

介质谐振器的 微波测量

倪尔瑚 著



科学出版社
www.sciencep.com

介质谐振器的微波测量

倪尔瑚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在作者多年从事介质谐振器及其测试方法研究的基础上编著而成。全书共4章,主要内容包括介质谐振器、高介微波陶瓷及其基本应用,截止开腔中的介质谐振测量技术,截止闭腔中的介质谐振测量技术,耳语坑道模介质谐振测量技术,腔外微扰测量原理与技术,微波频率低端的谐振测量技术,微波下三次交叉调制失真率的测量等。本书所介绍的利用介质自身谐振的测量技术和介质自身无须谐振的测量技术,是新型电子元器件、通信部件、非金属材料诸领域的研究、开发、应用中必不可少的重要手段和技术。

本书可供从事电子-材料领域、通信-信息领域和电介质物理研究的科研、教学、开发、应用、测试和计量等工作的科技人员及大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

介质谐振器的微波测量 / 倪尔瑚著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-016611-6

I. 介… II. 倪… III. 陶瓷介质谐振器-微波测量 IV. TN62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 146067 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2006年3月第一次印刷 印张:10

印数:1—2 500 字数:190 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

本书主要反映我们从事介质谐振器方面的研究及所取得的成果,并对相关文献报道的研究成果进行了总结。其涉及材料、应用和测试三个方面。由于涉及的面广、内容丰富,且材料、应用方面都有不少论文、专著,故本书只着重叙述测试方法与技术方面。为了使读者对介质谐振器有一个较全面的了解,书中也极其扼要地介绍了什么是介质谐振器,以及当今常用的高介微波陶瓷、介质谐振器的组合和基本应用等。本书所介绍的测试方法主要是针对中、低损耗的高介微波材料,也称介质谐振器材料。由于被测的介质样品通常就是一个谐振子,所以它又称介质谐振器。书中将文献报道的绝大部分测量方法归结为截止空腔中的介质自身谐振测量技术,而将我们创立的介质自身无须谐振的方法称腔外微扰测量技术。腔外微扰法目前已达到能用同一样品、同一腔体在 $8.2\sim 40\text{GHz}$ 的离散频率下获得介电谱。此外,由于介质本身没有谐振,故腔外微扰法也同时适合于测量较大损耗甚至大损耗的介质。这个测试系统已开始应用。最后,书中还介绍了一些经改进后可沿用的还能方便地施加直流偏压的方法。因此,可以说本书是对《材料科学中的介电谱技术》(科学出版社,1999)一书中有关频域测量技术的补充和发展。

众所周知,信息功能陶瓷的微波响应能作为阐明材料的微结构、缺陷等与宏观性能关系的重要依据,也为新型电子元器件、通信部件等方面提供设计参数。由于新材料的相继问世和现有材料的不断改进、电子-信息系统的飞速发展,研究和创新材料微波性能评价技术与系统也在不断取得新的成果。作者期望,本书的问世将为电介质物理学、电子-材料及通信-信息的基础研究再提供一些人们便于采用的手段和技术,也为材料电磁学参数测试方法的进一步研究提供一些思路,以期共同促进实现微小型、轻便、稳定、安全可靠的微波系统及其模块化、多功能化,以帮助和带动微波集成向大面积发展,最终走上全面集成化。

在本书撰写过程中曾得到浙江大学、解放军总装备部、惠州市、惠州学院和桂林电子工业学院等有关部门的研究经费资助,以及有关领导的

全力支持和同事的大力合作;得到浙江大学的朱永花副教授、王艳华老师,杭州中国计量学院的徐江峰副教授,惠州学院的方振逵副教授、刘晓莉老师、凌家良老师、罗萍老师,以及桂林电子工业学院敖发良教授、李思敏教授、姜兴副教授的帮助和支持。在此,对上述部门、单位、领导、同事和朋友致以衷心感谢!

倪尔瑚

2005年10月

目 录

前言

第一章 介质谐振器	1
1.1 概述	1
1.1.1 历史背景	1
1.1.2 复介电常数	3
1.1.3 谐振频率的温度系数	4
1.1.4 介质谐振器的运作概念	5
1.1.5 介质谐振器的某些优点	6
1.2 常用的介质谐振器材料	8
1.2.1 微波陶瓷材料	8
1.2.2 常用陶瓷材料的电学性能	10
1.3 介质谐振器的基本应用	11
1.3.1 由介质谐振器构成的滤波器	11
1.3.2 有源器件中的介质谐振器	20
1.4 介质谐振器的微波测量方法	23
参考文献	27
第二章 截止空腔中的介质谐振测量技术	31
2.1 截止空腔中的介质谐振器	31
2.1.1 介电常数	31
2.1.2 介质损耗角正切	32
2.1.3 无载Q因子的测量	35
2.2 截止开腔中的介质谐振测量技术	45
2.2.1 截止开腔中的 TE_{0nr} 模介质谐振器	45
2.2.2 截止开腔中的 TE_{0ns} 模介质谐振器	52
2.3 截止闭腔中的介质谐振测量技术	59
2.3.1 截止闭腔中的 TE_{01s} 模及其他波模介质谐振器	59
2.3.2 对开式介质柱谐振器	64
2.3.3 TE_{01s} 模介质圆波导谐振器	65
2.4 耳语坑道模谐振测量技术	70
参考文献	77

