

低介电常数陶瓷微波介电性能评价的关键问题

李 雷, 陈湘明

(浙江大学材料科学与工程学院电介质材料研究室, 杭州 310027)

摘 要: 低介电常数(ϵ_r)微波介质陶瓷是未来毫米波移动通讯技术中的关键材料之一, 其基本性能参数 ϵ_r 、 Qf 值及谐振频率温度系数(τ_f)的精确评价乃是相关研究中最基础的课题之一。TE₀₁₁ 模式平行板法及金属谐振腔法为评价微波介电性能的通用方法, 但在使用时却存在一些被长期忽视的问题, 其对低 ϵ_r 微波介质陶瓷的研究及应用尤为重要。本综述将探讨评价低 ϵ_r 微波介质陶瓷性能时在 TE₀₁₁ 谐振模式的准确识别、 Qf 值的测试可靠性及 τ_f 的测试可靠性等方面存在的若干关键问题, 并给出相应的解决方案。

关键词: 低介电常数; 微波介电性能评价; 平行板法; 谐振腔法; 测试可靠性

中图分类号: 84.37+q; 77.22.-d 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)04-0899-08

网络出版时间: 2023-03-12



Key Problems in Microwave Dielectric Characterization of Low-Dielectric-Constant Ceramics

LI Lei, CHEN Xiangming

(Laboratory of Dielectric Materials, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Low-dielectric-constant (ϵ_r) microwave dielectric ceramics are one of the key materials for future mobile communication technology, and the accurate characterization for their basic performance parameters of ϵ_r , Qf value and temperature-dependent coefficient of resonant frequency (τ_f) is one of the most fundamental issues. Parallel plate method and metal resonant cavity method with TE₀₁₁ mode are commonly used for measuring the microwave dielectric properties. However, the corresponding problems are neglected, which are especially important for the research and applications of low- ϵ_r microwave dielectric ceramics. In this review, the key problems of the identification of TE₀₁₁ resonant mode, measurement reliability of Qf value and measurement reliability of τ_f were discussed for the characterization of low- ϵ_r microwave dielectric ceramics, and the corresponding solutions to the problems were given.

Keywords: low dielectric constant; microwave dielectric characterization; parallel plate method; resonant cavity method; measurement reliability

以移动通讯为标志的微波通讯技术的迅猛发展, 给现代工业技术及人类生活方式带来了巨大变革, 而对更高通讯速度的持续需求, 则使微波通讯一直保持着向更高工作频段发展的趋势。以最重要的移动通讯为例, 1G 至 4G 的典型工作频率从 900 MHz 逐步升至 2.45 GHz, 中国于 2019 年实现商用的 5G 通讯则将工作频段进一步拓展至 3.4~3.6 GHz、4.8~4.9 GHz。然而, sub-6 GHz 频段资源非常有限, 已无法满足物联网、无人驾驶、虚拟/增强现实等新

兴技术对超高速、超低时延、高可靠性、大连接的通讯需求。为此, 国际电信联盟在 2019 年的世界无线电通信大会上, 将 26 GHz 频段(24.25~27.50 GHz)、40 GHz 频段(37.0~43.5 GHz)及 70 GHz 频段(66~71 GHz)的毫米波段划归未来国际移动通讯系统使用^[1-2], 毫米波通讯已成为包括 5G/6G 在内的未来移动通讯技术发展的必然方向。另一方面, 微波介质陶瓷是现代微波通讯技术的关键材料之一, 被广泛应用于微波电路的多种核心元器件中, 其基本性能参数及要

收稿日期: 2022-08-31。 修订日期: 2022-10-10。

基金项目: 国家自然科学基金(52272128, U20A20243)。

第一作者: 李 雷(1981—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2022-08-31. Revised date: 2022-10-10.

First author: LI Lei (1981—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: zjulilei@zju.edu.cn

求包括：合适的介电常数(ϵ_r)、高 Qf 值[品质因子 Q (即介电损耗 $\tan\delta$ 的倒数)与频率 f 的乘积]及近零谐振频率温度系数(τ_f)^[3-4]。微波介质陶瓷在微波通讯中的应用大致分为 2 类：基于微波介质谐振原理的元器件(包括介质谐振器、滤波器、双工器、介质天线等)，及用于传输电磁波的微波基板。对前者而言，微波介质陶瓷的 ϵ_r 、 Qf 值及 τ_f 分别决定了谐振元器件的尺寸、频率选择性及中心频率的温度稳定性；而对微波基板而言，三者则对应于微波传输过程中的相位延迟、衰减及相位延迟随温度的变化。谐振元器件的尺寸 L 与 ϵ_r 、工作频率 f 的关系为：

$$L \propto \frac{1}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

在 1G~4G 时代及 5G 前期，sub-6 GHz 工作频段较低，故通常需使用具有较高 ϵ_r (>20) 的微波介质陶瓷，以满足谐振元器件小型化这一重要应用需求。然而，工作频段的大幅提升将使谐振元器件的尺寸急剧减小，故其小型化乃是毫米波通讯的自然结果、而不再是需要追求的重要目标。相反，若仍采用 ϵ_r 较高的微波介质陶瓷，反而会出现谐振元器件尺寸太小、难以精确加工的新问题，因此需采用 ϵ_r 较低的微波介质陶瓷。同时，微波在基板中传输距离 d 时产生的相位延迟为：

$$\varphi = \frac{2\pi fd\sqrt{\epsilon_r}}{c_0} \quad (2)$$

其中： c_0 为真空光速，故毫米波通讯中的相位延迟将较 sub-6 GHz 频段大幅提升，同样需降低基板的 ϵ_r 以减小相位延迟。因此，低 ϵ_r (<10)、乃至超低 ϵ_r (<5) 微波介质陶瓷将成为未来移动通讯技术中的关键材料之一，相关研究也在近年吸引了广泛关注^[5-13]。

