

Измеренные значения N_e и T_e позволили оценить среднюю величину коэффициента усиления на переходе $4f-5g$ BeIV в зоне генерации ($x \geq 0.4$ см) и сравнить ее с результатами численного моделирования [1, 2]. Полученное совпадение (с точностью до фактора ~ 2) подтверждает вывод, что в экспериментах [1, 2] коэффициент усиления активной среды на переходе $4f-5g$ иона BeIV составлял $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Список литературы

- [1] Брюнеткин Б. А., Держиев В. И., Дякин В. М. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 10. С. 613—617.
- [2] Брюнеткин Б. А., Дякин В. М., Майоров С. А. // Спектральные методы исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом. М., 1986. С. 39—57.
- [3] Держиев В. И., Жидков А. Г., Магунов А. И., Яковленко С. И. Препринт ИОФАН. № 56. М., 1986. 37 с.
- [4] Скобелев И. Ю., Хахалин С. Я., Яковленко С. И. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 7. С. 872—875.
- [5] Скобелев И. Ю., Хахалин С. Я., Яковленко С. И. // Спектральные методы исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом. М., 1986. С. 4—31.

Поступило в Редакцию
13 октября 1988 г.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ НИЖНЕГИБРИДНОМ НАГРЕВЕ НА ТОКАМАКЕ ФТ-2

В. Н. Будников, Л. А. Есинов, М. А. Ирзак

Результаты экспериментов по нижнегибридному нагреву (НГ) ионов на различных токамаках отличаются большой противоположностью, в ряде экспериментов нагрев основной ионной компоненты отсутствует, а наблюдается лишь генерация высокоэнергичных периферийных ионов [1]. Такая сложная ситуация с нагревом ионов связана с отсутствием ясной физической картины взаимодействия волн НГ диапазона с плазмой токамака.

Поскольку нагрев ионов в этом частотном диапазоне осуществляется через генерацию быстрых надтепловых (так называемых «хвостовых») ионов, которые передают затем энергию основной массе ионов путем столкновений, то большой интерес представляет изучение локализации и механизма генерации быстрых ионов в поле замедленной НГ волны. С этой целью на токамаке ФТ-2 [2] были выполнены представляемые здесь исследования. Для НГ нагрева использовались ВЧ колебания моду (НГ резонанс) при магнитном поле 20 кГс должна происходить при концентрации $n_{i,H} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (при $z_{\text{eff}} = 2$). Именно в окрестности такой точки в соответствии с теоретическими представлениями должно происходить сильное замедление волны и стохастический нагрев ионов, тесно связанный с условием фазового резонанса иона в поле волны $v_{i,\perp} = v_{\phi,\perp}$ или $N_{\perp} = c(2E/m_i)^{-1/2}$, где E — энергия генерируемого иона.

В эксперименте при $P_{\text{ВЧ}} = 50$ кВт, токе плазмы $I_p = 20$ кА, магнитном поле $B = 20$ кГс с помощью анализатора атомных частиц производилось наблюдение за нейтральными перезарядки, которые отражают существование и поведение ионов соответствующей энергии. Концентрация плазмы уменьшалась до тех пор, пока не прекращалась генерация быстрых ионов с заданной энергией E . Обычно при достаточно больших концентрациях при включении ВЧ импульса потоки нейтралей перезарядки J , начиная с некоторой граничной энергии E_{min} , возникают скачком. Это свидетельствует о том, что в условиях эксперимента ионы с энергией $E > E_{\text{min}}$ непосредственно генерируются волной. С уменьшением концентрации плазмы резкий скачок выражается все меньше и наконец при какой-то концентрации n^* пропадает. При концентрации $n < n^*$ потоки прирастают плавно. Это связано с тем, что в процессе ВЧ импульса происходит рост плотности и соответственно увеличиваются потоки. Это иллюстрируется рис. 1. При уменьшении концентрации еще ниже $n < n_1^*$ генерация ионов прекраща-

