

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЧ ВОЛН В СЛОЕ БЕССТОЛКОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

В. А. Силин

При взаимодействии СВЧ излучения с плазмой уже при достаточно низких напряженностях поля (по сравнению с плазменным полем) могут играть существенную роль нелинейные процессы, в частности, параметрическая неустойчивость [1, 2]. Возникновение неустойчивости приводит к увеличению диссипации поля, так как осциллирующие электроны начинают рассеиваться на пульсациях плотности; этот механизм важен и для объяснения эффекта просветления плазменного слоя при сравнительно небольших напряженностях поля [3]. Впервые параметрическое возбуждение ленгмюровских и звуковых волн наблюдали Stern и Tzoar [4]. Однако, ими было показано, что для возникновения эффекта необходимо ориентировать электрическое поле волны перпендикулярно образующей плазменного цилиндра. Вследствие этого можно предполагать, что в работе [4] существенную роль играло наличие резкой границы плазмы и линейная трансформация поперечной волны в продольную на этой границе.

В настоящей работе была поставлена задача исследовать спектр излучения плазменного слоя, имеющего свободно расширяющуюся границу с характерным размером порядка длины волны излучения λ_0 при нормальном падении волны на слой (вектор электрического поля волны $E_0 \perp \nabla n$). Измерения проводились в тех же условиях, что и эксперимент по самовоздействию СВЧ волн [3]. Электромагнитное излучение 10-сантиметрового диапазона с помощью рупорно-линзовой антенны направлялось на слой плотной бесстолкновительной плазмы, создаваемый четырьмя искровыми источниками. Максимальная концентрация электронов в слое $n_m = (2+3)n_c$, $\left(\frac{4\pi n_c e^2}{m} = \omega_0^2, \omega_0 - \text{угловая частота поля}\right)$. Температура электронов, измеренная с помощью многосеточного зонда, составляет около 10 эв в момент включения СВЧ импульса. Измерения проводились в режиме одиночных импульсов (частота повторений 0,033 иц). Спектры изучались с помощью гетеродинного СВЧ анализатора С4-14. Анализ спектра достигается за счет того, что сигнал второй промежуточной частоты подается на линию задержки с частотной дисперсией. Естественно, что таким способом можно анализировать спектры только достаточно коротких импульсов, поскольку шкала частот при измерениях трансформируется в шкалу времени. В проведенных измерениях применялось стробирование усилителя промежуточной частоты импульсом длительностью около 2 мксек, задержки устанавливались таким образом, что анализировался спектр участка, проникающего в слой СВЧ импульса в области от 2-ой до 4-ой мксек от его начала. Включение СВЧ импульса производилось в тот момент, когда концентрация электронов в плазменном слое достигала максимального значения.

Излучение, прошедшее в плазменный слой, принималось открытым концом прямогольного волновода, установленного в центре слоя на оси вакуумной камеры. Измерения проводились следующим образом: регистрировался спектр импульса, попадающего в приемное устройство без плазмы; в следующем импульсе, при неизменных значениях усиления и коэффициентов связи, включались плазменные инжекторы. Как видно из рис. 1, интенсивность излучения в плазме на основной частоте уменьшается по сравнению со спектром генератора, кроме того, появляются дополнительные линии. Уменьшение амплитуды основной частоты (связанное с частичным отражением СВЧ энергии и ее диссипацией) подтверждает тот факт, что дополнительный спектр вызван нелинейностью плазмы, а не связан с возможными перегрузками кристаллического смесителя на входе измерительной схемы. Дополнительный спектр имеет протяженность около 10 – 12 Мгц в сторону меньших частот. Со стороны больших частот в пределах возможностей измерительной схемы (– 30 дб) изменений спектра не регистрировалось. Надо отметить, что на спектрограммах рис. 1 масштаб по амплитуде спектральных компонент нелинейный, измерения показывают, что максимальная интенсивность регистрируемых смещенных линий на 16 дб ниже ω_0 .

Зависимость интенсивности излучения на комбинационных частотах (рис. 2) от мощности падающей волны носит резко выраженный

нелинейный характер, а интенсивность спутников достигает уровня, достаточного для их уверенной регистрации лишь при значении

$$\frac{vE}{v_{Te}} = \frac{eE_0}{m\omega_0 v_{Te}} = 0,2 \quad (E_0 - \text{напряженность поля в вакууме в плоскости}$$

приема излучения, v_{Te} — начальная тепловая скорость электронов). Это значение поля соответствует такой мощности падающей волны, при которой слой просветляется примерно через 2 мксек после включения СВЧ генератора.

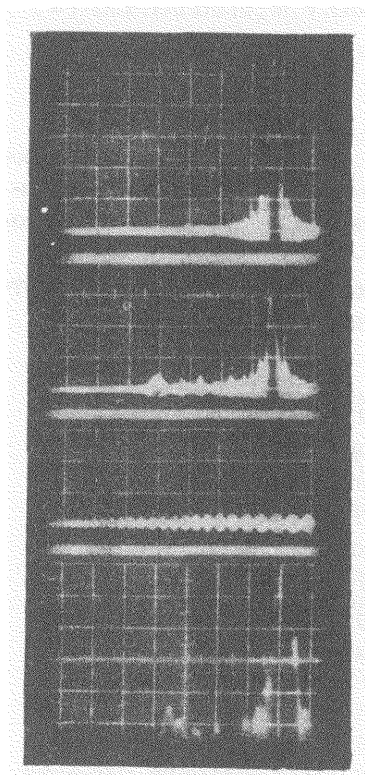


Рис. 1. Спектрограммы импульсов СВЧ излучения: 1 — спектр генератора СВЧ, 2 — спектр излучения в слое плазмы, 3 — калибровка с периодом 1 МГц, 4 — спектр излучения в плазме при увеличенном усилении. Мощность $P_0 = 60$ дБвт

В отраженном сигнале регистрируются аналогичные изменения спектра, однако в этом случае уровень спутников достигает $(10 \div 12)$ дБ от основной частоты. Существенно отметить, что порог регистрации спутников в данном случае также совпадает с порогом просветления слоя.

