

УДК 621.371.18 : 533.951

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ САМОФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

Б. Г. Еремин, А. Г. Литвак, Б. К. Полуяхтов

Приведены результаты экспериментального исследования тепловой самофокусировки электромагнитных волн СВЧ диапазона в изотропной слабоионизированной плазме. Показано, что наблюдавшиеся особенности явления находятся в хорошем согласии с существующими теоретическими представлениями.

Хорошо известно, что напряженности электромагнитного поля, при которых становятся существенными нелинейные эффекты, невелики и легко достигимы в радиодиапазоне как в лабораторной плазме, так и в ионосфере. Теоретические оценки показывают, что нелинейные эффекты должны играть существенную роль и при распространении в плазме мощного СВЧ излучения. Несмотря на это, в экспериментальном изучении нелинейного распространения электромагнитных волн в плазме делаются лишь первые шаги.

Настоящая работа посвящена исследованию одного из элементарных нелинейных эффектов, возникающих при распространении электромагнитных волн в плазме — тепловой самофокусировки. Простота этого эффекта связана с тем, что он характеризуется низким уровнем критических мощностей, при которых другие нелинейные процессы оказываются несущественными.

1. Экспериментальное исследование тепловой самофокусировки электромагнитных волн в плазме проводилось на установке, аналогичной кратко описанной в [1, 2]. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

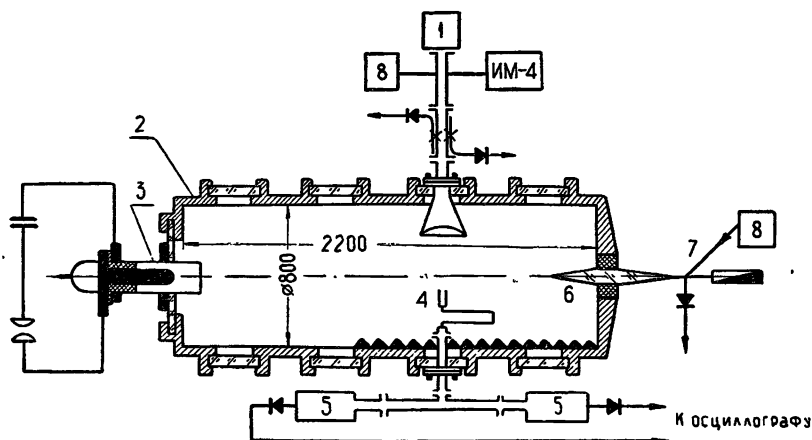


Рис. 1. Схема установки:

1—генератор СВЧ; 2—вакуумная камера; 3—инжектор; 4—приемный волновод; 5—резонансный фильтр; 6—диэлектрическая антенна; 7—двойной тройник; 8—кистронный генератор,

Вакуумная камера представляла собой стальной цилиндр диаметром 80 см и длиной 220 см, откачиваемый до давления 0,1 мм рт. ст. На боковой поверхности камеры располагалось 4 пары диагностических окон, через одно окно внутрь камеры вводилась передающая рупорная антенна с линзой. Рупор запитывался от генератора сверхвысокочастотных колебаний через волноводный тракт, включающий регулируемый аттенуатор, волноводный переключатель и два направленных ответвителя. С помощью волноводного переключателя волноводный тракт подключался к генератору малой мощности. Направленные ответвители позволяли измерять падающую и отраженную мощности. Внутренняя поверхность вакуумной камеры, обращенная к передающему рупору, была покрыта поглощающим материалом. КСВ передающего тракта вместе с камерой не превышал 1,1.