第三章 腔外微扰测量原理与技术	81
3.1 基本概念	81
3.2 TE_{01n} 模谐振腔腔外微扰的基本理论	82
3.2.1 含介质腔外波导的输入阻抗	82
3.2.2 含介质腔外波导对谐振腔的微扰	83
3.3 腔外空波导的 TE_{01} 场是消逝波	85
3.3.1 微扰通式	85
3.3.2 强耦合下的电抗终端	88
3.3.3 强耦合下的似匹配终端	89
3.3.4 强耦合下的短路终端	90
3.3.5 弱耦合下的短路终端	91
3.3.6 介质电厚度的选择	92
3.3.7 两种终端的组合	96
3.4 含样品波导段的 TE_{01} 场——消逝波	98
3.5 腔外空波导的 TE_{01} 场——传播波	100
3.5.1 微扰通式	100
3.5.2 介质前表面与耦合面重合时的电抗终端	103
3.5.3 介质前表面低于耦合面时的短路终端	104
3.6 测量技术	106
3.6.1 概述	106
3.6.2 谐振腔和腔外波导	106
3.6.3 微波信号源和谐振探测单元	110
3.6.4 复介电常数的测量	112
3.6.5 温度系数的测量	115
3.7 结语	118
参考文献	119
第四章 其他测量技术	121
4.1 同轴线-集中电容谐振腔法	121
4.1.1 谐振腔的构成	121
4.1.2 测量介电常数	124
4.1.3 测量介质损耗角正切	125
4.1.4 介电频率谱的测量	126
4.2 同轴线-介质圆波导谐振腔法	127
4.2.1 谐振腔中不连续处的导纳	127
4.2.2 复介电常数的计算	131

4.3	TE_{01} 模短路圆波导驻波法	133
4.4	波导传输线内的介质谐振法	136
4.5	介质套筒谐振腔法	137
4.5.1	在金属空腔中的介质套筒谐振腔	137
4.5.2	测量例子	142
4.6	微波下三次交叉调制失真率的测量	145
4.6.1	介质中交叉调制失真的发生原理	145
4.6.2	微波下三次交叉调制失真率的测量	146
	参考文献	149

第一章 介质谐振器

1.1 概 述

1.1.1 历史背景

高品质的谐振器是众多微波电路和系统的关键功能元件^[1,2]。谐振器的 Q 因子在本质上制约着滤波器和振荡器的工作特性,对它们的稳定运行具有重要意义。在微波频段,金属谐振腔的 Q 因子正比于体积,这样在波导(或同轴)结构中为提高 Q 因子常需要增加其尺寸、质量和成本。介质谐振器的 Q 因子主要取决于介质损耗,其金属屏蔽罩的损耗只占很小部分,那里介质损耗还会随着材料研究的进展而不断改善,而金属损耗(除超导外)基本上是不会变的。目前介质谐振器已能够被制成与金属谐振腔有相同功能和基本上相同性能的元器件,但却具有体积小、质量轻和稳定性好的特点。低损耗介质谐振器的普及差不多与微波电路中的许多其他相关元器件(如表面声波和薄膜体声波谐振器、微波固态源、GaAs 族场效应管、微带线及其器件等)的小型化同时发生。这样,只要将它们组合起来,就能实现小型、轻便、稳定和安全可靠的微波系统。各方面的继续研究将可望带动微波无源元件集成和无源-有源元件集成向大面积发展,最后使各类元件均走上半导体元件走过的道路,即全面实现集成化。尽管这一问题的解决难度非常大,其复杂性和艰巨性远远大于半导体元器件的集成,但却已经在这个目标下获得一些可喜的进展。

在微波研究的早期,认为电磁波在电介质中传播会遇到很大的衰减。然而,早在 1920 年这个观点就被一些著名的科学家如 Lord Rayleigh、Sommerfeld、Bose、Debye 等所否定:介质构件能够引导电磁波,而这些波的场部分地延伸到周围空间^[3]。1935 年, Southworth 在申请的美国专利^[4]中有这样的陈述:由相对介电常数高于 1 的介质材料构成的棒能定向传播电磁波,这种介质波导可以由金红石(TiO_2)基陶瓷制成的圆柱体。

由于辐射损耗,介质波导常用于毫米波,这样电磁场能更多地被约束在介质内,而金属波导却显示出过分高的电导损耗。介质波导最值得关注的应用是多模光波导和单模光纤。现今光纤已成为通信工程中的主要导光介质。

