

*Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 693 - 697*

*5 июня 1971 г.*

## **НАБЛЮДЕНИЕ САМОФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ**

*Б. Г. Еремин, А. Г. Литвак*

Возможность самофокусировки электромагнитных волн в плазме обсуждалась еще в первых работах по теории этого явления [1]. Позднее было показано, что эффекты самофокусировки могут играть существенную роль при распространении электромагнитных волн умеренной интенсивности в лабораторной и космической плазме [2]. Однако до настоящего времени, насколько нам известно, не были поставлены прямые эксперименты по исследованию этих эффектов в лабораторных условиях. В данной работе сообщается о наблюдении самофокусировки волн миллиметрового диапазона в слабо ионизированной плазме.

Использовавшаяся экспериментальная установка аналогична описанной в [3]. Вакуумный цилиндрический объем (длиной 100 см и диаметром 30 см, рабочее давление 0,25 тор) заполнялся плазмой с максимальной концентрацией  $N_e \approx 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . После окончания работы источника (коаксиального инжектора) начинался распад плазмы с характерным временем  $\tau \approx 1 \text{ мсек}$  и при  $\omega_p < \omega$  ( $\omega_p$  – плазменная частота) в плазму поступал СВЧ импульс длительностью 0,4 мсек. В качестве источника СВЧ колебаний использовался мазер на циклотронном резонансе (МЦР), позволяющий получать до 15 кВт мощности при  $\lambda = 5 \text{ мм}$ . Излучателем служил конический рупор, приемная антенна состояла из пяти стандартных прямоугольных волноводов 4-мм диапазона ( $1,8 \times 3,6 \text{ мм}^2$ ); четыре из них располагались попарно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, на равных расстояниях (15 мм) от пятого центрального волновода, который настраивался на максимум поля в "холодной" (без плазмы) системе. Расстояние между излучателем и приемником составляло 21 см и не изменялось в процессе работы. Принятые сигналы детектировались и регистрировались с помощью пятилучевого осциллографа. При обработке амплитуды сигналов, прошедших через плазму, определялись с учетом характеристик детекторов и нормировались на амплитуду максимального "холодного" сигнала.

Приведем оценки, иллюстрирующие возможность наблюдения тепловой самофокусировки волн на описанной выше установке. В плазме, характеризуемой следующими параметрами: концентрации нейтралов  $N_m \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и заряженных частиц  $N_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температуры компонент  $T = T_1 = T_m = 3 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ , эффективные частоты соударений  $\nu_{ei} = 2 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\nu_{em} = 2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\nu_{im} = 5 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\delta_m = 2 \cdot 10^3$  ( $\delta_m$  – доля энергии, теряемая электроном при одном соударении с молекулой), основную роль играют нелинейные эффекты, связанные с омическим нагревом и последующим вытеснением заряженных частиц из нагретой области. Поскольку в условиях эксперимента были выполнены неравенства  $\omega \gg \omega_p$ ,  $ka \gg 1$ ,  $a$  – радиус пучка,  $k = (\omega/c) \sqrt{1 - (\omega_p^2/\omega^2)}$  для оценок можно воспользоваться результатами квазиоптической теории тепловой самофокусировки волн в плазме [4]. В частности, в силу соотношения  $\sigma \ll L$ , где  $L = 1,45 (T/m\nu_{ei} \nu_{em} \delta_m)^{1/2}$  – характерный размер электронной теплопроводности в сильно ионизированной плазме ( $\nu_{ei} \gg \nu_{em}$ ) [5], по формулам безабберационного приближения для среды с нелокальной нелинейностью можно оценить мощность, при которой фокальное пятно должно попасть в плоскость приемных волноводов. Для коллимированного пучка эта мощность  $P_0 \approx 3\omega^4 T^2 c n_0 \sigma_0^2 / \omega_p^2 \nu_{ei}^2 e^2 L^2 \approx 3 \text{ вт}$ , а при учете измеренной экспериментально начальной расходимости пучка она увеличивается до 6 вт ( $P_0 \approx 6 \text{ вт}$ ). Однако характерное время релаксации тепловой нелинейности, определяемое в случае слабых возмущений как время амбиполярной диффузии заряженных частиц через поперечный размер пучка  $\tau_p \approx 4\sigma_0^2 \nu_{im} M / 2T \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ , значительно превышает длительность импульса  $\tau_{и} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ . Поэтому заметных эффектов самофокусировки следует ожидать при мощностях излучения  $P \geq P_0 \frac{\tau_{и}}{\tau_p} \approx 50 \text{ вт}$ .

На рис. 1 приведены результаты обработки одной из типичных осциллограмм, соответствующей времени задержки высокочастотного сигнала относительно начала работы источника плазмы  $\tau_3 = 1,8 \text{ мсек}$  (средняя концентрация электронов в объеме в этот момент составляла  $N_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и значению падающей мощности  $P_{\text{пад}} = 500 \text{ вт}$ . Как следует из кривых, сигнал в центральном волноводе сначала существенно меньше "холодного", затем он возрастает и в максимуме превышает "холодный" в 3,0 раза. Одновременно с ростом центрального сигнала уменьшаются сигналы в боковых каналах. Далее происходит ослабление центрального и увеличение боковых сигналов, причем сильнее других растет сигнал в третьем (верхнем) канале (кривая 3), так что к окончанию СВЧ импульса он превышает максимальный уровень "холодного" сигнала в 2,2 раза.

