

АНОМАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

И.Р.Геккер, О.В.Сизухин

Ранее проводились эксперименты [1 – 3] по взаимодействию мощной линейно-поляризованной волны H_{11} в круглом волноводе с цилиндрическим потоком плотной плазмы, инжектируемым вдоль радиуса волновода нормально к направлению электрического поля. Плазма была бесстолкновительной ($\omega_{Le} \geq \omega \gg \nu_{ei}$, где ω_{Le} – электронная плазменная частота, ω – частота СВЧ генератора, ν_{ei} – частота электронно-ионных столкновений). Во всех экспериментах $\lambda_g \gg a$, где λ_g – длина волны в волноводе, a – радиус потока. Максимальная напряженность электрического поля в центре волновода E изменялась от 100 в/см до 6 кВ/см. При $E > 1$ кВ/см наблюдалось изменение характера движения

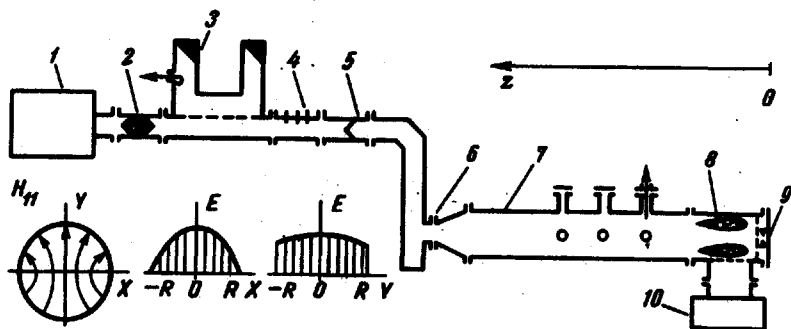


Рис.1. Схема установки с волной H_{11} : 1 – СВЧ генератор; 2 – ферритовый вентиль, регулируемый ослабитель; 3 – измерительный направленный ответвитель; 4 – согласующая секция; 5 – вакуумное СВЧ окно; 6 – возбуждатель волны H_{11} в круглом волноводе; 7 – круглый волновод с патрубками для введения СВЧ и плазменных зондов; 8 – поглощающая СВЧ нагрузка; 9 – плазменный источник; 10 – откачная секция

плазменного потока и появление ускоренных ионов [1, 3], говорящее об эффективной передаче энергии волны плазме. Также было замечено изменение структуры СВЧ поля в волноводе [1, 2]. Нелинейные явления в столбе газеразрядной плазмы, ограниченной трубкой, при E от 10 до 150 в/см исследовались в [4].

В данной работе приводятся результаты исследования взаимодействия мощной волны H_{11} с плазменным "поршнем", перекрывающим все сечение волновода ($\lambda_e \approx 2a$). Заметим, что структура поля волны H_{11} в центральной части сечения волновода близка к плоской волне в свободном пространстве. Эксперименты проводились на установке (см. рис. 1), подробно описанной в работах [1 – 3, 5]. Использовались как мощный импульсный генератор 10-сантиметрового диапазона ($\sim 1 \text{ Мвт}$), так и маломощный измерительный генератор ($\sim 10 \text{ мвт}$). Инжекция плазмы ($T_e = 4 \text{ эВ}$) производилась искровым источником, расположенным в центре заднего фланца круглого волновода, через свободное пространство пристеночной СВЧ нагрузки. Плазменный "поршень" имел практически однородное распределение концентрации плазмы по радиусу. Градиент концентрации плазмы на переднем фронте составлял $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-4}$. Скорость движения фронта была $\sim 10^7 \text{ см/сек}$. Максимальная концентрация плазмы при выходе из СВЧ нагрузки достигала 10^{12} см^{-3} ($\omega_{L_e} \gg \omega$). По мере движения плазменного "поршня" вдоль оси волновода z максимальная концентрация падала пропорционально z^{-3} . В зависимости от напряжения на источнике $U_{\text{и}}$ или, что то же от начального числа частиц в потоке, при некотором z плазма становилась прозрачной для электромагнитной волны ($\omega_{L_e} < \omega$).

При малом уровне СВЧ мощности ($E = 0,1 \text{ в/см}$), когда $v_{T_e} \gg v_E$, где $v_{T_e} = \sqrt{3kT/m}$ и $v_E = eE/m\omega$, было получено практически 100-процентное отражение волны от плотной плазмы ($\omega_{L_e} < \omega$), что находится в полном соответствии с теорией (см. [6], § 18).