“介质谐振器”这个术语首次出现在 1939 年,当时 Richtmyer^[5]证明:未金属化的介质圆环能够起微波谐振腔的作用,称为介质谐振器。然而,他的理论工作未能引起足够的关注,而实际上却被遗忘长达约 25 年之久。后来,在 20 世纪 60 年代,

Okaya、Barash^[6]在进行高介电常数材料(单晶 TiO_2)、顺磁共振和脉塞(受激辐射微波放大器)等的研究中,再次发现介质谐振现象,他们的论文第一次提供了介质谐振器的波模分析和腔体设计。可是由于金红石等高介电常数材料的温度稳定性太差,导致相当大的谐振频率漂移,所以尽管介质谐振器具有高 Q 和小尺寸等的优点,却仍然无法作为微波器件来使用。

在 20 世纪 60 年代中后期,Cohn 等^[7]首次完成了将介质谐振器的理论计算和实验测定延伸到滤波器,各向同性、介电常数为 100 数量级的金红石陶瓷被用于实验。但仍然是差的温度系数阻碍着实际元件的发展。陶瓷介质谐振器有实质性的突破发生在 20 世纪 70 年代:第一个温度稳定的低损耗钽-钛陶瓷被 Raytheon^[8]发现;用正、负温度系数材料复合而形成温度稳定的微波介质谐振器被 Konishi^[9]发表;不久,一个性能有改进的变形钽-钛系被 Bell 实验室^[10]发表。这些积极结果导致介质谐振器成为微波器件。然而,由于材料不足,没有商品可以买到。此后,一个主要的突破来自村田公司生产的 $(\text{Zr}, \text{Sn})\text{TiO}_4$ 陶瓷^[11],他们提供了温度系数在 $+10\text{ppm}/^\circ\text{C} \sim -12\text{ppm}^\text{①}/^\circ\text{C}$ 范围内可调节的制品,并把这些器件变成价格适中的商品。此后,介质谐振器的理论工作和应用飞速发展。如今,由介质谐振器构成的商品化电子元器件、组件,种类繁多,且很容易买到。

由此可见,介质谐振器(图 1.1)是一块高介电常数、低损耗的电介质材料(通常呈圆盘状),它起小型微波谐振腔的作用。对介质谐振器及其材料在介电性能方

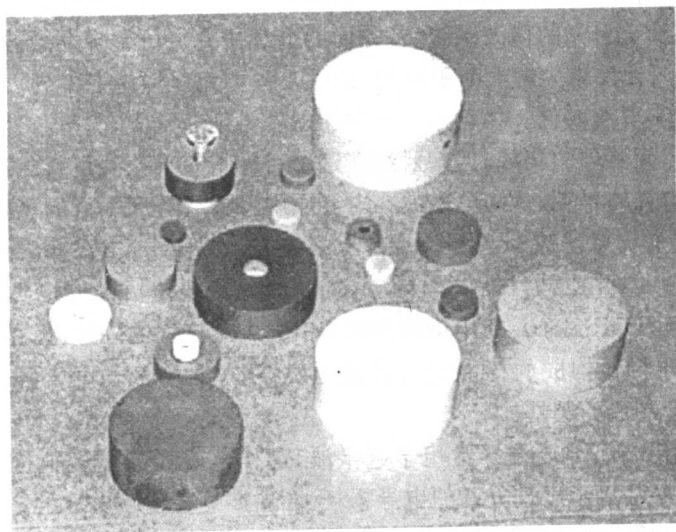


图 1.1 适用于微波各频段的典型介质谐振器

① $1\text{ppm} = 1 \times 10^{-6}$,下同。

面的基本要求是:① 相对介电常数 ϵ_r' 要高;② 损耗角正切 $\tan\delta$ 要低;③ 谐振频率的温度系数 τ_f 在零附近可调节。

1.1.2 复介电常数

我们知道, ϵ_r' 、 $\tan\delta$ 的联合是介质极化的表征,用以描写材料的介电性能,常用相对复介电常数 ϵ_r 来表示,即

$$\epsilon_r = \epsilon_r'(1 - j\tan\delta) = \epsilon_r'(1 - j1/Q_d) = \epsilon_r'(1 - j\epsilon_r'') \quad (1.1)$$

式中: Q_d 是材料的品质因数(Q 因子),也就是介质谐振器的无载 Q 因子; ϵ_r'' 是介质的相对损耗因子。

在微波频段使用的介质陶瓷和单晶,在室温下一般是非铁电性的离子晶体结构,其介电性能主要来自离子极化和电子极化。由于电子极化对介电性能贡献极少,故只需要考虑离子极化的作用。这样,我们可以把电场作用下的介质近似看成由约化质量为 m 、电荷为 e 、弹性常数为 β 、摩擦系数为 η 的全同线性振子。设作用在每个振子上的内电场波长比体系尺寸大得多。这样,在角频率为 ω 的该电场作用下,介质中的粒子运动可以看成是束缚电荷 e 被强迫偏离其平衡位置做位移运动,即产生介质极化,呈现复介电常数

