

Л. Е. МАЛЫШЕНКО, Л. С. ДИДЫК, В. В. ТАБАЧНИКОВ

К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ МНОГОМОДОВОГО СВЧ-ВАТТМЕТРА

В связи с применением многомодовых линий передачи СВЧ-сигнала актуальным стал вопрос об измерении мощности в них как суммарной, передаваемой совокупностью различных типов колебаний, так и передаваемой отдельными типами их.

При разработке методов измерения и измерителей мощности для многомодового тракта неизбежно применение специальных возбудителей высших типов колебаний, возбудителей их смеси, фильтров, изгибов, избирательных ответвителей. Для характеристики последних необходимо знание коэффициентов передачи, которое можно определить на малых уровнях передаваемого сигнала, используя серийные генераторы СВЧ-колебаний.

Очевидно, ваттметр, позволяющий определять коэффициент передачи многомодовых узлов с помощью серийных генераторов СВЧ-колебаний, должен быть достаточно чувствительным — на уровнях ≥ 5 мвт отклонение стрелки индикатора на всю шкалу и иметь погрешность измерения не более максимальной, допустимой по ГОСТУ, равной ± 1 дб.

Методы, с помощью которых определяется мощность отдельных мод и их совокупности описаны в [1—5]. Они более пригодны для определения помодового распределения мощности на больших уровнях. Основанные на поперечном или продольном зондировании поля эти методы требуют громоздких лабораторных установок с применением ЭВМ (электронно-вычислительных машин) для обработки результатов измерения.

Достаточно разработанным является метод селективных ответвителей [6—8]. Однако создание на их основе ваттметра для многомодового волновода с большим числом типов волн нецелесообразно: значительное влияние явления интерференции; громоздкость устройства и погрешность, равная $\pm (1 \div 5)$ дб.

Анализ тепловых методов приводит к заключению, что чувствительным и хорошо согласованным в широком диапазоне частот и пространственных гармоник (например, от 3 до 10 ГГц для волновода 72×34) может быть выполнен только болометрический измеритель мощности.

Теоретические предпосылки

Болометрический датчик обладает всем необходимым для создания ваттметра малых уровней в многомодовом волноводе.

Действительно, болометр можно выполнить по толщине меньше скин-слоя, что обеспечит малую теплоемкость датчика и необходимое приращение его температуры, связанное с поглощением измеряемой мощности. Ваттметр, основу которого составляет тонкопленочный болометр, можно проградуировать на низкой частоте или по постоянному току с высокой точностью и надежностью, так как в тонкопленочном болометре наиболее точно совпадают распределения постоянного и высокочастотного токов по объему сопротивления. Кроме того, болометр — такое термосопротивление, которым можно перекрыть полностью волновод, что и необходимо при измерении мощности в многомодовом тракте.

В целом болометрический датчик может быть:

а) широкополосным, т. е. обладать постоянством сопротивления в заданном диапазоне частот;

б) максимально согласованным с многомодовым трактом в этом диапазоне;

в) имеющим коэффициент преобразования, близкий к единице;

г) чувствительным;

д) малоинерционным.

Результаты исследований, приведенных в литературе, подтверждают, что болометры с непосредственным подогревом являются более устойчивыми и имеют лучшую повторяемость результатов, чем болометры с косвенным подогревом [9, 10]. Итак, необходимо выбрать материал для устойчивой поглощающей пленки болометра с непосредственным подогревом и стремиться при этом к получению возможно большего температурного коэффициента сопротивления (ТКС) материала, так как его значение в первую очередь определяет чувствительность болометра.

Высокий ТКС имеют многие полупроводниковые материалы. Однако в болометрах с непосредственным подогревом, когда чувствительный элемент и подогреватель совмещены, полупроводниковые материалы не могут быть использованы из-за высокого удельного сопротивления, затрудняющего согласование болометра с линией передачи.

ТКС у всех чистых металлов имеет один порядок величин, и закон изменения его с уменьшением толщины слоя одинаков для всех металлов. Поэтому выбор материала для поглощающей пленки болометра с непосредственным подогревом определяется в конечном счете удобством получения устойчивой тонкой пленки.

Толщина пленки определялась следующим образом. Чтобы точнее соблюдалась эквивалентность распределения постоянного и высокочастотного токов по объему болометра, активная составляющая полного сопротивления Z тонкопленочного элемента должна быть равна его сопротивлению R_0 на постоянном токе. А это возможно при такой толщине пленки, реактивная компонента которой близка к нулю. В соответствии с [11].

$$\frac{Z}{R_0} = \frac{\Delta}{\delta} \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right)} + j \frac{\Delta}{\delta} \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2\Delta}{\delta}\right)},$$

где Δ — толщина пленки;

δ — глубина проникновения электромагнитного поля в металл.

