

## НАБЛЮДЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО АНОМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЧ ВОЛН ПЛАЗМОЙ

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

Обнаружен эффект когерентного параметрического рассеяния СВЧ мощности плазмой, имеющий место как вблизи порога возбуждения абсолютной параметрической неустойчивости  $l \rightarrow l' + s$ , так и при существенном его превышении, когда происходит anomальное отражение СВЧ мощности, близкое к полному.

Согласно широко распространенной точке зрения, при воздействии на плазму электромагнитного излучения, мощность которого существенно превосходит пороговую для параметрической неустойчивости, в плазме возбуждается большое число внутренних степеней свободы, и она переходит в турбулентное состояние, характеризующееся широкими спектрами раскачанных колебаний <sup>1,2</sup>. Когерентные волновые процессы, столь существенные, например, в нелинейной оптике, в этом подходе к описанию взаимодействия волн в плазме, считаются пре-небрежимыми.

В настоящей работе описывается эксперимент, в котором, напротив, пространственная и временная когерентность взаимодействующих волн, по-видимому, играет определяющую роль. Он был выполнен на слабоионизованной аргоновой плазме, создаваемой в стеклянном баллоне длиной около 1 м, диаметром 2,5 см, помещенном в продольное магнитное поле  $H = 3$  кЭ. Плазма была неоднородна как радиально, так и аксиально  $n_e = n_e(r, z)$ ,  $n_e < 10^{12}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 2$  эВ<sup>3</sup>. С помощью волноводного ввода в плазму возбуждалась косая ленгмюровская волна (КЛВ) в виде основной радиальной моды Трайвелписа - Гулда -  $l_0$  на частоте  $f_0 = 2350$  МГц, дисперсионное соотношение для которой имеет вид  $K_{\perp}^2 = [(\omega_{pe}^2 / \omega^2) - 1] K_{\parallel}^2$ . В окрестности точки линейной трансформации КЛВ в теплую плазменную волну - фокуса, где  $n_e(o, z) = n_c = \pi f_0^2 m_e / e^2$  волна существенно замедляется, а ее электрическое поле достигает наибольших значений. Здесь в первую очередь при  $P_0 > 10$  мВт возбуждается параметрическая неустойчивость  $l_0 \rightarrow l'_0 + s$ . При малом уровне мощности  $P_0 < 20$  мВт параметрическое взаимодействие некогерентно и сводится к пространственному усилению равновесных ионнозвуковых шумов в окрестности точки резонанса для процесса  $l_0 \rightarrow l'_0 + s - z_0$ , в которой  $2k_{\parallel 0}(z_0) = 2\pi f_s / c_s$ . В этом процессе генерируется рассеянная назад основная радиальная мода Т.Г. -  $l'_0$  на частоте  $f_0 - f_s$ , которая регистрируется в волноводном тракте в виде сателлита у основной частоты  $f_0$ . Спектр рассеянного сигнала при этом шумящий, широкий  $\delta f \cong 1$  МГц, его частотный сдвиг отвечает  $f_s \cong 3$  МГц, зависимость амплитуды сателлита  $p_s$  от мощности накачки экспоненциальная (рис. 1).

При увеличении мощности волны накачки  $P_0 > 20$  мВт зависимость  $p_s(P_0)$  становится существенно круче (кривая  $l$  на рис. 1). В плазме при этом на базе пространственного усиления  $l_0 \rightarrow l'_0 + s$  происходит возбуждение когерентного волнового процесса - абсолютной параметрической неустойчивости. Механизм этой неустойчивости связан, по-видимому, с многомодовостью волны накачки<sup>4</sup>. Замыкание "петли обратной связи", охватывающей усилитель в точке  $z = z_0$ , происходит в точке  $z = z_1$  в результате процесса  $l_1 \rightarrow l'_1 + s$ , в котором первая радиальная мода накачки  $l_1$  взаимодействует с волной  $l'_1$  и рождает ионнозвуковую волну, возвращающую энергию в область распада  $l_0 \rightarrow l'_0 + s$ . В спектре рассеянного сигнала при превышении порога абсолютной неустойчивости появляется узкая линия на частоте  $f \cong f_0 - 3,5$  МГц. Непрерывные измерения спектра в режимах разряда с малыми флуктуациями концентрации плазмы дают, что  $100$  кГц  $< \delta f < 200$  кГц (кривая  $l$ , рис. 2). Это значение является лишь оценкой сверху истинной ширины линии и определяется, по-видимому, изменени-

