

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ,  
ИЗОЛИРОВАННОЙ ОТ СТенок ВОЛНОВОДА

В. И. Баринов, И. Р. Геккер, В. А. Иванов

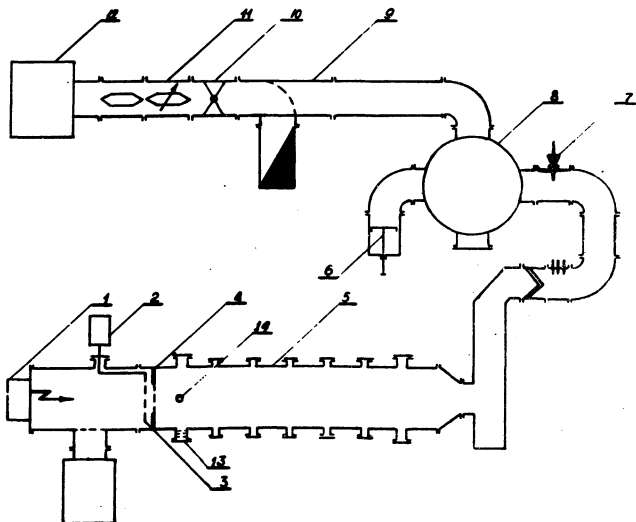
УДК 533.95

Проведены измерения поглощения интенсивной  $H_{11}$ -волны в столбе бесстолкновительной плазмы, изолированном от стенок круглого волновода. Показано, что наличие аномально сильного поглощения волны в плотной плазме ( $n/n_c \sim 1$ ), обязанного развитию параметрической неустойчивости плазмы, не связано ни с процессом линейной трансформации поперечной волны в продольную, ни с влиянием вторично-эмиссионного СВЧ разряда со стенок.

Одним из возможных механизмов эффективной передачи энергии лазерного излучения плазме при осуществлении управляемого термоядерного синтеза является аномальное поглощение электромагнитной волны, обязанное развитию параметрической неустойчивости. Для лучшего понимания физики протекающих при этом процессов является существенным проведение моделирующих экспериментов в различных диапазонах длин волн. При взаимодействии излучения Ю-см диапазона (большая область воздействия излучения и сравнительно низкие пороги) с потоком бесстолкновительной немагнитиченной плазмы ( $\omega_{Le} \sim \omega_0 \gg \nu_{ei}$ ), заполняющим все сечение металлического волновода при  $E > E_{пор} \approx 0,1$  кв/см наблюдалось аномально сильное поглощение /1,2/, сопровождающееся ускорением электронов /2,3/ и интенсивным распадом плазмы /1,3/. Однако можно было предположить, что в подобных условиях могли играть заметную роль пристеночные явления.

Настоящие исследования проводились на установке с  $H_{11}$ -волной /1,3/, претерпевшей ряд изменений (рис.1). Водородно-углеродная

плазма ( $n/n_c = 0,4 - 1,5$ );  $T_e \approx 5\text{эВ} \gg T_i$ ), создаваемая искровым источником, инжестировалась через металлическую диафрагму ( $\phi 8$  и  $3$  см), затянутую сеткой ( $z = 60$  см) в металлический вол-

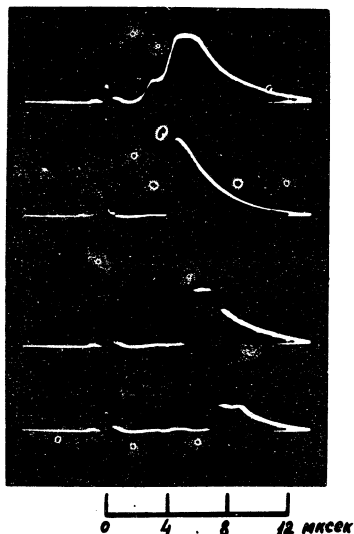


Р и с. I. Схема экспериментальной установки. I - плазменный искровой источник; 2 - блокинг-генератор; 3 - отсекающая плазму медная сетка (ячейка  $0,03 \times 0,03 \text{ мм}^2$ ); 4 - металлическая диафрагма ( $\phi 8$  и  $3$  см); 5 - вакуумный волновод ( $\phi 14$  см); 6 - короткозамыкающий поршень; 7 - СВЧ зонд; 8 - волноводный переключатель; 9 - направленный ответвитель; 10 - согласующая секция; II - ферритовый вентиль - регулируемый ослабитель; I2 - СВЧ генератор; I3 - многосеточный плазменный зонд; I4 - экранированный плазменный зонд

