

УДК 621.317

*Б. А. КАЛУГИН, Н. Н. КОЛЧИГИН, канд. физ.-мат. наук,
Г. Г. ПОЛОВНИКОВ*

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Измерения коэффициента отражения широко применяются при определении параметров магнитодиэлектриков и полупроводящих материалов для контроля их качества и анализа воздействия на них внешних факторов [1]. В миллиметровом диапазоне наибольшее применение находят методы измерения в свободном пространстве — однопозиционный и двухпозиционный [2]. Их преимуществами являются возможность измерения образцов с различной формой и размерами, бесконтактность измерения и сравнительная простота.

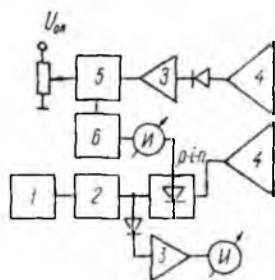
Для проведения измерений в нестационарных условиях появляется необходимость разработки малогабаритной аппаратуры с высокой чувствительностью и точностью измерений. Трудность состоит в том, что повышение чувствительности и точности в основном достигается усложнением измерительной схемы, а для снижения веса и уменьшения габаритных размеров аппаратуры ее нужно упростить.

Как показало сравнение различных методик, это противоречие можно устранить, применяя методику относительных (эталонных) измерений по двухпозиционной схеме. Сравнение амплитуд отраженных волн от исследуемого образца и эталона с известным коэффициентом отражения обеспечивает высокую точность измерений, а разделение передающего и приемного трактов — малую взаимную связь приемника и передатчика при минимальном количестве СВЧ-узлов. При использовании интерферометрических схем необходимо применение специальных мер по стабилизации частоты и уровня генерации.

Конструктивными особенностями прибора (рисунок) являются использование полупроводникового генератора — диода Ганна в импульсном режиме и применение автобалансной схемы, в результате чего достигается оперативность измерения при высокой точности [3]. В передающую часть прибора входит волноводная генераторная секция 2, модулятор 1, генерирующий прямоугольные импульсы, компенсирующее электрически управляемое устройство на $p-i-n$ -диоде, ответвитель с детекторной секцией, усилителем, индикатором, антенна 4. Приемный тракт представляет собой антенну с согласованной детекторной секцией, которая соединена с селективным усилителем низкой частоты 3 и устройством сравнения 5.

Цепь обратной связи образуется через усилитель мощности 6 и индикатор, включенные между устройством сравнения и управляемым аттенуатором. Аттенуатор включен в передающую часть, что повышает устойчивость режима генерации диода Ганна, так как он обеспечивает развязку от отраженного сигнала. В процессе измерения в приемник поступает отраженный сигнал, детектируется и усиливается селективным усилителем до значения, необходимого для нормальной работы устройства сравнения. Управляющее напряжение, пропорциональное разности между отраженным сигналом и опорным напряжением стабилизированного источника, с усилителя мощности подается на $p-i-n$ -диод. В результате изменяется затухание, вносимое $p-i-n$ -диодом в тракт передатчика таким образом, что напряжение на приемном детекторе остается постоянным. При этом погрешность, обусловленная изменением рабочей точки детектора, исключается. В цепь управления диодом включен миллиамперметр. Измеренной силе тока диода соответствует затухание, которое определяется по градуировочной кривой. Значение коэффициента отражения равно разности затуханий при измерении отражения от металлического экрана, используемого в качестве эталона, и исследуемого диэлектрика, которые располагаются на одном расстоянии от прибора. При этом предполагается, что фазовый фронт падающего поля — плоский, амплитудное распределение однородное и форма отраженного пучка, не зависит от параметров отражающей поверхности, т. е. одинакова при отражении от эталонного отражателя и диэлектрика. На практике эти условия выполняются не всегда, что приводит к ошибкам в значениях коэффициента отражения. Полная погрешность измерений будет также определяться погрешностью аттенуатора, рассеивателя, нестабильностью генератора и ошибкой индикатора.

В связи с этим рассмотрим требования к основным узлам измерительного прибора и возможности их реализации. Выбор излучающей и приемной антенн проводился из условий согласования с подводимым трактом и свободным пространством, диапазонности и высокой направленности при минимальных размерах. Предпочтение было отдано антеннам оптико-акустического типа, простейшими из которых



являются пирамидальные рупоры с диэлектрическими линзами. Уже при линейных размерах апертуры $4 - 5 \lambda$ для углов раскрыва меньше 40° коэффициент отражения от края рупора стремится к нулю. Размеры рупоров и профиль линз выбирались для расстояния дальней зоны порядка $1,5 \text{ м}$ при сдвигах фазы на краях не более $\pi/8$. В двух позиционных схемах чувствительность приемника ограничена связью с передатчиком. Однако в случае использования невыступающих линз и при параллельном расположении антенн в H -плоскости даже на минимальном расстоянии уровень поля в приемной антенне в результате прямой связи значительно меньше измеряемого отраженного поля.

