

НАГРЕВ ИОНОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

Е.К.Завойский, С.Л.Недосеев, Л.И.Рудаков

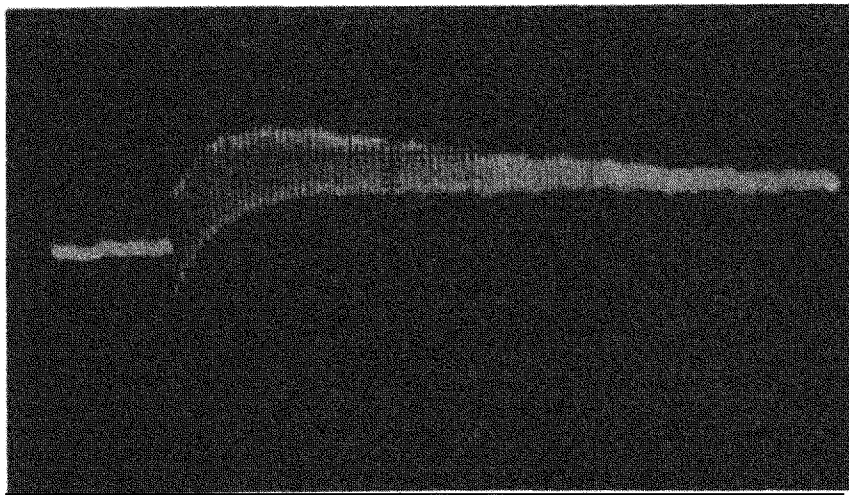
В магнитной ловушке ТН-4 типа пробкотрона, описанной в [1], мы исследовали нагрев ионов плазмы при турбулентном нагреве ее током, протекающим вдоль магнитной оси пробкотрона [1,2]. В отличие от [2,3] для определения средней энергии ионов был использован метод, основанный на одновременном измерении энергии E и импульса P потока нейтралов перезарядки ионов плазмы. Средняя энергия \bar{E} нейтралов вычислялась по формуле

$$\bar{E} = \frac{M}{2} \left(\frac{2E}{P} \right)^2$$

и принималась равной средней энергии ионов плазмы. Для измерения E и P был применен специально изготовленный конденсаторный микрофон, который располагался за стенкой вакуумной камеры против отверстия в ней, сделанного в средней части камеры. Микрофон был защищен от плазмы тремя металлическими сетками. Мембрана микрофона была сделана из алюминиевой полоски шириной 0,8 см и толщиной $2,5 \cdot 10^{-3}$ см, покрытой с внутренней стороны пленкой окиси алюминия, а с наружной стороны сажей. Благодаря разности коэффициентов теплового расширения алюминия и его окиси, мембрана при нагревании потоком нейтралов деформировалась и емкость микрофона изменялась.

Градуировка чувствительности мембраны по энергии производилась при пропускании через нее тока и контролировалась по балометру от импульсного источника света. Точность и постоянство градуировки составляли 5%. Постоянная времени охлаждения мембраны была около 0,1 сек.

Импульс нейтралов измерялся тем же микрофоном. Поток нейтралов перезарядки ионов плазмы передавал свой полный импульс мембране за время значительно меньшее периода ее собственных колебаний и вызвал затухающие колебания мембраны и, следовательно, изменение ем-



Оциллограмма датчика импульса и энергии потока нейтралов перезарядки ионов. Длительность развертки 110 мсек. Величина импульса нейтралов $P = 2,1 \cdot 10^{-3}$ г.см/сек, энергия $E = 7,2 \cdot 10^4$ эрг, средняя энергия ионов плазмы 2,4 кэв при концентрации 10^{13} см⁻³. Частота механических колебаний мембраны 0,62 кгц

кости микрофона. Чувствительность микрофона к импульсу определялась путем подачи разности потенциалов между мембраной и ближайшей к ней металлической сеткой, экранирующей микрофон от плазмы. Точность и постоянство градуировки по импульсу составляли, соответственно, 2 и 5%. Необходимая для наших экспериментов абсолютная чувствительность микрофона по энергии и импульсу были выбраны в результате предварительных опытов.