ется вообще. На рис. 2 приведена зависимость n^* и n_1^* от энергии. Видно, что для генерации ионов более высокой энергии требуется большая концентрация. Например, при концентрации $n_{e0} = 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ спектр генерируемых ионов будет обрезан со стороны высоких энергий при $E \approx 2 \text{ кэВ}$, при $n_{e0} = 2.15 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в спектре появляется энергия $E = 3.75 \text{ кэВ}$. Если увеличить

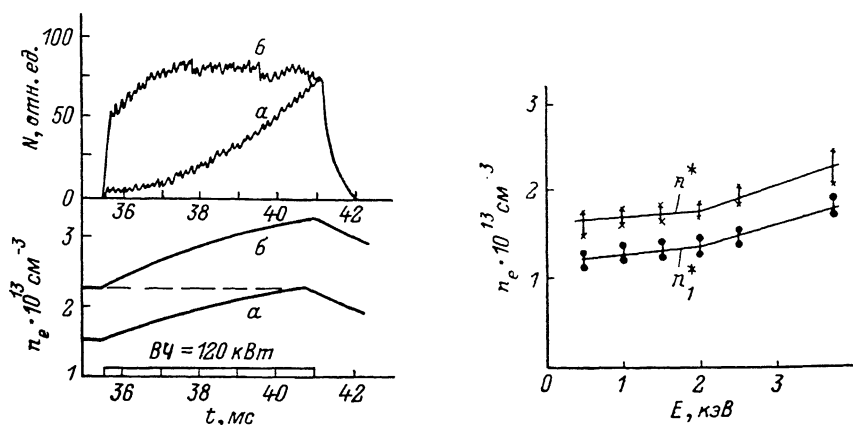


Рис. 1. Поведение потока нейтралей перезарядки с $E = 2500 \text{ эВ}$ при $P_{\text{ВЧ}} = 120 \text{ кВт}$ и различной плотности плазмы n_e .
Начальная плотность n_{e0} , см^{-3} : $\alpha - 1.5 \cdot 10^{13}$, $\beta - 2.3 \cdot 10^{13}$.

Рис. 2. Граничная концентрация плазмы n^* и n_1^* в зависимости от энергии генерируемых ионов E при $P_{\text{ВЧ}} = 50 \text{ кВт}$.

ВЧ мощность, то n^* уменьшается. Например, при $P_{\text{ВЧ}} = 100 \text{ кВт}$ она составляет $n^* = 1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (для $E = 1.5 \text{ кэВ}$), а при зафиксированной концентрации расширяется спектр энергий ионов. Это видно из рис. 3, где приведены спектры для различных случаев n_e и $P_{\text{ВЧ}}$ вблизи граничной концентрации n^* .

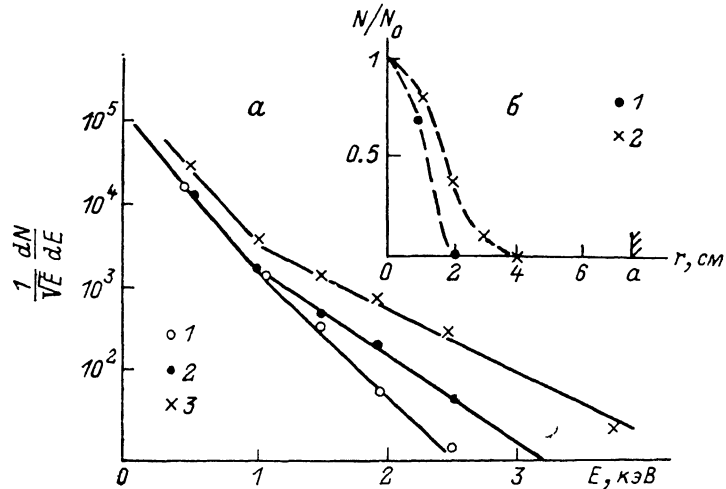


Рис. 3. Спектры нейтралей перезарядки (а) и распределение потока нейтралей перезарядки (б).
 α : n_e , см^{-3} : 1, 2 — $1.6 \cdot 10^{13}$; 3 — $2.2 \cdot 10^{13}$; $P_{\text{ВЧ}}$, кВт: 1 — 30; 2, 3 — 50; б: $E = 3570$ (1), 2500 эВ (2).

