

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, *д-р физ.-мат. наук*, А. В. ПАШКОВ,
Н. И. СЛИПЧЕНКО, *канд. техн. наук*

РАЗВИТИЕ ПРЯМОГО СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ГИГРОМЕТРИИ

В современной СВЧ гигрометрии можно выделить прямой и косвенный диэлектрические методы. Основы прямого метода были заложены в работах [1 – 6]. Он базируется на измерении диэлектрической проницаемости смеси сухого газа и паров воды СВЧ резонаторным способом. Теоретической его основой является соотношение Клаузиусе-Моссоти-Дебая [7], связывающее относительную диэлектрическую проницаемость указанной смеси с содержанием компонент и их физическими свойствами

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \sum_i \frac{\rho_i N_A}{3\varepsilon_0 m_i} \left(\alpha_{ai} + \alpha_{ei} + \frac{P_i^2}{3kT} \right), \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента газовой смеси; N_A – число Авогадро; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; m_i – молекулярная масса i -го компонента; α_{ai} и α_{ei} – атомная и электронная поляризуемости молекулы i -го компонента; P_i – дипольные моменты молекул; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Инструментальной основой прямого метода является дифференциальный резонаторный способ, базирующийся на измерении разности резонансных частот опорного и измерительного резонаторов. При этом в опорный резонатор подаются сухой газ, а в измерительный – исследуемый [1, 3, 4, 6].

В работах [3, 4, 6] подробно обсуждены источники инструментальных и методических погрешностей этого метода. В результате показана принципиальная возможность построения СВЧ резонаторных гигрометров, по точности мало уступающих классическому гравитационному. Однако достижение такой точности требует реализации весьма прецизионных технических средств измерения относительной разности резонансных частот опорного и измерительного резонаторов порядка 10^{-8} . Это требование даже на современном уровне техники СВЧ измерений существенно усложняет применимость метода в производственных условиях. Следует также отметить, что даже среди участников единого авторского коллектива работ [2 – 5] впоследствии в научном журнале развернулась дискуссия о достижимости ранее декларированной ими точности [6].

Целью данной работы является повышение чувствительности измерительного и опорного резонаторных измерительных преобразователей в указанной дифференциальной схеме измерения влажности газов, которое позволит снизить требования ко вторичной обработке измерительной информации и упростит эксплуатацию измерителей.

Поставленная цель достигается переходом от традиционного способа измерения диэлектрической проницаемости по изменению резонансной частоты измерительного резонатора к ее измерению по изменению добротности специализированного структурно неоднородного резонатора.

В предшествующих работах измерение диэлектрической проницаемости газов и газовых смесей (в частности, влажного газа) базировалось на простом соотношении измеряемой величины и изменения резонансной частоты структурно однородного резонатора, вытекающем из теории малых возмущений

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r}, \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота исходного резонатора, незаполненного исследуемым газом или заполненного сухим газом при гигрометрических измерениях; Δf – изменение резонансной частоты, связанное с наличием паров влаги в исследуемом газе.

Под структурно однородным резонатором при этом подразумевается резонатор с однородными по электропроводности стенками, не содержащий диэлектрических вставок с потерями.

Следует заметить, что величина $\frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r}$ изменяется в диапазоне $10^{-6} \div 10^{-4}$, что сравнимо с частотной нестабильностью обычного СВЧ генератора.

При всей простоте этого соотношения инструментальная и методическая погрешности измерения ε_r могут оказаться значительными из-за влияния на измеряемые величины f_0 и Δf различных факторов. К таким факторам, в первую очередь, следует отнести: изменение температуры окружающей среды и исследуемого газа; нестабильность частоты и мощности задающего генератора при реализации прямых методов измерения резонансных частот резонаторов; погрешности рассогласования при реализации автодинных или основанных на использовании АПЧ методов и др. Добротность измерительного резонатора при этих измерениях если и фигурирует, то только в связи с точностью фиксации резонанса. Влажный газ весьма слабо влияет на ее величину из-за малых потерь СВЧ энергии в нем. Тангенс угла диэлектрических потерь во влажном газе не превышает 10^{-5} даже при высоком влагосодержании.