При высоком уровне СВЧ мощности, когда E изменялось от 0,2 до 2 кв/см ($v_{T_e} = v_E$), отраженная от плазмы СВЧ мощность регистрировалась с помощью направленного ответвителя, а проходящая – с помощью электрических антенн, вводимых через стенку круглого волновода (см. рис. 1). СВЧ мощность подавалась до момента инъекции плазмы. На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с СВЧ и плазменного зондов. Амплитуда СВЧ сигналов пропорциональна СВЧ мощности. Из рис. 2 следует, что относительный уровень отраженной СВЧ мощности падает по мере увеличения напряженности электрического поля E в волноводе. На СВЧ сигнале также видны кратковременные "провалы" с минимальным отражением, имеющие интервал порядка 1 мксек . Сигнал с антенны, введенной через стенку круглого волновода на расстоянии $z = 45 \text{ см}$ от источника, вдоль направления электрического поля, сначала не изменяется, пока плазма находится в пределах СВЧ нагруз-

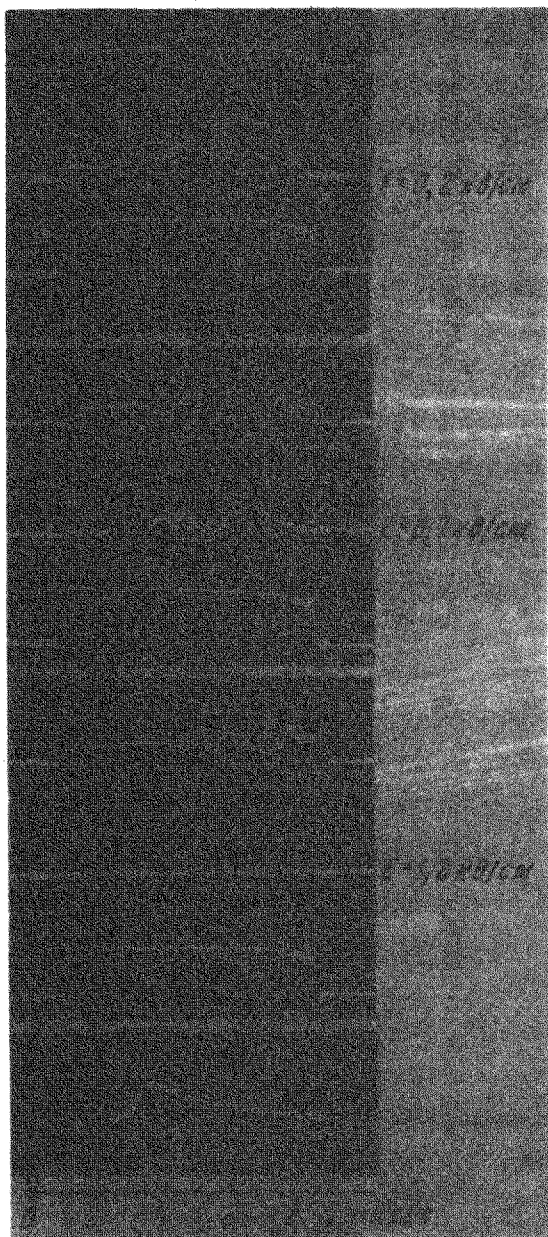


Рис.2. Осциллограммы СВЧ и плазменного сигналов при $U_{и} = 5 \text{ кВ}$ и различных E . Вверху – сигнал отраженной СВЧ мощности (для сравнения приведен СВЧ сигнал при полном отражении). Внизу – СВЧ сигнал с антенны, введенной в круглый волновод вдоль E при $x = 45 \text{ см}$. Отдельно приведен сигнал с плазменного зонда (ионный ток), введенного в центр круглого волновода при $x = 45 \text{ см}$

ки, а затем принимает периодический характер, свидетельствующий о наличии некоторого отражения волны H_{11} от движущегося плазменного "поршня" (перемещаются узлы и пучности стоячей волны). Далее имеет место сравнительно длительная "отсечка" плазменным "поршнем" волны H_{11} ($\omega_{L_0} > \omega$), когда плазма экранирует антенну от СВЧ поля. Длительность "отсечки" падает как с уменьшением начальной плотности плазмы, т.е. U_H , так и с ростом E . Наконец, плазма становится прозрачной для волны и СВЧ сигнал достигает первоначального значения. Отметим, что при этих экспериментах не было зарегистрировано появления СВЧ сигнала с антенны, вводимой через стенку круглого волновода нормально к ориентации электрического поля волны H_{11} . Указанное свидетельствует об отсутствии как вращения плоскости поляризации волны H_{11} , так и появления в волноводе волны E_{01} , распространение которой допустимо для волновода данного диаметра.