ϵ_r 、 Qf 值及 τ_f 3 个基本性能参数的精确评价，显然是微波介质陶瓷研究及应用中最基础的课题之一。平行板法与金属谐振腔法是评价微波介质陶瓷介电性能的通用方法^[14]，但在实际应用中却仍存在各种各样的问题，并集中体现在 3 个基本性能参数测试结果的可靠性上。这一方面因为微波频段介电性能的评价远比较低频段复杂；另一方面则源于微波介质陶瓷研究初期由于性能评价方法不完善而做的若干基本假定及其后形成的思维定势。这些问题在微波介质陶瓷的研究中一直存在，但在材料 ϵ_r 较高、测试及应用频段较低时并不严重。然而，对于低 ϵ_r 微波介质陶瓷的研究及其在毫米波通讯中的应用而言，这些问题却要严重得多，并可能导致对材

料真实介电行为不准确、乃至完全错误的理解，从而阻碍相关研究及应用的发展，因此必须予以充分重视。本文首先简要回顾微波介电性能评价的基本原理及方法，在此基础上探讨使用平行板法及金属谐振腔法评价低 ϵ_r 微波介质陶瓷性能时在 TE_{011} 谐振模式的识别、 Qf 值的可靠性及 τ_f 的可靠性 3 个方面遇到的若干关键问题，并给出相应的解决方案。

1 微波介电性能评价的基本原理及方法

根据测试原理的不同，可将材料微波介电性能的评价方法分为传输线法及介质谐振法 2 大类^[15-16]。前者将待测试样看作微波传输线的一部分，根据单个频率下测得的 S 参数计算此频率下的 ϵ_r 及 $\tan\delta$ ，因此容易实现宽频率范围内的测试，但精度较低^[15-16]；后者则基于微波介质谐振的原理，根据特定谐振模式谐振峰附近的 S 参数计算 ϵ_r 及 $\tan\delta$ ，故只能进行单频率点或离散频率点的测试，其精度较高，适于微波介质陶瓷的性能评价^[14-16]。微波介质谐振系统由金属壁、介质(包括待测试样、空气与支撑物)及耦合装置构成，三者的作用分别为限制电磁场、产生介质谐振、激励所需谐振模式。微波介质谐振系统在特定模式下的谐振频率 f_0 由所有介质的介电常数及尺寸决定，总的无载损耗则由介质损耗及金属内壁的导体损耗 2 部分构成，即：

$$\frac{1}{Q_u} = \sum_i (P_{e,i} \tan\delta_i) + \frac{1}{Q_c} \quad (3)$$

其中： Q_u 为谐振系统的无载品质因子； $P_{e,i}$ 为介质的电能填充因子，定义为某介质内存储的电能与整个谐振系统内存储电能的比值，介于 0~1 之间； Q_c 则为金属内壁的品质因子。支撑物与空气的介电损耗通常可忽略，故式(3)可简化为：

$$\frac{1}{Q_u} = P_e \tan\delta + \frac{1}{Q_c} \quad (4)$$

根据谐振峰附近的 S 参数可得到 f_0 及 Q_u ，而利用解析方法或数值计算，即可由 f_0 求得待测试样的 ϵ_r ，并进一步算出 P_e 、 Q_c 及试样的 $\tan\delta$ (或 Qf 值)^[14]。而 τ_f 则通常由包含试样的谐振系统在 2 个温度 T_1 、 T_2 (典型值为 20 °C、80 °C) 下的 f_0 、根据下式^[3-4]求得：

$$\tau_f = \frac{f_0(T_2) - f_0(T_1)}{(T_2 - T_1) \times f_0(T_1)} \quad (5)$$

理论上而言，所有介质谐振器的任意谐振模式均可用于微波介质陶瓷介电性能的评价，但考虑到

测试精度、实现与分析难度等关键因素, 平行板法(又称开腔法、Hakki-Coleman 法、Courtney 法)^[17-18]及圆柱形金属谐振腔法(又称闭腔法)^[19-20]应用最为广泛。2 种方法均采用圆柱形试样(典型尺寸为直径 10 mm、厚度 5 mm)及 TE₀₁₁ 谐振模式(谐振腔法中的 TE₀₁₁ 模式也称为 TE_{01δ} 模式), 前者将试样夹持在 2 块大的平行金属板之间, 后者则将试样放置于金属谐振腔内低 ϵ_r 、低 $\tan\delta$ 的支撑物上。TE₀₁₁ 模式的电磁场呈轴对称分布, 且电场仅有环向分量, 其 Q_c 明显高于其他常见谐振模式, 故有利于 $\tan\delta$ 的评价。2 种方法相比较, 平行板法具有结构简单、存在解析解、易分析等优点^[14, 17-18]; 而金属谐振腔法则不存在解析解、必须通过数值方法分析, 其优势在于试样远离金属壁使得 Q_c 更高, 故更适于低 $\tan\delta$ 的精确评价^[14, 19-20]。除此之外, 谐振微扰法^[21]、分离柱介质谐振法^[22]、回音壁模式法^[23]、准光腔法^[24]等也被用于微波介质陶瓷介电性能的评价, 但由于测试精度、通用性及分析难度等方面的限制, 应用较少。

