

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОМЕЩЕННОЙ В ВОЛНОВОД

В. Е. Филиппенко, В. Н. Крепак

Харьков

Исследование распространения электромагнитных волн в волноводах с плазмой представляет большой интерес в связи с возможностью использования возникающих при этом эффектов в диагностике плазмы, а также в радиотехнике и электронике СВЧ [1, 2].

В данной работе экспериментально исследовано распространение электромагнитных волн в круглом волноводе, частично заполненном плазмой. Показано, что при сравнении экспериментальных и теоретических дисперсионных характеристик появляется возможность оценить закон спадания электронной плотности от оси к стенке и определить концентрацию электронов на оси плазменного цилиндра.

Экспериментальная установка и методика измерений

Функциональная схема экспериментальной установки (рис. 1) позволяет исследовать свойства электромагнитных волн, распространяющихся в круглом волноводе, частично заполненном плазмой, в частности, определять величину фазовой скорости и коэффициент затухания в зависимости от плотности плазмы, частоты зондирующего сигнала, давления газовой среды в стеклянном баллоне и геометрии системы.

Установка представляет собой круглый волновод (диаметр 74 мм и длина 600 мм) с продольной щелью, в которую помещен электрический зонд, позволяющий измерять распределение

поля. При измерении согласования исследуемого волновода с трактом в конце его помещалась согласованная нагрузка, а при измерении длины волны для увеличения КСВ помещалась металлическая заглушка. С помощью штыревой антенны, которая в то же время служила вводом анодного напряжения, в волноводе возбуждалась волна E_{01} .

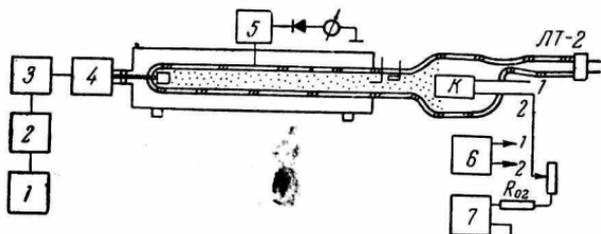


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки:

1 — генератор; 2 — ферритовый вентиль; 3 — измерительная линия; 4 — согласующее устройство; 5 — резонансная головка; 6 — источник накального напряжения; 7 — источник высокого напряжения.

Стеклянная трубка с плазмой (рабочая длина 700 мм и внутренний диаметр 22 мм) помещалась на оси волновода. Плазма, представляющая собой положительный столб разряда, создавалась в аргоновой среде при давлении 10^{-1} — 10^{-2} мм рт. ст., которое поддерживалось постоянным при измерениях и контролировалось манометрической лампой ЛТ-2 с пересчетом показаний по аргону. Для уменьшения потенциала зажигания разряда и улучшения стабильности режима работы плазменной трубки использовался подогревной оксидный катод.

Для контроля концентрации электронов на оси и у стенки трубки в процессе эксперимента параллельно проводились зондовые измерения, для чего в трубку предварительно впаивались осевой и пристеночный зонды.

Информацию о характеристиках плазменного образования, помещенного в круглый волновод, можно получить, измеряя дисперсионные свойства волновода, частично заполненного плазмой. Дисперсионные характеристики волновода измерялись в диапазоне 2,3 Гц — 4 Гц.

Результаты измерений и обсуждение

Результаты, полученные в работе, обобщены и представлены в виде графического материала. На рис. 2 показано типичное распределение поля в круглом волноводе, частично заполненном плазмой на волне E_{01} для различных разрядных токов на частоте 3,6 Гц. Приведенное распределение поля позволяет судить о существовании снсвнго типа волн, подтверждая тот факт, что возмущение, внесенное плазмой малой концентрации, не приводит к

значительному смещению граничной частоты в высокочастотную область и не вызывает появления волн высшего типа. Исследуя распределение поля вдоль волновода с плазмой на нескольких частотах, можно легко вычислить фазовые скорости и построить дисперсионные характеристики, а также при необходимости получить информацию о затухании волн.

На рис. 3, а приведены дисперсионные характеристики волновода с плазмой для различных разрядных токов и дисперсионная характеристика волновода без плазмы. На графике указана величина погрешности, рассчитанная для параметров $\frac{c}{v_{\phi}}$ и $\frac{\omega a}{c}$. Погрешность ординаты меньше, так как в нее входит только одна измеряемая величина v_{ϕ} , вычисляемая на основании измерений длины волны. Погрешность абсциссы складывается из суммы погрешностей определения частоты зондирующего сигнала и погрешности измерения радиуса волновода.

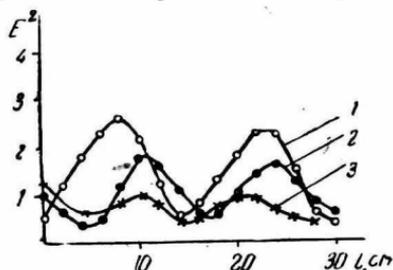


Рис. 2. Распределение поля в волноводе, частично заполненном плазмой:
1 — $I_p = 50$ ма; 2 — $I_p = 100$ ма; 3 — $I_p = 200$ ма.