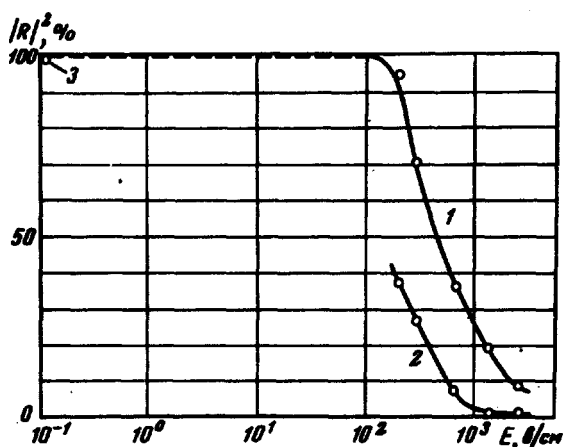


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения $|R|^2$ от E при $U_H = 5$ кВ :
 1 – по максимальным значениям отраженной СВЧ мощности; 2 – по минимальным значениям (в "провалах");
 3 – измерения с маломощным СВЧ генератором

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента отражения волны по мощности $|R|^2$ от E , как для максимальных значений отраженной СВЧ мощности (берется отношение амплитуды СВЧ сигнала при инъекции плазмы к амплитуде сигнала, полученного при перекрытии подводимого СВЧ мощность прямоугольного волновода металлической заглушкой), так и для $|R|^2$ в "провалах" (см. рис. 2). Видно снижение $|R|^2$ с рос-

том E , начиная с "порогового" значения $E = 10^2$ в/см ($v_E = 0,1v_{Te}$) и далее до $E = 10^3$ в/см ($v_{Te} = v_E$). Поскольку при этом согласно рис. 2, волна H_{11} не проходит за плазменный "поршень" и только частично от него отражается (в нашем случае в течение 3 – 4 мксек), то, очевидно, имеет место значительное поглощение волны в плазме. Коэффициент поглощения можно найти из известного соотношения

$$|D|^2 = 1 - |R|^2 - |T|^2,$$

где $|T|^2$ – коэффициент пропускания ($|T|^2 = 0$). Таким образом имеет место сильное увеличение $|D|^2$ с ростом E в исследованном нами диапазоне значений E . Это явление, по-видимому, связано с возбуждением неустойчивости, приводящей к нагреву плазмы. Отмеченное ранее уменьшение длительности "отсечки" с ростом E вызвано разбрасыванием плазмы.

Обнаруженное аномально сильное поглощение электромагнитной волны в бесстолкновительной плазме (в отсутствии внешнего магнитного поля), происходящее при значениях напряженности электрического поля свыше 100 в/см, позволяет осуществить эффективную передачу энергии волны плазме.

Авторы выражают благодарность Г.М.Батанову, Л.М.Горбунову, М.С.Рабиновичу и К.Ф.Сергейчеву за обсуждение результатов эксперимента.

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

Поступило в редакцию
20 февраля 1969 г.

Литература

- [1] И.Р.Геккер, К.Ф.Сергейчев, В.Е.Трофимов. Труды 8-ой Международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Вена, 394, 1967.
- [2] И.Р.Геккер. Препринт ФИАН, № 144, 1966.
- [3] К.Ф.Сергейчев. ЖЭТФ, 52, 575, 1967.
- [4] A. M. Messiaen, P. E. M. Vandenplas. Phys. Lett., 25 A, 339, 1967.
- [5] И.Р.Геккер, Э.Я.Гольц, Б.П.Кононов, К.А.Сарксян, В. А.Силин, Труды 7-ой Международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Белград, 2, 445, 1965.
- [6] В.Л.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Физматгиз, 1960.