

НАБЛЮДЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО РЕЖИМА ГЕНЕРАЦИИ АНТИСТОКСОВОЙ КОМПОНЕНТЫ РАССЕЯНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ

*В.И.Архипенко, В.Н.Будников, Е.З.Гусаков, А.Н.Савельев,
Л.В.Симончик*

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР
194021, Ленинград*

*Институт физики им. Б.П.Степанова АН Белорусской ССР
220602, Минск*

Поступила в редакцию 23 января 1991 г.

Обнаружен эффект генерации антистоксовой компоненты рассеяния СВЧ волны, связанный с возбуждением в неоднородной магнитоактивной плазме когерентного параметрического процесса - абсолютной неустойчивости $l \rightarrow l' + s$.

Согласно результатам работ ^{1,2}, пространственная неоднородность плазмы приводит не только к повышению порогов параметрических распадных неустойчивостей за счет конвективного выноса энергии из узкой области трехволнового взаимодействия, но и к их насыщению еще в линейном приближении. Параметрические неустойчивости при этом сводятся к некогерентному процессу - конвективному увеличению равновесных плазменных шумов. В то же время в литературе были указаны и многие возможности возбуждения в неоднородной плазме когерентного параметрического процесса - абсолютной неустойчивости. Как правило, это происходит, если в неоднородной плазме возможно возвращение назад в область трехволнового взаимодействия хотя бы части конвективно вынесенной из нее энергии, т. е. существует петля обратной связи. Впервые такая возможность была указана М.Н.Розенблютом ². Она реализуется, если распадные условия для трехволнового взаимодействия $k_0(\omega_0, z) = k_1(\omega_1, z) + k_2(\omega_2, z)$ выполняются не в одной, а в двух точках, а направления групповых скоростей волн противоположны. Экспериментально этот механизм возбуждения абсолютной неустойчивости исследовался в работе ³ на примере вынужденного комбинационного рассеяния лазерного излучения в плазме с параболическим профилем плотности. ВКР наблюдалось в условиях, когда в плазме заведомо существовали две точки синхронизма для процесса $t \rightarrow t' + l$ и могла реализоваться петля обратной связи. Однако в ³ нет однозначных свидетельств в пользу возбуждения именно абсолютной неустойчивости $t \rightarrow t' + l$, в частности, не установлена когерентность процесса.

В настоящей работе механизм возбуждения абсолютной неустойчивости, предложенный в ², исследуется экспериментально на примере процесса $l \rightarrow l' + s$, протекающего в неоднородной магнитоактивной плазме. Эксперимент выполнен на установке ⁴, в которой с помощью электронного циклотронного пробоя создавалась аргоновая плазма, неоднородная как радиально, так и аксиально $\omega_{pe} = \omega_{pe}(r, z)$. Параметры эксперимента: $B = 3$ кГс, $T_e = 2$ эВ, $p_{Ar} = 1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., $n_e = 10^{12} \div 10^{10}$ см⁻³. С помощью волноводного ввода в плазму возбуждалась косая ленгмюровская волна l_0 (основная радиальная мода Трайвеллиса - Гулда аксиально неоднородного плазменного волновода) на частоте $f_0 = \omega_0/(2\pi) = 2350$ МГц. В окрестности точки $\omega_{pe}(0, 0) = \omega_0$, где $\omega_{pe}^2/\omega_0^2 = 1 - (z/a) - (r^2/b^2)$ ($a \approx 5$ см, $b \approx 0,4$ см), происходит трансформация волны в "теплую" плазменную, ее поле и продольное волновое

число k_0 , определяемое из уравнения

$$3r_d^2 k_m^2 - \frac{z}{a} - \frac{2(2m+1)}{k_m b} = 0 \quad (1)$$

при $m = 0$, резко возрастают.