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{Ne^2/m\epsilon_0}{(\omega_T^2 - \omega^2) + j2\omega\gamma} \quad (1.2)$$

式中: $\omega_T^2 = \omega_0^2 - Ne^2/(3m\epsilon_0)$ 是晶格振动横光学模的角频率,其中 $\omega_0 = (\beta/m)^{1/2}$ 为相邻离子间近程弹性力产生的无阻尼振子的角频率,第二项为远程洛伦兹电场力造成的影响; N 是振子的浓度; $\gamma = \eta/2m$ 是阻尼系数; ϵ_0 是真空的介电常数。

分开式(1.2)的实部和虚部,给出

$$\epsilon_r'(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{\omega_T^2 - \omega^2}{(\omega_T^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\gamma^2} \quad (1.3)$$

和

$$\epsilon_r''(\omega) = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{2\omega\gamma}{(\omega_T^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\gamma^2} \quad (1.4)$$

对于大多数晶体,频率 $f_T (= \omega_T/2\pi)$ 在 $10^{12} \sim 10^{13}$ Hz 的亚毫米波远红外频段,而广义微波的频率 f 约 $10^8 \sim 10^{11}$ Hz。对于中、低损耗介质,考虑到 $\omega_T^2 \gg \omega^2$ 后,从式(1.3)得到其微波分量为

$$\epsilon_r' = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega_T^2} \quad (1.5)$$

即在直到毫米波的微波频段范围内,介电常数是基本不变的,且与阻尼系数 γ 无关。从上述这个极其近似的全同线性振子模型可知,用选择弹性常数 β 低、约化质量 m 轻、振子浓度 N 高的材料,即设法合成高离子极化率和高离子浓度的介质,就可以提高 ϵ_r' 。然而,在选择实际配方时,这些因数是相互制约的。此外,低损耗的

铁电材料也许有一天能在微波频段出现。对于介质谐振器材料,还有式(1.3)中右边第二项远大于等于1,故得

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''(\omega)}{\epsilon_r'(\omega)} \approx \frac{2\omega\gamma}{\omega_T^2} \quad (1.6)$$

即 $\tan\delta$ 随频率升高成正比。式(1.6)也表明,就给定介质谐振器而言,有

$$Q_d f \approx \text{常数} \quad (1.7)$$

显然,式(1.6)和式(1.7)是极其近似的,但在一个较狭窄的微波频段内是一个很好的近似。此外也可以看出,要降低介质损耗、提高 Q 因子必须要减小阻尼系数 γ 。在完整的晶体中, γ 是由晶格振动的非协调项造成的;在多晶的陶瓷中,晶界、不纯物、晶格缺陷、副晶相、晶格中的离子置换、玻璃相、固溶体等都会成为 γ 增大或减少的原因。因此,在微波陶瓷制造中应采用高纯度原料和合理的配方,并以合理的工艺来烧成杂质低、晶格缺陷少、晶粒均匀、密度高的制品。此外还可以采用适当的离子置换(同价或异价)和选配合适的固溶体来进一步提高其性能。

1.1.3 谐振频率的温度系数

谐振频率的温度系数 τ_f ,是指介质谐振器的谐振频率 f 随温度 T 的变化。要使介质谐振器的 τ_f 在零附近,必须使材料介电常数的温度系数 τ_ϵ 较小。众所周知, τ_ϵ 与 τ_f 之间的关系为

$$\tau_\epsilon \approx -2(\tau_f - \alpha_l) \quad (1.8)$$

式中: α_l 是介质的线膨胀系数,对于普通的陶瓷接近于 10ppm/°C。从 $\tau_f = 0$ ppm/°C,得到 $\tau_\epsilon = -20$ ppm/°C。Harrop^[12]认为,介电常数 ϵ_r' 的温度特性取决于:①由于热膨胀使单位体积内离子数减少;②由于热膨胀使离子在电场下容易形变;③极化率 χ 的温度依存关系。如果将②归结到③,按克劳修斯-莫索缔方程,有

$$\tau_\epsilon = \frac{\epsilon_r'}{3} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial \chi}{\partial T} - 3\alpha_l \right) \quad (1.9)$$

