1970 г. Июнь

Том 101, вып. 2

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

539.9.07

УЧЕБНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СВЧ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Среди применяемых в настоящее время экспериментальных методов исследования плазмы значительное место занимают СВЧ методы, основанные на взаимодействии радиоволн диапазона СВЧ с плазмой, в частности зондирование плазмы радиоволнами.



Рис. 1.

Зондирование позволяет получить многообразную информацию об электронной компоненте плазмы — о концентрации, частоте их столкновений с другими частицами и т д.^{1, 2}.

В безграничной плазме постоянная распространения волн определяется комплексной диэлектрической проницаемостью плазмы є. Если частота столкновений электронов с другими частицами ν мала по сравнению с частотой зондируемой волны $\omega (\nu^2/\omega^2 \ll \ll 1)$ дисперсионное соотношение для є выражается в следующем виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_{im} \equiv [1 - (\omega_0^2/\omega^2)] + i (\omega_0^2 \nu/\omega^3),$$

где «плазменная частота» $\omega_0^2 = 4\pi n e^2/m$, е и m — заряд и масса электрона, n — концентрация электронов. Решения волнового уравнения для комплексных амплитуд пропорциональны $\exp(i\omega \sqrt{\overline{v_r}x/c})\exp(-\omega \varepsilon_{im}x/2c \sqrt{\overline{v_r}});$ первый сомножитель определяет фазовую скорость распространения волн, второй — затухание волн в плазме вдоль направления x. Измеряя фазовый сдвиг прошедшей через плазму волны относительно фазы опорной волны и ослабление прошедшей волны, можно рассчитать значения n и у.

Для ограниченной плазмы явление качественно остается тем же, однако необходимо решать граничную задачу. Исчерпывающее решение задачи о плазменном волноводе включает совместное решение дисперсионного соотношения и детерминантного уравнения, которое получается при наложении определенных граничных условий на искомые поля³.

Для демонстрации одного из методов зондирования, основанного на прохождении волн по плазменному волноводу², нами был разработан простой радиоинтерферометр, позволяющий проводить как качественные наблюдения явления взаимодействия радиоволн с плазмой, так и количественные измерения электронной концентрации.

На рис. 1 приведен общий вид радиоинтерферометра, а на рис. 2 — конструкция и схема питания разрядной трубки. Кварцевая разрядная трубка имеет внешний диаметр 27 мм, внутренний — 22 мм и состоит из трех частей 1, 2, 3, соединенных между собой на эпоксидной смоле дюралюминиевыми трубками-волноводами 4 и 5, которые одновременно служат в качестве электродов. Концы трубки 1 закрыты кварцевыми окнами 6, 7, приклеенными под углом Брюстера с целью исключения отражения радиоволн от окон. Концы 1, 3 трубки вставлены в плавные переходы 8, 9 от прямоугольного волновода к круглому. Эти переходы преобразуют волны типа TE_{01} в прямоугольном волновода к круглому. Эти переходы преобразуют волны типа TE_{01} в прямоугольном волноводе в волны типа TE_{11} в круглом волноводе. Средняя часть трубки 2 почти по всей длине помещена в металлический кожух-волновод 10, изготовленный из медной фольги. Откачка воздуха из разрядной трубки производится форвакуумным насосом через патрубок, ввинченный в электрод 5. Питание разрядной трубки производится конденсатора с частотой до 10—15 ги путем варьирования напряжения, подаваемого с выпрямителя УПУ-1м.

При каждом разряде конденсатора через отрезок трубки 2 последняя заполняется плазмой, а границы плазмы, диффундируя за пределы электродов 4, 5 в концы



Рис. 2.

1 и 3, размываются. Эта особенность разрядной трубки в сочетании со способом установки окон 6, 7 и применением переходов 8, 9 обеспечивает хорошее согласование объема плазмы с излучающе-приемными элементами интерферометра, что является необходимым условием его нормального функционирования.

Воздух при рабочем давлении 0,01 — 0,1 мм рт. ст. после разряда обладает большим временем послесвечения и денонизации, так что начало следующего разряда развивается в условиях сохранения значительной электропроводности газа от предыдущего разряда. Благодаря этому начало явления растягивается во времени, что облегчает его наблюдение. Для осциллографирования токовых импульсов в цепи конденсатора предусмотрен бифилярный шунт 12 (см. рис. 2).

Радиоволны от клистрона К-27 поступают по волноводу (см. рис. 1) к разветвитетелю ⁴ и расщепляются на два пучка, которые далее следуют по различным путям. Первый пучок радиоволн проходит через прямоугольный волновод и абсорбцюнный аттенюатор, второй — по круглому волноводу, содержащему разрядную трубку. Радиоволны обоих пучков смешиваются во втором разветвителе и поступают к детектору ДК-И2м, напряжение с которого наблюдается на экране осциллографа «Duoskop» или ЭО-58. Оптическая длина плеча интерферометра, содержащего аттенюатор, остается постоянной во времени. Во втором плече интерферометра при каждом разряде микропараметры и комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы изменяются во времени, вследствие этого изменяется оптическая длина и поглощательная способность плазменного столба в волноводе. В результате интерференции волн этих двух пучков — опорного и зондирующего — с детектора снимается напряжение различной амплитуды в зависимости от разности фаз и амплитуд интерферирующих волн.