2 TE₀₁₁ 谐振模式的准确识别

所有微波介质谐振器均具有无限个谐振模式, 不同谐振模式的电磁场分布、 f_0 、 Q_u 、 P_c 、 Q_c 各不相同。因此, 准确识别所需的谐振模式是正确进行微波介电性能评价的基本前提。若谐振模式识别错误, 则会导致测试结果完全错误。根据试样的尺寸及 ϵ_r , 可求得平行板法及谐振腔法中 TE₀₁₁ 模式的 f_0 。当试样的 ϵ_r 较高时, TE₀₁₁ 模式的谐振峰位于较低频率, 且一般与寄生模式的谐振峰相距较远, 因此只需粗略估计 ϵ_r 及 f_0 即可, 通常不会误判 TE₀₁₁ 模式^[25]。但对于低 ϵ_r 微波介质陶瓷, 寄生模式与 TE₀₁₁ 模式的谐振峰可能相距很近, 虽然可通过改变激励条件、观察上金属盖抬起时谐振峰的移动方向等手段排除部分寄生模式谐振峰^[14], 但这些方法不具普适性、且严重依赖于测试经验。故在试样的准确 ϵ_r 未知时, 容易出现 TE₀₁₁ 模式的误判, 并导致测试结果完全错误。

为此, 李雷等^[25]在前期工作中发展了 1 种简单、可靠的方法, 可通过以下 3 步准确识别采用金属谐振腔法测试微波介电性能时的 TE₀₁₁ 模式。第一步, 将具有较高已知介电常数及低介电损耗的薄参考试样放置在谐振腔中的支撑物上, 记录 TE₀₁₁ 模式的谐振频率 $f_{0,1}$; 第二步, 将待测试样放置在参考试样上, 观察放置过程中 TE₀₁₁ 模式谐振峰的移动, 记

录最终的谐振频率 $f_{0,2}$ 。利用数值方法, 可根据 $f_{0,2}$ 与 $f_{0,1}$ 的差异估算出待测试样的介电常数 $\epsilon_{r,est}$ 及只放置待测试样时 TE₀₁₁ 模式的谐振频率 $f_{0,est}$; 第三步, 将待测试样单独放置于谐振腔中, 在 $f_{0,est}$ 附近寻找谐振峰。估算与实测的谐振频率一般相差 1% 以内, 因此可准确识别出 TE₀₁₁ 模式。但在少数情况下, 干扰模式与 TE₀₁₁ 模式的谐振峰非常接近, 通过上述方法仍无法将两者区分开。为此, 本工作用厚度为 ΔH 的金属片抬高谐振腔的金属上盖、将谐振腔的高度增加 ΔH 。根据 $\epsilon_{r,est}$ 及 ΔH , 可算出谐振腔高度增加后谐振频率的变化 $\Delta f_{0,est}$, 对照备选谐振峰谐振频率的真实变化, 即可排除寄生模式, 最终实现 TE₀₁₁ 模式的准确识别、并计算出待测试样的准确介电常数 $\epsilon_{r,acc}$ 。例如, 图 1 为采用金属谐振腔法测试试样 1 (直径 12.03 mm、厚度 6.51 mm) 微波介电性能时 S_{21} 的模随频率的变化。在 2~20 GHz 的频率范围内, 出现 1~6 共 6 个强谐振峰, 对应的谐振频率分别为 11.897、14.642、14.988、16.095、18.407、19.691 GHz, 难以识别出 TE₀₁₁ 模式。当采用上述第 1 种方法、参考试样的直径、厚度及介电常数分别为 10.75 mm、1.49 mm 及 77.2 时, 测得 $f_{0,1}$ 与 $f_{0,2}$ 分别为 5.224、5.184 GHz, 由此求得 $\epsilon_{r,est}$ 及 $f_{0,est}$ 分别为 2.730、15.107 GHz。与测试结果比较, 可判断峰 3 对应于 TE₀₁₁ 模式^[25]。同时, 可采用第 2 种方法对上述结果进行确认。当 ΔH 为 0.48 mm 时, 求得 $\Delta f_{0,est}$ 为 -192 MHz。而实际测得峰 2、3、4 谐振频率的变化分别为 -343、-189 MHz 及 -294 MHz, 故可完全确定峰 3 即为 TE₀₁₁ 模式的谐振峰, 并进一步求得试样的 $\epsilon_{r,acc}$ 为 2.79。由于结构的限制, 上述第 1 种方法无法用于平行板法中 TE₀₁₁ 模式的识别, 但第 2 种方法仍适用。可根据谐振腔法中测

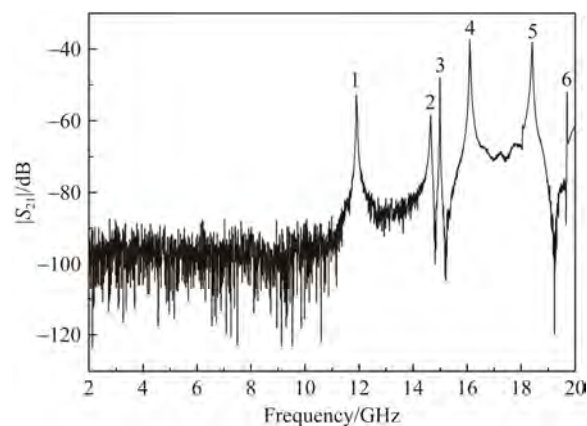


图 1 试样 1 的 $|S_{21}|$ 随频率的变化

Fig. 1 $|S_{21}|$ as a function of frequency for sample 1

得的 $\varepsilon_{r,acc}$ 计算平行板法 TE_{011} 模式的谐振频率, 并将平行板谐振器设计为上金属板高度可调的结构, 根据改变上金属板与试样距离后谐振频率的变化, 实现 TE_{011} 模式的准确识别。