对于高介电常数材料,忽略极化率 χ 随温度的变化后,有

$$\tau_\epsilon = -\alpha_l \epsilon_r' \quad (1.10)$$

另外,对于顺电相介质, ϵ_r' 的温度特性符合居里-外斯定律,有

$$\epsilon_r' = C/(T - T_C) \quad (1.11)$$

式中: C 是常数; T_C 是居里温度。从式(1.11)的导数得到介电常数的温度系数为

$$\tau_\epsilon = (-1/C)\epsilon_r' \quad (1.12)$$

比较式(1.10)和式(1.12)可知,线膨胀系数等于居里-外斯常数的倒数。从而可以认为式(1.11)也是式(1.10)的积分形式。陶瓷氧化物的居里-外斯常数值约为 10^5 K,这样高介电体的 τ_ϵ 均为大的负值。这显然与实际情况不相符,因为在微波频段已开发出 $\epsilon_r' = 20 \sim 100$, $\tau_f \approx 0$ 的不少介质。因此,不妨从晶格中的离子置换、介质中其他相的共存、物质的微小相变等方面来探索规律。

值得指出的是, τ_c 是 ϵ_r 温度曲线在各温度点的斜度, 它随温度而异。此外, 由于不同频段的介质极化机制是不同的, 所以 τ_c 还随频率而异。对于 τ_f 而言, 还要考虑固定介质谐振器的绝缘支柱和金属罩的膨胀、损耗、几何尺寸及它们间相对位置, 使这类外在的影响达到可忽略地小。

1.1.4 介质谐振器的运作概念

介质元件为什么能起谐振腔的作用呢? 这是因为借助于介质-空气界面, 电磁波在介质内部来回反射, 导致其能量在介质材料内部和周边的密集, 当电磁波密集区的波长为某一波模的整倍数半波长时, 就产生谐振, 构成谐振器件。

类似于金属壁腔, 在介质谐振器中也存在很多的谐振波模。最粗糙的近似是把介质谐振器视为金属壁(电壁)腔的对偶体, 即磁壁腔。众所周知, 在磁壁处界面, 电场的法向分量和磁场的切向分量为零, 即极近似地把介质谐振器的界面视为开路面。换句话说, 忽略了介质谐振器外围的电磁场。因而, 对于这样一个介质谐振器模型, 其场的分布和谐振频率可以被分析计算。

为改进这个模型, 首先要计及介质谐振器中的电磁场泄漏(这个泄漏场用波模的下标 δ 来表示)。考虑到介质谐振器谐振时界面外的电磁场随距离按指数衰减, 可引入该谐振波模的截止波导模型

(图 1.2) 来描述。即将介质谐振器的周侧视为磁壁, 平行两面视为磁壁截止波导; 这样在自由空间的介质谐振器, 当谐振时, 可以看成是: 在虚拟磁壁截止波导中的振子。这个模型给出 $TE_{01\delta}$ 模的谐振频率计算准确度约为 6%。接着介质谐振器的圆周磁壁被取消, 变成其两平行面以截止波导为负载的介质波导。这时, 谐振频率的计算

准确度进一步改善, 达到 1%~2%。在实际的介质谐振器结构中, 为了使电磁场辐射不导致 Q 因子的下降, 常需用金属壁的外壳, 或称截止腔体(波导)作为负载。在这些结构中, 谐振频率和电磁场分布的准确计算, 要采用电磁场边值问题的计算方法, 如 Rayleigh-Ritz 法^[13]、有限元法^[14]或模匹配技术^[15]等。

在更完善的模型中, 当采用模匹配计算方法时, 还引入附加因子来计及介质支柱、调谐片和微带基片等的影响。这样, 使具有各种负载的介质谐振器的谐振频率计算, 其准确度优于 1%。近年来, 三维的电磁场模拟程序已能对更复杂的结构进行计算。介质谐振器的外壳、调谐、耦合元件等都能精确模型化, 故能方便地获得准确的计算结果。这些软件的附加功能是绘制和显示电磁场分布、耗散功率等。

在介质谐振器中最常用的波模是: 圆柱腔的 $TE_{01\delta}$ 模、 $TM_{01\delta}$ 模、 $TM_{11\delta}$ 模、 $HE_{11\delta}$ 混合模、矩形腔的 $TE_{11\delta}$ 模和同轴腔的 TEM 模。最通常考虑的基模有 $TE_{01\delta}$ 模、

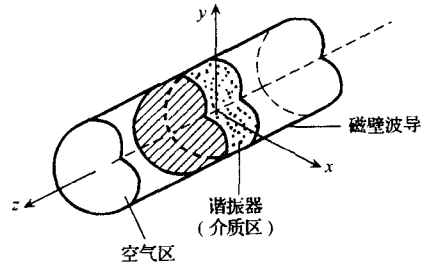


图 1.2 用磁壁波导来描述介质谐振器

TM₀₁₈模和TEM模。其中只有TEM模能制成全介质化的元器件,且具有最小的尺寸,其体积可以做到不足金属腔的1/20。如果采用阶梯式结构还能进一步减小尺寸,以及改善寄生谐振特性。然而,这个模有最低的无载Q因子。其他各种波模能降低介质谐振器组合件的尺寸为普通金属腔的1/3~1/5。就截止闭腔中的介质谐振器而言,对于很低的介质直径/长度,HE₁₁₈模有最低的谐振频率,是金属屏蔽罩内圆柱介质谐振器的最低基模(图1.3),常被用于高性能双模滤波器、方向滤波器和振荡器。对于大部分其他的介质直径/长度,TE₀₁₈模有最低的谐振频率,并有最高的无载Q因子,故是最普遍使用的,特别是构成单模滤波器和振荡器。TM模常被用于腔体组合器件、滤波器和低频滤波器。图1.3是金属屏蔽罩内介质谐振器的波模图。一些波模的电磁场分布如图1.4所示。

