

НАГРЕВ ИОНОВ ПЛАЗМЫ ВНЕШНИМ СТОХАСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

О.М.Швец, С.С.Калиниченко, В.И.Курилко, Г.А.Мирошниченко

Одним из эффективных методов нагрева ионов в плазме следует считать высокочастотный нагрев. Этим методом осуществлен нагрев ионов до энергий $1 - 2 \text{ кэВ}$ при плотности частиц $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в объеме нескольких литров [1]. Поскольку энергия ионов при высокочастотном нагреве первоначально содержится в виде регулярного движения их в поле волны, так что столкновение частиц отсутствует, то для обеспечения реакции синтеза необходим процесс, приводящий к хаотизации этого движения.

При ускорении частиц в стохастическом поле необходимость в специальном процессе термализации отпадает, так как термализация обеспечивается самим полем. Впервые возможность нагрева частиц стохастическим полем была указана в работе [2]. Нагрев электронной компоненты плазмы стохастическим полем рассмотрен в работе [3]. Для обеспечения стохастического нагрева ионов плазмы необходимо обеспечить проникновение поля в плотную плазму с одновременным выполнением условия $r_c \ll t$, где r_c — время корреляции стохастического поля; t — время жизни частиц в ловушке. Выражение для средней энергии частицы имеет вид [3]

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{4M} \frac{e^2 E^2}{(\omega - \omega_{ci})^2 + r_c^{-2}} \frac{t}{r_c},$$

где $\bar{\epsilon}$ — средняя энергия частицы, M — масса частицы, E — напряженность электрического поля в плазме, e — заряд электрона, ω — частота генератора, ω_{ci} — ионная циклотронная частота частицы.

Экспериментальные исследования стохастического нагрева ионов проводились на установке "Вихрь" [4], со стеклянной камерой. Плазма создавалась тем же стохастическим ВЧ полем, которым производился и нагрев. Первоначальным источником шума служил газовый стабилитрон СГЗП, шумовой спектр которого располагается в области частот $0 - 1,5 \text{ МГц}$. Этот спектр преобразовывался с помощью кольцевого балансного модулятора в используемую область частот, усиливался и подавался на оконечный усилитель мощности (ОУМ). Нагрузкой ОУМ служил контур, нагруженный вносимым сопротивлением плазмы. Регулировка рабочей полосы частот осуществлялась как на входе ОУМ, так и на его выходе, путем уменьшения связи выходного контура с плазмой. Измерение полосы производилось в непрерывном режиме спектроанализа.

заторм С 4-8 после подключения к контуру сопротивления, равного эквивалентному сопротивлению плазмы. При работе с плазмой ОУМ использовался в импульсном режиме. Эксперименты проводились с рабочей полосой $\Delta f = 200 \text{ кГц}$ и $\Delta f = 80 \text{ кГц}$, которая располагалась в области 2 МГц , что соответствовало условию возбуждения ионно-циклотронных волн ($\omega \leq \omega_{ci}$). Мощность, вводимая в плазму, измерялась по методу эквивалентного сопротивления, а ВЧ напряжение – квадратичным детектором.

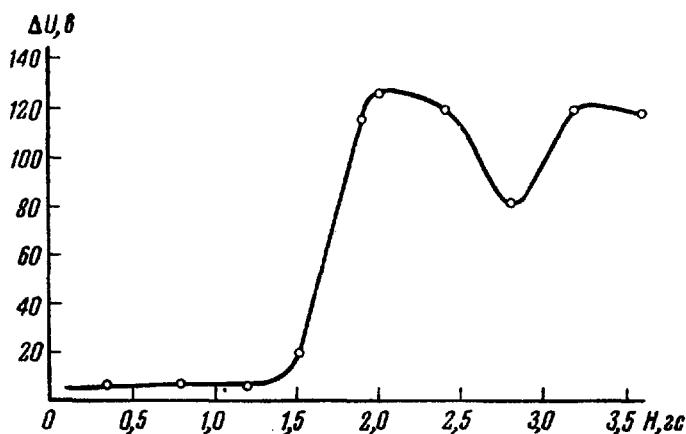


Рис. 1. Зависимость разности запирающих напряжений $\Delta V = U_{\text{зап}}^{\text{стох}} - U_{\text{зап}}^{\text{рег}}$ от напряженности внешнего магнитного поля