3 Qf 值的测试可靠性

在微波介质陶瓷的 3 个基本性能参数中, Qf 值的评价最为复杂, 也最易出错。 Qf 值及各中间参数的测试与分析细节已有较多文献涉及^[14–19, 26–28], 不再赘述, 但有必要讨论 Qf 值测试可靠性的基本判断依据及由此得出的重要结论。将式(4)改写为:

$$\tan\delta = \frac{1}{P_e} \left(\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_c} \right) \quad (6)$$

即可由 Q_u 、 Q_c 及 P_e 3 个中间参数计算出 $\tan\delta$ 及 Qf 值。由式(6)可知: Q_c 与 Q_u 的比值 Q_c/Q_u 是决定 $\tan\delta$ 测试误差的关键因素, 此比值越大, 谐振系统总的无载损耗中待测试样的贡献越大, 由 Q_c 及 Q_u 本身误差所导致的 $\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_c}$ 的误差越小; 另一方面, $\frac{1}{P_e}$ 则将 $\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_c}$ 的误差进一步放大, 并构成 $\tan\delta$ 的最终测试误差。因此, 在高 Qf 值的测试中, 必须关注这 3 个中间参数的具体数值, 当 Q_c/Q_u 及 P_e 均较高时, 才可在试样损耗很低时保证测试结果的可靠性^[29]。这一简单结论可用作所有介质谐振法适用范围及 $\tan\delta$ (或 Qf 值)测试可靠性的基本判断依据。例如, 谐振微扰法^[21]、分离柱介质谐振法^[22]、准光腔法^[24]中使用的试样相对于整个谐振系统而言尺寸很小,

P_e 通常较低, Q_u 与 Q_c 相差不大, 因此仅在 $\tan\delta$ 相对较高时才可保证较高的测试精度; 平行板法中试样直接与上、下金属板接触^[17–18], Q_c 只有几千, 故通常只能精确测试几万 GHz 以内的 Qf ; 谐振腔法中试样远离金属壁^[19–20], Q_c 较平行板法高 1 个数量级, 而回音壁模式法中电磁场集中分布在试样内部^[23], Q_c 及 P_e 均很高, 因此两者可用于更高 Qf 值的测试。

在式(6)中还需注意: Q_u 、 Q_c 及 P_e 3 个中间参数中, Q_u 由谐振曲线测得, P_e 可根据谐振系统内所有介质的尺寸及介电常数算出, 两者精度通常较高; 而 Q_c 则与谐振系统内电磁场的分布相关, 同时与难以精确测量的金属内壁表面电导率 σ_s 的平方根成正比^[19], 故 Q_c 的精度相对较低、在 $\tan\delta$ 很低时为其测试误差的主要来源。由于趋肤效应的存在, 金属的 σ_s 不仅取决于其体电导率 σ_0 , 还与表面粗糙度负相关, 因此应使用 σ_0 高、表面光洁的金属内壁(建议使用镀银的铜质腔体, 内壁达到镜面光洁度), 以提高 σ_s 及 Q_c , 从而减小 $\tan\delta$ 的测试误差。当 Q_u 与 Q_c 接近时, 需予以特别关注, 此时两者的少许误差即可导致测试的 Qf 值变化很大, 甚至计算得到负 Qf 值的错误结果。

表 1 为采用金属谐振腔法评价微波介电性能时的几个实例。试样 1、2、3 的 Q_c 均明显高于 Q_u , 且 P_e 较大, 故可判断 Qf 值的测试结果可靠。相比之下, 试样 3 的 Q_c/Q_u 低于 1 和 2, 故前者 Qf 值的测试误差也相对较高。而试样 4 的 Q_c/Q_u 仅为 1.38, P_e 则低于 0.1, 说明测得的 Qf 值不可信。

表 1 采用金属谐振腔法评价微波介电性能时的几个实例

Table 1 Some examples for the evaluation of microwave dielectric properties by metal resonant cavity method

Sample No.	Diameter/mm	Thickness/mm	ε_r	f_0 /GHz	Q_u	Qf /GHz	P_e	Q_c
1	12.03	6.51	2.79	14.988	7 875	138 800	0.781	23 465
2	9.92	4.84	3.81	15.109	9 497	152 200	0.732	30 638
3	10.00	5.00	9.50	10.158	21 759	396 800	0.920	44 631
4	6.02	3.05	2.76	19.679	11 520	78 500	0.095	15 855

ε_r : Dielectric constant; f_0 : Resonant frequency; Q_u : Unloaded quality factor; Qf : Product of quality factor and frequency; P_e : Electric energy filling factor; Q_c : Quality factor of conducting metal walls.

Qf 值评价中的另一个关键问题是其频率依赖性。通常认为, 微波介质陶瓷在微波频段的 ε_r 、 Qf 值及 τ_f 3 个基本参数均不随频率变化^[3–4]。因此, 在实际测试中, 往往仅评价 1 个频率下的性能, 并将其直接用于微波频段的任意频率。如在工程应用中, 直接使用的性能参数为微波介质陶瓷在工作频率下

的 $\tan\delta$, 即由工作频率除以测试频率下的 Qf 值得到。绝大部分微波介质陶瓷为非极性材料、不存在自发极化, 而其在微波频段下的低 $\tan\delta$ 则表明 ε_r 由离子极化及电子极化 2 种本征极化机制所主导, 与氧空位、晶界、气孔、杂质等微结构缺陷相关的非本征极化在微波频段已基本退出响应、对 ε_r 的贡献可忽

