

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗРАСТАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ В РЕЗОНАНСНОМ СЛОЕ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Л. И. Григорьева, Б. И. Смердов, С. А. Сапогов,

В. В. Чечкин

В настоящей работе сообщается об экспериментальном обнаружении резкого возрастания азимутального магнитного поля H_ϕ ионной циклотронной волны в области так называемого резонансного слоя [1] неоднородной плазмы. В этом слое квадрат продольного показателя преломления $n_{||} = k_{||} c / \omega$ близок к величине компоненты $\epsilon_1 = -\omega_{pi}^2 / (\omega^2 - \omega_{Hi}^2)$ тензора диэлектрической проницаемости ($n_{||}^2 \approx \epsilon_1$, $\omega < \omega_{Hi}$).

Явление резкого увеличения радиального электрического поля волны $E_r = H_\phi / n_{||}$ в резонансном слое, аналогичное эффекту "разбухания" поля в неоднородной плазме в области гибридных резонансов [2], было исследовано теоретически в [3, 4]. В окрестности этого слоя может происходить сильное поглощение волны за счет черенковского [3], циклотронного [5] или столкновительного [4] затухания. В ряде экспериментальных работ [6 - 8] наблюдалось сильное поглощение волн с частотой $\omega < \omega_{Hi}$ в плазме и предполагалось, что это поглощение обусловлено наличием резонансного слоя.

Существованием резонансного слоя можно воспользоваться для получения сильных переменных электрических полей в плазме с целью ее турбулентного нагрева. Приводимые в настоящей работе данные получены в экспериментах, в которых исследуется такая возможность.

Плазма создавалась высокоточным прямым разрядом в водороде, исходное давление $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст., длительность импульса разрядного тока ~ 15 мксек, внутренний диаметр кварцевой разрядной трубы равен 6,2 см, расстояние между электродами 88 см. Электрическая схема источника плазмы аналогична схеме описанной в [9]. Разряд производился в квазипостоянном продольном магнитном поле H . Колебания в плазме возбуждались катушкой Стикса, состоящей из 8 секций

диаметром 8,5 см. Аксиальный период $2\pi/k_{||}$ высокочастотного (ВЧ) поля, генерируемого катушкой, равен 20 см. Катушка являлась индуктивностью ударного контура с собственной частотой $\omega/2\pi = 6,6$ МГц. Максимальная амплитуда переменного продольного магнитного поля H_z на оси в вакууме достигала 200 э.

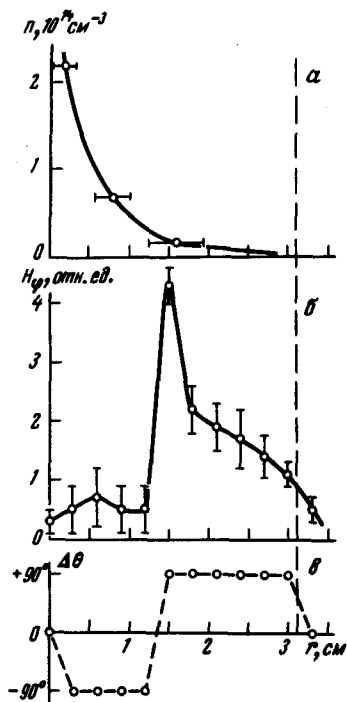


Рис. 1. Радиальное распределение плотности плазмы (а), поля H_ϕ (б) и сдвига фаз между H_r и H_ϕ при $H = 4650$ э. Вертикальной штриховой линией отмечено положение стенки трубы

ВЧ поле включалось через ~ 10 мксек после окончания импульса разрядного тока. Характер радиального распределения плотности плазмы $n(r)$ в этот момент (рис. 1, а) был установлен на основании совместного наблюдения проходящих и отраженных микроволновых сигналов (последние в схеме интерферометра) с длиной волны 8,1; 4,0 и 2,2 мм. В области частот $\omega \sim \omega_{H_i}$ плазмой поглощалось до 70% энергии, запасенной в контуре. При этом существенно (в два – три раза) увеличилось поле H_z , что свидетельствовало о возбуждении волны в плазме.

Радиальное распределение H_ϕ измерялось магнитным зондом диаметром 2 мм, который перемещался по диаметру разрядной трубы в кварцевой трубке (наружный диаметр 4 мм) в сечении между двумя соседними секциями возбуждающей катушки. Зависимость $H_\phi(r)$ при постоянном магнитном поле 4650 э ($\omega = 0,9\omega_{H_i}$) изображена на рис. 1, б. На рис. 1, в для этого же случая показана зависимость от радиуса разности фаз $\Delta\theta$ колебаний компонентов H_ϕ и H_r (последний измерялся миниатюрным магнитным зондом, который располагался рядом с зондом, измерявшим H_ϕ). Для зависимости $H_\phi(r)$ характерно скачкообразное увеличение H_ϕ в окрестности $r_0 \approx 1,5$ см. Как следует из рис. 1, в в этом же месте величина $\Delta\theta$ испытывает скачок на 180° . При $r > r_0$ определенное по $\Delta\theta$ направление вращения вектора попе-

речного магнитного поля колебаний соответствует ионной циклотронной волне. Таким образом, при $r < r_0$ ионная циклотронная волна не возбуждается.

Совокупность данных, приведенных на рис. 1, позволяет заключить, что скачкообразное изменение H_ϕ в окрестности $r_0 \approx 1,5$ см обусловлено резонансом $n_{ii}^2 \approx \epsilon_1$. Вычисленная из этого равенства плотность плазмы для условий рис. 1 $n \approx 1,0 \cdot 10^{13}$ см⁻³ близка к плотности $n(r_0) \approx 1,7 \cdot 10^{13}$ см⁻³, определенной из рис. 1, а.