Если же резонатор выполнить структурно неоднородным, например, с разной электропроводностью торцов и боковых стенок, то при изменении диэлектрической проницаемости заполняющего газа добротность такого резонатора может заметно изменяться. Покажем это на примере широко используемого в СВЧ диагностике материалов цилиндрического резонатора с H_{012} видом колебаний.

Будем исходить из следующих известных представлений о выражении добротности резонаторов через параметры их конструкций. Пользуясь формулами

$$Q = \omega_0 \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{пот}}} = \omega_0 \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{пот.г}} + P_{\text{б.ст}} + P_{\text{т}}} \approx \omega_0 \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{б.ст}} + P_{\text{т}}}, \quad (3)$$

$$W_{\text{зап}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \int E_{\varphi}^2 dV; \quad P_{\text{б.ст}} = Z'_{\text{б.ст}} \int_{S_{\text{б.ст}}} H_z^2 dS; \quad P_{\text{т}} = Z'_{\text{т}} \int_{S_{\text{т}}} H_z^2 dS \quad (4)$$

и записью составляющих поля в виде

$$\begin{aligned} E_{\varphi} &= E_0 \omega_0 \mu_0 \frac{R}{\nu_{01}} J'_0 \left(\frac{\nu_{01} r}{R} \right) \sin \beta z = E_0 \omega_0 \mu_0 a(r) \sin \beta z, \\ H_r &= -j E_0 \beta a(r) \cos \beta z, \\ H_z &= -j E_0 \beta a(r) \sin \beta z \end{aligned} \quad (5)$$

при условии

$$Z'_{\text{т}} \gg Z'_{\text{б.ст}}, \quad (6)$$

получим следующее выражение добротности измерительного резонатора, электропроводность торцов которого существенно меньше электропроводности боковых стенок:

$$Q = \omega_0^3 \varepsilon_0 \mu_0^2 \pi p \frac{\varepsilon_r}{Z'_{\text{т}} \beta^3}. \quad (7)$$

В выражениях (3-7) использовались следующие обозначения: ω_0 – круговая резонансная частота резонатора; $W_{\text{зап}}$ – запасаемая в резонаторе энергия; $P_{\text{пот.г}}$, $P_{\text{б.ст}}$, $P_{\text{т}}$ – мощности СВЧ потерь в заполняющем газе, боковых стенках и торцах соответственно; $Z'_{\text{б.ст}}$ и $Z'_{\text{т}}$ – активная часть СВЧ импеданса боковых стенок и торцов; R – радиус цилиндра резонатора; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; ν_{01} – корень функции Бесселя первого порядка; r и z – цилиндрические координаты; β – фазовая постоянная распространения волны H_{01} в цилиндрическом волноводе; p – продольный индекс резонансного колебания H_{01p} .

Представляя $Z'_{\text{т}}$ и β в виде

$$Z'_{\text{т}} = \sqrt{\frac{\omega_0 \mu_0}{2\sigma_{\text{т}}}}, \quad (8)$$

$$\beta = \omega_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon_{\text{г}} - \left(\frac{\omega_{\text{кр}}}{\omega_0}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon_{\text{г}} - \theta}, \quad (9)$$

получим

$$Q = \pi p \frac{(2\omega_0 \varepsilon_0 \sigma_{\text{т}})^{1/3} \varepsilon_{\text{г}}}{(\varepsilon_{\text{г}} - \theta)^{3/2}}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – удельная электропроводность материала торцов; $\omega_{\text{кр}}$ – критическая круговая частота цилиндрического сечения резонатора для волны H_{01} ; θ – параметр близости к критичности.

Из (10) нетрудно видеть, что абсолютное изменение добротности измерительного резонатора, связанное с увеличением влажности заполняющего газа тем выше, чем ближе сечение цилиндра к критическому для волны H_{01} на выбранной рабочей частоте ω_0 .