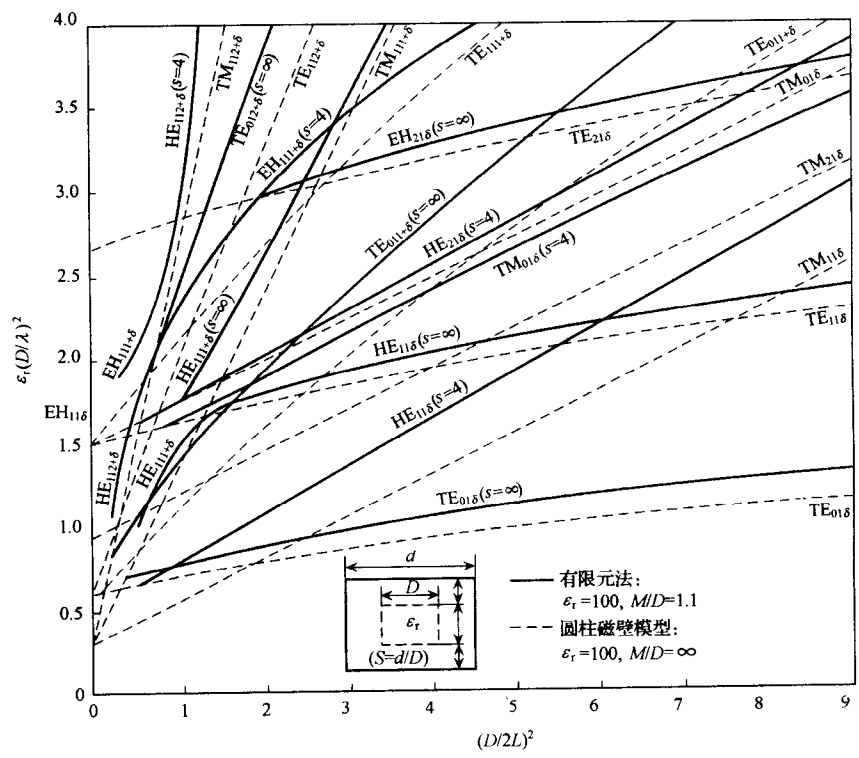


图 1.3 金属屏蔽罩内介质谐振器的波模图

1.1.5 介质谐振器的某些优点

介质谐振器还有一个重要的优点是它容易与常用的传输线,如波导、微带线耦合。例如,如图1.5(a)所示,一个圆盘形的TE₀₁₈模介质谐振器,以其轴心垂直于波导的狭边,插入矩形波导,馈入波导的电磁波以磁场激励介质(磁耦合),使其谐振,形成带阻滤波器。这个磁耦合的强度是可以调节的:用向着或背着波导狭边旋转或

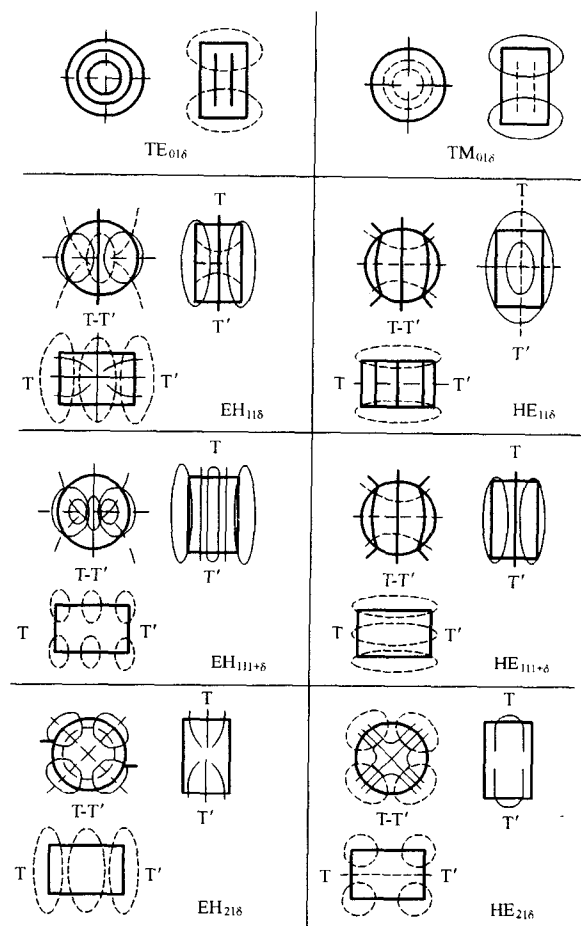


图 1.4 某些波模的电磁场分布

移动介质,就能产生增强或减弱其耦合强度。在微带线中,介质谐振器同样可以用磁耦合来形成一个带阻滤波器[图 1.5(b)],这时磁耦合强度可以这样调节:移动介质谐振器,使其离开或靠近微带线;这个移动也可以借助于微带线上的一个专门