略。因此,在绝大多数情况下,确实可将微波介质陶瓷在微波频段下的 ϵ_r 看作不随频率变化的常数。而 τ_f 由 ϵ_r 的温度系数及热膨胀系数决定,故其频率依赖性也基本可忽略。由于微波介质陶瓷的本征损耗通常很低,即使与微结构缺陷相关的非本征极化对 ϵ_r 影响很小,也会导致 $\tan\delta$ 显著升高, Qf 值则明显降低,这已被大量研究所证实^[3-4]。另一方面, Qf 值为不随频率变化的常数这一假定实际上源于以离子极化的简谐振子模型为基础的理论推导^[30]。在这一模型中,仅考虑了离子极化导致的本征介电损耗,其与频率成正比,故可将本征 Qf 值视为不随频率变化的常数。然而,非本征极化引起的介电损耗并非与频率成正比,这就导致真实微波介质陶瓷的 Qf 值不再为常数,而是通常随频率的升高而升高^[31-33]。 Qf 值的频率依赖性被长期忽略,部分缘于相关研究初期即已形成的思维定势,更重要的原因则在于缺少可变频评价 Qf 值的精确方法。相对于 1G 至 5G 前期、工作于 sub-6 GHz 频段的移动通讯而言,毫米波通讯的工作频率大幅提升,对于其中的低 ϵ_r 微波介质陶瓷,工作频率与 Qf 值测试频率的差别较之前明显增大,忽略 Qf 值的频率依赖性也将对实际应用造成更显著的负面影响,因此必须予以充分重视。这就要求提高测试频率,在实际工作的毫米波频段直接评价低 ϵ_r 微波介质陶瓷的 Qf 值。

金属谐振腔法的测试频率(即 TE_{011} 模式的谐振频率)通常为 3~15 GHz,远低于毫米波段。提高测试频率的方法主要有以下几种:1) 减小谐振腔法中试样及/或腔体的尺寸^[31, 33];2) 采用谐振腔法中的 TE_{0mp} 高阶模式^[32-34];3) 采用回音壁模式法^[23]、准光腔法^[24]等基于其他复杂模式的方法。第 1 种方法最易实现,但腔体及试样尺寸的减小会给精确加工带来诸多困难,同时测试频率随试样 ϵ_r 的升高而降低,故一般仅可勉强用于 ϵ_r 很低(通常小于 5)的材料在 26 GHz 频段的性能评价。此外,腔体尺寸固定时,减小试样尺寸可使测试频率升高,但同时会引起式(6)中 P_e 、 Q_c/Q_u 的降低,并会导致 Qf 值测试误差的急剧升高(如表 1 中的试样 4),需在应用时引起足够重视。而在第 2、3 种方法中,同样需注意式(6)中 P_e 及 Q_c/Q_u 的具体数值。例如,准光腔法中试样相对于谐振系统而言很小、 P_e 通常较低,一般可用于 $\tan\delta > 10^{-3}$ 的测试,但在 $\tan\delta$ 更低时则会带来较大误差。而 TE_{0mp} 高阶模式谐振腔法及回音壁模式法中 P_e 及 Q_c 均较高,是适用于毫米波介质陶瓷 Qf 值

评价的最佳方法。但 2 种方法在谐振模式的激励与识别、电磁场分析及性能参数的求解等方面均存在困难,且其正确使用严重依赖于测试经验,故至今仍只有少量研究单位使用、而无成熟的商用产品。总体上而言,毫米波段高 Qf 值的精确评价仍是相关研究领域内的 1 个关键难题。

4 τ_f 的测试可靠性

微波介质陶瓷的 τ_f 决定了基于介质谐振原理的微波元器件的温度稳定性,通常要求近零($|\tau_f| < 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。对这些元器件而言,中心频率随温度的漂移与中心频率、 τ_f 均成正比,故毫米波通讯对应用于其中的低 ϵ_r 微波介质陶瓷 τ_f 的要求将更加严格, τ_f 的测试可靠性也需予以更多关注。

实际上,谐振频率 f_0 及其温度系数 τ_f 是由微波介质陶瓷、其他介质(空气、支撑物)及金属壁构成的介质谐振器的性能参数,故严格来说,不应采用 τ_f 表征微波介质陶瓷的温度稳定性,而应使用其介电常数温度系数 τ_ϵ 。两者与线性热膨胀系数 α_L 有以下关系:

$$\tau_f = -\alpha_L - \frac{1}{2}\tau_\epsilon \quad [3-4] \quad (7)$$

但在工程应用中,使用 τ_f 表征微波介质陶瓷的温度稳定性确实会带来很多便利,因此这一参数自相关研究初期便被广泛使用,并沿用至今。需注意的是:只有在介质谐振器内部完全由微波介质陶瓷填充、而无其他介质时,式(5)定义的微波介质陶瓷的 τ_f (记为 $\tau_{f,d}$) 才等同于介质谐振器的 τ_f (记为 $\tau_{f,r}$),而实际谐振器与理想情况的偏离则会使两者不同^[35-36]。然而,在实际测试中,却通常将测得的 $\tau_{f,r}$ 直接作为 $\tau_{f,d}$ 使用,从而导致微波介质陶瓷 τ_f 的测试误差。 $\tau_{f,r}$ 源于介质谐振器内所有介质的尺寸及介电常数随温度的变化,故对轴对称的介质谐振器而言,有:

$$\tau_{f,r} = \sum_i (C_{L\parallel,i} \alpha_{L\parallel,i} + C_{L\perp,i} \alpha_{L\perp,i} + C_{\epsilon\parallel,i} \tau_{\epsilon\parallel,i} + C_{\epsilon\perp,i} \tau_{\epsilon\perp,i}) \quad (8)$$