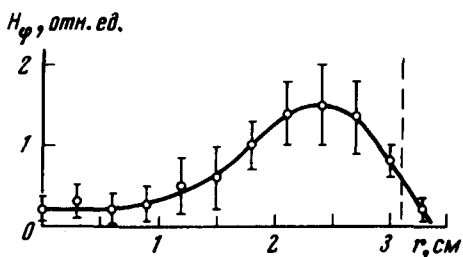


Рис. 2. Радиальное распределение поля H_ϕ при $H = 3000$ э

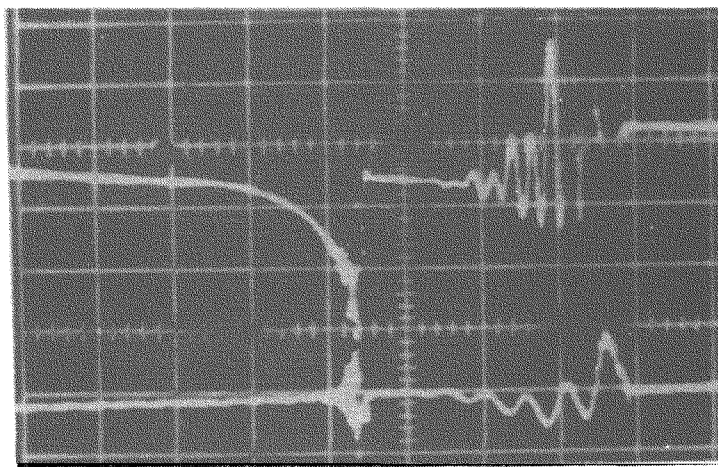


Рис. 3. Верхний луч — совмещенные осциллограммы тока прямого разряда и ВЧ тока в возбуждающей катушке; нижний луч — диамагнитный сигнал. Развертка 5 мксек/дел

Как и следовало ожидать, особенность в зависимости $H_\phi(r)$ отсутствует при $H = 3000$ э ($\omega = 1,4 \omega_{Hi}$), когда равенство $n_{ii}^2 \approx \epsilon_1$ не выполняется ни при каком значении n (рис. 2, H_ϕ отложено в том же масштабе, что и на рис. 1).

Из сравнения рис. 1, б и 2 следует, что поле H_ϕ в резонансном слое возрастает примерно на порядок. Максимальная амплитуда H_ϕ в резонансном слое достигала по абсолютной величине 500 э. Соответствующее радиальное электрическое поле по порядку величины равно 700 в/см. Максимальная поперечная токовая скорость равна $v_r \approx k_{\parallel} c H_\phi / 4\pi n e = 4 \cdot 10^7$ см/сек и значительно превышает предполагаемую тепловую скорость ионов ($\lesssim 3 \cdot 10^6$ см/сек). Поэтому в окрестности резонансного слоя должен происходить турбулентный нагрев плазмы [10]. При включении ВЧ поля имело место быстрое ($\lesssim 1$ мксек) увеличение поперечного давления плазмы, которое регистрировалось диамагнитным зондом (рис. 3). В условиях рис. 1, б ($\omega < \omega_{Hi}$) это увеличение достигало $7 \cdot 10^{15}$ эв/см³. В условиях рис. 2 ($\omega > \omega_{Hi}$) прирост поперечного давления был значительно меньше. Поэтому можно предполагать, что увеличение внутренней энергии плазмы, по крайней мере, частично обусловлено нагревом плазмы сильным ВЧ полем в обнаруженном нами резонансном слое. †

Приносим глубокую благодарность И.Ю.Адамову и В.И.Кононенко за помощь при выполнении работы и А.В.Лонгинову и К.Н.Степанову за обсуждение работы и полезные советы.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 марта 1973 г.

Литература

- [1] Т. Н. Stix. Phys. Fluids , 3, 19, 1960; Т.Стикс. Теория плазменных волн. М., Атомиздат, 1965.
- [2] В.Е.Голант, А.Д.Пилия. УФН, 104, 413, 1972.
- [3] В.В.Долгополов, К.Н.Степанов. Ядерный синтез, 5, 276, 1965.
- [4] В.В.Долгополов, К.Н.Степанов. ЖТФ, 36, 1003, 1966. †
- [5] М.П.Васильев, Л.И.Григорьева, В.В.Долгополов, Б.И.Смердов, К.Н.Степанов, В.В.Чечкин. ЖТФ, 34, 1231, 1964.
- [6] В.В.Чечкин, М.П.Васильев, Л.И.Григорьева, Б.И.Смердов. ЖТФ, 31, 1034, 1961. †
- [7] J.Adam, F.Alvarez de Toledo, P.H.Rebut et A.Torossian. 2-eme Colloque International Sur les Interactions Entre les Champs Oscillants Et les Plasmas, Saclay, 15 – 19 Janvier 1968, volume - 1, стр. 77.
- [8] A.Jigoshi, J.Fujita, S.Sakakibara, N.Inoue, C.Leloup. Kakuyugo Kenkyu, 25, 61, 1970; J. Phys. Soc. Japan, 31, 315, 1971.
- [9] Л.В.Дубовой, В.П.Федяков. ЖЭТФ, 53, 689, 1967.
- [10] Л.И. Григорьева, А.В. Лонгинов, А.И.Пятак, В.Л.Сизоненко, Б.И.Смердов, К.Н.Степанов, В.В.Чечкин. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1971, vol. III, IAEA, Vienna, 1971, стр. 573.