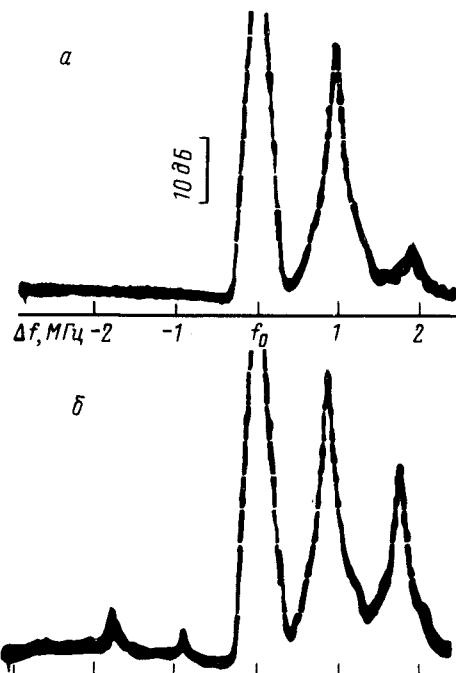


Рис. 1. Спектр рассеянного сигнала: *a* - без влияния, *b* - при влиянии многосеточного анализатора

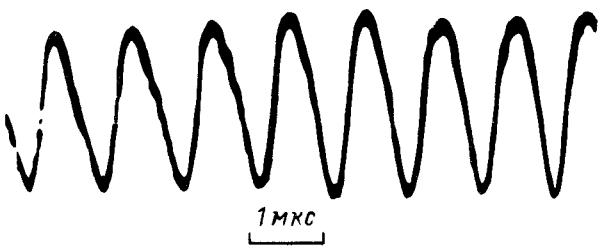


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с СВЧ детектора

В этой области ранее⁵ мы наблюдали возбуждение неустойчивости вынужденного рассеяния назад $l_0 \rightarrow l'_0 + s$, происходящее при $P_0 \sim 10$ мВт и приводящее к появлению в спектре рассеяния стоксовой компоненты с частотным сдвигом $f_0 - f'_0 \simeq 3$ МГц. При большем уровне мощности $P_0 > 100$ мВт стоксовая компонента подавляется и одновременно в спектре рассеяния появляется антистоксова компонента с частотным сдвигом $f'_0 - f_0 \simeq 0,8 \div 1$ МГц. В некоторых режимах разряда подавление стоксовой компоненты рассеяния происходит в околовороговой области еще при $P_0 \lesssim 20$ мВт и оказывается полным. Спектр рассеяния при этом имеет вид последовательности очень

узких эквидистантных линий (рис. 1а). Появление в спектре антистоксовой компоненты естественно связать с рассеянием на ионно-звуковой волне частоты $f_s \approx 1$ МГц, распространяющейся навстречу волне накачки $l_0 + s \rightarrow l'_0$. Одним из возможных механизмов генерации такой волны может быть ионно-звуковая неустойчивость, возбуждаемая в плазме электронным током, компенсирующим потери быстрых электронов, ускоряемых волной⁶. Однако этот механизм не в состоянии объяснить очень высокую когерентность рассеянного сигнала, проявляющуюся в синусоидальной форме биений накачки и рассеянной волны, наблюдавшихся с помощью СВЧ детектора в волноводном тракте (рис. 2).

Альтернативный механизм генерации ионно-звуковой волны, распространяющейся навстречу волне накачки - параметрическая неустойчивость вынужденного рассеяния вперед $l_0 \rightarrow l'_1 + s$. В результате этого процесса кроме ионно-звуковой волны возбуждается первая радиальная мода l'_1 на частоте $f_0 - f_s$, распространяющаяся в том же направлении, что и волна накачки и поглощающаяся в плазме. Как показывает расчет по формуле (1), распадные условия для процесса $l_0 \rightarrow l'_1 + s$, имеющие вид $k_0(z) = k_1(z) + k_s$, $k_s < 0$, могут быть выполнены в двух пространственных точках z_1 и z_2 (рис. 3). При этом может происходить возбуждение когерентного параметрического процесса - аб-