其中: i 为谐振系统内各种介质,包括微波介质陶瓷 d 、空气、支撑物 s ; C_L 、 C_ϵ 分别为与介质的线性热膨胀系数及介电常数温度系数相关的系数;“ $\parallel$ ”与“ $\perp$ ”则表示平行、垂直于轴向^[36]。对于 TE_{011} 模式的平行板法及谐振腔法,电场仅存在环向分量^[14];同时,微波介质陶瓷通常为各向同性,空气的 τ_ϵ 可忽略、热膨胀则由金属壁 m 的线性热膨胀系数决定,故结合式(7)、将式(8)简化后,可得到将 $\tau_{f,r}$ 等同于 $\tau_{f,d}$ 所造成的 $\tau_{f,d}$ 的测试误差:

$$\Delta = \tau_{f,r} - \tau_{f,d} = C_{L,m} \alpha_{L,m} + (C_{L||,s} \alpha_{L||,s} + C_{L\perp,s} \alpha_{L\perp,s} + C_{\varepsilon,s} \tau_{\varepsilon\perp,s}) + [36] (P_{e,d} + C_{L,d}) \alpha_{L,d} + (P_{e,d} - 1) \tau_{f,d} \quad (9)$$

式中: 第 1、2 项分别对应金属谐振腔法中金属腔体及支撑物的贡献; 第 3、4 项则与试样本身性质相关。而在平行板法中, 上、下金属板之间的距离由试样的热膨胀决定、且无支撑物, 式(9)可简化为:

$$\Delta = (P_{e,d} - 1)(\tau_{f,d} + \alpha_{L,d}) [36] \quad (10)$$

相对于谐振腔法, 平行板法中电磁场更集中于待测试样内部, 即 $P_{e,d}$ 更高。即使 $P_{e,d}$ 随试样 ε_r 的降低而减小, 在 $\tau_{f,d}$ 近零时, 平行板法中将 $\tau_{f,r}$ 等同于 $\tau_{f,d}$ 导致的 Δ 最多在 $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 的数量级, 基本可忽略^[36]。而对金属谐振腔法而言, 较低的 $P_{e,d}$ 不仅直接导致式(9)中 3、4 项带来的测试误差升高, 还会使腔体及支撑物的负面影响变大。在 $\tau_{f,d}$ 近零时, 金属谐振腔法中 Δ 通常为负几 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 且总误差随 ε_r 的降低而变大^[36]。而毫米波通讯频段对所用陶瓷材料的 τ_f 有着更严格的要求, 因此建议使用平行板法、而非金属谐振腔法评价低 ε_r 微波介质陶瓷的 τ_f 。若使用金属谐振腔法, 则应通过式(9)对测试结果进行修正。

τ_f 评价中的另一个关键问题乃是其温度依赖性。通常认为, 微波介质陶瓷的 τ_f 为不随温度变化的常数, 故根据 2 个温度下测得的 f_0 , 即可由式(5)求得 τ_f ^[3-4]。然而, 根据 τ_f 的严格定义:

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{df_0}{dT} \quad (11)$$

根据式(5)求得的 τ_f 实际上是一定温度范围内的平均 τ_f , 仅当 τ_f 的温度依赖性可忽略时, 测得的平均 τ_f 才能反应微波介质陶瓷的真实温度稳定性。如果 f_0 或 f_0 随温度的变化率随温度明显改变, 则 τ_f 将不再是常数, 而是表现出显著的温度依赖性^[37]。当 $|\tau_f|$ 较大时, f_0 随温度变化明显, 即使其与温度呈线性关系, τ_f 仍会表现出显著的温度依赖性。对实际应用而言, τ_f 需近零, 此时 f_0 随温度的变化很小, τ_f 可能的温度依赖性则对应于 f_0 随温度的非线性变化。实际上, 已有研究表明: 部分平均 τ_f 近零的单相微波介质陶瓷的 f_0 确实随温度近线性变化, 但仍有一些单相陶瓷的 f_0 与温度呈非线性关系, τ_f 则随温度改变^[38-41]。同时, 理论及实验研究均表明: 这一现象在由 τ_f 分别为正、负值的两相构成、平均 τ_f 近零的复合陶瓷中是普遍存在的, 其 f_0 通常随温度升高先升高、后降低, τ_f 则由正值降为负值^[37, 42-46]。

显然, 若 τ_f 具有显著的温度依赖性, 则根据式(5)测得的近零平均 τ_f 会掩盖 f_0 较大的真实温度漂移, 从而对实际应用产生误导。例如, $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ 复合陶瓷是最为重要的 1 种商用微波介质陶瓷, $0.94\text{MgTiO}_3\text{-}0.06\text{CaTiO}_3$ 陶瓷在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 间的平均 τ_f 近零 ($-2.3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 但其 τ_f 却随着温度的升高, 由 -40°C 下的 $8.6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 近线性地降至 80°C 下的 $-13.4\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[37]。长期以来, $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ 复合陶瓷 τ_f 的温度依赖性并未引起应有的关注, 这主要是由于其在 4G 及之前移动通讯中的应用以介质天线为主, 而较低通讯频段及天线应用对温度稳定性的要求均相对低。但在中国 5G 移动通讯发展初期, $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ 复合陶瓷被大规模应用于移动通讯基站中的介质波导滤波器, 更高的通讯频段及滤波器应用均对温度稳定性提出更高要求, 因此使 $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ 复合陶瓷 τ_f 温度依赖性的问题暴露出来, 并导致介质波导滤波器的温度稳定性严重低于预期, 最终不得不改用 τ_f 近零、且无明显温度依赖性的单相微波介质陶瓷。而绝大多数低 ε_r 单相微波介质陶瓷的 τ_f 为较大的负值, 须与具有正 τ_f 的材料形成复合陶瓷才能将平均 τ_f 调至近零, 故 τ_f 的温度依赖性在具有近零平均 τ_f 的低 ε_r 微波介质陶瓷中将更加普遍。同时, 随着移动通讯向毫米波频段发展, 对相关元器件温度稳定性的要求将进一步提高。因此, 由 τ_f 温度依赖性引发的问题也将变得更加严重, 必须予以充分重视。对于 τ_f 的评价而言, 这就需要以较小的温度间隔(如 20°C 或更小)、在实际工作的温度范围内(如 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$)测试多个温度下的 f_0 , 最终得到 f_0 随温度的真实变化及不同温度下/温度区间内的 τ_f ^[37, 46], 这对于复相及单相微波介质陶瓷的研究与应用均具有重要意义。