новод  $\phi 14$  см. Диафрагмы ограничивали поперечные размеры плазменных потоков (имелось однородное распределение концентрации по радиусу). Формирование кругого плазменного фронта обеспечивалось подачей в различные моменты времени отрицательного импульса напряжения  $\sim 100$  в с мощного блокинг-генератора на дополнительную метал-

ж) Как известно,  $n = n_c$  при  $\omega_{Le} = \omega_0$

лическую сетку, расположенную в 1 см перед диафрагмой /4/ (см.рис.2) При этом создавался однородный по концентрации плазменный цилиндр (неоднородность не свыше  $\pm 10\%$ ). Вакуум в волноводе достигал



Р и с. 2. Осциллограммы, иллюстрирующие работу системы электрической отсечки плазменного потока (экранированный зонд расположен на расстоянии 10 см от диафрагмы).

$1 \cdot 10^{-6}$  тор. На плазму падала  $H_{11}$ -волна мощностью до 1 Мвт ( $\tau \approx 0,5$  мксек). Малая длительность СВЧ импульса позволяла с большей достоверностью ориентироваться на начальные параметры плазмы. Особое внимание было обращено на корректность измерения доли СВЧ мощности, поглощаемой плазмой. Последняя определялась как  $|D|^2 = 1 - |R|^2$  (ж). Измерения  $|R|^2$  проводились с помощью направленного ответвителя (направленность 35 дБ, переходное ослабление 35 дБ), имеющего КСВН нагрузки  $\sim 1,01$ . Существенным было также достижение КСВН  $= 1,01 + 1,02$  за направленным ответвителем в сторону СВЧ генератора, с помощью согласующей секции. Качество согла-

ж) Здесь  $|D|^2$  и  $|R|^2$  - коэффициенты поглощения и отражения.

сования контролировалось путем перемещения короткозамыкающего поршня, передвигаемого в волноводе на высоком уровне СВЧ мощности и подсоединяемого волноводным переключателем вместо вакуумного волновода в тракт за направленным ответвителем. При успешном согласовании пульсации величины сигнала отраженной СВЧ мощности не превышали  $\pm 3\%$ , что и определяло точность абсолютных измерений  $|D|^2$ . Для плазменных измерений использовались экранированные и многосеточные зонды. Экранированный зонд при определении абсолютных значений концентрации  $n$  калибровался по минимальному порогу развития неустойчивости /5/. Порог неустойчивости отождествлялся с порогом появления ускоренных электронов, регистрируемых многосеточным зондом /3/. Точность измерения  $n/n_c$  достигала  $\pm 10\%$ .

Плазменный поток диаметром 8 см (также как и 14 см /1/) полностью отражал передним фронтом волну (на малом уровне СВЧ мощности), что регистрировалось СВЧ зондом, располагаемым в волноводном тракте, в виде перемежающейся картины узлов и пучностей стоячей волны. Поток  $\phi$  3 см при этом отражал не свыше 20%. Импульсный СВЧ генератор включался в момент нахождения переднего фронта плазменного потока примерно на расстоянии  $\sim 10$  см от диафрагмы. Результаты измерения средних значений  $|D|^2$  для  $n/n_c = 0,9 \div 1,5$  приведены в таблице I. Отметим, что в этом случае имеется слабая зависимость  $|D|^2$  от  $n/n_c$ . При значениях  $n/n_c = 0,5 - 0,8$  поглощения в пределах ошибок измерения замечено не было.

