

谐振腔体外微扰及应用研究^{*}

Study on the Perturbation and its Application to the Cylindrical Cavity

倪祖荣 吕文选

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

NI Zurong, LU Wenxuan

(Department of Physics Xiamen University, Xiamen 361005)

【摘要】 本文分析圆柱 TE_{011} 模端盖对称隙缝特性。在隙缝辐射较小的条件下, 提出适于损耗小, 厚度薄 (1mm 左右) 的片状材料腔外微扰的近似计算方法, 测得聚四氟乙烯、聚氯乙烯、纯陶瓷片等复介电常数与准确值相当吻合的结果。测得相同厚度的片状半导体材料电阻率 $\geq 2\Omega \cdot \text{cm}$, 与 $1/Q_L$ 有线性关系, 与提出的近似方法所预期结果一致。理论分析和实验表明, 应用圆柱 TE_{011} 模端盖对称隙缝可实现无接触、高精度、多功能测量片状材料的参数, 且预期可用于二维测量。

关键词: 圆柱腔, 微扰法, 多参数测量

Abstract The characteristics of symmetric slots on the top-cover of TE_{011} -mode cylindrical cavity are analyzed in this paper. The approximate calculating method is proposed for the low loss and thin flake material perturbation outside of the cavity. The measured complex permittivities of teflon, polyvinyl chloride (PVC), pure ceramic flake are in good agreements with the standard data. The linear relation between $1/Q_L$ of the cavity and the conductivity of the semiconductor slice material with the same thickness agrees to the anticipation of the approximate calculating method. The theoretical analysis and experimental results show that contactless, high precision, multifunction parameters measurement of flake material are realized by using the slots of port-cover. The two-dimensional measurements are also realized by this method.

Key terms Cylindrical cavity, Perturbation method, Multiparameter measurement

一、引言

众所周知, 微波腔体可以用于电、磁介质参数, 电子自旋共振的检测, 还可用于湿度、厚度、温度、半导体少数载流子寿命等非电量检测^[1-3]。被测介质一般放入腔体中, 也可放在开有孔-

* 收稿日期: 1999-11-01; 定稿日期: 2000-01-10 福建省自然科学基金资助项目。

缝的腔壁外。因在腔外微扰较为复杂,应用研究相对较少。近年我们对腔外微扰应用及有关理论进行了一些研究,在测量片状小损耗介质参数、半导体材料的电导率方面取得一定成果,现综述如下。

二、腔体模式的选择

测量快捷方便、灵敏度高、抗干扰能力强、多功能是近代测量技术的要求,我们选用 TE_{011} 模圆柱腔作为传感器,其突出优点为:

1. 品质因数 (Q 值)高,测量分辨率高、灵敏度高。可以导得介电常数 χ 的测量分辨率与有载 Q_c 值的关系为^[1]

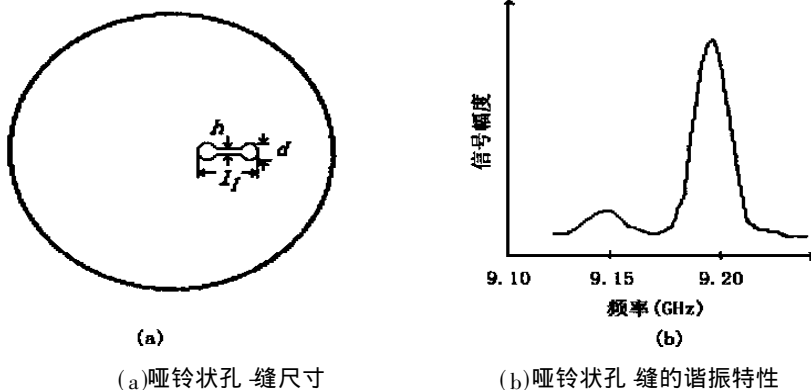
$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = - \frac{1}{2Q_c A} \frac{V W_f}{V_s \Delta f} \quad (1)$$

式中 Q_c 为腔体有载品质因数, A 为与腔体及隙缝尺寸有关的参数, V 为腔体体积, V_s 为样品体积, Δf 为谐振 3dB 带宽的半宽度, W_f 为介质介电常数变化 $\Delta\chi$ 所引起的谐振频偏