ями частоты линии из-за вариации параметров плазмы за большие времена. Импульсные измерения за время  $\tau = 10$  мкс дали оценку ширины линии рассеянного сигнала  $\delta f < 100$  кГц. При  $P_0 > 30$  мВт рост амплитуды сателлита насыщается на уровне  $p_s = 2 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц. Оценка показывает, что этот уровень рассеяния отвечает параметрическому отражению волны в окрестности точки фокуса, близкому к полному. При этом уровне мощности в спектре рассеянного сигнала появляется вторая узкая линия, сдвинутая на  $f_0 - f = 2,8$  МГц (рис.2, кривая 2). Зависимость амплитуды второй линии от  $P_0$  дана кривой 2 на рис.1. Отметим, что при  $P_0 > 30$  мВт амплитуда первой линии начинает падать, в то время как амплитуда второй растет. Сильное параметрическое отражение происходит также когерентно, но в более плотной плазме при рассеянии на звуке частоты  $f_s = 2,8$  МГц.

При дальнейшем росте мощности реализуется следующий этап этой своеобразной эстафеты. В спектре появляется еще одна узкая линия на частоте  $f = f_0 - 2,4$  МГц, которая постепенно превосходит остальные — рис.2, кривая 3.

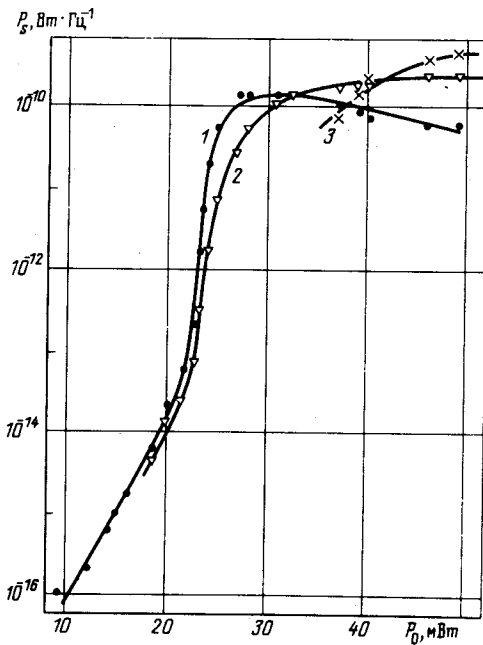


Рис. 1. Зависимость амплитуды компонент спектра рассеянного сигнала от мощности

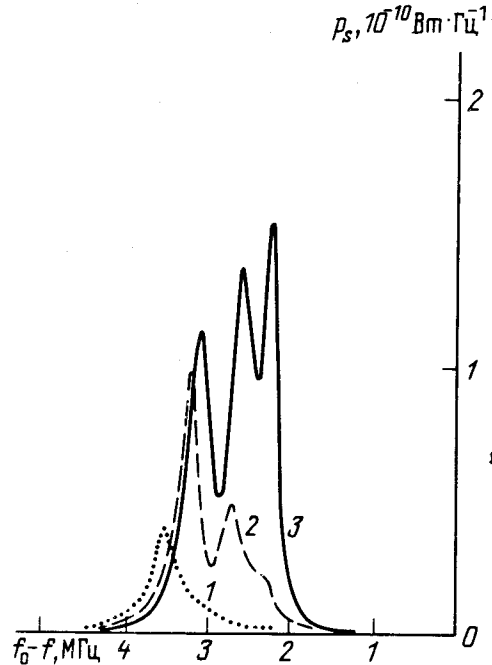


Рис. 2. Формы спектров при различной мощности накачки

Дискретные линии в спектре рассеянного сигнала естественно связать с частотами собственных мод петли обратной связи, то есть когерентной резонансной структуры, возникающей в плазме в поле многомодовой волны накачки и приводящей к возбуждению абсолютной параметрической неустойчивости. При этом частота раскачиваемых ионнозвуковых волн определяется условием квантования набега фазы волн в петле обратной связи. Расчет показывает, что разность частот между соседними линиями в спектре определяется временем распространения ионного звука в петле  $\Delta f = f_1 - f_2 = c_s / (z_0 - z_1)$ . Длина петли обратной связи зависит от частоты звуковой волны, так что  $\Delta f = 0,5$  МГц при  $f_s = 3$  МГц и  $\Delta f = 0,3$  МГц при  $f_s = 2$  МГц. Экспериментально наблюдаемые спектры на рис. 2 находятся в согласии с этой оценкой.

