

## НАБЛЮДЕНИЕ ВСПЫШЕК ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОМ СЛОЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

*В.Л.Гольцман, Ю.В.Задирака, В.А.Силин*

При облучении слоя плотной бесстолкновительной плазмы излучением десятисантиметрового диапазона обнаружено появление СВЧ мелкомасштабных плазменных полей, носящих характер кратковременных вспышек.

При взаимодействии СВЧ полей со слабонеоднородной плазмой существенную роль играют процессы, происходящие в области вблизи плазменного резонанса. Особый интерес представляет случай, когда динамика полей в резонансной области определяется нелинейными процессами, что практически соответствует весьма умеренным полям.

В настоящей работе сообщается об измерении продольных плазменных полей с помощью электронного пучка. В отличие от ранее проводившихся исследований <sup>1</sup> диагностический пучок пропускается в направлении параллельном градиенту концентрации и затем анализируется СВЧ модуляция тока пучка <sup>2</sup>. Схема опыта показана на рис. 1. Создаваемый искровыми источниками слой плазмы облучается СВЧ волнами 10-см диапазона достаточно большой интенсивности <sup>3</sup>. Диагностический пучок с энергией 10 кэВ пересекает поверхность критической концентрации на некотором расстоянии от оси слоя, так что траектория пучка проходит вблизи максимума продольной компоненты поля  $E_z \approx 0,5E_0$ . За слоем плазмы полученная пучком продольная модуляция скорости приводит к модуляции тока пучка. Далее

пучок проходит вдоль оси цилиндрического резонатора, в котором возбуждена на частоте накачки  $\omega_0$  кругополяризованная мода колебаний  $TM_{110}$ , и благодаря этому разворачивается по конической поверхности, описывая круговую траекторию на люминесцентном экране или пластине сцинтиллятора. В случае когда прошедший плазму пучок приобретает модуляцию на частоте  $\omega_0$ , яркость кольца промодулирована по азимуту. Если частота модуляции пучка  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ , то модуляция яркости движется по кольцу, проходя полный оборот за время  $2\pi/\Delta\omega$ . Для анализа модуляции свечение малого участка кольца регистрируется с помощью фотоумножителя. Применение двухканальной схемы регистрации позволяет одновременно анализировать свечение двух элементов кольца, определяя знак сдвига частоты  $\Delta\omega$ . Отметим, что наблюдение СВЧ модуляции пучка свидетельствует о появлении мелкошабного (характерный размер  $a \leq 1$  см) СВЧ поля в плазме, частота которого отличается от частоты накачки на величину частоты наблюдаемой модуляции.

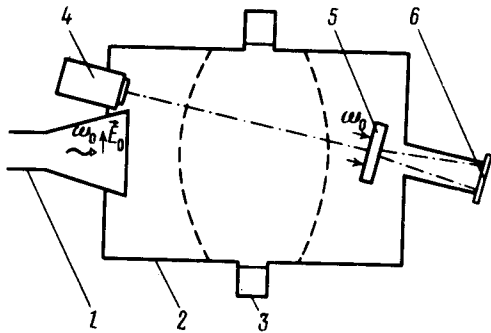


Рис. 1. Схема установки: 1 - излучатель, 2 - вакуумная камера, 3 - искровые источники, 4 - электронная пушка, 5 - резонатор, 6 - сцинтиллятор

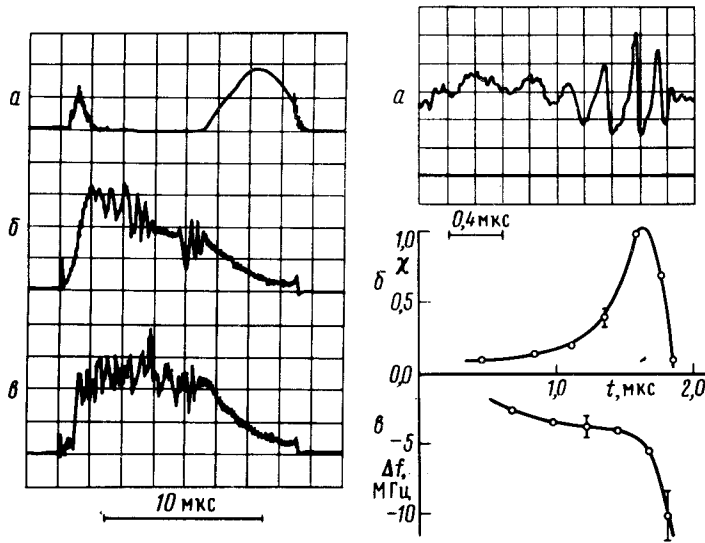


Рис. 2. Прошедший СВЧ-сигнал (а) и сигналы с фотоумножителя (б -  $v_E/v_{Te} = 2 \cdot 10^{-2}$ , в -  $v_E/v_{Te} = 3 \cdot 10^{-2}$ )

Рис. 3. Оциллограмма вспышки (а) и соответствующие ей параметр группирования  $\chi$  (б) и сдвиг частоты  $\Delta f$  (в)