Приемной антенной служил открытый конец стандартного волновода (10×23 мм), размещенного внутри камеры. Принятый сигнал по высокочастотному кабелю выводился наружу и после детектирования подавался на осциллограф. Перемещая приемный волновод вдоль и поперек оси передающего рупора, можно было снимать распределение потока энергии внутри камеры. Измерения, проведенные таким образом в холодной системе (без плазмы), показали, что в вакуумную камеру входит сходящийся пучок электромагнитных волн с характерной полушириной ~ 10 см. На расстоянии 20 см от линзы в фокусе пучок имеет минимальную полуширину ~ 3 см, а затем снова расходится. Распределение потока энергии во всех сечениях пучка близко к гауссову.

В качестве генератора СВЧ использовался магнетрон непрерывного действия, позволяющий получать в 3-х сантиметровом диапазоне волн мощность до 100 вт.

Для наполнения камеры плазмой использовался обычный коаксиальный плазменный инжектор, запитываемый от конденсаторной батареи емкостью $1,2 \cdot 10^3$ мкф и напряжением до 5 кв. При срабатывании инжектора камера заполнялась плазмой с концентрацией $N_e \sim 10^{14} \div 10^{15}$ см $^{-3}$. После окончания работы источника плазма распадалась. Зависимость $N_e(t)$ определялась по результатам измерения концентрации микроволновым интерферометром ($\lambda = 0,9$ см) и по отсечкам ($\lambda = 0,9; 3$ и 4 см), а также по зондовым измерениям. В результате получена кривая зависимости $N_e(t)$, характерное время распада плазмы, определенное по кривой, составляло ~ 1 мксек.

Зондовые измерения, проведенные в различных точках волновой трассы, показали, что в диапазоне концентраций $N_e \sim 10^{12}$ см $^{-3}$ плазменный столб можно считать однородным с точностью 10%.

Температура плазмы, измеренная спектральными методами (по относительной интенсивности линий бальмеровской серии водорода) сразу после срабатывания источника, оказалась равной $T_e \sim 5 \cdot 10^3$ °К.

При заполнении камеры плазмой связь между передающей и приемной антеннами прекращалась (сигнал отсечки) до тех пор, пока концентрация электронов в плазме не уменьшалась до $N_{e\text{кр}}$. Измерения распределения полей проводились сразу вслед за прекращением сигнала отсечки.

2. Приведем оценки возможности осуществления самофокусировки волн в плазме, получаемой на описанной установке. В плазме, характеризующейся параметрами: концентрации электронов $N_e = 5 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$ и нейтралов $N_m = 4 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$; температуры компонент $T_e = T_i = T_m = 2,5 \cdot 10^3$ К; доля энергии, передаваемая электроном при соударении с молекулами $\delta_m = 2 \cdot 10^{-3}$; эффективные частоты соударений

$\nu_{em} = 7 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$, $\nu_{ei} = 9 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$, $\nu_{im} = 10^8 \text{ сек}^{-1}$, основную роль должны играть нелинейные эффекты, связанные с омическим нагревом и последующим вытеснением заряженных частиц из области поля (тепловая самофокусировка) [3-5]. Поскольку в эксперименте было выполнено условие $a \gg l/\sqrt{3\delta_m}$ (a — радиус пучка), можно было в оценках считать тепловую нелинейность локальной и определить величину критической мощности самофокусировки по формуле $P_{кр} = \frac{c^3}{\omega^2 n_0 \epsilon'} = \frac{c^3 \sqrt{\epsilon_0} E_p^2}{2\omega_p^2}$, где E_p — характерное плазменное поле для тепловых эффектов. В результате получаем $E_p = 40 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$, $P_{кр} = 10 \text{ вт}$. Следовательно, на всех уровнях мощности $P_{кр} \leq 100 \text{ вт}$ длина самофокусировки пучка с начальным радиусом $a = 10 \text{ см}$, $z_\phi = \frac{2\pi a^2}{\lambda \sqrt{P/P_{кр} - 1}} = 70 \text{ см}$, существенно превышает расстояние до «линейного» фокуса волноводной системы. Поэтому нелинейность должна приводить лишь к уменьшению размера фокального пятна (без заметного изменения фокусного расстояния системы).