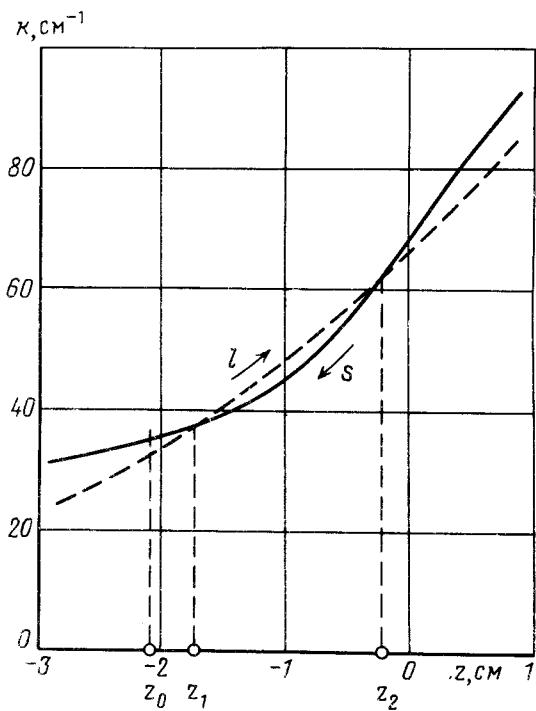


Рис. 3. Дисперсионные кривые $k_1(z) - "l"$ и $k_0(z) - k_s - "s"$. Стрелками показаны направления групповых скоростей волн (безразмерные значения)

солютной неустойчивости по механизму, предсказанному в работе². Касание кривых $k_0(z)$ и $k_0(z) - k_s$ достигается при частоте $f_s \approx 0,9$ МГц, а частота ионно-звуковой волны, отвечающая возбуждению высокой собственной моды

петли обратной связи $m \gg 1$ определяется соотношением

$$\int_{z_1}^{z_2} (k_0 - k_1 - k_s) dz = 2\pi(m + \frac{1}{2}). \quad (2)$$

Как показывает численный расчет, в случае $m = 0$ $f_s \approx 0,85$ МГц. Порог возбуждения абсолютной неустойчивости $k_0 \rightarrow k'_1 + s$ определяется неоднородностью плазмы и затуханием ионно-звуковой волны

$$S_{sl}(z_1) S_{ls}(z_2) \exp[-k_s''(z_2 - z_1)] = 1, \quad (3)$$

где S_{sl} и S_{ls} - коэффициенты параметрической трансформации в точках распада z_1 и z_2 , а k_s'' - постоянная затухания при распространении звуковой волны. Численно значение, предсказываемое (3), $P_{th} \approx 12$ мВт близко к экспериментально измеряемому $P_0 \approx 20$ мВт.

Следует заметить, что наблюдаемая когерентная антистоксова компонента рассеяния является результатом вторичного процесса рассеяния $k_o + s \rightarrow k'_0$, происходящего в точке z_0 вне петли обратной связи, где выполнено условие $2k_0(z_0) = k_s$ (рис. 3). Как было отмечено выше, первичная стоксова компонента рассеяния k'_1 в описанной постановке эксперимента не наблюдается, так как распространяется в противоположную от волноводного тракта сторону. Чтобы зарегистрировать ее, нами был выполнен специальный эксперимент. В плазму вдоль оси системы вдвигался анализатор быстрых частиц. В то время, когда его поверхность приближалась к области взаимодействия, что контролировалось по продольному распределению свечения плазмы, происходило отражение волны k'_1 и в спектре рассеянного сигнала появлялась стоксова компонента, расположенная симметрично антистоксовой (рис. 1б).

Таким образом, в представленном эксперименте впервые наблюдался когерентный режим абсолютной параметрической неустойчивости неоднородной плазмы, возбуждаемой по механизму, предсказанному М.Н.Розенблютом ².

Литература

1. Pilija A.D. Proc. of 10-th Conf. on Phenom. in ionized gases. Oxford, p.320.
2. Rosenbluth M.N. Phys. Rev. Lett., 1972, 29, 565.
3. Villeneuve D.M., Baldis H.A. Phys. Fluids., 1988, 31, 1970.
4. Архипенко В.И., Будников В.Н., Романчук И.А. и др. Физика плазмы, 1981, 7 396.
5. Архипенко В.И., Будников В.Н., Гусаков Е.З. и др. ЖЭТФ, 1987, 93, 1221.
6. Архипенко В.И., Будников В.Н., Гусаков Е.З., и др. Письма в ЖТФ, 1986, 12, 1190.