2. TE_{011} 模电磁场是圆对称的,腔内壁和端盖电流均只有圆周电流 J_h ,腔盖可以与圆柱不接触,可用对称激励和端盖圆柱间绝缘的方法抑制其它模式的谐振,而且更换端盖极为方便,可用开有不同孔、缝尺寸的端盖测量不同样品的参量。

二、端盖孔、缝特性

应用圆柱 TE_{011} 模腔处微扰,在端盖开孔、缝较为方便。我们对图 1 所示端盖哑铃状孔、缝或隙缝特性进行了研究,有如下结果。



(a) 哑铃状孔、缝尺寸

(b) 哑铃状孔、缝的谐振特性

图 1 哑铃状孔、缝及其谐振特性

1. 观察谐振腔和哑铃状孔、缝两者相互耦合的谐振曲线图 1(b),低谐振峰是哑铃状孔、缝谐振曲线,高峰为谐振腔的谐振曲线。用准静态近似方法计算哑铃状谐振器的谐振频率,计算值 $f = 9.05\text{GHz}$,实测值为 $f = 9.15\text{GHz}$,两者较为吻合^[4]。近似计算的思路是,由于两孔均使磁场外泄,增加磁场空间,因此两孔的电感应视为串联,隙缝视为电容,产生隙缝电场的原因是 J_h 被切断, J_h 沿径向按一阶贝塞尔函数 J_1 分布,这样将不断满足孔、缝两端的边界条件,一级近似时可以用正弦函数代替 J_1 ,以满足电场的边界条件,实验证实此思路是合理的。从场的观

点分析,圆柱 TE_{011} 模端盖的径向隙缝均具有谐振特性,因隙缝有驻波电场,且有腔内表面处的磁场外泄,因此可用 LC 谐振电路等效。

2. 耦合系统

实验测得两个对称哑铃状孔缝比单个同样尺寸哑铃状孔缝与腔体的耦合系数大得多,两者差别在一个数量级以上,其原因是,圆柱 TE_{011} 模场结构具有圆对称性,对任意中心纵轴的纵截面,场是镜像对称的,对称的隙缝(或孔缝)与 TE_{011} 模场具有相同的对称性,因此相互耦合比单个隙缝强。为使测量具有、高灵敏度和较宽的量程,应开两个对称的孔缝。

3. 改变孔缝尺寸,可以调整哑铃状谐振器与 TE_{011} 模之间的耦合度和两者的谐振频率差。耦合度增大,辐射增大,品质因数降低,测量易受周围环境干扰,且精度下降。应根据测量需要,选取合适耦合度,一般取 10^{-3} 左右^[5]。在宽量程测量时,哑铃状谐振器的谐振频率应与 TE_{011} 模谐振频率有较大的间距,因样品参数变化对两者谐振频率影响不同,如使两者谐振频率接近,耦合系数增大,则此时耦合系数是样品参数的函数,数据难于处理。

四、腔外微扰的近似计算

根据腔体微扰理论可以求得:

$$\frac{f - f_0}{f} = - \frac{(X_r - 1) \int_{V_s} \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV}{\int_V \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV}, \quad \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} = \frac{X_r \int_{V_s} \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV}{\int_V \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV} \quad (2)$$

其中 f_0, f 分别为介质微扰前后的谐振频率, Q_0, Q 为介质微扰前后的品质因数, X_r, X_r' 为介质介电常数的损耗系数, \vec{E}_0, \vec{E} 为介质微扰前后的电场, V, V_s 为腔体和样品的体积。上面公式适用于腔体内微扰的计算。现探讨腔外微扰的近似计算问题。圆柱 TE_{011} 模腔的径向隙缝是辐射隙缝,如计算辐射的存在,问题是复杂的。对电导率高的样品,因接近金属特性,样品微扰将严重干扰隙缝处的场,计算也是困难的,对于高损耗的介质,其等效电导率 $e = kX_r X$ 较高,计算同样会有困难。因此作两点假定:

1. 端盖开隙缝后, Q 值下降少,隙缝辐射可以忽略
2. 微扰介质电导率或损耗系数不高,样品微扰对隙缝处的电场干扰不大

据此,式(2)可改写为

$$\frac{f - f_0}{f} = - \frac{(X_r - 1) \int_{V_s} \vec{E}_{0s} \cdot \vec{E}_s^* dV}{\int_V \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV}, \quad \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} = \frac{X_r \int_{V_s} \vec{E}_{0s} \cdot \vec{E}_s^* dV}{\int_V \vec{E}_0 \cdot \vec{E}^* dV} \quad (3)$$