5 结论

本文论述了低 ε_r 微波介质陶瓷性能评价中的若干关键问题及相应的解决方案, 包括 TE_{011} 谐振模式的准确识别、 Qf 值测试可靠性的基本判断依据、 Qf 值的频率依赖性及毫米波段 Qf 值的评价、平行板法及谐振腔法测试 τ_f 的误差、 τ_f 的温度依赖性及其评价。这些问题自微波介质陶瓷性能评价的基本方法确立后便一直存在、但未受到应有重视。而随着毫米波移动通讯技术的到来, 这些问题在低 ε_r 微波介质陶瓷的研究与应用中变得更加突出, 并可能导致对相关材料真实介电行为片面、乃至完全错误的理解, 从而对实际应用产生严重误导, 因此应予

以充分重视。上述大部分问题已有妥善、成熟的解决方案,但目前仍缺少评价毫米波段高 Q_f 值的精确、易用的方法,这也是相关研究领域内最为关键的一个难题。

参考文献:

- [1] International Telecommunication Union. Provisional final acts[C]// World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19), Sharm El-Sheikh, Egypt, Oct. 28–Nov. 2, 2019. <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Documents/PFA-WRC19-E.pdf>.
- [2] 王坦, 钱肇钧, 韩锐, 等. WRC-19 大会 5G 毫米波结果梳理与分析[EB/OL]. [2020-03-30]. <http://www.srrc.org.cn/article24252.aspx>.
- [3] REANEY I M, IDDLES D. Microwave dielectric ceramics for resonators and filters in mobile phone networks[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(7): 2063–2072.
- [4] SEBASTIAN M T, Ubig R, Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties[J]. Int Mater Rev, 2015, 60(7): 392–412.
- [5] KIM J S, NGUYEN N H, LIM J B, et al. Low-temperature sintering and microwave dielectric properties of the Zn_2SiO_4 ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2008, 91(2): 671–674.
- [6] FANG Y, LI L, XIAO Q, et al. Preparation and microwave dielectric properties of cristobalite ceramics[J]. Ceram Int, 2012, 38(6): 4511–4515.
- [7] TSUNOOKA T, ANTO M, SUZUKI S, et al. Research and developments for millimeter-wave dielectric forsterite with low dielectric constant, high Q, and zero temperature coefficient of resonant frequency[J]. Jpn J Appl Phys, 2013, 52(9): 09KH02.
- [8] ZHOU D, PANG L X, WANG D W, et al. High quality factor, ultralow sintering temperature $\text{Li}_6\text{B}_4\text{O}_9$ microwave dielectric ceramics with ultralow density for antenna substrates[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2018, 6(8): 11138–11143.
- [9] SONG X Q, DU K, LI J, et al. Low-fired fluoride microwave dielectric ceramics with low dielectric loss[J]. Ceram Int, 2019, 45(1): 279–286.
- [10] BIAN J J, SUN X Q, XIE Y R. Structural evolution, sintering behavior and microwave dielectric properties of $\text{Al}_{1-x}(\text{Si}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_x\text{PO}_4$ ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2019, 39(14): 4139–4143.
- [11] TANG Y, ZHANG Z, LI J, et al. $\text{A}_3\text{Y}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (A=Ca, Mg): Two novel microwave dielectric ceramics with contrasting τ_f and $Q \times f$ [J]. J Eur Ceram Soc, 2020, 40(12): 3989–3995.
- [12] PÁLVÖLGYI P S, SEBŐK D, SZENTI I, et al. Lightweight porous silica foams with extreme-low dielectric permittivity and loss for future 6G wireless communication technologies[J]. Nano Res, 2021, 14(5): 1450–1456.
- [13] HAMEED I, LI L, LIU X Q, et al. Ultra low loss $(\text{Mg}_{1-x}\text{Ca}_x)_2\text{SiO}_4$ dielectric ceramics ($x=0$ to 0.15) for millimeter wave applications[J]. J Am Ceram Soc, 2022, 105(3): 2010–2019.
- [14] KAJFEZ D, Guillon P. Dielectric Resonators, 2nd ed.[M]. Atlanta: Noble, 1998.
- [15] 倪尔瑚. 材料科学中的介电谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] CHEN L F, ONG C K, NEO C P, et al. Microwave electronics: Measurement and material characterization[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- [17] HAKKI B W, COLEMAN P D. A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range[J]. IRE Trans Microwave Theory Tech, 1960, 8(4): 402–410.
- [18] COURTNEY W E. Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability microwave insulators[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1970, 18(8): 476–485.
- [19] KAJFEZ D. Incremental frequency rule for computing the Q-factor of a shielded TE_{0mp} dielectric resonator[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1984, 32(8): 941–943.
- [20] FAN X C, CHEN X M, LIU X Q. Complex-permittivity measurement on high-Q materials via combined numerical approaches[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 53(10): 3130–3134.
- [21] CARTER R G. Accuracy of microwave cavity perturbation measurements[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2001, 49(5): 918–923.
- [22] KRUPKA J, GREGORY A P, ROCHARD O C, et al. Uncertainty of complex permittivity measurement by split-post dielectric resonator techniques[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 21(10): 2673–2676.
- [23] ANNINO G, BERTOLINI D, CASSETTARI M, et al. Dielectric properties of materials using whispering gallery dielectric resonators: Experiments and perspectives of ultra-wideband characterization[J]. J Chem Phys, 2000, 112(5): 2308–2314.
- [24] KRUPKA J, Cwikla A, MROZOWSKI M, et al. High Q-factor microwave fabry-perot resonator with distributed bragg reflectors[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 52(9): 1443–1451.
- [25] 李雷, 颜涵, 陈湘明. 低损耗材料微波介电性能测试中识别 TE_{018} 模式的新方法[J]. 物理学报, 2020, 69(12): 128401.
LI Lei, YAN Han, CHEN Xiangming. A New method for identifying TE_{018} mode during microwave dielectric measurements of low-loss materials[J]. Acta Phys Sin (in Chinese), 2020, 69(12): 128401.
- [26] KAJFEZ D. Linear fractional curve fitting for measurement of high Q factors[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1994, 42(7): 1149–1153.
- [27] KAJFEZ D, CHEBOLU S, ABDUL-GAFFOOR M R. Uncertainty analysis of the transmission-type measurement of Q-factor[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(3): 367–371.
- [28] KAJFEZ D. Random and systematic uncertainties of reflection-type Q-factor measurement with network analyzer[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(2): 512–519.
- [29] LI L, CHEN X M. Effect of sample size on measurement reliability of microwave dielectric properties of low-loss materials by a resonant cavity method[J]. Ferroelectrics, 2012, 434(1): 37–43.
- [30] GUREVICH V, TAGANTSEV A. Intrinsic dielectric loss in crystals[J]. Adv Phys, 1991, 40(4): 719–767.
- [31] LI L, CHEN X M. Frequency-dependent Q_f Value of low-loss $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ ceramics at microwave frequencies[J]. Ceram Int, 2012, 38(8): 6831–6835.
- [32] LI L, CHEN X M. Frequency-dependent Q_f value of microwave dielectric ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2014, 97(10): 3041–3043.
- [33] DING Y H, LIU L, YANG Z J, et al. Structure and microwave dielectric characteristics of $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$ ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2022, 105(2): 1127–1135.
- [34] KRUPKA J, HUANG W T, TUNG M J. Complex permittivity measurements of low-loss microwave ceramics employing higher order quasi TE_{0mp} modes excited in a cylindrical dielectric sample[J]. Meas Sci Technol, 2005, 16(4): 1014–1020.
- [35] KAJFEZ D. Temperature characterization of dielectric-resonator