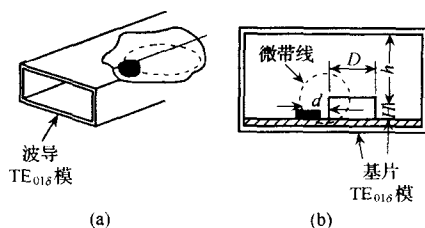


图 1.5 $TE_{01\delta}$ 模介质谐振器的磁耦合
(a)与波导; (b)与微带线

支架来实现。

此外,在一些布局中,介质谐振器的谐振频率是可以调节的,就一个非常实际的情况而言,还可以用特定的公式来计算^[16]。如果在介质谐振器的上端近邻空间安装金属螺钉或金属片去微扰磁场,可向高端调节谐振频率;用提升介质谐振器使其稍微离开接地板去产生电磁波的泄漏,则实现向低端调节谐振频率。这个结构的频率调节范围的典型值约为 10%。然而,必须格外当心靠近介质谐振器的金属片的引入,应不降低其 Q 因子和不改变其谐振频率的温度特性。

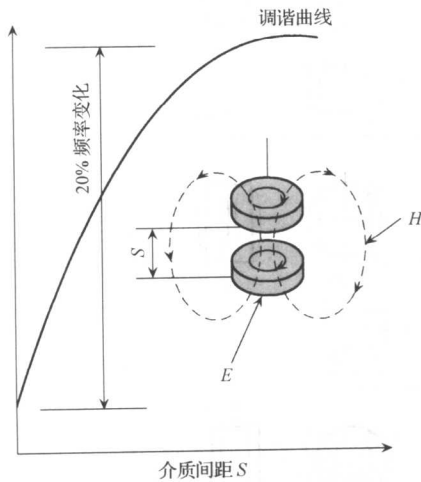


图 1.6 双介质谐振器及其调谐曲线

另外,彼此分开的双介质平行结构的谐振器, also 具有很好的频率调谐特性。如图 1.6 所示,将陶瓷圆盘对开为两、与其间隔 s 一起构成一个三层复合的圆柱介质谐振器,调节其空气间隔 S ,可获得非常宽广的线性频率调谐范围,而又不降低其 Q 因子。

与金属谐振腔相比,介质谐振器还具有容易整形的优点。虽然典型的介质谐振器是圆盘状,但可按需要进行加工、整修。例如,为了调谐,可以刻槽、切口、磨薄;为方便固定,可以附加凸齿、在零电场处打孔;为抑制寄生模,可以在不同的位置打孔;此外还可以制成多层介质谐振器和复

合介质谐振器等。

1.2 常用的介质谐振器材料

1.2.1 微波陶瓷材料

表 1.1 给出当前微波应用中有代表性的陶瓷材料。

表 1.1 常用的介质谐振器材料及其性能

材料组分	ϵ_r	$Q \times f/\text{GHz}$	$\tau_f/(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$	参考文献
$\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$	21	55 000	$+10 \sim -10$	[11]
$\text{Ba}(\text{Sn}, \text{Mg}, \text{Ta})\text{O}_3$	25	200 000	$+5 \sim -5$	[28]
$\text{Ba}(\text{Zn}, \text{Ta})\text{O}_3$	30	168 000	$+5 \sim -5$	[29]
$\text{Ba}(\text{Zr}, \text{Zn}, \text{Ta})\text{O}_3$	30	100 000	$+5 \sim -5$	[30]
$(\text{Zr}, \text{Sn})\text{TiO}_4$	38	50 000	$+5 \sim -5$	[23]
$\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$	40	32 000	$+10 \sim +2$	[18]
$\text{BaO-pbO-Nd}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	90	5000	$+10 \sim -10$	[23]