Начиная с мощности волны накачки  $P_0 = 30$  мВт, частоты каждой из линий в рассеянном сигнале плавно уменьшаются (рис.2), что, по-видимому, объясняется увеличением из-за дополнительной ионизации в фокусе продольного масштаба неоднородности плазмы и пропорциональной ему длины петли обратной связи  $z_0 - z_1$ .

Динамика установления рассеянного сигнала изучалась по зависимости амплитуды продетектированного сигнала в волноводном тракте от времени  $A(t)$ . Как видно из осциллограммы 18

на рис.3, при небольшом превышении порога ( $P_0 = 25$  мВт) время установления синусоидальной составляющей сигнала велико ( $\tau = 12$  мкс), что связано, по-видимому, с малым значением инкремента абсолютной неустойчивости в околороговой области. С увеличением мощности амплитуда колебаний возрастает, а время их установления падает до  $\tau = 7$  мкс при  $P_0 = 30$  мВт (рис.3, осциллограмма 2). Зависимость  $A(t)$  при этом усложняется и представляет собой биение синусоидальных сигналов близкой частоты. Отметим, что рассеянный сигнал остается когерентным и синусоидальным и при большом уровне мощности  $P_0 = 40$  мВт (рис. 3, осциллограмма 3), однако время его установления при таком значительном превышении порога падает до 2 – 3 мкс.

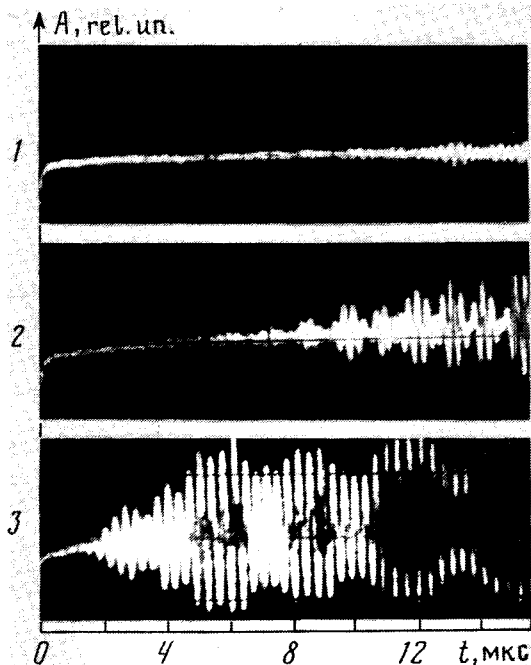


Рис. 3. Динамика установления рассеянного сигнала

В описанном эксперименте эффект когерентного взаимодействия волн проявляется так ярко и легко наблюдается из-за особенности экспериментальной ситуации — в системе не возбуждается большое число радиальных мод колебаний. Можно думать, что когерентные явления существенны и в других случаях при взаимодействии интенсивных волн с плазмой, однако выявление их роли может быть затруднено из-за большого числа возбужденных степеней свободы.

#### Литература

1. Б.Б.Кадо́мцев. Коллективные явления в плазме. М., Наука, 1976.
2. В.Н.Цытович. Теория турбулентной плазмы. М., Госатомиздат, 1971.
3. В.И.Архипенко и др. ЖТФ, 1985, 55, 298.
4. В.И.Архипенко, В.Н.Будников, Е.З.Гусаков и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 453.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Институт физики  
Академии наук Белорусской ССР

Поступила в редакцию  
8 мая 1987 г.