

САМОКАНАЛИЗАЦИЯ МОШНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Ю.Я.Бродский, Б.Г.Еремин, А.Г.Литвак, Ю.А.Сазончик

Хорошо известно из линейной теории волн, что изотропная плазма является непрозрачной для электромагнитных волн на частоте ниже плазменной $\omega < \omega_p$. Однако, если интенсивность электромагнитной волны достаточно велика, под ее действием происходит перераспределение плотности заряженных частиц и возможно образование волноводного канала в "закритической" плазме [1 – 4]. В этой статье описываются прямые наблюдения прохождения интенсивных электромагнитных волн через плотную плазму. Показано, что полученные результаты находятся в согласии с теоретическими оценками.

1. Экспериментальная установка состояла из вакуумного цилиндрического объема (ϕ 80 см и длиной 220 см), откачиваемого до давления 0,1 тор. С помощью коаксиального плазменного источника, расположенного на торцевой стенке цилиндра, этот объем заполнялся плазмой с низкой степенью ионизации. Максимальная концентрация электронов $N_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигалась через $\sim 0,5$ мсек после начала разряда в инжекторе, затем начинался распад плазмы с характерным временем ~ 10 мсек. В качестве генератора СВЧ колебаний использовался импульсный магнетрон 10-см диапазона, позволяющий получать мощность до 300 кВт. Излучателем служила рупорная антенна, приемником – открытый конец волновода, расстояние между которыми изменялось от 40 до 60 см. Внутренняя поверхность вакуумной камеры со стороны приемного волновода была покрыта поглотителем для уменьшения отражения волн от стенок.

Магнетрон запускался с различной задержкой относительно начала разряда, что позволяло исследовать взаимодействие в широком диапазоне концентраций. Концентрация плазмы определялась по отсечке двух зондирующих слабых сигналов с длинами волн $\lambda = 3$ см и $\lambda = 12$ см в предположении, что распад плазмы происходит по экспоненциальному закону. Для развязки слабого сигнала от мощного импульса использовалась система резонансных фильтров.

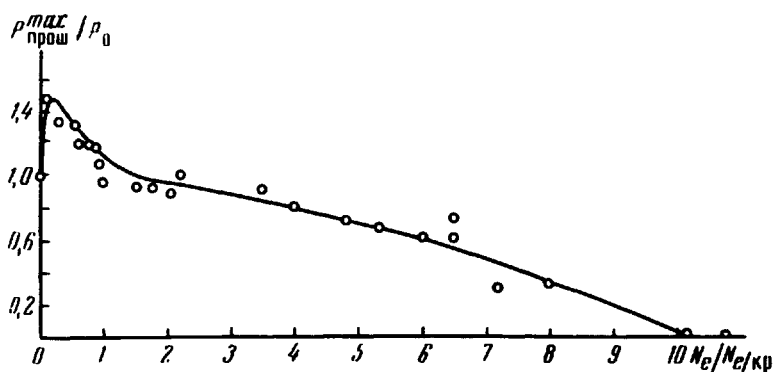


Рис.1. Зависимость максимальной мощности сигнала, прошедшего через плазменный слой, толщиной 40 см, от концентрации плазмы при мощности падающего импульса $P_i = 50$ квт, P_0 — мощность сигнала в вакууме $N_{e,кр} = 10^{11}$ см⁻³, $z = 40$ см

2. Большой экспериментальный материал, накопленный в результате измерений¹⁾, позволяет считать установленным факт проникновения мощных электромагнитных волн в плотную ($N_e > 10^{11}$ см⁻³) плазму на глубину, существенно превышающую толщину скин-слоя (см. рис. 1). С увеличением мощности P_i СВЧ сигнал проникает во все более плотную плазму, причем величина прошедшего сигнала при $P_i = \text{const}$ уменьшается с ростом концентрации электронов. В ряде случаев амплитуда прошедшего через плотную плазму сигнала превышала амплитуду сигнала в отсутствие плазмы, но не более чем в 1,3 — 1,6 раза. Значение N_e , при котором наступает отсечка (прошедший сигнал исчезает), растет с увеличением падающего импульса до $P_i \approx 50$ квт, а затем выходит на насыщение²⁾. Из анализа формы прошедшего через плазму импульса следует, что независимо от величины превышения концентрации над критической (для $\lambda = 10$ см) и мощности падающего импульса, начиная с $P_i = 15$ квт (при меньших мощностях измерения не проводились), характерное время "просвет-

¹⁾ При каждом значении задержки импульса (концентрации электронов) и падающей мощности производилось 30 — 40 измерений. Хотя эффект просветления плазмы регистрировался в каждом единичном опыте, для получения количественных характеристик производилось усреднение результатов измерений.

²⁾ Это насыщение объясняется эффектами высокочастотного пробоя в слабо ионизированной плазме, наблюдаемыми уже на переднем фронте импульса. Время развития пробоя зависит от мощности импульса и концентрации электронов.

ления" плазмы не превышает длительности переднего фронта импульса ($\sim 2 \cdot 10^{-7}$ сек), что хорошо видно из приводимых осциллограмм¹⁾ (рис. 2).