Вблизи граничной концентрации n^* генерация ионов происходит в центральной части плазменного объема. Это было установлено при сканировании плазменного шнура с помощью анализатора атомных частиц. Так, при плотности $n_{e0} = 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($P_{\text{ВЧ}} = 50 \text{ кВт}$), когда только появляются ионы с энергией $E = 3.75 \text{ кэВ}$ (рис. 3, кривая 2), соответствующий поток J локализован в узкой области вблизи центра $r < 2 \text{ см}$, а более развитый поток с $E = 2.5 \text{ кэВ}$ наблюдается также в центральной, но более широкой области $r < 4 \text{ см}$ (рис. 3, б). В соответствии с условием фазового резонанса высоким энергиям ионов отвечают меньшие показатели

преломления N_{\perp} (или волновые числа k_{\perp}) волны. Эволюция спектров нейтралей перезарядки при изменении $P_{ВЧ}$ и n_e отражает эволюцию спектров волновых чисел k_{\perp} волн, участвующих в генерации ионов. Характер наблюдаемых зависимостей спектров от $P_{ВЧ}$ и n_e типичен для параметрических неустойчивостей, поскольку наименьшие пороги имеют место при больших k и увеличиваются при уменьшении k ; в НГ диапазоне частот аналогичной является зависимость порога и от концентрации [3]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что поглощение волны и генерация ионов связаны с каким-то параметрическим процессом, например с распадом КЛВ на КЛВ меньшей частоты и квазимоду [3].

Следует отметить, что наблюдавшийся в нашем эксперименте способ формирования функции распределения генерируемых ионов противоположен описанному в докладе [4]: на токе $Wega$ для появления генерации ионов меньших энергий требовалось увеличение плотности плазмы.

Выводы

1. Поглощение волн НГ диапазона и генерация ионов не связаны с существованием точки линейной трансформации $n_{ЛН}$, а происходят при $n^* \leq 0.5n_{ЛН}$. При этом условия наиболее легко развиваются параметрические неустойчивости. Об этом свидетельствуют особенности формирования спектров генерируемых ионов.

2. Функция распределения генерируемых ионов зависит от концентрации плазмы и от ВЧ мощности. Можно сформировать функцию распределения ионов, обрезанную по энергиям сверху, причем ионы генерируются в центральной части плазменного шнура. В этом случае эффективный нагрев основной массы ионов обеспечивается «хвостовыми» ионами умеренных энергий, а отсутствие высокоэнергичных ионов существенно уменьшает энергетические потери.

Список литературы

- [1] Голант В. Е., Федоров В. И. Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
 [2] Будников В. Н., Герасименко Г. В., Дьяченко В. В. и др. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. № 2. С. 485—492.
 [3] Porkolab M. // Phys. Fluids. 1974. Vol. 17. P. 1432—1442. Phys. Fluids. 1977. Vol. 20. P. 2058—2075.
 [4] Gormezano C., Blanc P., El Shaer M. et al. // Proc. of the 3rd Grenoble-Varena Intern. Symp. «Heating in Toroidal Plasmas». Grenoble, 1982. Vol. 2. P. 439—453.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
27 сентября 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ КЕРАМИКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ($R=Y, \text{Ho}, \text{Er}$)

С. Н. Смирнов

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей микроволнового поглощения $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ керамических образцов в магнитном поле в условиях наличия сверхпроводимости (СП).

Образцы приготавливались по стандартной методике. Рентгеноструктурный анализ показал хорошую их однофазность со структурой искаженного перовскита. Критическая температура по резистивным измерениям была близка к 92 К.

Измерения микроволнового поглощения производились на ЭПР спектрометре ER-200Д «Bruker» с резонатором X-диапазона (9.2 ГГц), а также самодельным коаксиальным четверть-волновым резонатором L-диапазона (1.3 ГГц). Все измерения производились в сосуде дьюара при 77 К.