Время установления стационарного распределения температуры $\tau_T = 1/\delta_m \nu_{em} = 10^{-5} \text{ сек}$, время релаксации возмущения концентрации $\tau_N = 2a^2 M \nu_{im}/T$ по порядку величины совпадает с временем распада плазмы лишь вблизи фокальной плоскости ($a = 3 \text{ см}$) $\tau_N \sim 10^{-3} \text{ сек}$, а на входе в плазму $\tau_N \sim 10^{-2} \text{ сек}$, что также способствует проявлению нелинейных эффектов только вблизи фокальной плоскости. В то же время максимальная напряженность электрического поля в фокусе $E = (8\pi P/cS)^{1/2} = 100 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$ превышает величину плазменного поля E_p , что должно приводить к заметным изменениям температуры и концентрации электронов под действием поля. Таким образом, параметры используемой установки удовлетворяют условиям, необходимым для реализации тепловой самофокусировки электромагнитных волн в плазме.

3. Для выявления эффекта самофокусировки снималось распределение плотности потока энергии в различных сечениях волнового пучка в плазме. Параллельно с распределением потока энергии сильного сигнала ($P_{пад} > P_{кр}$) снималось аналогичное распределение на малом уровне мощности ($P_{пад} \ll P_{кр}$) для пучка той же геометрии и частоты. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы сигналов, прошедших через плазму при большой ($P_{пад} = 100 \text{ вт}$) (а) и малой ($P_{пад} \sim 0,5 \text{ вт}$) (б) мощности падающего излучения. Расстояние между передающей и приемной антеннами составляло $z = 20 \text{ см}$, приемный волновод располагался на оси пучка. На рис. 2 введена также осциллограмма сигнала с двойного зонда, показывающая изменение концентрации электронов в плазме со временем. На осциллограммах виден сигнал отсечки, после окончания которого поведение прошедших сигналов большой и малой мощности резко различно. Если сигнал большой мощности за время порядка $0,5 \text{ мсек}$ после просветления плазмы возвращается на уровень сигнала в холодной системе и затем (пока N_e близко к $N_{e,кр}$) превышает его, то сигнал малой мощности нарастает много медленнее и достигает уровня сигнала в «холодной» системе, по существу, после окончательного распада плазмы.

Осциллограммы, подобные приведенным на рис. 2, были сняты в различных точках поперечного сечения пучка. Поскольку на осцилло-

граммах видны быстрые флуктуации, имеющие случайный характер и связанные, по-видимому, с методом генерации плазмы, при каждом

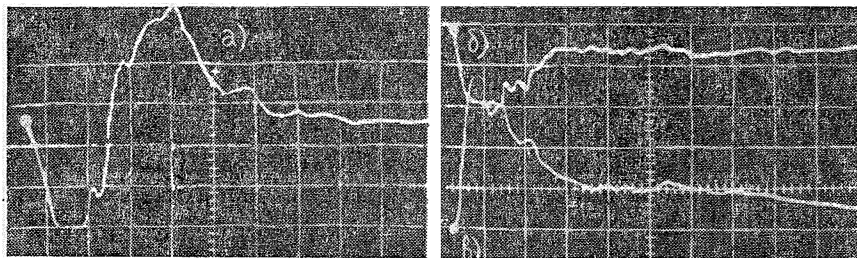


Рис. 2. Осциллограмма сигнала, прошедшего через слой распадающейся плазмы на оси волнового пучка:

а) $P_{пад}=100 \text{ вт}$; б) $P_{пад}=0,5 \text{ вт}$; в) сигнал с двойного зонда, помещенного в плазму; 1 см — 1 мсек.

значении параметров пучка снималось несколько (~ 10) осциллограмм, в результате обработки которых (с учетом диодной характеристики) были построены средние зависимости потока энергии от времени и определены среднеквадратичные ошибки.