Чтобы заведомо ослабить эффект хаотизации "магнитным берегом", эксперименты проводились вдали от него. В этих условиях, воздействуя на плазму стохастическим и регулярным сигналом, можно было ожидать различий в функции распределения ионов по энергии. Энергетический спектр ионов определялся с помощью зонда поперечной энергии, работающего по методу запирающего потенциала [4]. Оценка плотности заряженных частиц производилась методом отсечки сигнала 3-сантиметрового генератора. При давлении водорода в рабочей камере $P = 5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$ и вводимой мощности 700 см , создавалась плазма плотностью 10^{12} см^{-3} в объеме 2 л. В этих условиях время жизни иона определяется в основном столкновениями с молекулами нейтрального газа и составляет $t = 100 \text{ мксек}$. Следовательно, для сигнала с $\Delta f = 200 \text{ кГц}$ выполняется условие $\tau_c \ll t$.

Для обнаружения различий энергетического спектра в случае воздействия стохастическим и синусоидальным сигналом была снята серия зондовых характеристик для различных значений напряженности внеш-

него магнитного поля H . При одинаковом высокочастотном напряжении на вводах в рабочую камеру постоянным оказался и ток коллектора зонда при запирающем напряжении $U_{\text{зап}} = 0$.

Результаты измерений приведены на рис. 1. Из рисунка следует, что различие в спектрах наблюдается в области напряженности магнитного поля, где имеет место возбуждение ионно-циклотронных волн.

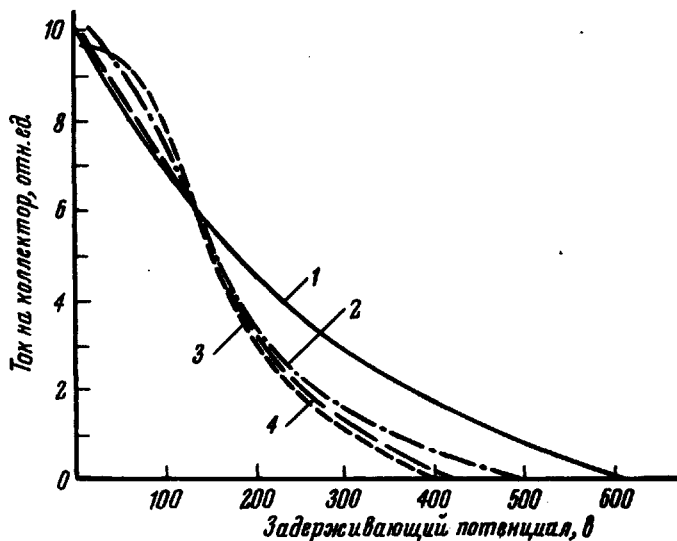


Рис. 2. Зондовые характеристики, снятые для различных сигналов ($H = 2,0 \text{ кэс}$, $P = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$): 1 — $\Delta f = 200 \text{ кГц}$; 2 — $\Delta f = 80 \text{ кГц}$; 3 — регулярный сигнал ($\Delta f = 0$); 4 — регулярный сигнал, модулированный частотой $F = 40 \text{ кГц}$, с глубиной модуляции $m = 80\%$

Зондовые характеристики, полученные при воздействии на плазму стохастическим и регулярным сигналами (рис. 2), свидетельствуют о расширении энергетического спектра при расширении полосы шумового сигнала. Энергетическое распределение ионов, определяемое по зависимости логарифма зондового тока от запирающего потенциала, с ростом ширины полосы сигнала приближается к максвелловскому. Однако энергетический спектр остается таким же, как и при регулярном сигнале, в случае наложения на последний модуляционного сигнала с частотой $F = 40 \text{ кГц}$ и глубиной модуляции $m = 80\%$. Это еще раз подтверждает необходимость стохастического поля для обеспечения нагрева.

Таким образом, применение стохастического высокочастотного поля позволяет осуществить нагрев плотной плазмы в ловушках без использования специальных процессов термализации, что приводит к ряду преимуществ по сравнению с нагревом регулярными полями.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
23 сентября 1968 г.

Литература

- [1] О.М.Швец, В.Ф.Тарасенко, С.С.Овчинников, В.Т.Толок. Сб. Высокочастотные свойства плазмы. Киев, изд. "Наукова думка", 1967.
- [2] В.И.Векслер, А.А.Коломенский, Э.Л.Бурштейн. Сб. Некоторые вопросы теории ускорителей. М., изд. АН СССР, 1955.
- [3] Ф.Г.Басс, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро. ЖЭТФ, 49, 7, 1965.
- [4] О.М.Швец, В.Ф.Тарасенко, С.С.Овчинников, В.Т.Толок. Сб. Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Киев, изд. АН УССР, вып.3, 1963.