Для определения величины возмущений, производимых мощным СВЧ импульсом, в плазму вводился также слабый ($P_3 = 10^{-3}$ Вт) непрерывный сигнал с $\lambda = 7$ см, для которого $N_{\text{кр}} = 3 \cdot 10^{11}$ см⁻³. Обнаружено, что, если зондирующий сигнал имеет ту же поляризацию электрического поля, что и основной сигнал, то в присутствии 10-см излучения плазма становится прозрачной и для зондирующего сигнала, причем длительность последнего в 2 – 3 раза больше, чем у прошедшего мощного импульса. Для слабой волны с ортогональной поляризацией электрического поля плазма по-прежнему остается непрозрачной.

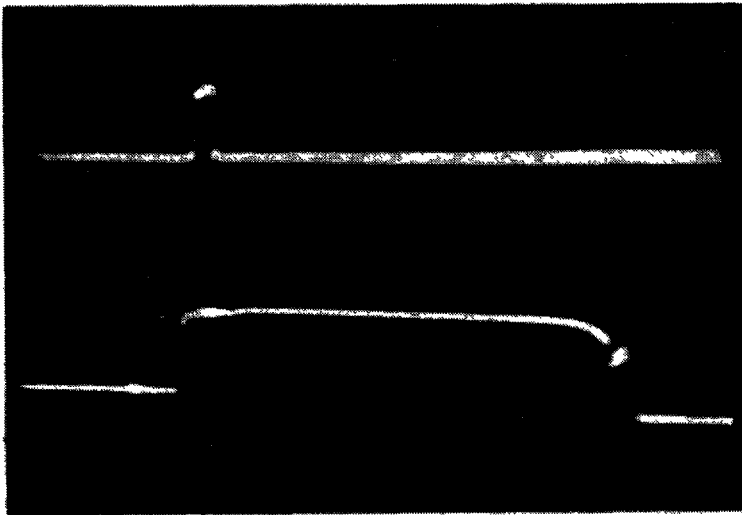


Рис.2. Осциллограммы прошедшего (верхний луч) и падающего (нижний луч) импульса. Длительность падающего импульса $\tau_i = 20$ нсек

3. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с гипотезой об образовании в "закритической" плазме волноводного канала, простейшей моделью которого при падении на плазму волны H_{01} прямоугольного волновода является плоский прозрачный ($\omega_p < \omega$) слой, с поперечными размерами a и b , удовлетворяющими неравенству $b > \lambda/2 \gg a$. В условиях эксперимента основным нелинейным механизмом являлся омический нагрев плазмы, так как за время образования канала ($\sim 2 \cdot 10^{-7}$ сек) электроны успевают испытать много соударений и существенно увеличить свою энергию. В плазме с $N_{e0} = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ и $T_e = 3 \cdot 10^3$ °К эффективные частоты соударений равны $\nu_{ei} = 2 \cdot 10^7$ сек⁻¹ $\nu_{em} = 5 \cdot 10^7$ сек⁻¹. Поскольку $\nu_{ei} \sim T_e^{-3/2}$, а $\nu_{em} \sim T_e^{1/2}$, можно при оценках

1) Значительное уменьшение длительности прошедшего импульса по сравнению с падающим также связано с возникновением СВЧ пробоя.

пренебречь соударениями электронов с ионами и представить зависимость температуры электронов от времени на начальном участке в виде

$$T_e = T_0 \left[1 + \left(\frac{e^2 E^2 \nu_{em}^2}{4m\omega^2 T_0} t \right)^2 \right],$$

T_0 — начальная температура электронов. При $P_1 = 30 \text{ кэВ}$ за время $t \approx 10^{-7} \text{ сек}$ T_e увеличивается более, чем на порядок, но еще не достигает стационарного уровня. Разумеется, при этом концентрация электронов в области поля резко уменьшается $N_e \approx (T_0/T_e) N_0 \ll N_{e0}$. Так как время образования канала мало по сравнению с временем ион-молекулярных соударений ν_{im}^{-1} , перераспределение концентрации происходит со скоростью ионного звука. Следовательно, для меньшего поперечного размера канала должно выполняться соотношение $a \ll \sqrt{(T_e/M)r} \approx 2 \text{ см}$. Возможно, что в плазме образуется не один, а несколько тонких "шелевых" каналов. Такая модель позволяет, в частности, объяснить наблюдающееся в эксперименте хорошее согласование падающего излучения с плазмой.

Исследование эффектов самоканализации волн представляет интерес для широкого круга проблем, связанных с распространением интенсивного электромагнитного излучения в плазме. В частности, для определения эффективности высокочастотных методов нагрева плазмы необходимо проведение аналогичных экспериментов в бесстолкновительной сильно ионизированной плазме, где время жизни не будет ограничиваться пробоем и возможен переход к более высоким уровням мощности, при которых важную роль должны играть эффекты аномальной диссипации энергии поля в протяженных (вдоль канала) областях плазменного резонанса ($\omega_p \approx \omega$). Можно также ожидать возникновения волноводных каналов в плотной плазме, образующейся под действием электромагнитного излучения (например, в лазерной плазме).

Авторы признательны В.Б.Гильденбургу и М.А.Миллеру за полезные дискуссии и Г.М.Батанову за возможность ознакомления с результатами аналогичных экспериментов.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
28 декабря 1970 г.

Литература

- [1] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1962.
- [2] В.И.Таланов. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 7, 564, 1964.
- [3] А.Г.Литвак. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 9, 675, 1966.
- [4] А.Г.Литвак. Диссертация, Горький, 1967.