

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ПЛОТНОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

Г. М. Батанов, В. А. Силин

Самовоздействие электромагнитных волн в плазме [1 - 3] обычно связывается либо с действием стрикционных сил, либо с неоднородным нагревом заряженных частиц при парных столкновениях. Недавно сообщалось [4] об экспериментальном наблюдении термической самоканализации электромагнитной волны в условиях, когда длина свободного пробега электронов λ была меньше размера неоднородности поля L . В то же время большой интерес представляет случай, когда выполняется обратное условие $\lambda \gg L$. Отметим, что в бесстолкновительном случае существует возможность передачи энергии волны электронам по крайней мере двумя механизмами. К таковым можно отнести линейную трансформацию поперечной волны в продольную, с последующим ее поглощением и аномальное увеличение высокочастотной проводимости, вызванное параметрической неустойчивостью высокочастотных и низкочастотных потенциальных волн [5, 6].

В нашем эксперименте изучается проникновение мощной электромагнитной волны через слой плотной плазмы, находящейся в высоком вакууме ($\sim 10^{-6}$ мм рт. ст), максимальное значение отношения $\omega_{L_e}^2 / \omega_0^2 = 5$, где ω_0 - угловая частота поля. Плазменный слой создавался четырьмя искровыми источниками, расположенными по окружности цилиндрической вакуумной камеры [7] внутренним диаметром около 60 см. Распределение плотности вдоль оси камеры имело колоколообразную форму, толщина слоя по уровню критической плотности составляла 30 см. Температура электронов плазмы была около 10 эв. Электромагнитная волна генерировалась магнетроном 10-см диапазона мощностью до 1 Мвт и направлялась на плазменный слой с помощью рупорно-линзового излучателя, создававшего вдоль оси камеры слаборасходящийся поток излучения с поперечным размером 20 см. Регистрация поля в камере осуществлялась с помощью отрезка прямоугольного волновода, перемещавшегося вдоль оси камеры, и с помощью симметрич-

ной антенны, имеющей четыре электрических СВЧ зонда¹⁾, расположенных на разных расстояниях от оси камеры.

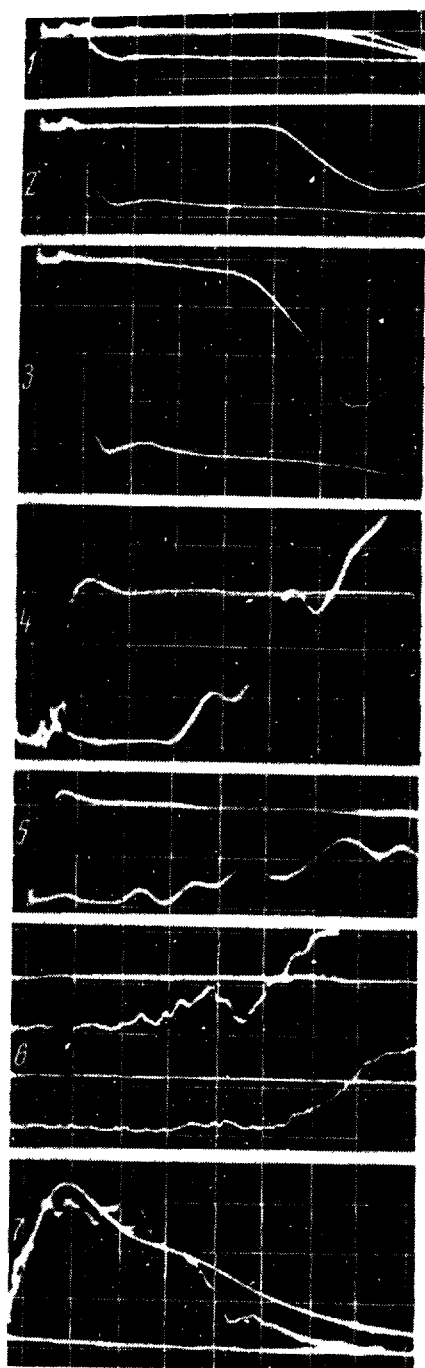


Рис. 1. Осциллограммы: 1, 2, 3 – огибающая СВЧ регистрируется волноводом, находящимся за слоем; совмещены осциллограммы сигналов с плазмой и без плазмы. Мощности: 1 – 10 квт, 2 – 140 квт, 3 – 480 квт. Масштаб времени 1 мксек/см; 4, 5 – сигналы с антенны, расположенной в центре слоя, 4 – на оси камеры, 5 – смещение от оси на 12 см (снимаются в одном импульсе). Масштаб времени 1 мксек/см; 6 – проникновение диагностического сигнала в плазменный слой, регистрация с помощью антенны; внизу – без мощного СВЧ, сверху – мощность 100 квт (2 мксек/см); 7 – ионный ток ленгмюровского зонда, напряжение на зонде – 100 в, совмещены сигналы для случаев, когда мощность падающей волны равна 0 и 500 квт

¹⁾Ниже приводятся значения протектированного тока антенны. Для перехода к полю в плазме необходимо знание коэффициента связи антенны с излучением; с учетом диэлектрической постоянной плазмы.

