

УДК 533.951

## ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ ВОЛН НАКАЧКИ НА РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЯХ РЕШЕТКИ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПРОБОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

А.С. Белов, Г.А. Марков

## STIMULATED SCATTERING OF PUMP WAVES ON RELAXATION OSCILLATIONS OF PLASMA INHOMOGENEITY LATTICE IN THE MIRROR MAGNETIC CONFINEMENT SYSTEM

A.S. Belov, G.A. Markov

Исследовано вынужденное рассеяние волнового пучка, формирующего протяженный разрядный канал в пробочной магнитной ловушке, на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей, создаваемой полем пучка. Экспериментально показано, что в плазме ВЧ-разряда частотный спектр накачки существенно уширяется и на нем появляются выделенные модуляционные пики, соответствующие колебаниям решетки. Представлена физическая модель, объясняющая данные наблюдений.

A study has been made of the stimulated scattering of wave beam forming the lengthy discharge channel in the mirror magnetic confinement system on the relaxation oscillations of plasma inhomogeneity lattice generated by the beam field. It is experimentally shown that in HF-discharge plasma the frequency spectrum of a pump field is substantially extended with modulation peaks corresponding to oscillations of the lattice. The physical model that explains the observed data has been considered.

### Введение

Сложные нелинейные явления, наблюдаемые в магнитоактивной плазме ВЧ-разрядов свистового диапазона частот, привлекают внимание научной общественности уже более двух десятилетий. Особенно интересным оказался вариант разряда в пробочной конфигурации магнитного поля. В этом случае распределение вдоль продольной оси ловушки параметров, таких как плотность плазмы в разрядном канале, ширина канала и величина напряженности магнитного поля, оказалось подобным распределению этих величин вдоль магнитной силовой трубки в магнитосферном резонаторе с дактом повышенной плотности плазмы.

Исследования электромагнитных возмущений, генерируемых в неравновесной плазме ВЧ-разряда в пробочной магнитной ловушке, показали сильную зависимость и спектров, и природы наблюдаемых колебаний от соотношения длины свободного пробега электронов ( $l_e$ ), длины ловушки ( $L$ ) и длин волн пучка, формирующего разрядный канал ( $\lambda_{\parallel}$ ). Например, при малых давлениях в разрядной камере, когда  $l_e > L$ , возможна генерация ионно-циклотронных линий молекул рабочего газа [1]. При несколько больших значениях давления ( $L > l_e > \lambda_{\parallel}$ ) возможно эффективное возбуждение ионно-звуковых и магнитозвуковых волн [2]. При еще больших давлениях, когда длина свободного пробега электронов становится близкой длине стоячей волны излучения, формирующего разрядный канал ( $l_e \leq \lambda_{\parallel}/2$ ), оказалась возможной генерация ионизационных волн – страт, возникающих в местах пучностей поля стоячей волны накачки.

В работе приведены данные о наблюдении вынужденного рассеяния волн накачки на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей в пробочной магнитной ловушке.

### Условия и результаты экспериментов

Эксперименты были выполнены на установке, схема которой приведена на рис. 1.