Разложение в ряд правой части равенства в предположении, что $\Delta/\delta < 1$, приводит к уравнению, из которого при $\Delta/\delta = 0,1$ получим

$$Z/R_0 = 1,00 + j \cdot 0,07.$$

Итак, даже при $\Delta/\delta=0,1$ тонкопленочный элемент болометра практически безреактивен, т. е. независимо от частоты сигнала в линии передачи его сопротивление остается равным сопротивлению на постоянном токе. Очевидно, Δ/δ должно быть рассчитано для δ на самой высокой частоте рабочего диапазона, так как

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \delta}}$$

где f — частота, *гц*;

μ — магнитная проницаемость, *гн/м*;

δ — удельная проводимость, *мо/м*.

В связи с тем, что проектируемый пленочный болометр должен быть очень малым по толщине, необходимо наносить его на специальную подложку. Малоинерционными и достаточно прочными получаются болометры на подложках из телевизионной слюды СТА ГОСТ 13756—68, которая отличается малой толщиной — (0,005—0,04) *мм*, однородностью, прозрачностью, отсутствием дефектов.

Расчеты показали, что в волноводе сечением 72×34 в диапазоне частот от 3 до 10 *Ггц* могут распространяться 16 видов колебаний. Волновые сопротивления (с учетом всех мод) приобретают значения от 1000 до 100 *ом*, поэтому добиться хорошего согласования болометра с исследуемой линией передачи при непосредственном включении его в волновод 72×34 не представляется возможным. Очевидно, если включить болометр на выходе волноводного перехода с заданного сечения на расширенное, то можно получить приемлемое согласование его с линией передачи. Действительно, чем больше размеры волновода по сравнению со стандартными, тем скорее выполняется условие $\lambda_0 \ll \lambda_{кр}$, $\lambda_в \rightarrow \lambda_0$ и фазовая скорость какого-либо типа колебаний $v_ф$ приближается по величине к скорости света c в свободном пространстве, а волновые сопротивления ρ для всех мод почти не отличаются от волнового сопротивления свободного пространства ρ_0 .

С учетом сказанного поверхностное сопротивление болометра R_{\square} должно быть равно $\rho_0 \approx 380$ *ом*.

Характеристика и экспериментальные исследования ваттметра

Болометрический измеритель мощности для многомодовой линии передачи состоит из многомодовой болометрической головки и измерительного болометрического моста типа МЗ-8А.

Принцип действия его основан на измерении мощности постоянного тока, эквивалентной по тепловому воздействию на болометр СВЧ-мощности. В основу схемы положен двойной уравновешенный мост, состоящий из моста питания и измерительного моста. Сопротивления плеч измерительного моста выбраны так, что при балансе в нем наступает баланс в мосте питания.

Болометрическая головка обеспечивает включение болометра как в цепь измеряемой мощности СВЧ, так и в цепь измерительного моста.

За основу взята конструкция перестраиваемой головки, содержащей элемент настройки — короткозамыкающий поршень, позволяющий регулировать согласование полных сопротивлений

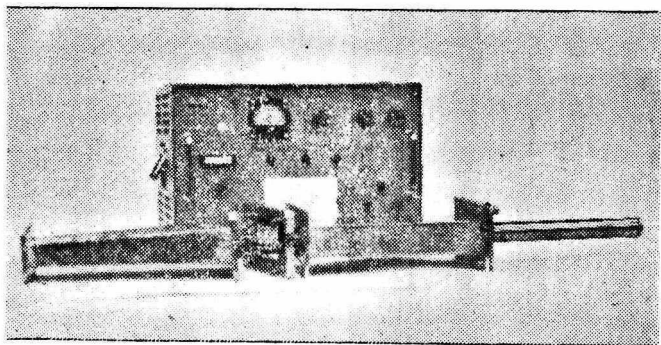


Рис. 1.

головки в линии передачи на каждой частоте заданного диапазона для каждого типа колебаний. Она состоит из волноводного перехода с сечения 72×34 на сечения 90×45 или 110×55 , держателя болометра с окном 90×45 или 110×55 и к.з.-поршня, имеющего вход 90×45 или 110×55 (см. рис. 1).

Конструкция перехода — простая (образующая — линейного типа), так как при наличии перестраиваемого согласующего элемента — к.з.-поршня не имеет значения величина КСВН перехода.

Держатели для удобства обращения с болометрами выполнены в виде отдельных секций. В них для болометра сделан паз, в котором он закрепляется с помощью вкладыша, изолированного от болометра лавсановой прокладкой. Вкладыш снабжен пружинящими контактами, изолированными от корпуса, посредством которых осуществляется связь контактных площадок болометра с входными клеммами измерительного моста.

Короткозамыкающий поршень имеет пружинящие скользящие гальванические контакты, расположенные параллельно четырем стенкам волновода для обеспечения замыкания для всех типов колебаний. Применение бесконтактных поршней на малых уровнях нецелесообразно. Кроме того, бесконтактные поршни способствуют большей перетрансформации типов волн.