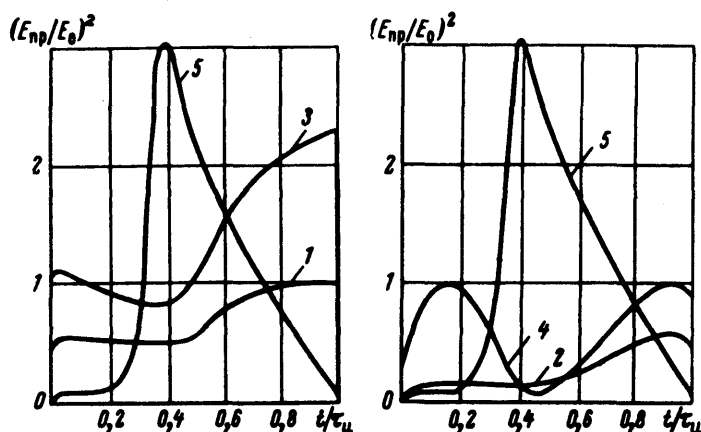


Рис. 1. Осциллограммы импульсов, прошедших через плазму

При сопоставлении осциллограмм, полученных при одинаковых значениях мощности и времени задержки, но при различных выстрелах инжектора, обнаруживается заметный разброс результатов, связанный с отсутствием полной повторяемости параметров плазмы. Однако практически во всех случаях максимальная амплитуда сигнала в центральном канале при  $25 \text{ вт} < P_{\text{пад}} < 4 \cdot 10^3 \text{ вт}$  превосходила величину сигнала в вакууме. Наибольшее превышение наблюдалось при падающей мощности  $P_{\text{пад}} \approx 500 \text{ вт}$ . С дальнейшим ростом мощности это превышение убывает и при  $P_{\text{пад}} \gtrsim 4 \text{ вт}$  отношение  $E_{\text{пр}}^2/E_0^2 \approx 1$ . На боковых каналах, наоборот, с увеличением падающей мощности это превышение возрастает, причем заметна тенденция к смещению пучка в направлении третьего канала. Зависимость от мощности максимальных значений отношения  $E_{\text{пр}}^2/E_0^2$  (при данном значении времени задержки  $\tau_3 = 1,8 \text{ мсек}$ ) на центральном и верхнем каналах приведена на рис. 2.

Заметное усиление прошедшего через плазму сигнала по сравнению с вакуумным уровнем и характер зависимости изменений пространственной структуры электромагнитных волн от мощности являются несомненными свидетельствами осуществления самофокусировки электромагнитных волн в описанных экспериментах. Полученные экспериментальные результаты на малых уровнях мощности качественно согласу-

ются с теоретическими представлениями. Однако в целом наблюдаемая картина оказывается существенно более сложной, чем это следует из элементарной теории. В первую очередь, это связано с нестационарностью нелинейных процессов (в том числе, и нестационарностью плазмы) и с необходимостью учета эффектов насыщения нелинейности (в стационарных условиях возмущения температуры и концентрации становятся порядка невозмущенных значений этих величин при  $P \geq 200$  *вт*).

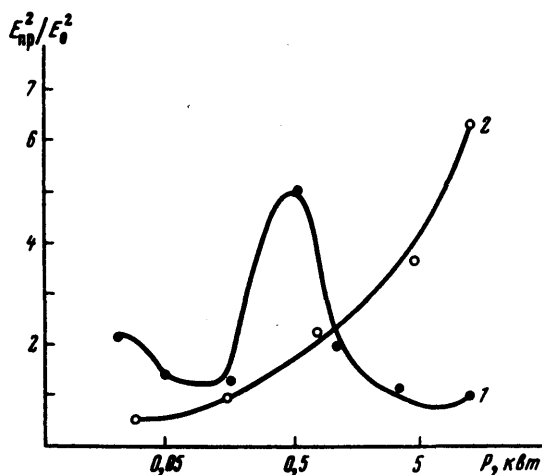


Рис. 2. Зависимость максимальных значений  $E_{\text{пр}}^2/E_0^2$  от падающей мощности: 1. — канал 5, 2 — канал 3

По-видимому, именно эффектами насыщения при мощностях  $P \geq 4$  *квт* можно объяснить отсутствие превышения сигнала на оси пучка над вакуумным уровнем (приосевая часть пучка распространяется в вакуумном канале) и наличие значительной фокусировки на периферии пучка. Несимметрия саморефракции пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях может быть связана как с регулярной неоднородностью плазмы, так и с возможной несимметричностью распределения поля в начальном сечении пучка.

Полученные результаты свидетельствуют, что эффекты самофокусировки должны играть важную роль при взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой. Представляет интерес дальнейшее экспериментальное и теоретическое исследование специфических "плазменных" особенностей этого явления.

Авторы признательны Т.Б.Панкратовой, В.А.Флягину и Д.И.Шестакову за изготовление и помощь в освоении МЦР и М.А.Миллеру за полезные дискуссии.

## Литература

- [ 1 ] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1964; В.И.Таланов. Изв. высш уч. зав., сер. Радиофизика, 7, 564; 1964.
  - [ 2 ] А.Г.Литвак. Изв. высш. уч. зав., сер., Радиофизика, 11, 1433; 1968; ЖЭТФ, 57, 629, 1969.
  - [ 3 ] Ю.Я.Бродский, Б.Г.Еремин, А.Г.Литвак, Ю.А.Сахончик. Письма в ЖЭТФ, 13, 136, 1971.
  - [ 4 ] A.G.Litvak. Phenomena in Ionized Gases Contributed Papers, Vienna, 1967, p.409.
  - [ 5 ] А.В.Гуревич. Геомагнетизм и астрономия, 7, 291, 1967.
-