Относительное изменение добротности описывается при этом соотношением

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{\text{г}} + \theta}{\varepsilon_{\text{г}} - \theta} \right) \frac{\Delta \varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}}. \quad (11)$$

Нетрудно видеть, что даже при одинаковой чувствительности и точности выделение сигналов измерительной информации, связанных соответственно с $\frac{\Delta f}{f}$ и $\frac{\Delta Q}{Q}$ чувствительность и точность предлагаемого нами способа может быть более чем на порядок выше исходного. Повышение чувствительности в предлагаемом варианте количественно определяется выбором величины θ , то есть степени близости сечения резонатора к критическому на рабочей частоте. Ограничения при этом будут связаны с возможностью подавления дестабилизирующих факторов, обуславливающих инструментальную погрешность.

Весьма важно при этом отметить, что аппаратная реализация основанного на предлагаемом СВЧ резонаторного гигрометра существенно упрощается по сравнению с ранее описанными. На рис. 1 представлена его функциональная схема, включающая только один СВЧ задающий генератор (Г), блок опорного и измерительного резонаторов (P_1) и (P_2), высокопрецизионный волноводный мост на балансном двойном тройнике с СВЧ детектором (Д) в Е плече и традиционный газовый блок (БГ), описанный в работах [4, 6].

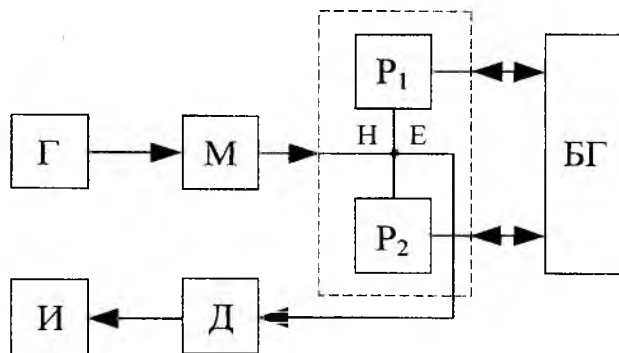


Рис. 1

Видно, что в предлагаемом гигрометре отсутствуют весьма сложные по устройству, настройке и требованиям к условиям работы системы автоматической подстройки частоты опорного и измерительного резонаторов.

Вторичная обработка сигнала измерительной информации в данном гигрометре сводится к выделению аналогового сигнала разбаланса волноводного моста с помощью хорошо разработанных инструментальных приемов. При этом используется известный [8, 9] метод передачи для измерения $\frac{\Delta Q}{Q}$. Точность ее может быть легко доведена до уровня 10^{-8} применением внутренней или внешней системы амплитудной модуляции СВЧ мощности (М), поступающей на вход Н двойного волноводного тройника.

Заметим, что как и в предыдущем варианте использование единого блока идентичных опорного и измерительного резонаторов существенно снижает влияние внешних факторов (температуры, давления, вибраций и т.п.) на инструментальную погрешность гигрометра. Практически не требуется в данном случае особых систем стабилизации мощности и частоты задающего СВЧ генератора. Применение стандартных измерительных СВЧ генераторов допустимо без существенного влияния на погрешность измерений.

Инструментальная погрешность предлагаемого гигрометра реально определяется погрешностями разбаланса двойного волноводного тройника и вторичной обработки этого сигнала. Влияние погрешностей газового блока остается прежним.

Такой гигрометр более просто встраивается в производственные условия, удобен в эксплуатации и устойчив в работе.

На рис. 2 приведен вид характеристик преобразования предлагаемого способа в единицах $\frac{\Delta Q}{Q}$ и $\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}$ при различных значениях θ .