Усредненные зависимости потока энергии на оси пучка в сечении, отстоящем на 20 см от линзы, при различных мощностях падающего сигнала приведены на рис. 3. Все сигналы нормированы на величину

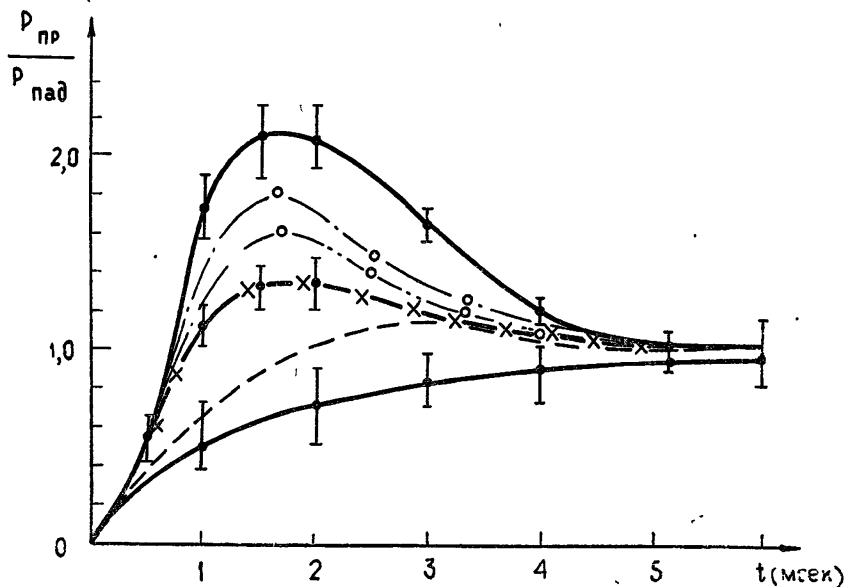


Рис. 3. Усредненная осциллограмма сигнала, прошедшего через плазму на оси пучка при $z=20 \text{ см}$;

— $P_{пад} = 100 \text{ вт}$; - - - $P_{пад} = 80 \text{ вт}$; - · - · - $P_{пад} = 60 \text{ вт}$;
 - x - x $P_{пад} = 35 \text{ вт}$; - - - $P_{пад} = 18 \text{ вт}$; — $P_{пад} = 0,5 \text{ вт}$.

сигнала в «холодной» системе, отсчет времени ведется с момента про-светления плазмы. Такие осциллограммы снимались в каждой точке поперечного сечения пучка, в результате чего можно было проследить

