

Коэффициенты разложения выражаются либо через коэффициенты характеристического уравнения корреляционной матрицы (формулы (4)), либо для их отыскания нужно решить систему уравнений (6). Данный метод имеет определенные вычислительные преимущества перед методом прямого обращения матрицы  $M$  (прямого решения уравнения (1)) в случае, если априори известно, что входной процесс состоит из суммы  $I$  квазигармонических, некоррелированных компонент, число которых меньше числа отводов используемой линии задержки ( $I < N-1$ ).

Автор выражает глубокую благодарность В. А. Звереву за внимание к настоящей работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ундрои Б. и др. — ТИИЭР, 1976, 64, № 8, с. 37.
2. Widrow B., McCool J. M. — IEEE Trans., 1976, AP-24, № 5, p. 615.
3. Мальцев А. А., Патронис Е. Т. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 3, с. 326.
4. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 4, с. 472.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц — М: Гостехиздат, 1953.

Поступила в редакцию  
9 ноября 1981 г.

УДК 533.9.08(088.8)

### ИЗМЕРЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ДОБРОТНОСТИ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОГО РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМОЙ СВЧ РАЗРЯДА

*И. И. Лебедюк, А. И. Лысов, М. Е. Хастанов, Ю. Д. Шевченко*

В настоящее время проявляется интерес к исследованию параметров плазмы СВЧ разряда [1-5]. Это вызвано большим числом практических приложений, к которым можно отнести, например, быстродействующие переключатели СВЧ энергии, СВЧ накачку газовых лазеров. В настоящей работе приводится описание методики экспериментального определения смещения резонансной частоты и измерения добротности

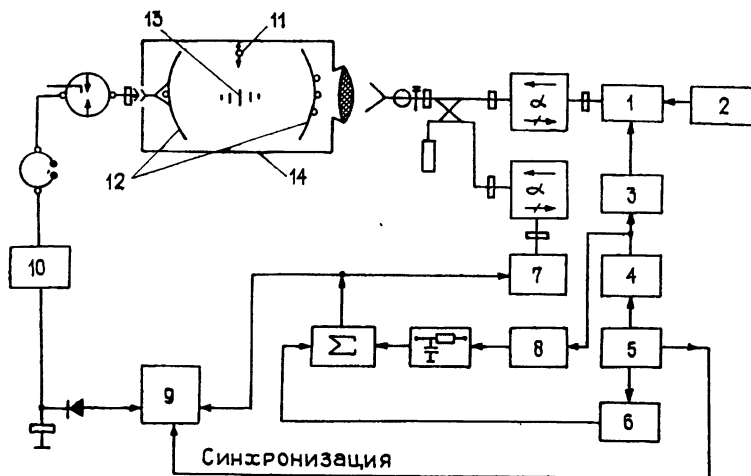


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 — клистронный усилитель, 2 — задающий генератор, 3 — модулятор, 4 — генератор задержанных импульсов типа Г5-26, 5 — генератор тактовых импульсов типа Г5-15, 6 — генератор пилообразного напряжения, 7 — генератор СВЧ на отражательном клистроне, 8 — генератор компенсации типа Г5-54, 9 — усилитель СВЧ типа УКЗ-19, 10 — осциллограф двухлучевой типа С1-17, 11 — малое поглощающее тело, 12 — открытый резонатор, 13 — плазма СВЧ разряда, 14 — вакуумная камера

открытого резонатора (ОР), частично заполненного распадающейся плазмой СВЧ разряда. Соотношения, связывающие параметры плазмы СВЧ разряда (концентрацию  $N_e$ , частоту столкновений  $\nu$ ) с изменением резонансной частоты и добротности ОР, можно найти, например, в [1]. При этом пространственное распределение параметров плазмы обычно считается известным. В действительности это не так. Одно из наибо-

лее интересных и полезных применений ОР заключается в извлечении из экспериментальных данных информации о пространственном распределении параметров плазмы. Этого можно достигнуть, измеряя смещения частоты основного и высших типов колебаний [4]. Таким образом, измерение смещения резонансной частоты и изменения добротности ОР лежат в основе методики экспериментального исследования пространственного распределения электронной концентрации  $N_e(r, t)$  распадающейся плазмы СВЧ разряда.