На рис. 2 приведены оциллограммы прошедшего сквозь слой плазмы СВЧ сигнала (а) и сигналов с фотоумножителя (б, в) для различных значений мощности падающей СВЧ волны. Появление модуляции пучка наблюдается только во время существования слоя с концентрацией выше критической (отсечка прошедшего сигнала). Характер модуляции существенно зависит от величины параметра  $v_E/v_{Te}$  ( $v_E$  - осцилляторная скорость электронов в поле накачки,  $v_{Te}$  - тепловая скорость электронов). При  $2 \cdot 10^{-3} \leq v_E/v_{Te} < 10^{-2}$  модуляция проявляется в виде отдельной кратковременной вспышки, возникающей случайно в период отсечки прошедшего сигнала. Наиболее вероятно появление вспышки в период перед распадом закритического слоя, когда плотность плазмы в центре слоя составляет  $n = (1,2 - 1,4) n_{кр}$ . При  $10^{-2} \leq v_E/v_{Te} < 3 \cdot 10^{-2}$  за время существования плотного слоя

возникают 2 – 3 вспышки модуляции (рис. 2, б), а при  $v_E/v_{Te} \geq 3 \cdot 10^{-2}$  отдельные вспышки перекрываются и модуляция носит шумовой характер (рис. 2, в).

Перечислим основные наблюдаемые свойства вспышек: 1) длительность вспышек составляет  $\tau = 0,5 - 2,5$  мкс; 2) характерный сдвиг частоты  $\Delta f = 1 - 10$  МГц и отрицателен; 3) для большей части вспышек характерно увеличение во времени сдвига частоты, что соответствует уменьшению частоты модулирующего поля; 4) глубина модуляции тока пучка в отдельных вспышках достигает 100%. Этой амплитуде модуляции соответствует величина параметра группирования  $\chi = \frac{\omega L}{v_b} \frac{v_{\sim}}{v_b} \approx 1,0$ , где  $L$  – расстояние от источника модуляции до резонатора,  $v_{\sim}$  – амплитуда модуляции скорости пучка,  $v_b$  – скорость электронов пучка.

Предполагая, что модулирующее поле сосредоточено в районе ближней к излучателю резонансной поверхности ( $\epsilon = 0$ ), имеем длину группирования  $L \approx 50$  см. Отсюда можно оценить величину СВЧ разности потенциалов, модулирующей пучок,  $U_{\sim} \approx 100$  В и напряженность электрического поля  $E_{\sim} = U_{\sim}/a \geq 100$  В/см. Заметим, что напряженность поля накачки при этом составляет  $E_0 \approx 10$  В/см.

На рис. 3, а приведена осциллограмма одной из вспышек модуляции пучка, а на рис. 3, б, в – рассчитанные по этой осциллограмме зависимости параметра группирования  $\chi$  и сдвига частоты  $\Delta f$  в функции времени в процессе развития данной вспышки. Видно, что происходит относительно медленное нарастание амплитуды модуляции и резкий ее спад в конце вспышки одновременно с быстрым увеличением сдвига частоты.

Естественно попытаться интерпретировать наблюдаемую динамику вспышек с точки зрения формирования кавитонов в слое  $\epsilon = 0$ <sup>4</sup>. Сразу оговоримся, что объяснить измеренный сдвиг частоты, учитывая только направленное движение кавитонов (без нелинейного сдвига частоты), по-видимому, нельзя. Для того, чтобы обеспечить наблюдаемый сдвиг частоты (до 10 МГц) необходимо, чтобы скорость кавитонов достигала  $v_k \approx 3 \cdot 10^7$  см/с, более чем в 10 раз превышая скорость ионного звука. Кроме того, при распаде слоя плазмы область  $\epsilon = 0$  движется от излучателя, что должно вызывать положительный сдвиг частоты, тогда как в эксперименте он был отрицательным.

Отрицательный сдвиг частоты может возникнуть при формировании кавитона, когда образуется "ямка" плотности, а у захваченных в ней ленгмюровских колебаний адиабатически перестраивается частота. Отметим, что в нашем случае еще на линейном уровне напряженности поля накачки, характерный размер области локализации поля вблизи слоя  $\epsilon = 0$  достаточно мал  $\Delta l = (r_{De}^2 l)^{1/3} = 0,1$  см =  $10 r_{De}$ , где  $r_{De}$  – дебаевский радиус, а  $l$  – характерный размер неоднородности концентрации. При превышении порога нелинейности (по оценкам  $(v_E/v_{Te})_{пор} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ) включается механизм формирования кавитона и происходит дополнительное снижение размера локализации поля. Одновременно с этим происходит увеличение по абсолютной величине сдвига частоты. На определенном этапе, когда размер кавитона становится достаточно мал, включается затухание Ландау, приводящее к быстрому спаду поля. Именно это мы, по-видимому, наблюдаем при резком срыве модуляции пучка.

В заключение авторы выражают признательность Г.М. Батанову, А.Г. Литваку и Г.М. Фрайману за обсуждение работы.

#### Литература

1. Kim H. C., Stenzel R. L., Wong A. Y. Phys. Rev. Lett., 1974, 33, 886.
2. Гольцман В.Л., Задирака Ю.В., Силин В.А., Файзуллин Р.З. Препринт ИОФАН №173, 1984.
3. Батанов Г.М., Силин В.А. Тр. ФИАН, 1977, 92, 3.
4. Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой, ИПФ АН СССР, Горький, 1980.