

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ВЫВОД ИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ПРИ РАЗВИТОМ РЕЗОНАНСНОЙ ИОННОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

*В.В.Власов, И.И.Залюбовский, Ю.А.Кирочкин,
М.Г.Кривонос, Ю.П.Крлячко, А.М.Рожков,
М.В.Сосипатров, К.Н.Степанов, В.И.Фареник*

В настоящей работе сообщается об экспериментальном обнаружении эффекта пространственного и энергетического разделения различных ионных компонентов вращающейся плазмы в стационарных условиях при наличии ионной циклотронной неустойчивости.

Резонансная ионная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме возникает, когда $2\omega_{вр}^i \approx \omega_{вi}$, где $\omega_{вi} = e_i B_0 / m_i C$ – циклотронная частота ионов с массой m_i и зарядом e_i , $\omega_{вр}^i \sim \frac{c E_2}{r B_0}$ – частота

вращения этих ионов в скрещенных радиальном электрическом E_2 и продольном магнитном B_0 полях, r – расстояние от оси разряда [1,2]. Развитие этой неустойчивости сопровождается пространственной концентрацией и нагревом ионов, для которых имеет место резонанс в узкой области, где локализованы колебания, с последующим выбросом ионов вдоль магнитного поля.

Обнаруженный эффект отличается от ранее рассматривавшихся методов разделения ионов разных сортов [3 – 6]. Разделение ионов различных изотопов в плазме в скрещенных полях [3] обусловлено центробежной силой и не связано с циклотронным резонансом. Использование ионного циклотронного резонанса для вывода из плазмы ионов разных

сортов [4 – 6] основано на эффекте увеличения поперечной энергии ионов от внешнего переменного электрического поля в устойчивой плазме.

Эксперименты проводились с плазмой отражательного разряда в стационарных условиях при $n_c = 10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$, $T_c \sim 10 \div 50 \text{ эв}$, $B_0 \leq 1,5 \text{ кэ}$, $E_r \leq 300 \text{ в/см}$ (описание установки см. в [2]). Подбирая резонансные значения B_0 и E_r при заданной массе рабочего газа (N_2 , O_2 , Ar , He и их смесей), можно возбуждать циклотронные колебания, при этом ионы рабочего газа, а также ионы с массой, кратной массе ионов рабочего газа, будут ускоряться и покидать разряд. Было измерено распределение по радиусу плазменного столба ионов с массами $28(N_2^+)$, $32(O_2^+)$, $14(N^+)$, $16(O^+)$, $18(H_2O^+)$, $44(CO_2^+)$, $40(Ar)$ и др. оптическими и масс-спектрометрическими методами. Типичное распределение масс ионов по радиусу показано на рис. 1. Из этого рисунка видно, что как интенсивности оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота ($\lambda = 3914 \text{ \AA}$ для N_2^+ и $\lambda = 5679 \text{ \AA}$ для N^+), так и потоки ионов вдоль B_0 , отобранные масс-спектрометром непосредственно из различных участков разряда, четко разделены пространственно. Распределения потоков ионов и интенсивности их оптического излучения по радиусу аналогичны распределению по радиусу амплитуды ионных циклотронных колебаний (см. рис. 1). Зависимости потоков ионов различных масс и энергий от параметров разряда (E_2 , B_0 , n_c , P) также оказываются аналогичны зависимости амплитуды циклотронных колебаний от этих параметров [2].

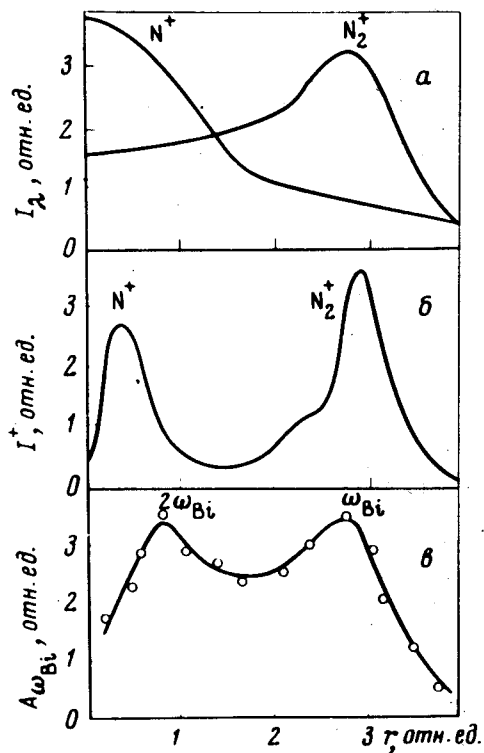


Рис. 1. Радиальное распределение интенсивности оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота а); потоков ионов, уходящих из плазмы вдоль B_0 б); амплитуды ионных циклотронных колебаний в)

Энергетические спектры ионов с разной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля (см. рис. 2), лежат в интервале $100 \div 300$ эв и являются достаточно монохроматическими, что позволило осуществлять разделение ионов разных масс и по энергиям.