Экспериментальные исследования показали, что наилучшим образом отвечает требованиям, изложенным в предыдущем параграфе, платиновый болометр, полученный путем термического испарения платины в вакууме. Толщина напыленных образцов

$\Delta < 0,01$ мкм, поверхностное сопротивление $R_{\square} \approx 380$ ом. Площадь болометра равна площади окна его держателей.

Исследования в диапазоне частот от 3 до 10 Гц показали, что ваттметр с данными болометрами, перекрывающими волновод под углом 90° к его оси, измеряет мощность независимо от типа волны и частоты (рис. 2, а, б).

На рис. 2, а представлена диаграмма измеренных на частоте

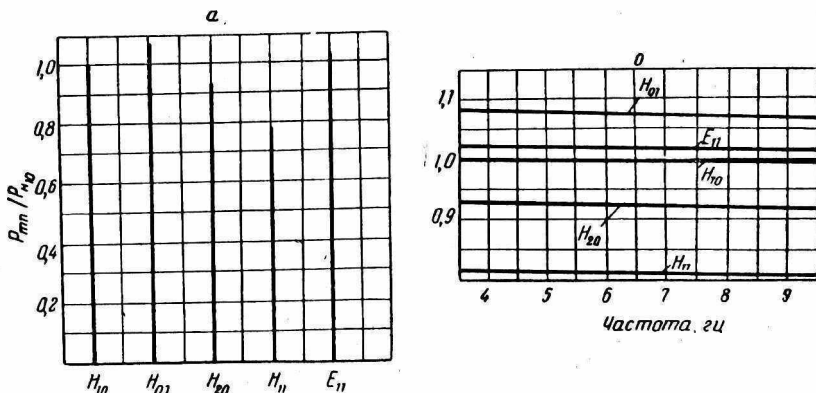


Рис. 2.

5,2 Гц уровней мощности, передаваемых на волнах типа H_{01} , H_{20} , H_{11} , E_{11} , в относительных единицах (по отношению к уровню основного типа H_{10} , равному 20 мвт и принятому за единицу). На рис. 2, б приведена зависимость относительных уровней мощности волны каждого типа от частоты.

КСВ болометрической головки приобретает значение в пределах от 0,4 до 2,0. Коэффициент преобразования близок к единице и не имеет больших разбросов по величине как для отдельных типов колебаний, так и для их смеси.

Оценка погрешности показала, что усредненная ошибка измерения мощности равна не более ± 1 дб. Время одного измерения $t \leq 30$ сек.

Итак, с помощью описанного ваттметра доказана возможность измерения многомодовой мощности.

Следует отметить, что кроме определения коэффициента передачи многомодовых узлов описанный ваттметр, очевидно, может применяться для измерения мощности высших типов колебаний и в мощном тракте в сочетании со специальными избирательными ответвителями, а также для измерения суммарной мощности побочных излучений при ответвлении основного вида колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forrer M., Tomiyasu K. Determination of Higher Order Propagating Modes Waveguide Systems. — «J. Appl. Phys.», 1958, vol. 29, N 7, p. 1040—1046.

2. Price V. Measurement of Harmonic Power Generated by Microwave Transmitters. — «IRE Transactions», 1959, vol. MTT—7, N 1, p. 116—120.
3. Levinson D., Rubinstein I. Technique for Measuring Individual Modes Propagation in Overmoded Waveguide. — «IEEE Transactions», 1966, vol. MTT — 14, N 7, p. 310—322.
4. Taub J. New Technique for Multimode Power Measurement. — «IRE Transactions», 1962, vol. MTT — 10, p. 496—505.
5. Лыскин С. М., Кац Л. И. О возможности применения корреляционного анализа для определения спектра типов волн в многомодовой линии передач. — «Электронная техника. Сер. 11. Контрольно-измерительная аппаратура», 1967, вып. 3, с. 49—56.
6. Фел С. С. Измерения мощности высших гармоник методом частичного отбора. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. Радиоизмерительная техника», 1964, вып. 6, с. 58—63.
7. Sharp E., Jones E. A Sampling Measurement of Multimode Waveguide Power — «IRE Trans.», 1962, vol. MTT — 10, № 1, p. 73—82.
8. Ваганов Р. Б., Матвеев Н. Ф., Мериакри В. В. Многомодовые волноводы со случайными нерегулярностями. М., «Сов. радио», 1972, с. 190—193.
9. Слущкая В. В. Тонкие пленки в технике СВЧ. М., «Сов. радио», 1967, с. 5—90; 249—254.
10. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. М., «Мир», 1972.
11. Kohn C. The Radio — Frequency coaxial resistor Using a Tractorial Jacket. — «Proc. IRE», 1955, August, p. 951—960.