式中 $\vec{E}_{0s}, \vec{E}_s^*$ 是介质微扰前后隙缝表面处的电场。对窄的隙缝,可近似认为 \vec{E}_{0s} 平行于端面,片状材料微扰时,可近似认为 $\vec{E}_s = \vec{E}_{0s}$,则式(3)可改写为

$$\frac{f - f_0}{f} = - \frac{(X_r - 1) \int_{V_s} |\vec{E}_{0s}|^2 dV}{\int_V |\vec{E}_0|^2 dV}, \quad \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} = \frac{X_r \int_{V_s} |\vec{E}_{0s}|^2 dV}{\int_V |\vec{E}_0|^2 dV} \quad (4)$$

式(4)中 V_s 应为受表面电场作用的样品体积, \vec{E}_{0s} 是由切断 TE_{011} 模的 J_h 产生,数值上 $J_h = H_r$,

圆柱波导的波阻抗为

$$Z_{TE} = \frac{E_h}{H_r} = \frac{Z_{TEM}}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (5)$$

上式的比值关系对圆柱式谐振腔同样适用,可认为 $E_h = E_{0s}$,从上式就可由隙缝处的内表面 H_r 计得 E_{0s} 。近似计算时 E_{0s} 的径向分布函数 J_1 用正弦函数近似以满足边界条件,这点已在前面叙述。如被测样品厚度 d 小,且损耗不大,可认为在样品中的场是均匀的,则由式(4)得

$$\frac{f - f_0}{f} = - (X_r - 1) \frac{d}{A}, \quad \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = 2X_r \frac{d}{A} \quad (6)$$

根据上述的基本思路,我们用聚四氟乙烯、聚氯乙烯、纤维板、三氧化二铝 (Al_2O_3) 片状材料为样品,应用开有哑铃状孔缝的端盖对样品所引起频偏值和 Q 值变化进行测量,并根据测量值计算 X_r 、 $t_g W$, 计算值与标准值较为吻合^[5], 数据如表 1 所示。在一定的厚度范围内,频偏值和厚度的变化呈线性关系,而且对于介电常数较小,损耗较小的材料,成线性关系的厚度范围更大,如聚四氟乙烯线性厚度 $\leq 2.0\text{mm}$,聚氯乙烯 $\leq 1.0\text{mm}$ 。当厚度增大时,应考虑隙缝处场随距离增加而减弱和场在样品中的衰减情况,频偏值的变化随厚度变化将趋缓

表 1 计算值与标准值

		聚四氟乙烯	聚氯乙烯	纤维板	陶瓷片 Al_2O_3
$\Delta f/d$ (MHz/mm)		1.91	3.52	7.73	14.76
X_r	标准值	1.95~2.1	2.71	5.36	8.0~9.0*
	计算值	2.00	2.83	5.00	8.60
$t_g W$	标准值	4.0×10^{-4}	15×10^{-4}	-	-
	计算值	4.3×10^{-4}	12×10^{-4}	-	-

* 低频测量值, ** 纯度高, X_r 值大

如测量半导体的电导率,则式(4)改写为

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = \frac{e \int_{V_s} |\vec{E}_{0s}|^2 dV}{2cf_0 X_0 \int_{V_s} |\vec{E}_0|^2 dV} \quad (7)$$

式中 e 为被测样品电导率。对较高电阻率 ($\geq 2\Omega \cdot \text{cm}$) 和较薄样品 ($\leq 1\text{mm}$), 在样品中的 E_{0s} 可近似认为不变,则式(7)可改写为

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = kd^e, \quad k = \frac{1}{2cf_0 X_0} \frac{\int_{V_s} |\vec{E}_{0s}|^2 dS}{\int_{V_s} |\vec{E}_0|^2 dV} \quad (8)$$

分子中的 S 可近似认为是隙缝的面积。当样品厚度 d 不变,则 $1/Q - 1/Q_0$ 与 e 应有线性关系,当 e 不变, $1/Q - 1/Q_0$ 与 d 应有线性关系。应用长 6.74mm, 宽 1.2mm 的隙缝实测两组样品,用计算机自动直接测量后拟合的方法测量 Q 的变化值,结果如图 2 所示,由图得出,对相同厚度样品,当电阻率 $\geq 2\Omega \cdot \text{cm}$, Q 值变化与 e 有很好的线性关系,拟合系数 $R \geq 0.982$ 。由微扰公式计算 $k = 5.25 \times 10^2$, 由 $500\mu\text{m}$ 实验曲线计得 $k = 4.80 \times 10^2$, 误差为 8%, 由 $640\mu\text{m}$ 实验曲线算得 $k = 5.3 \times 10^2$, 误差为 1%, 两者吻合较好。