- materials[J]. J Eur Ceram Soc, 2001, 21(15): 2663–2667.
- [36] LI L, ZHU J Y, CHEN X M. Measurement error of temperature coefficient of resonant frequency for microwave dielectric materials by TE₀₁₈-mode resonant cavity method[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2016, 64(11): 3781–3786.
- [37] YANG S, LI L, CHEN X M. Temperature dependence of τ_f and its origin in MgTiO₃–CaTiO₃ microwave dielectric composites[J]. J Eur Ceram Soc, 2022, 42(13): 5718–5725.
- [38] NAGAI T, INUZUKA T, SUGIYAMA M. Contribution of dielectric constant to change in temperature coefficient of resonant frequency in (Ba_{1-x}Sr_x)(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Compounds[J]. Jpn J Appl Phys, 1992, 31(9B): 3132–3135.
- [39] NENASHEVA E A, MUDROLIUBOVA L P, KARTENKO N F. Microwave dielectric properties of ceramics based on CaTiO₃–LnMO₃ System (Ln–La, Nd; M–Al, Ga)[J]. J Eur Ceram Soc, 2003, 23(14): 2443–2448.
- [40] LI L, FANG Y, CHEN X M. Measurement of dielectric properties of Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃, Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb₂O₆ and BaTiO₃ ferroelectric ceramics at microwave frequencies[J]. J Am Ceram Soc, 2012, 95(3): 982–985.
- [41] JIA Y Q, LUO W K, LI L, et al. MSO₄ (M=Ca, Sr, Ba) microwave dielectric ceramics with low dielectric constant[J]. J Am Ceram Soc, 2023, 106(2): 1250–1259.
- [42] DAI S X H, HUANG R F, WILCOX D L. Use of titanates to achieve a temperature-stable low-temperature cofired ceramic dielectric for wireless applications[J]. J Am Ceram Soc, 2002, 85(4): 828–832.
- [43] KOLODIAZHNYI T, ANNINO G, SPREITZER M, et al. Development of Al₂O₃–TiO₂ composite ceramics for high-power millimeter-wave applications[J]. Acta Mater, 2009, 57(11): 3402–3409.
- [44] LI L, YANG S, WU S Y, et al. Nonlinear variation of resonant frequency with temperature and temperature-dependent τ_f in Al₂O₃–TiO₂ microwave dielectric composites[J]. Appl Phys Lett, 2021, 118(21): 212902.
- [45] LI L X, HE X R, YUE T, et al. L₂Ti_{0.85}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.15}O₃/MgTiO₃/L₂Ti_{0.85}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.15}O₃ tri-layer co-fired microwave dielectric ceramics: a strategy to suppress non-linear variation of resonant frequency with temperature and achieve a high Q value[J]. Appl Phys Lett, 2022, 120(22): 222901.
- [46] YANG S, JIA Y Q, LI L, et al. MgTiO₃–Ca_{1-x}Sm_{2x/3}TiO₃ (x=0.2–0.5) microwave dielectric composites with greatly improved temperature stability[J]. J Am Ceram Soc, 2023, 106(1): 456–465.