Для упрощения измерений емкости микрофона, он был включен в контур генератора на 30 Мгц, колебания которого создавали биения с колебаниями стандартного генератора. После преобразования частоты биений в амплитуду, сигнал подавался на усилитель оциллографа.

На рисунке приведена типичная оциллограмма показаний микрофона на установке ТН-4. В начальной стадии видны затухающие колебания мембраны с частотой 0,64 кгц, вызванные импульсом потока нейтралов перезарядки и затем медленно нарастающие отклонения, вызванные деформацией мембраны при нагревании ее через слои сажи пото-

ком нейтралов. В этом опыте было найдено, что средняя энергия ионов плазмы около 2 кэв при концентрации горячих частиц в плазме $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Эти данные находятся в качественном согласии с измерениями диамагнетизма плазмы и СВЧ измерениями ее концентрации.

С помощью описанного датчика был изучен нагрев ионов в турбулентной плазме в двух режимах. В первом случае пробкотрон заполнялся плазмой от одной или двух титановых пушек, расположенных в магнитных пробках и через $15 \times 100 \text{ мксек}$ производился турбулентный нагрев плазмы током. Во втором случае пробкотрон сначала заполнялся плазмой от одной пушки, а затем через $15 + 50 \text{ мксек}$ срабатывала вторая пушка и турбулентный нагрев производился с разными задержками по времени относительно начала ее работы. В обоих случаях был измерен значительный нагрев ионов плазмы. Однако во втором варианте, когда задержка τ составляла от 2 до 4 мксек наблюдался значительно больший нагрев ионов. При этом средняя энергия ионов достигала $5+8 \text{ кэв}$, а энергия ионов в погонном сантиметре плазменного столба после нагрева током превосходила начальный запас энергии в конденсаторе второй пушки. Отсюда следует, что сильный нагрев ионов не был результатом простого торможения плазменного сгустка от второй пушки, но возникал только тогда, когда через плазму проходил быстрый плазменный сгусток, скорость которого лежала в интервале значений $v = L/2\tau \approx (3 + 5) 10^7 \text{ см/сек}$, где L — длина пробкотрона.

Это явление можно объяснить в рамках теории, связывающей аномальное сопротивление плазмы с ионнозвуковой неустойчивостью тока [4]. Если нагрев основной массы ионов турбулентной плазмы может происходить благодаря относительно слабым нелинейным эффектам, то ионы сгустка, двигающиеся через плазму со скоростью, большей скорости ионного звука, могут греться благодаря линейному затуханию Ландау колебаний, возбуждаемых током электронов. Скорость такого нагрева велика и может быть сравнима со скоростью нагрева электронов электрическим полем.

Из условия существования ионнозвуковой неустойчивости следует, что плотность энергии $n'T_i'$ горячей ионной компоненты плазмы может превосходить плотность энергии nT_e электронов, но не более, чем в $(T_i'/T_e)^{5/2} (\mu v^2/T_e)^{1/2}$ раз (v — токовая скорость). Так как электроны из-за большей подвижности вдоль магнитного поля остывают быстрее ионов, то плотность энергии, запасенной в ионах за время нагрева, может оказаться больше, чем в электронах.

Поступило в редакцию
7 октября 1967 г.

Литература

- [1] М.В.Бабыкин, П.П.Гаврин, Е.К.Завойский и др. ЖЭТФ, 52, 643, 1967.
- [2] М.В.Бабыкин, П.П.Гаврин, Е.К.Завойский и др. ЖЭТФ, 47, 1597, 1964.
- [3] М.В.Бабыкин, Е.К.Завойский, Л.И.Рудаков и др. ЖЭТФ, 43, 1976, 1962.
- [4] Л.И.Рудаков, Л.В.Кораблев. ЖЭТФ, 50, 220, 1966.