Поскольку в целях повышения надежности и упрощения из измерительной схемы исключены высокодобротные элементы, стабильность генератора может быть не такой высокой, как при резонансных методах измерения. Но важным является обеспечение квазимонохроматического режима излучения, так как наличие высших гармоник в спектре приводит к снижению точности измерений. Частотная и модовая селекции осуществляются применением генераторной секции в виде суженного волновода с подвижными короткозамыкающими поршнями на торцах. Генераторная секция посредством штыревого зонда связана с отводящим волноводом, один конец которого нагружен на подвижный короткозамыкающий поршень, а второй соединен с измерительным трактом. Таким образом, удается снизить амплитуду второй гармоники на $15 - 20 \text{ дБ}$.

Для измерения отраженного сигнала в приемнике применяется волноводная детекторная головка с подстроечным поршнем, в которой предусмотрена возможность выбора рабочей точки детектора в процессе настройки, а также замена кристалла и иглы. КСВН таких головок в широком диапазоне частот в режиме оптимальной настройки меньше $1,2$. Электрически управляемый аттенюатор на основе сосредоточенных элементов рассчитан на изменение затухания $0,5 + 40 \text{ дБ}$ в диапазоне перестройки генератора, при этом КСВН не превышает 2 .

Значительное влияние на точность результатов измерений оказывает изменение расстояния между образцом и излучателем, а также геометрические размеры образца и эталона.

Отличие измеренных значений модуля коэффициента отражения от истинного при расстоянии базы меньше 100λ для различных материалов составило $10 - 16 \%$. Как следует из сравнения результатов, устойчивые значения коэффициента отражения получаем для прибора с линзами при меньших расстояниях в отличие от прибора без линз. В табл. 1 приведены результаты измерений модуля коэффициента отражения R для фиксированного расстояния базы, равного примерно 100λ . Здесь L_H, L_E — размеры образца и экрана в H - и E -плоскостях. Для каждого случая определения коэффициента отражения размеры образца и эталона были одинаковыми.

Ширина пучка по уровню $0,01$ составила при этом 260 мм . В случае использования образцов и эталонного экрана с размерами, равными ширине пучка в сечении, и с размерами, меньшими 100 мм , были

получены равные значения коэффициента отражения. Это свидетельствует о минимальном вкладе дифракционных полей в отраженное поле. Дальнейшее уменьшение размеров приводит к заметному снижению относительного коэффициента отражения, так как интенсивность отраженного поля от эталона изменяется медленнее, чем отраженного от образца.

Изменения размеров в E - и H -плоскостях оказывают примерно одинаковое влияние на точность. Оптимальное значение размеров в измерениях $L_E, L_H \simeq 10\lambda$. Влияние краев на значения малых коэффициентов отражения начнет сказываться при больших размерах.

Таблица 1

L_H , мм	R , дБ	
	$L_E = 50$ мм	$L_E = 80$ мм
150	15,5	16,5
125	15,5	16
100	16	16,5
75	16,5	16
60	16,5	16
55	17,5	17
50	20	18

Таблица 2

Расстояние базы, мм	R , дБ	
	Нормальное падение и прием под углом	Наклонное падение и прием зеркального отражения
500	19	19
650	18	17
850	16	16
1100	16,5	16
1400	16	16

Из полученных результатов следует, что достаточно точные измерения можно проводить на образцах, имеющих размеры в 2—3 раза меньше, чем ширина пучка.

Так как двухпозиционный метод исключает определение коэффициента отражения в главном направлении при нормальном падении электромагнитных волн, было исследовано влияние ориентации образца и экрана относительно главного направления передающей и приемной антенн. Измерения проводились для различных базовых расстояний на образцах с размерами, превышающими ширину главного лепестка диаграммы направленности излучающей антенны (табл. 2).

Приведенные результаты являются средними значениями как минимум пяти независимых измерений. Так как отклонение углов падения и приема незначительное относительно нормали к отражающей поверхности, полученные значения коэффициентов отражения близки к значениям, измеренным на однопозиционной установке при расположении образца в дальней зоне.

Приведем технические характеристики прибора.

1. Диапазон измеряемого модуля коэффициента отражения $0,5 \pm 40$ дБ.
2. Расстояние между прибором и образцом — $0,5 \pm 1,5$ м.
3. Излучаемая мощность 20 мВт. Генератор работает в импульсном режиме с частотой модуляции 1000 Гц.
4. Напряжение источника питания $12 \text{ В} \pm 5 \%$.
5. Потребляемая мощность не более 10 Вт.
6. Габаритные размеры $520 \times 220 \times 120$ мм,

Таким образом, разработан и изготовлен малогабаритный высокочувствительный измеритель коэффициента отражения электромагнитных волн миллиметрового диапазона. Прибор может использоваться для контроля характеристик материалов в нестационарных условиях.

Список литературы: 1. *Технологический неразрушающий контроль пластмасс* / Потапов А. И., Игнатов В. М., Александров Ю. Б. Л., 1979. 288 с. 2. *Воробьев Е. А., Михайлов В. Ф., Харитонов А. А.* СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. М. 1977. 208 с. 3. *Кукуш В. Д.* Электрорадиоизмерения. М., 1985. 368 с.

Поступила в редколлегию 20.04.87