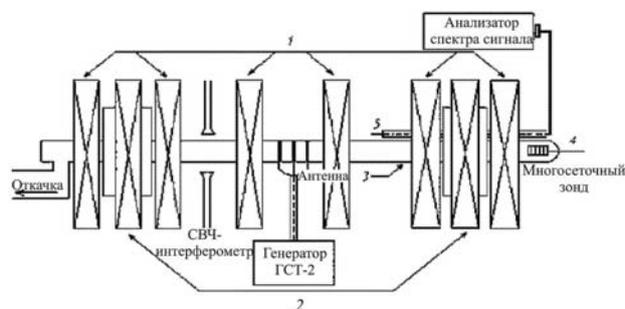


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Магнитное поле в ловушке создавалось двумя соленоидами (катушки 1 и 2) с отдельным питанием, что позволяло изменять продольное распределение индукции магнитного поля  $B_z(z)$  от квазиоднородного до сильно неоднородного распределения пробочной конфигурации. Разряд формировался в стеклянной колбе длиной 150 см и диаметром  $2a = 6$  см при ионизационном самоканалировании волновых полей в свистовом диапазоне частот, возбуждаемых квадрупольной антенной из трех медных колец, надетых на колбу в ее центральной части на расстоянии 9 см друг от друга. ВЧ-напряжение ( $f = 200$  МГц,  $V_0 = 50$  В) подводилось к возбуждающим кольцам антенны от генератора ГСТ-2 коаксиальным кабелем, так что центральная жила кабеля была соединена с центральным кольцом, а внешняя обмотка кабеля – с боковыми кольцами. Рабочий газ – воздух, давление изменялось в пределах  $P \sim 10^{-1} - 10^{-3}$  Торр. Вводимая в разряд ВЧ-мощность составляла величину порядка 10 Вт. Усредненная по поперечному сечению разрядного столба плотность плазмы  $\bar{N}_e$  определялась СВЧ-интерферометром на частоте 9.5 ГГц. Для регистрации электромагнитных излучений в плазме использовался анализатор спектра СК 4–Белан. Анализируются сигналы со штыревой антенны (рис. 1, элемент 5), расположенной на поверхности разрядного баллона вдоль его оси и подвижной между катушками магнитных пробков.

Особенностями ионизационного самоканалирования волновых полей свистового диапазона частот в неоднородном поле магнитной пробки являются

сужение разрядного плазменного столба в области сильного поля  $B_z$ , возрастание плотности плазмы в этой части столба и наличие стоячей волны излучения, формирующего разрядный канал, с характерными продольными масштабами  $\sim 10\text{--}12$  см. На рис. 2 представлены распределения вдоль оси ловушки поперечного радиуса канала  $R_{\perp}(z)$  ( $R_{\perp}(z)$  – радиус наиболее яркой части разрядного канала,  $N_e(R_{\perp}) \sim N_e(0)/2$ ) и усредненной по поперечному сечению канала плотности плазмы  $\bar{N}_e(z)$  для заданного распределения продольной составляющей магнитного поля  $B_z(z)$  при  $P \approx 8 \cdot 10^{-3}$  Тор.

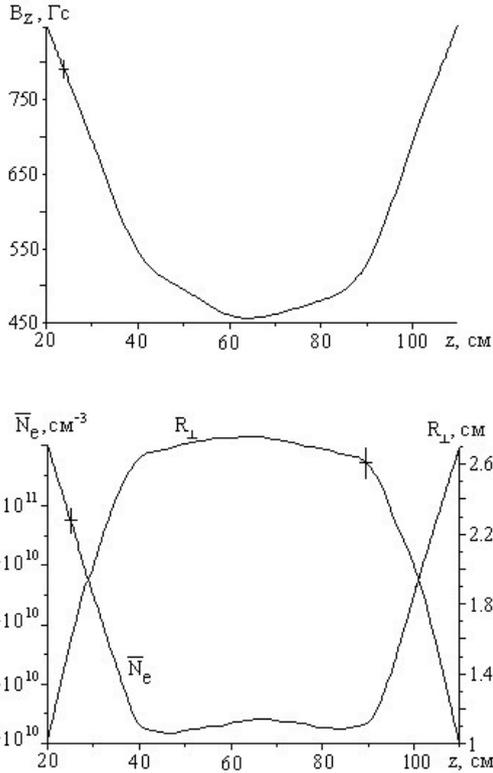


Рис. 2. Распределение параметров  $B_z(z)$ ,  $\bar{N}_e(z)$  и  $R_{\perp}(z)$  вдоль продольной оси установки.

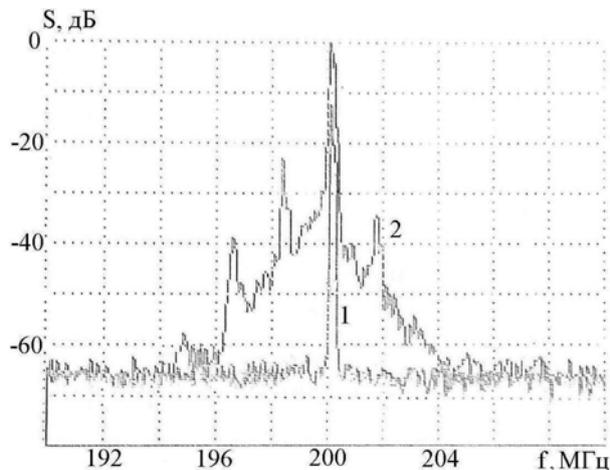


Рис. 3. Спектральный состав излучения, формирующего разрядный канал. Кривая 1 соответствует случаю отсутствия плазменной нагрузки, кривая 2 – спектральный состав поля накачки в плазме ВЧ-разряда.