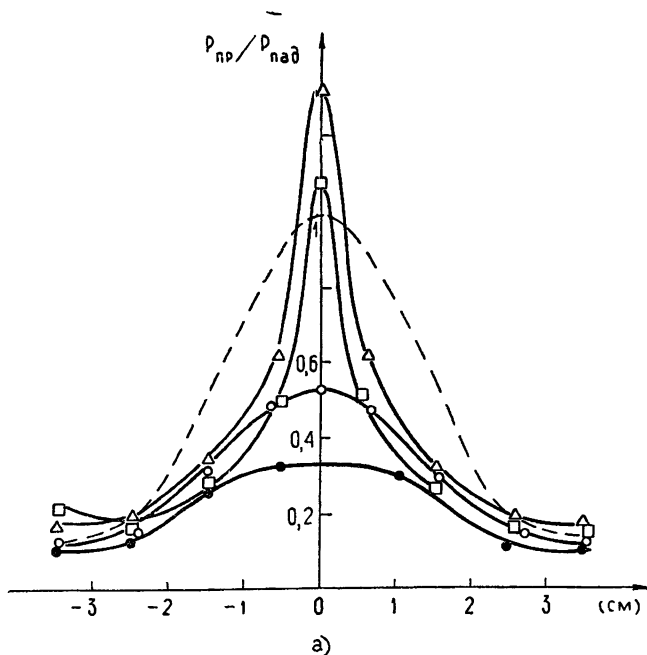


Рис. 4а. Распределение потока энергии при $z = 20$ см;
 ●●● — $P_{\text{пад}} = 0,5$ вт, □□□ — $P_{\text{пад}} = 60$ вт, $\tau = 0,9$ мсек,
 ○○○ — $P_{\text{пад}} = 0,5$ вт, $\Delta\Delta\Delta$ — $P_{\text{пад}} = 60$ вт, $\tau = 1,2$ мсек, $N_e \sim$
 $\sim 0,5 N_{\text{кр}}$, — — — — холодная система.

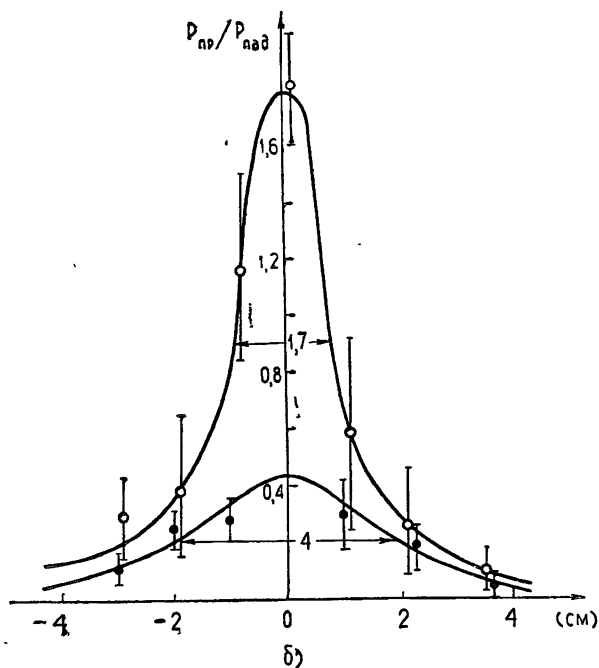


Рис. 4б. Распределение потока энергии при $z = 20$ см;
 ●●● — $P_{\text{пад}} = 0,5$ вт, ○○○ — $P_{\text{пад}} = 100$ вт, $\tau = 1$ мсек после
 просветления плазмы, $N \sim 0,5 N_{\text{кр}}$.

за изменениями распределения потока энергии пучка с изменением концентрации электронов в плазме. На рис. 4 а и 4 б приведены поперечные распределения потока энергии в разные моменты времени.

Одновременно с выяснением характера деформации фокусирующей электромагнитного пучка была предпринята попытка обнаружить изменение концентрации электронов в плазме, возникающее в результате взаимодействия с сильным полем. Для этого снималась зависимость от времени тока двойного зонда, помещенного на оси пучка на расстоянии $z = 20$ см от линзы. Кроме того, измерялось время распада плазмы от концентрации $N_e \approx 10^{12}$ см $^{-3}$ ($\lambda_{кр} = 3,2$ см) до $N_e \approx 0,6 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ ($\lambda_{кр} = 4$). С этой целью в передающий волноводный тракт вводился слабый сигнал от клистронного генератора с длиной волны $\lambda = 4$ см, который в приемном тракте селективировался от мощности сигнала с $\lambda = 3,2$ см при помощи системы проходных резонаторов.

