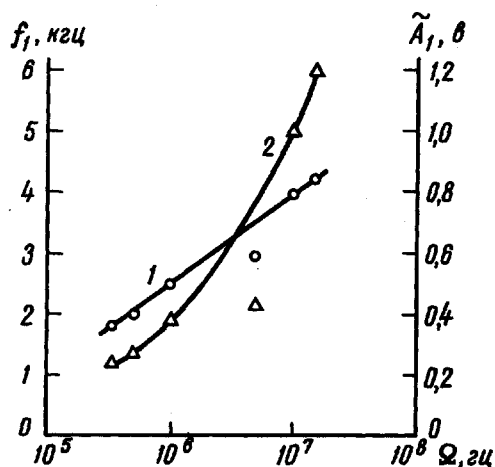


Рис.2. Зависимость частоты (кривая 1) и амплитуды (кривая 2) первой гармоники ионно-звуковых колебаний от частоты внешнего переменного электрического поля. $n = 1 \cdot 10^{10}$ см⁻³; $H = 3500$ э; $V_a = 20$ в

ВЧ поля электроны набирают направленную скорость u , превышающую тепловую скорость электронов $v_{те}$ ($u > v_{те}$), т.е. выполняются условия для развития пучковой неустойчивости [5, 6]. Турбулентный нагрев плазмы в условиях пучковой неустойчивости обычно сопровождается аномально большим сопротивлением прохождению тока [7, 8]. Аналогичный эффект наблюдается в нашем эксперименте. На рис.3 приведены осциллограммы ВЧ напряжения и тока в плазме. Из них следует, что при малых напряжениях (осциллограммы 1-3, рис.3) ток в плазме носит индуктивный характер, хотя обнаруживается тенденция к уменьшению сдвига фазы между током и напряжением с увеличением амплитуды электрического поля. При $V > V_{крит} \approx 20$ в ток, достигнув критической величины, сказывается чисто омическим и ограниченным по амплитуде большим сопротивлением плазмы (осциллограмма 4, рис.3). Колебания плотности плазмы, происходящие с частотой ионного звука, приводят к низкочастотной модуляции амплитуды тока. Этому соответствует

размазывание токового сигнала на рис.3, полученного при многократном запуске развертки осциллографа. Отметим, что наблюдаемое однополупериодное выпрямление ВЧ тока обусловлено наличием эмиттирующей поверхности только на одном торце Q-машины. Второй торцевой электрод-коллектор не нагревался.

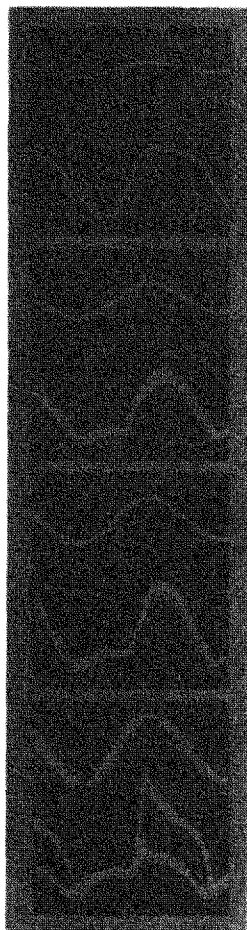


Рис.3. Осциллограммы ВЧ напряжения (верхний луч) и ВЧ тока в плазме (нижний луч) $n = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $H = 3500 \text{ э}$. 1 - $V_a = 5 \text{ в}$; 2 - $V_a = 10 \text{ в}$; 3 - $V_a = 15 \text{ в}$; 4 - $V_a = 20 \text{ в}$. Частота ВЧ поля - 500 кГц. Запуск развертки осциллографа - многократный

Полученные нами экспериментальные результаты можно резюмировать следующим образом:

1. Сильное ($eEL \gg T$) высокочастотное электрическое поле, наложенное на "спокойную" термическую плазму, приводит к существенному повышению температуры электронов.

2. Эффективность нагрева плазмы возрастает с увеличением частоты внешнего переменного поля, что может представлять интерес для турбулентного нагрева плазмы.

3. В неизотермической плазме, находящейся в сильном высокочастотном поле, возбуждаются интенсивные колебания типа ионного звука, частота которых существенно меньше частоты внешнего переменного поля.

Авторы благодарят А.К.Геворкова, А.Г.Кирова, Ф.М.Некрасова, А.Ф.Попова, Л.И.Рудакова, В.П.Сидорова – за ценные обсуждения.

Сухумский
физико-технический институт

Поступило в редакцию
3 сентября 1967 г.

Литература

- [1] N.Rynn, N.D'Angelo. Rev. Sci. Instr., 31, 1326, 1960.
- [2] Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Ядерный синтез, 6, 255, 1966; ЖЭТФ, 52, 387, 1967.
- [3] Р.А.Демирханов, Г.Л.Хорасанов, И.К.Сидорова, Г.И.Зверев. Докл. на 8-ой Междунар. конф. по явлениям в ионизованных газах, Вена, 1967.
- [4] Е.К.Завойский. АЭ, 14, 57, 1963.
- [5] Я.Б.Файнберг. АЭ, 11, 313, 1961.
- [6] Р.А.Демирханов, А.К.Геворков, А.Ф.Попов, Г.Л.Хорасанов. Plasma physics and controlled nuclear fusion research, Vienna, 2, 801, 1966.
- [7] Б.А.Демидов, Н.И.Елагин, Д.Д.Рютов, С.Д.Фанченко. ЖЭТФ, 48, 455, 1965.
- [8] Р.А.Демирханов, А.Г.Киров и др. Plasma physics and controlled nuclear fusion research, Vienna, 2, 327, 1966.