Спектральный состав излучения, формирующего разрядный канал, показан на рис. 3, где кривая 1 соответствует случаю отсутствия плазменной нагрузки. В плазме ВЧ-разряда спектральный состав поля накачки (кривая 2) существенно уширился (особенно в красную сторону) и на нем появились выделенные модуляционные пики. Монотонное уширение спектра обусловлено рассеянием волны накачки на ионно-звуковых колебаниях плазмы [2]. Пики наблюдаются в довольно узком интервале давлений  $P \sim 3 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$  Тор и значений магнитного поля в центральной части ловушки  $B_{z0} \sim 300 - 600$  Гс. Частотный сдвиг между пиками зависит от условий разряда и меняется в пределах от 1.4 МГц ( $P \geq 10^{-2}$  Тор,  $B_{z0} \sim 350$  Гс) до 1.8 МГц ( $P < 10^{-2}$  Тор,  $B_{z0} \sim 550$  Гс).

### Обсуждение результатов экспериментов

Совокупность приведенных экспериментальных данных и анализ дисперсионных свойств плазменного волновода в неоднородном магнитном поле позволяют нам представить следующую физическую модель наблюдаемых явлений. Повышенная ионизация газа в пучностях электрического поля «стоячей» волны накачки может привести к возникновению решетки плазменных неоднородностей с характерным пространственным периодом  $\Lambda \sim 10$  см. Поскольку период решетки близок половине длины волны накачки, с появлением решетки возникает сильное брегговское отражение. В результате амплитуда поля волны, формирующей разряд, уменьшается, плазменные неоднородности расплываются, отражение уменьшается, снова формируется стоячая структура поля накачки и возникают плазменные неоднородности. Время формирования неоднородностей  $\tau \sim 1/\nu_i$  мало по сравнению со временем их рассасывания из-за амбиполярной диффузии вдоль магнитного поля. Диффузия на боковые стенки затруднена из-за замагниченности электронов, поэтому значение частоты колебаний наблюдаемых релаксационных колебаний ионизационно-диффузионного типа определяется временем диффузионного рассасывания плазменных неоднородностей:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \approx D_{\text{амб}} k_0^2 \approx D_{\text{амб}} (2\pi/\Lambda)^2. \quad (1)$$

Здесь коэффициент амбиполярной диффузии  $D_{\text{амб}} = \kappa T_e / (m\nu_{\text{en}} + M\nu_{\text{in}})$ ,  $\kappa T_e$  – тепловая энергия электронов,  $\nu_{\text{in}}$  и  $\nu_{\text{en}}$  – частоты столкновений ионов и электронов с нейтральными молекулами,  $M$  и  $m$  – массы иона и электрона соответственно.

Для значений параметров, соответствующих условиям эксперимента  $T_e \approx 10$  эВ,  $\nu_{\text{en}} = 1.4 \cdot 10^8$  Рад/с,  $\nu_{\text{in}} = 10^4$  Рад/с, получаем, что  $f_0 \approx 1.7$  МГц.

При уменьшении давления газа увеличивается длина свободного пробега электронов и несколько увеличивается  $f_0$ , но при  $l_e > \lambda_{\parallel}/2$  ( $P < 4 \cdot 10^{-3}$  Тор) плазменные неоднородности размываются вдоль оси  $z$  на расстояния, большие, чем расстояния между источниками повышенной ионизации. В результате пропадает решетка плазменных неоднородностей и, как следствие, исчезают максимумы на спектральных характеристиках рассеянного ВЧ-сигнала

и шумовых НЧ-колебаний в плазме. С ростом давления увеличивается затухание волн, формирующих разряд, уменьшается амплитуда отраженных волн и при  $P > 3 \cdot 10^{-2}$  Топ периодическая неоднородность распределения  $E_z(z)$  становится не достаточной для формирования решетки плазменных неоднородностей.

Возможность возбуждения таких колебаний в плазме ВЧ-разрядов необходимо учитывать при проектировании технологических установок [3], использующих разряды геликонного типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-00436-а) и программы «Ведущие научные школы» (НШ-6043.2006.2).

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Доброхотов В.В., Люкшин Н.М., Марков Г.А., Чу-гунов Ю.В. Генерация низкочастотных излучений неравновесной плазмой ВЧ-разряда в линейной магнитной ловушке // Физика плазмы. 2005. Т. 31, №. 8. С. 701–706.
2. Белов А.С., Марков Г.А. Генерация звуковых волн ВЧ-разрядом геликонного типа // Физика плазмы. 2006. Т. 32, №. 9. С. 826–831.
3. Chen F.F., Torreblanca H. Large-area helicon plasma source with permanent magnets // Plasma Phys. Contr. Fusion. 2007. V. 49. P. A81–A93.

*Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород, Россия*