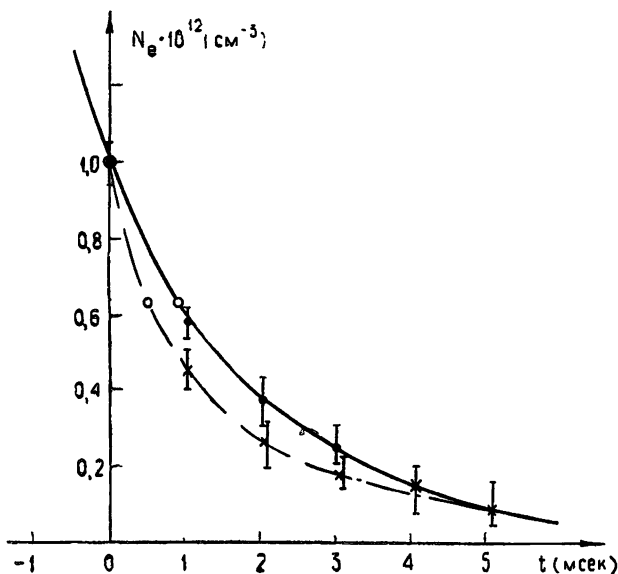


Рис. 5. Усредненные зондовые осциллограммы:
 — ток с зонда без СВЧ пучка; — ток с зонда с СВЧ пучком, $P_{пад} = 100$ вт; $\circ\circ$ — точки, полученные методом отсечки для сигналов $\lambda = 3,2$ и 4 см.

На рис. 5 приведены усредненные осциллограммы зондового тока в невозмущенной плазме и в присутствии мощного сигнала с $P_{пад} = 100$ вт. На эти же осциллограммы нанесены значения концентрации, полученные методом микроволновой отсечки. Если за начало отсчета принять момент, в который $N_e = N_{e\text{кр}1}$ ($\lambda = 3,2$ см), то время распада плазмы до значения концентрации $N_e = N_{e\text{кр}2}$ ($\lambda_{кр} = 4$ см) оказывается равным $\tau_1 = 0,9 \cdot 10^{-3}$ сек в невозмущенной плазме и $\tau_2 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ сек в присутствии сильного поля. Следовательно, распад плазмы в сильном поле происходит быстрее, что, по-видимому, связано с вытеснением плазмы из области сильного поля, происходящим вследствие ее нагрева.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что в описанном эксперименте наблюдалось явление самофокусировки пучка электромагнитных волн в слабоионизированной плазме. Об этом свидетельствуют не только усредненные распределения плотности потока энергии в поперечном сечении пучка, но

и тот факт, что практически во всех осциллограммах, снятых на оси пучка в сечении $z = 20$ см, нормированный сигнал на большом уровне мощности заметно превышает величину сигнала в вакууме и в плазме на малом уровне мощности. В соответствии с предсказаниями теории такое превышение наблюдалось лишь в сечении $z = 20$ см, близком к фокальному сечению линейной системы. В хорошем согласии с теоретическими оценками находятся и другие экспериментальные данные, такие, как величина мощности, начиная с которой наблюдалось превышение над уровнем нормированного слабого сигнала $P_{\text{пад}} \approx 20$ вт, время релаксации процессов $\tau \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$ сек и характер зависимости фокального размера пучка от мощности. Качественные измерения концентрации электронов, показывающие увеличение скорости распада плазмы в присутствии сильного поля, подтверждают результаты высокочастотных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Бродский, Б. Г. Еремин, А. Г. Литвак, Ю. А. Сахончик, Письма в ЖЭТФ, 13, 136 (1971).
2. Б. Г. Еремин, А. Г. Литвак, Письма в ЖЭТФ, 13, 603 (1971).
3. D. T. Farley, J. Geophys. Res., 68, 401 (1963).
4. А. В. Гуревич, Геомagnetизм и астрономия, 5, 30 (1965).
5. A. G. Litvak, Phenomena in Ionized Gases, Contributed Papers, Vienna, 1967, p. 409; А. Г. Литвак, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 11, № 9, 1433 (1968).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
17 декабря 1971 г.

INVESTIGATION OF THERMAL ELECTROMAGNETIC WAVE SELF-FOCUSING IN PLASMA

B. G. Eremin, A. G. Litvak, B. K. Poluyakhtov

The results of experimental investigation of the thermal self-focusing UHF electromagnetic wave in an isotropic weakly ionized plasma are given. The observed peculiarities of this phenomenon are shown to be in good agreement with the existing theoretical assumptions.