Область спектра вблизи второй гармоники частоты падающего излучения изучалась с помощью измерительного приемника П5-7Б. Установлено, что интенсивность гармоники $2\omega_0$ генератора на 60 дБ ниже ω_0 . В присутствии плазмы интенсивность излучения на $2\omega_0$ возрастает на 3 — 5 дБ (в проходящем сигнале), что может быть объяснено рефракцией излучения в плазменном слое. В то же время регистриру-

ется пик излучения на частоте $(2f_0 - 10) \text{ МГц}$, т. е. смещенного на ту же величину, что и красный спутник вблизи основной частоты. Появление этого пика во времени соответствует просветлению плазменного слоя.

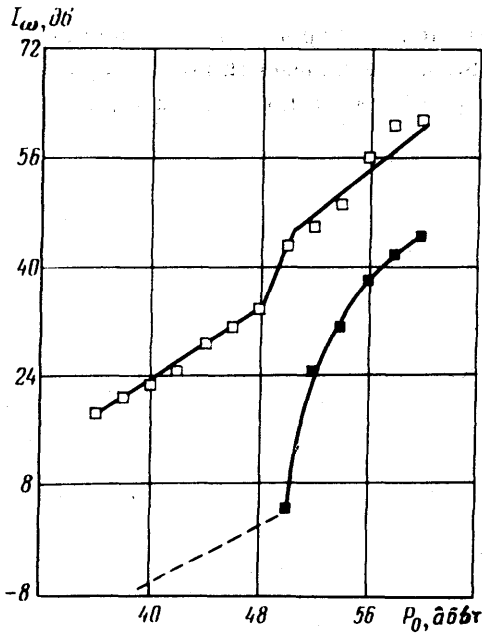


Рис. 2. Зависимости интенсивности спектральных компонент I_{ω} от мощности падающей волны: \square — излучение на частоте f_0 , \blacksquare — излучение на частоте $(f_0 - 10) \text{ МГц}$; пунктирная линия соответствует уровню надежных измерений

Возникновение излучения на комбинационных частотах со смещением $\omega < \omega_{Li}$ можно объяснить как результат неустойчивости с образованием ленгмюровской и ионно-звуковой волны, при этом надо иметь в виду, что ν -волна смещенной частоты может конвертироваться в t -волну, регистрируемую анализатором. Сравнение полученных экспериментальных данных ($\omega = 6,3 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$, $\gamma > 10^7 \text{ сек}^{-1}$) с теорией параметрического резонанса в однородной плазме показывает, что при $\nu_E / \nu_{Te} = 0,2 \div 0,6$ инкремент низкочастотных колебаний согласно формуле (3.18) [5]

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\frac{3}{5}} \omega = 0,34 \left(k_m r_{De} \frac{\omega_{Li}}{\omega_p} \frac{\nu_E}{\nu_{Te}} \right)^{2/3} \omega_p = (0,8 + 1,6) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}.$$

Эта оценка достаточно близка к эксперименту, однако, согласно теории, следует ожидать и синих спутников, сравнимых по интенсивности с красными.

Возможно и другое объяснение, связанное с неустойчивостью непопучивальной и звуковой волны [6]. В этом случае возникает только красный спутник и

$$\gamma_{\max} = \sqrt{3} \omega = 0,87 \omega_0 \left(\frac{\nu_E}{c} \frac{\omega_{Li}}{\omega_0} \right)^{2/3} = (2 \div 4) \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}.$$

Здесь частота оказывается в несколько раз заниженной по сравнению с наблюдаемой.

Такое различие, по-видимому, связано с тем, что использованная теория не учитывает влияния неоднородности плазменного слоя.

Автор благодарен М.С.Рабиновичу за ряд важных замечаний, Г.М.Батанову за постановку задачи и внимание к работе, Л.М.Горбунову, А.Ю.Кирию и Г.С.Лукьянчикову за обсуждение результатов.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
29 июня 1972 г.

Литература

- [1] V.P.Silin. A.Survey of Phen. in Ionized Gases. Vienna, 1968, p.205; Препринт ФИАН №138, 1967.
 - [2] D.F.Du Bois, M.V.Goldman. Phys. Rev. Lett., 14, 544, 1965.
 - [3] Г.М.Батанов, В.С.Силин, Письма в ЖЭТФ, 14, 445, 1971.
 - [4] R.A.Stern, N.Tzoar. Phys. Rev. Lett., 17, 903, 1966.
 - [5] Н.Е.Андреев, А.Ю.Кирий, В.П.Силин. ЖЭТФ, 57, 1028, 1969.
 - [6] Л.М.Горбунов, ЖЭТФ, 55, 2298, 1968.
-