При введении в разряд газов, атомы которых имеют массу, кратную массе атомов рабочего газа, или же массу, близкую к массе атомов рабочего газа или кратной ей, то в спектре колебаний появляются колебания с циклотронной частотой введенных атомов, а в масс-спектрах проб, взятых из разряда, появляются ионы введенного газа с четкой локализацией по радиусу (см. рис. 3).

$$\frac{dI}{U dU}, \text{отн. ед.}$$

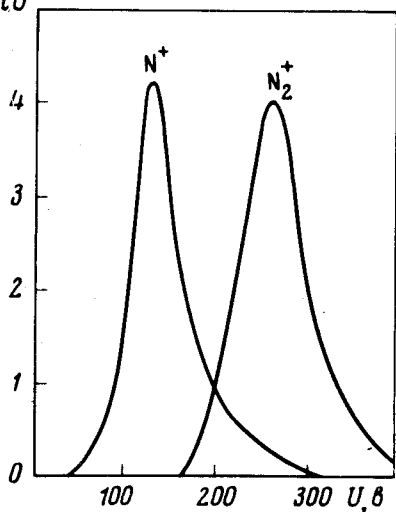


Рис. 2. Энергетические спектры ионов с разной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля.

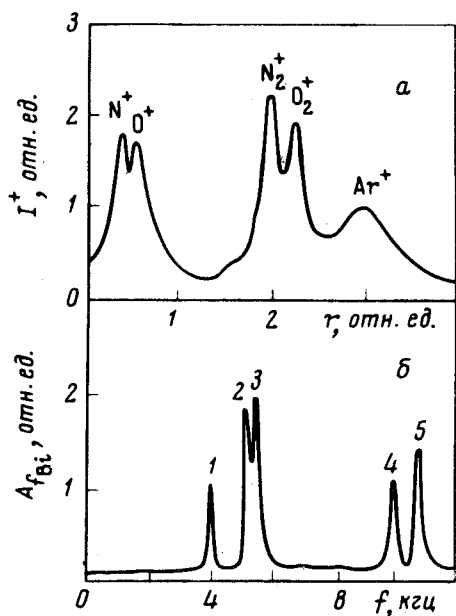


Рис. 3. а — Радиальное распределение потоков ионов с разной массой, уходящих из плазмы, вдоль B_0 ; б — спектр ионных циклотронных колебаний с частотами, соответствующими ионам Ar^+ (1), O_2^+ (2), N_2^+ (3), O^+ (4), N^+ (5).

Следует отметить, что ионы тяжелых атомов с массой, большей массы атома рабочего газа, для которых не выполняются условия ре-

зонанса, концентрируются, как правило, на оси разряда, что может быть использовано для очистки плазмы от нежелательных примесей.

В условиях, когда во вращающейся плазме циклотронная неустойчивость не развивается (например, в сильном поле E_r или слабом поле B_0 , когда возбуждаются колебания с частотой $\omega \gg \omega_{Bi}$), сепарация ионов по массам и энергиям не наблюдается.

Эти эксперименты показывают, что наблюдаемые эффекты разделения различных компонентов связаны с наличием ионной циклотронной неустойчивости. Однако, повышенный уход ионов из области разряда, где локализованы эти колебания, связать с ускорением их электрическим полем циклотронных колебаний, по-видимому, нельзя, так как энергия, приобретаемая резонансными ионами в этом поле значительно меньше наблюдаемой в эксперименте.

Возможно, что наблюдаемое явление связано с фокусировкой резонансных ионов радиальным ВЧ-полем собственных ионных циклотронных колебаний, которое компенсирует ускорение этих ионов по радиусу статическим полем E_r . При этом резонансные ионы набирают энергию в продольном статическом поле E_z в области падения потенциала между анодом и катодом $\Delta\epsilon \sim eV$, где V — разность потенциалов между точкой, где произошел акт ионизации, и катодом. В этом случае область циклотронных колебаний играет как бы роль фокусирующего устройства для резонансных частиц. На нерезонансные частицы ВЧ-поле действует слабо. Они, ускоряясь полем E_r , уходят на боковые стенки разрядного устройства.

Таким образом, во вращающейся плазме в стационарном режиме в условиях развитой ионной циклотронной неустойчивости, источник энергии которой — источник постоянного тока, возникает пространственное и энергетическое разделение различных ионных компонентов.

Харьковский
государственный университет
им. А.М.Горького

Поступила в редакцию
9 января 1978 г.

Литература

- [1] А.М.Рожков, К.Н.Степанов, В.А.Супруненко, В.И.Фареник, В.В.Власов, Письма в ЖЭТФ, **10**, 71, 1969.
- [2] А.М. Rozhkov et. al. Plasma Physics, **12**, 519, 1970.
- [3] В. Lehnert. Phys. Scripta, **2**, 106, 1970; **7**, 102, 1973.
- [4] Г.А.Аскарьян, В.А.Намиот, А.А.Рухадзе. Письма в ЖТФ, **1**, 820, 1975.
- [5] К.Клима, А.В.Лонгинов, К.Н.Степанов. ЖТФ, **46**, 704, 1976.
- [6] I.M.Dawson et. al. Phys. Rev. Lett., **37**, 1547, 1976.