Градуировочные характеристики прибора зависят от мощности СВЧ генератора, коэффициента связи резонатора с волноводным трактом, крутизны преобразования СВЧ детектора и коэффициента передачи измерительной системы (И). Однако из этого не следует делать поспешный вывод, что указанное является крупным недостатком разработки. Применение микроконтроллера, ставшего обычным в измерительной технике, позволит корректировать градуировочную характеристику гигрометра к стандартной при замене СВЧ генератора, СВЧ детектора и резонаторного блока. Описание такой системы выходит за рамки этой статьи. Экспериментальные исследования проводились на рабочей частоте 9,35 ГГц. Резонаторный блок был выполнен из латуни с последующим серебрением боковых стенок. На торцы резонаторов методом тонкопленочной технологии наносились резистивные слои толщиной 2,1 мкм с поверхностным сопротивлением 0,5 Ом/□. Результирующая добротность резонато-

ров с колебанием H_{013} при $\theta = 0,95$ составляла 3100 и фактически контролировалась поверхностным сопротивлением торцов. Величина θ варьировалась изменением рабочей частоты. Выходная мощность задающего СВЧ генератора имела величину 6,3 мВт. Для вторичной обработки сигнала измерительной информации осуществлялась амплитудная модуляция мощности на частоте 10 кГц.

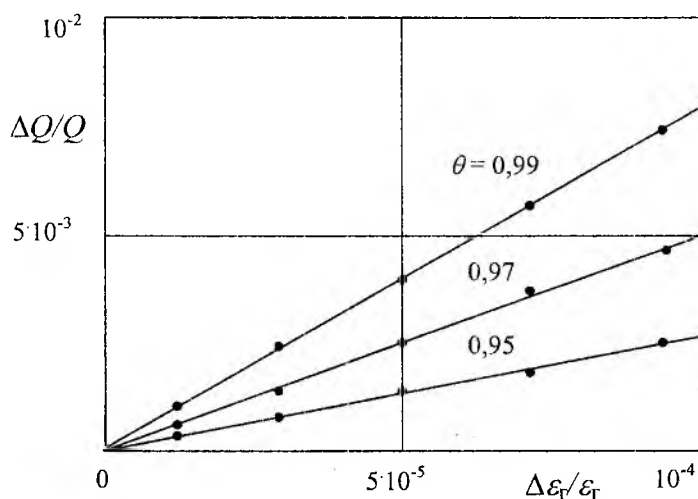


Рис. 2

Экспериментальные точки представлены на сплошных кривых рис. 2. Приведенная к значению $\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} = 10^{-4}$ относительная инструментальная погрешность по нашим оценкам составила $\pm 0,6\%$. Величина ее может быть уменьшена усовершенствованием балансного моста и крепления на нем резонаторов в едином блоке.

Дальнейшее повышение чувствительного способа с целью снижения требований к техническому исполнению СВЧ узла возможно путем усовершенствования структуры резонаторов, направленное на усиление влияния ϵ_r на добротность резонатора.

Список литературы: 1. Стоуксберри, Хасегава. Усовершенствованный автоматический цифровой микроволновый гигрометр // Приборы для научных исследований. 1976. № 5. С. 23-25. 2. Потапов А.А., Мецнер Е.П. Установка для исследования диэлектрических свойств газов // Приборы и техника эксперимента. 1982. № 5. С. 192 – 196. 3. Потапов А.А. Измерение влажности газов на основе диэлектрического метода // Измерительная техника. 1985. № 6. С. 48 – 50. 4. Лебедев И.В., Мецнер Е.П., Потапов А.А. Высокоточный СВЧ гигрометр // Измерительная техника. 1985. № 7. С. 56 – 58. 5. Потапов А.А., Куклин Е.А. Микроволновый гигрометр // Измерительная техника. 1986. № 3. С. 36 – 37. 6. Косолец Т.В., Лебедев И.В., Мецнер Е.П. Погрешности СВЧ гигрометра // Измерительная техника. 1989. № 7. С. 59 – 62. 7. Браун В.Б. Диэлектрики. М.: Иностранная литература, 1961. 326 с. 8. Лежсканев И.Н. Измерение малых сдвигов резонансной частоты и малых изменений добротности резонаторов СВЧ // Журнал технической физики. 1971. Т. 41, № 8. С. 1651 – 1660. 9. Зальцман Е.Б., Пояркова В.Е. Измерение тангенса угла потерь диэлектриков методом передачи на образцах в форме круглых стержней // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 54 – 56.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.10.2003