Вследствие теплового расширения плазмы даже при низких мощностях падающей волны наблюдается постепенное просветление плазменного слоя (рис. 1, 1). Однако время просветления (временной интервал от момента включения генератора до момента нарастания поля до уровня $1/e$ от его величины в вакууме) при уровнях мощности ниже $5+7 \text{ кэвт}$ не зависит от интенсивности падающей волны. Дальнейшее увеличение мощности приводит к заметному уменьшению времени просветления (рис. 1, 2, 3), при этом в центре слоя напряженность поля растет быстрее, чем на периферии (рис. 1, 4, 5), что говорит об образовании в плазме канала с неоднородным распределением концентрации заряженных частиц. Изменение плотности плазмы в канале было зарегистрировано по моменту отпирания антенны для диагностического СВЧ сигнала мощностью 1 Мэвт , имеющего частоту в 1,5 раза более низкую, чем основной сигнал, а также с помощью цилиндрических ленгмюровских зондов. Как видно из осциллограмм рис. 1, 6, 7 при воздействии мощной волны плотность заряженных частиц падает. При этом наблюдаются колебания как ионного тока ленгмюровского зонда, так и сигнала антенны. Частота этих колебаний составляет $1+2 \text{ Мгц}$.

Повышение мощности падающего на слой излучения до $300+500 \text{ кэвт}$ приводит к резкому изменению характера проникновения излучения через плазму: слой оказывается прозрачным на всю свою глубину уже на переднем фронте СВЧ сигнала, т. е. через $0,2 \text{ мксек}$. Изменение характера проникновения излучения через слой демонстрируется на рис. 2, где приведены распределения сигналов антенны вдоль оси камеры при различных мощностях падающих волн.

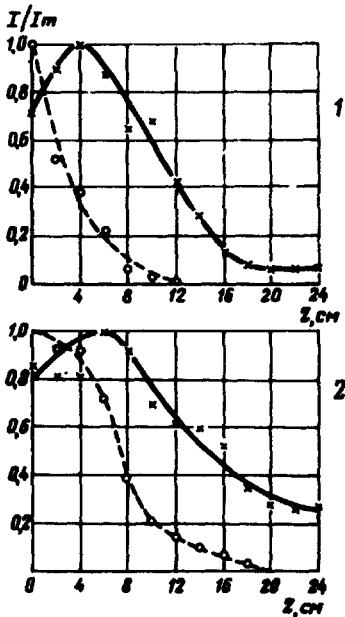


Рис. 2. Распределение поля по оси вакуумной камеры: 1 — в момент времени $0,2 \text{ мксек}$ после включения СВЧ поля; 2 — в момент времени 5 мксек после включения СВЧ поля, пунктирные линии — мощность 2 кэвт , сплошные линии — 500 кэвт

Одновременно с ростом просачивания излучения через слой зарегистрировано уменьшение отражения слоем падающих на него волн обратно в рупорно-линзовую антенну. Однако, если проникновение волн наблюдается спустя некоторое время после включения генератора, то

отраженный сигнал оказывается уменьшенным по сравнению с его уровнем на мощностях до $5 + 7 \text{ кэВ}$ сразу же после включения генератора. По-видимому, это наблюдение свидетельствует о сильном поглощении падающего излучения в плазме.

• Таким образом, зарегистрировано просачивание через слой плотной бесстолкновительной плазмы СВЧ излучения относительно низкой мощности, когда $E_0^2 / 8\pi \ll nT_e$. Так мощности $5 + 7 \text{ кэВ}$ соответствует $E_0 / E_T = 0,03$, ($E_T = \sqrt{3} T_e m \omega_0^2 e^{-2}$). Мощности $300 + 500 \text{ кэВ}$, когда происходит быстрое просветление слоя, соответствует $E_0 / E_T = 0,2 + 0,3$.

Наблюдаемый эффект, видимо, может быть объяснен параметрической раскачкой потенциальных волн в плазме [6]. Действительно, согласно [8] для порога аperiодической неустойчивости имеем $E_0 / E_T = 0,02$, тогда как экспериментально влияние поля волны на ее просачивание через слой наблюдается при $E_0 / E_T = 0,03$. В пользу развития неустойчивости плазмы свидетельствуют и наблюдаемые колебания плотности в диапазоне звуковых частот, а также зависимость отражения волн слоем от мощности падающего излучения.

Развитие параметрической неустойчивости должно приводить к увеличению эффективных частот столкновений, а в таком случае возможен обычный тепловой механизм самовоздействия излучения. Можно предположить также, что в результате развития звуковых колебаний при параметрическом резонансе происходит сильная модуляция плотности плазмы ($\Delta n / n \approx 1$) звуковой волной вдоль электрического поля падающей волны. В этом случае слой также окажется прозрачным для излучения. Энергетически же этот процесс более выгоден, чем образование широкого канала в плазменном слое.

Авторы выражают свою признательность Г.А.Аскарьяну, М.С.Рабиновичу и В.П.Силину за ряд важных замечаний, высказанных при обсуждении работы.

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

Поступила в редакцию
27 августа 1971 г.

Литература

- [1] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 6, 1567, 1962.
- [2] В.И.Таланов. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 7, 3, 564, 1964.
- [3] А.Г.Литвак. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 9, 4, 675, 1966.
- [4] Ю.Я.Бродский, Б.Г.Еремин, А.Г.Литвак, Ю.А.Сахончик. Письма в ЖЭТФ, 13, 136, 1971.
- [5] Л.И.Анисимов и др. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., IAEA, Vienne, 2, 399, 1969.
- [6] В.П.Силин. ЖЭТФ, 48, 6, 1679, 1965.
- [7] Г.М.Батанов, К.А.Сарксян, В.А.Силин. Препринт ФИАН №92, М., 1970.
- [8] Н.Е.Андреев, А.Ю.Кирий, В.П.Силин. ЖЭТФ, 57, 1024, 1969.