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. ОР, образованный парой сферических зеркал и имеющий параметр конфокальности  $g = -0,6$ , помещен в вакуумную камеру. Основной тип колебаний ОР имеет нагруженную добротность  $2 \cdot 10^5$  и возбуждается через квадратную решетку круглых отверстий связью импульсным источником СВЧ энергии с помощью двухмодового конического рупора [6] и корректирующей линзы из полистирола. Диаметр отверстий связи рассчитывался таким образом, чтобы связь была близкой к критической. Линза из полистирола является одновременно вакуумным вводом СВЧ энергии в камеру.

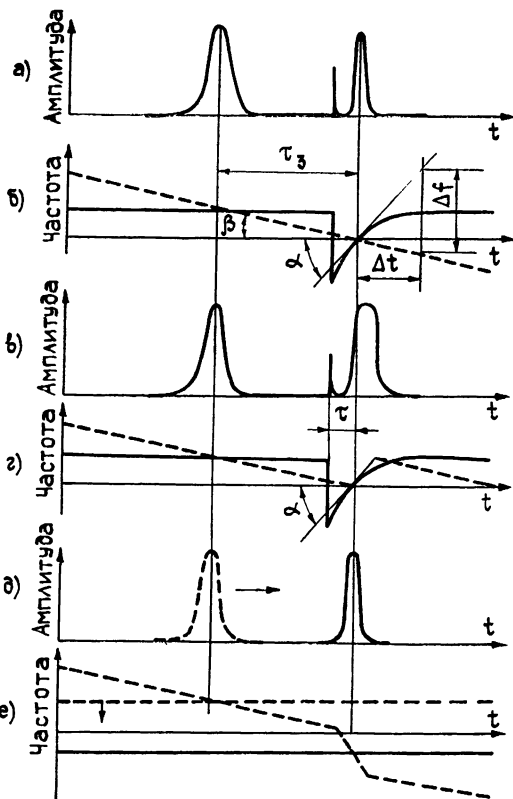


Рис 2. Амплитудно-частотные временные диаграммы.

В диапазоне давлений ( $10^{-3} + 400$ ) Тор мощности источника СВЧ энергии было достаточно, чтобы на основном типе колебаний  $TEM_{0,0,q}$  в ОР происходил пробой воздуха. Наблюдаемые размеры и конфигурация возникающей плазмы зависели от давления воздуха в камере, причем размеры плазмы увеличивались с уменьшением давления. Линейно-модулированный по частоте зондирующий сигнал отражательного клистрона 7 может возбуждать в ОР одно из колебаний типа  $TEM_{m,n,(q-6)}$ , распределение поля которых нам известно (в том числе и основное колебание:  $m = 0, n = 0$ ). При возникновении распадающейся плазмы в зависимости от степени пространственного согласования распределений параметров плазмы и поля то или иное зондирующее колебание ОР будет испытывать смещение резонансной частоты и изменение добротности, которые могут быть измерены.

Принцип измерения смещения резонансной частоты и добротности ОР с распадающейся плазмой поясняется временными диаграммами на рис. 2 На рис. 2а изображены импульсы, формируемые в результате прохождения зондирующего сигнала через ОР без плазмы (импульс слева) и с плазмой (два других импульса). Резонансная частота ОР изменяется в соответствии с временной диаграммой на рис. 2б

(сплошная линия) Момент возникновения плазмы определяется временем задержки  $\tau_a$ . Очевидно, меняя  $\tau_a$  и измеряя  $\tau$ , можно получить зависимость смещения резонансной частоты от времени с момента начала распада плазмы СВЧ разряда. Результаты этих измерений для колебания типа ТЕМ<sub>0,0</sub> ( $q=6$ ) при различных давлениях воздуха приведены на рис. 3. Зависимости в полулогарифмическом масштабе хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что свидетельствует об экспоненциальной зависимости смещения резонансной частоты ОР с распадающейся плазмой от времени