На рис. 3 приведена интерферограмма явления. Каждый период изменения сигнала соответствует изменению абсолютного значения фазы зондируемой волны на 2л. Таким образом, согласно рис. 3, в период нарастания электронной концентрации полный набег фазы соответствует примерно + 20л, затем следует резонанс, характеризующийся максимальным поглощением, и последующий распад плазмы, сопровождающийся обратным изменением фазы на -20л.

При настройке интерферометра подают напряжение питания на клистрон (см. ⁴), устанавливают сильную связь возбуждающего штыря клистрона с волноводной линией, подбирают положения короткозамыкающих поршней клистрона и детектора по максимуму сигнала с детектора. Откачивают трубку до необходимого вакуума и на электроды трубки подают напряжение от УПУ-1м такой величины, чтобы частота релаксации разряда была около 1 гц. Синхронизацию осциллографа, работающего в ждущем режиме с запуском от внешнего сигнала, осуществляют подачей напряжения с высоковольтного электрода трубки через небольшую емкость. Следя за экраном осциллографа, регулируют абсорбционный аттенюатор, добиваясь наиболее четкой и повторяющейся интерферограммы. При хорошей настройке эта интерферограмма должна оставаться четкой и при повышении частоты повторения разрядов до 10—15 гц. Например, приведенная на рис. 3 интерферограмма получена путем фотографирования на один кадр четырех-пяти последовательных осциллограмм.

Демонстрацию лучше проводить в процессе откачки разрядной трубки. В этом случае хорошо заметно, как по мере уменьшения давления газа в трубке увеличивается



Рис. 3.

амплитуда интерферограммы, так как по мере откачки уменьшается числе нейтральных частиц и как следствие этого — частота столкновений электронов v. На интерферограмме рис. 3 отчетливо прослеживается зависимость затухания волн в плазме от величины постоянного электрического поля в плазме. Так, нарастание электронной концентрации (положительный набег фазы) происходит при наличии большой разности потенциалов между электродами разрядной трубки, т. е. при наличии достаточно сильного продольного электрического поля в плазме. Уменьшение же электронной концентрации происходит в условиях, когда продольное электрическое поле близко к нулю. Очевидно, наличие постоянного электрического поля должно вызывать усиленный дрейф заряженных частиц, а следовательно, и большое число столкновений этих заряженных частиц как между собой, так и с нейтралами. Поэтому в этот период весьма сильно поглощение волн плазмой, что и подтверждается на рис. 3.

Для условий эксперимента максимальное поглощение сигнала наступает при так называемом резонансе, когда концентрация электронов достигает значения ³

$$n^* = n_{\rm K}/(1 + \varepsilon_{\rm PT}),$$

где $n_{\rm R}$ — критическая концентрация электронов, соответствующая условию $\varepsilon_r = 0$ для частоты зондируемого сигнала ω , $\varepsilon_{\rm PT}$ — диэлектрическая проницаемость материала разрядной трубки. Так как $\omega = 5,89\cdot10^{10}~ce\kappa^{-1}$ (длина волны в свободном пространстве 3,2~cm), то $n_{\rm R} = 1,09\cdot10^{12}~cm^{-3}$. Подставляя значение $\varepsilon_{\rm PT} = 3,8$, после вычислений найдем, что электронная концентрация $n^* = 2,27\cdot10^{11}~cm^{-3}$ наступает через $24-25~\kappacc\kappa$ после начала рязряда. Полная длительность интерферограммы 110 мксск. Путем возбуждения стоячих волн в трубке с металлическим кожухом, но без плазмы была определена длина волны в таком сложном волноводе, которая оказалась равной примерно 3,6 см. На длине плазменного столба укладывалось (при n = 0) 18—19 длин волн. Так как полный набег фазы в опытах с плазмой составляет около 10 периодов, что соответствует «вытягиванию» из волновода 10 длин волн, то, следовательно, в период времени, близкий к резонансу, фазовая скорость волны в пазменном волноводе примерно в 2,5 раза превышает скорость света в вакууме.

Ф. Х. Байбулатов

Новосибирский государственный университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- М. Хилд, С. Уортон, Микроволновая диагностика плазмы, М., Атомиздат, 1968.
 В. Е. Голант, Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы, М., «Наука»,
- 1968. В. Эллис, С. Буксбаум, А. Берс, Волны в анизотропной плазме, М., Атомиздат, 1966, стр. 247—251.
 Ф. Х. Байбулатов, УФН 96 (2), 370 (1968).