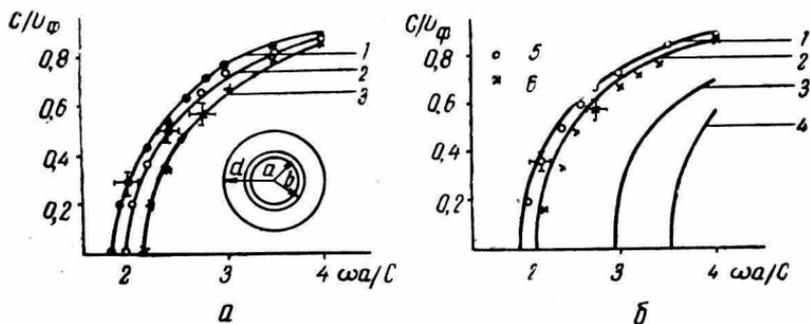


Рис. 3. Дисперсионные характеристики круглого волновода, частично заполненного плазмой:

1 — $I_p = 0$; 2 — $I_p = 50$ ма; 3 — $I_p = 200$ ма (а);
1 — $a_0^2 = 0,1$; 2 — $a_0^2 = 1$; 3 — $a_0^2 = 10$; 4 — $a_0^2 = 50$; 5 — $I_p = 50$ ма;
6 — $I_p = 200$ ма (б).

На рис. 3, б приведены теоретические дисперсионные кривые для различных параметров $a_0^2 = \frac{\omega_p^2 a^2}{c^2}$, где $\omega_p^2 = \frac{4\pi n_0 e^2}{m}$, n_0 — концентрация электронов на оси цилиндра.

Теоретические дисперсионные характеристики рассчитаны на ЭВМ для круглого волновода, частично заполненного неоднородным

плазменным цилиндром, в предположении, что радиальная плотность плазмы изменяется по линейному закону

$$n = n_0 \left(1 - \alpha \frac{r}{a}\right)$$

с коэффициентом $\alpha = 0,7$ [4]. Остальные параметры (толщина стенки стеклянного баллона, параметр $\delta = \frac{b}{a}$ и заполнение волновода плазмой, параметр $\eta = \frac{d}{a}$) в теории и эксперименте одинаковы в пределах точности измерений. На этом же графике нанесены экспериментальные точки для двух разрядных токов 50 и 200 *ма*.

Из сопоставления теоретических и экспериментальных результатов, приведенных на рис. 3, б, следует, что в пределах точности измерений дисперсионная характеристика, соответствующая разрядному току 50 *ма*, наиболее близко подходит к теоретической кривой 1, а дисперсионная характеристика для $I_p = 200$ *ма* — кривой 2.

Достаточно полное совпадение теоретических кривых 1, 2 и экспериментальных результатов открывает возможность для развития общей методики определения концентрации плазмы на оси и изменение ее по радиусу, которая основывается на сравнении экспериментальных результатов с серией машинных экспериментов при различных параметрах плазмы.

Сравним результаты, полученные на основании экспериментальных и теоретических дисперсионных характеристик (рис. 3, б) и зондовых измерений для разрядного тока $I_p = 50$ *ма*. Кривая 1 соответствует $\alpha_0^2 = \frac{\omega_p^2 a^2}{c^2} = 0,1$, т. е. $n_0 = 2,5 \cdot 10^{10}$ *см*⁻³. На основании зондовых измерений концентрация на оси равна $2,36 \cdot 10^{10}$ *см*⁻³, а у стенки $n_{ст} = 1,32 \cdot 10^{10}$ *см*⁻³. В теоретической модели принят линейный закон электронной плотности по радиусу с коэффициентом $\alpha = 0,7$. Экспериментальные точки легли справа от кривой 1, что должно соответствовать меньшему коэффициенту α [4]. Если бы среди семейства теоретических дисперсионных характеристик была кривая, которая точно совпадала с экспериментальными точками, то тогда распределение электронов по радиусу в модели плазменного цилиндра соответствовало бы распределению электронов в реальной цилиндрической плазме. На основании зондовых измерений перепад электронной плотности от оси к стенке определяет значение для $\alpha = 0,44$.

Таким образом, совместное экспериментальное и теоретическое исследование круглого волновода, частично заполненного неоднородным плазменным цилиндром, дает возможность измерить распределение концентрации по радиусу и максимальную плотность на оси плазменного цилиндра. Помимо этого результаты проведенной работы имеют более общее значение, так как они под-

тверждают справедливость концепции представления неоднородного плазменного образования слоистыми [3, 4].

В заключение авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук И. П. Якименко за ценные советы и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург. Распределение электромагнитных волн в плазме. Изд-во «Наука», 1967.
2. В. Е. Голант. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. Изд-во «Наука», 1968.
3. И. П. Якименко. ЖТФ, 1966, № 5.
4. В. Н. Крепак, И. П. Якименко. «Радиотехника и электроника», 1968, № 4; 1969, № 3.