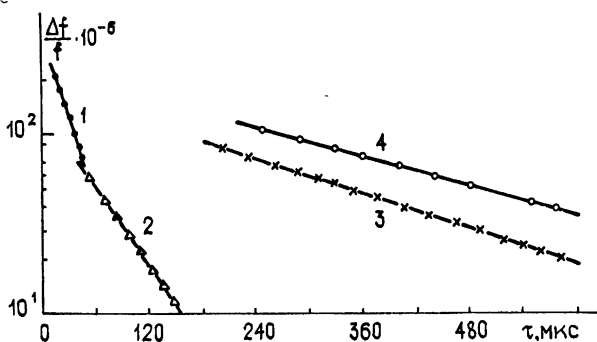


Рис. 3. Кривые зависимости взаимной расстройки резонансной частоты ОР с плазмой и частоты зондирующего сигнала от времени с момента начала распада плазмы; 1 — 4  $T_{op}$ , 2 —  $4 \cdot 10^{-1} T_{op}$ , 3 —  $6 \cdot 10^{-2} T_{op}$ , 4 —  $1,5 \cdot 10^{-2} T_{op}$ .

Добротность ОР с распадающейся плазмой может быть определена экспериментально путем замещения его эквивалентным по потерям ОР без плазмы и измерением добротности последнего. Эквивалентность резонаторов устанавливается следующим образом. С помощью элементов 4, 8 и сумматора схемы на рис. 1 формируется сложное напряжение, управляющее частотой генератора зондирующего сигнала. Это напряжение формируется таким образом, чтобы скорости перестройки резонансной частоты ОР с плазмой и частоты зондирующего сигнала оказались равными (см рис. 2г). Наглядным свидетельством равенства вышеуказанных скоростей является наличие плоской вершины у импульса, формирующегося при прохождении зондирующего сигнала через ОР с плазмой. Закон изменения частоты зондирующего сигнала на участке выравнивания скоростей перестройки частот выглядит следующим образом:

$$\Delta f = (k_1 + k_2) \Delta t, \quad (1)$$

где  $k_1$  — скорость изменения частоты зондирующего сигнала,  $k_2$  — скорость плазменной перестройки резонансной частоты ОР в момент времени, отстоящий на величину  $\tau$  от начала распада плазмы ( $k_1 = \text{tg } \beta$ ,  $k_2 = \text{tg } \alpha$ ).

Далее, для удобства осциллографирования у управляющего напряжения в области выравнивания скоростей перестройки частот изменяется полярность. При этом закон изменения частоты зондирующего сигнала сохраняет вид (1) (рис. 2е). Снижая мощность СВЧ до прекращения разряда и перестраивая ОР до получения резонанса в вышеуказанной области (рис. 2д), реализуем ситуацию, при которой через ОР без плазмы проходит зондирующий сигнал со скоростью перестройки частоты, равной взаимной скорости перестройки резонансной частоты ОР с плазмой и частоты зондирующего сигнала. Для установления полной эквивалентности необходимо в ОР ввести поглотитель и добиться полного совпадения формы импульса, формирующегося при прохождении зондирующего сигнала через ОР с плазмой (рис. 2а), предварительно сняв с него копию на кальку, и формы импульса эквивалентного ОР с поглотителем (рис. 2д). Измерение добротности ОР с поглотителем не составляет труда и может быть осуществлено известными методами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы — М: Наука, 1968.
2. Мак-Дональд. СВЧ пробой в газах. — М: Мир, 1968.
3. Вихарев А Л, Еремич Б. Г. — ЖЭТФ, 1975, 68, № 2, с 452
4. Аустон Д., Примич Р., Хаями Р. Об исследовании резонаторов Фабри—Перо для СВЧ диагностики плазмы — В сб: Квантоптика (избранные доклады на международном симпозиуме). — М: Мир, 1966, с. 387
5. Акулина Д. К., Нечаев Ю. И. — Труды ФИАН, 1973, 65, с. 100
6. Potter P. D. — Microwave J., 1963, 6, № 6, p. 71.

Московское высшее техническое училище  
им. Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию  
13 октября 1981 г.,  
после доработки  
11 марта 1982 г.