① $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ 系陶瓷材料,是由 MgTiO_3 ($\tau_f = -45 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 和 CaTiO_3 ($\tau_f = +800 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 的混合物或固溶体 $(\text{Mg,Ca})\text{TiO}_3$ 组成。近似地,材料的 ϵ_r 和 τ_f 值可以按每一组分性质用体积分数加权的数学平均值来预估。在 MgTiO_3 的制备工艺和微波性能的研究中发现^[17],当其组成与化学计量稍有偏差时,材料有最小的微波损耗。这个偏差为 $\text{MgO}/\text{TiO}_2 = 1.01 \sim 1.02$,而进一步加入 CaO ,可以补偿温度系数,并提高介电常数。研究表明,当 $\text{CaO}/\text{TiO}_2 = 4.2\text{mol}\%$ 时,可获得 $\tau_f \approx 0$ 的陶瓷材料,最佳烧结温度为 1400°C 。该材料的分子式是 $(\text{Mg}_{0.95}\text{Ca}_{0.05})\text{TiO}_3$,调节 Ca 的含量,可以使 τ_f 在零附近变化。该配方的唯一缺点是介电常数($\epsilon_r = 21$)偏低。

② $\text{BaTi}_4\text{O}_9/\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷。 BaO-TiO_2 系有十分复杂的相图,随着组分变化,有各种各样的性质。在富钛-钡化合物中有两个微波性能优异的材料^[18],就是大家熟知的 BaTi_4O_9 和 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷。前者的谐振频率温度系数 $\tau_f \approx 15\text{ppm}/^\circ\text{C}$,后者 $\tau_f \approx 2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。因而 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 可以用来制造介质谐振器;但该材料对制造工艺有过于严格的要求。如果在 BaTi_4O_9 中添加 WO_3 ^[19],则生成 BaWO_4 ($\tau_f = -33\text{ppm}/^\circ\text{C}$) 和 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$;当 WO_3 达到 0.11mol 时, BaTi_4O_9 组分消失,得到 $\tau_f \approx 0$ 的 $\text{BaO-4TiO}_2\cdot 0.1\text{WO}_3$ 微波陶瓷。此外,若利用少量 Zr 置换 Ti 引起 τ_f 的稍微降低和易于生成 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 的特性,再用少量的 Sr 置换 Ba ,也可以获得 $\tau_f \approx 0$ 的 $\text{BaTi}_4\text{O}_9/\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷^[20,21]。在频率 10.5GHz ,温度在 $20 \sim 50^\circ\text{C}$ 时,测得陶瓷 $(\text{Ba}_{0.975}\text{Sr}_{0.025})\text{O-4}(\text{Ti}_{0.94}\text{Zr}_{0.06})\text{O}_2$ 的 $\tau_f = 9.2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 、 $(\text{Ba}_{0.975}\text{Sr}_{0.025})\text{O-4.5}(\text{Ti}_{0.94}\text{Zr}_{0.06})\text{O}_2$ 的 $\tau_f = -5.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 和 $(\text{Ba}_{0.975}\text{Sr}_{0.025})\text{O-4.3}(\text{Ti}_{0.94}\text{Zr}_{0.06})\text{O}_2$ 的 $\tau_f = 1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。后者陶瓷的性质近似符合体积分数加和法,即 $\tau_f = \sum \nu_i \tau_{fi}$ (ν_i 是各组分的体积分数)。文献[22]还对在 $\text{BaTi}_4\text{O}_9/\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 基陶瓷中添加 $\text{ZnO}/\text{Me}_2\text{O}_5$ ($\text{Me} = \text{Ta}, \text{Nb}$) 而引起其组分和电学性能变化进行详尽的报道,以期该类陶瓷获得更广泛的应用。

③ $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 陶瓷有高的 Q 因子和好的温度稳定性^[21,23], ZnO 是最理想的烧结促进剂,最佳掺入量为 1.5% (质量分数)。微调 Sn 的含量可实现 τ_f 在 $-10\text{ppm}/^\circ\text{C} \sim +10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 间的变化,其调节比例为 $\text{Sn}/\tau_f \approx 7 \times 10^{-3} (\text{mol} \cdot ^\circ\text{C})/\text{ppm}$ 。 $\text{Zr}_x\text{Sn}_y\text{Ti}_z\text{O}_4$ ($z+y+z=4$) 陶瓷的相图发表于 1981 年^[24]。在 $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 陶瓷中,施主离子(Ta^{5+})和受主离子(Fe^{3+})的作用被研究^[25],显示出在微波频段施主能降低 $\tan\delta$ 。

④ $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ 家族是特别高 Q 因子的一类材料。对 $\text{Ba}(\text{Zn,Ta})\text{O}_3\text{-Ba}(\text{Zn,Nb})\text{O}_3$ 陶瓷研究发表于 1977 年^[26]。随后,许多学者对这类复合钙钛矿型结构的材料进行研究^[27~30]。其中, $\text{Ba}(\text{Zn,Ta})\text{O}_3$ 和 $\text{Ba}(\text{Mg,Ta})\text{O}_3$ 是最有希望去获得 Q 因子高于 20 000 (在 10GHz) 的材料,因而在频率高于 10GHz 得到应用。

⑤ $(\text{Ba,Pb})\text{O-Nd}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 系陶瓷有高介电常数($\epsilon_r \approx 90$)的性能^[23,31],在微波