Таблица I  
Средние значения коэффициента поглощения  $|D|^2$

$E_0$ , кв/см	$v_E/v_{Te}$	$\phi$ 3 см	$\phi$ 8 см	$\phi$ 14 см
0,35	0,5	20%	<3%	3%
1,15	1,8	<3%	3%	10%
3,6	5,3	<3%	10%	27%

Различный ход зависимостей  $|D|^2$  от  $E_0$  при разных диаметрах потоков, по-видимому, отражает разные доминирующие механизмы бесстолкновительного поглощения волн в плазме. Так, при диаметре 3

см при минимальном значении  $E_0$  значение  $|D|^2$  сравнительно велико ( $\sim 20\%$ ) и возрастает до 80% при увеличении длины потока до 50 см. Резкое уменьшение  $|D|^2$  при больших значениях  $E_0$ , очевидно, является следствием быстрого распада плазмы (временное разрешение системы СВЧ измерений не превышало 0,1 мксек). Указанное не исключает влияние механизма, связанного с линейной трансформацией поперечных волн в продольные /6/, тем более, что по этому благоприятствуют условия эксперимента ( $n/n_c \geq 1$ ;  $\Delta_{\perp} n \parallel \vec{E}$ ). При больших диаметрах потока ( $\varnothing$  8 и 14 см;  $\Delta_{\perp} n \parallel \vec{E}$ ) наблюдается заметный рост  $|D|^2$  при увеличении  $E_0$ . Поглощение носит нелинейный характер, достигая заметных значений только при больших  $E_0$ , и может быть связано с развитием параметрической неустойчивости плазмы /5/. Значения  $|D|^2$  возрастают примерно пропорционально площади сечения потока и не зависят от его длины. Увеличение  $|D|^2$  с ростом диаметра также говорит о слабом влиянии механизма линейной трансформации, в случае которого была бы обратная зависимость. Полученные значения  $|D|^2$  для потока  $\varnothing$  14 см меньше приведенных в /1/ (где  $\tau = 5+10$  мксек и осуществлялась инжекция плазмы в ранее созданное СВЧ поле), что, по-видимому, связано как с изменением условий эксперимента, так и с улучшением методики СВЧ измерений.

Поглощение СВЧ волны в плазме приводило к нагреву, сопровождаемому вылетом из плазмы электронов, ускоренных до энергий в несколько кэВ, и ее распадом. Вылет электронов происходил из области "скин-слоя" на переднем фронте ( $\sim 5-7$  см) для широких потоков и по всей длине для потока  $\varnothing$  3 см /7/. Одновременно с появлением ускоренных электронов отмечалось возбуждение низкочастотных колебаний ( $f_s \approx 5$  МГц). Энергия, уносимая из "скин-слоя" быстрыми электронами, при  $n/n_c = 0,9+1,5$  растет как  $E_0^3$ , по порядку величины совпадая с поглощенной СВЧ энергией (при  $n/n_c < 0,9$  ток резко падает). Отключение системы, формирующей крутой передний фронт плазменного потока (при слабом изменении крутизны в наиболее плотной части — см. рис. 2) существенно не изменяло ни величину  $|D|^2$ , ни поток ускоренных электронов.

На результатах измерений также не сказалось введение в плазменные потоки медной пластинки  $3 \times 3 \text{ см}^2$  (нормально к  $\vec{E}$ ). Указанное говорит о допустимости введения в плазму металлических зондов.

Несмотря на значительную величину  $E_0$  при длительности СВЧ импульсов 0,5 мксек не наблюдалось развития достаточно сильного вторично-эмиссионного разряда, в то же время длительности импульса хватало для протекания всех плазменных процессов, включая распад.

Таким образом показано, что наблюдаемое аномальное поглощение связано с плазменными явлениями, а не с пристеночными процессами. Более того, сам механизм поглощения, по крайней мере в широких потоках, не определяется линейной трансформацией и обязан развитию неустойчивости плазмы, помещенной в сильное СВЧ поле.

Поступила в редакцию  
26 июня 1973 г.

### Л и т е р а т у р а

1. И. Р. Геккер, О. В. Сизухин. Письма в ЖЭТФ, 9, 408 (1969).
2. К. Ф. Сергейчев, В. Е. Трофимов. Письма в ЖЭТФ, 13, 236 (1971).
3. В. И. Баринов, И. Р. Геккер, О. В. Сизухин, Э. Г. Хачатурян. Краткие сообщения по физике ФИАН № 3, 41 (1971); Препринт ФИАН, № 25, 1971 г.
4. В. И. Баринов. Краткие сообщения по физике ФИАН № 6, 8 (1971).
5. Н. Е. Андреев, А. Ю. Кирий, В. П. Силлин. ЖЭТФ, 57, 1024 (1969).
6. В. Е. Голант, А. Д. Пелия. УФН, 104, 413 (1971).
7. В. И. Баринов, И. Р. Геккер, В. А. Иванов. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 8 (1973).