有一样品的电阻率 $d = 1. \Omega \cdot \text{cm}$, 其实验点偏离线性关系较大。计算其在工作频率下的趋肤深度为 0.54mm , 小于样品的厚度 0.64mm , 实验还观察到此样品微扰时的腔体谐振频率比大电阻率样品的高。这些结果表明, 样品已接近金属特性, 样品微扰已较严重干扰隙缝处的电磁场, 上述的近似处理方法不能应用。

五、结 束 语

综上所述理论和实验结果, 应用圆柱 $T_{E_{01}}$ 模端盖对称隙缝 (或哑铃状孔缝) 的微扰, 可以高精度无接触测量片状小损耗介质复介电常数、半导体材料电阻率。由于样品可以在端盖上二维平移, 还可用于二维参量的测量。

参 考 文 献

- [1] 吕文选. 微波腔体微扰方法测量非电量技术. 固体电子学研究与进展, 1990; 10(2): 211~216.
- [2] 吕文选等. 微波腔体在工业检测中的应用. 微波学报, 1995; 11(3): 228~235.
- [3] БУ Ракон А.В., Я кубеня С.Н., Янченко А.М. Прибор для бесконтактно д измерения времени жизни неравновесных носителей заряда. Приблвыц Техника Эксперимента, 1985; 4: 226.
- [4] 郑绍宽等. 圆柱腔 $T_{E_{01}}$ 模端盖哑铃状孔缝特性及其应用. 厦门大学学报(自然科学版), 1997; 36(6): 847~851.
- [5] 倪祖荣等. Research on the measurement of

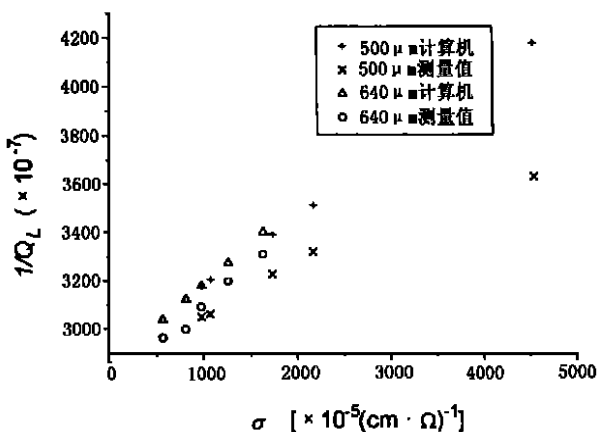


图 2 $1/Q_L$ 和 σ 的关系

the permittivity by cylinder cavity with dumbbell-sized slots on its port-cover. 电子测量与仪器学报, 1997; 11(增刊): 254~258.

吕文选 教授, 1958年 8月毕业于厦门大学物理系半导体物理专业, 60, 10-62, 10在苏联基辅大学无线电物理系进修, 回国后一直在厦门大学物理系任教, 长期从事微波和电子自旋共振的教学和研究工作, 曾担任中国电子学会非电量电测分会学术部主任, 省电子学会常务理事, 省物理学会常务理事。

倪祖荣 讲师, 1994年本科毕业于厦门大学物理系无线电物理专业, 后保送至该专业攻读硕士学位, 硕士期间完成“用微波方法测量片状介质及半导体材料参数的研究”的论文, 1997年留校任教至今。

(上接第 304页)

- [12] C. F. Smith, A. F. Peterson. R. Mittra. The biconjugate gradient method for electromagnetic scattering, IEEE Trans. AP, 1990; 38(6): 938~940.

杨 峰 1962年出生. 1983年, 1995年和 1998年分别获工学学士、硕士和博士学位. 1983年至 1992年在航天部南海机电厂工作, 现在电子科技大学从事教学和科研工作. 主要研究兴趣为计算电磁学、面

天线、电磁散射与逆散射和地球物理测井数值方法的研究. 曾获得科技进步一等奖和部科技进步三等奖各一次, 在国内外科技期刊发表学术论文十余篇。

聂在平 1946年出生. 电子科技大学副校长、电磁场与微波工程系教授, 博士生导师. 主要研究领域为复杂非均匀介质中的场与波、电磁散射与逆散射、天线理论、计算电磁学等. 近年来主持完成十余项科研课题, 先后获电子工业部、国家教委和四川科技进步奖多项, 在国内外发表学术论文 140余篇。