

TM_{0n0}モード空洞共振器摂動法による マイクロ波帯における誘電率の測定

キーワード：誘電率、誘電正接、マイクロ波、空洞共振器

はじめに

第5世代移動通信システムに代表される高速無線通信や高度道路交通システムに係る技術開発競争の激化を背景として、電子回路基板等に使用される誘電体材料の分野でも、マイクロ波帯において低損失な材料の開発が活発に行われています。

このような低損失誘電体材料の特性評価には、損失に対し鋭敏に応答する測定系が必要であることから、高いQ値(Quality factor: 共振の鋭さ)を有する共振系が用いられます。

本稿では、1 GHz~20 GHzのマイクロ波帯において10⁻⁴程度までの誘電正接を測定できるTM_{0n0}モード空洞共振器を用いた誘電率の測定方法を解説します。

TM_{0n0}モード空洞共振器

誘電率測定用空洞共振器(株式会社関東電子応用開発製、5.8 GHz、TM₀₂₀モード)の外観を図1に示します。

誘電率測定用TM_{0n0}モード空洞共振器は、金属円筒の両端を金属平板で塞ぎ、上底面の中心に試料挿入孔を設けた構造となっています。試料挿入孔には、高いカットオフ周波数をもつ円形導波管が取り付けられており、電磁波の漏洩によるQ値の低下を防いでいます。

側面にある2つの同軸コネクタは、空洞共振器と疎結合された励振線に接続されており、高周波信号の入力および出力端子として使用されます。

ここで、本測定法で用いられるTM_{0n0}モードについて述べます。

「モード(姿態)」は導波管や共振器内の電磁界分布を意味する用語で、TM(Transverse Magnetic)モードは円筒の中心軸方向の磁界成分 H_z がなく、電界成分 E_z のみであること、1番目の添字0は電界 E_z が円筒対称であること、2番目の添字nは電界 E_z が円筒の半径方向にn個の節をもつこと、3番目の添字0は電界 E_z が円筒の中心軸方向に変化しな

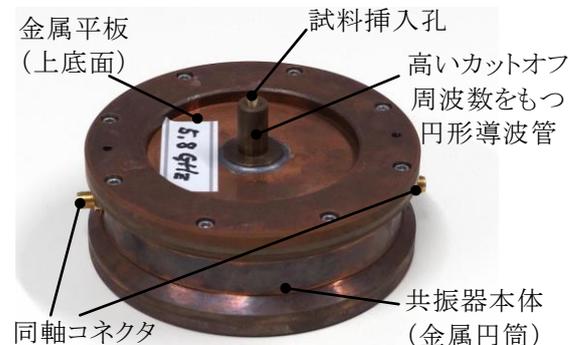
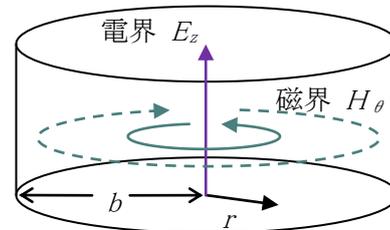
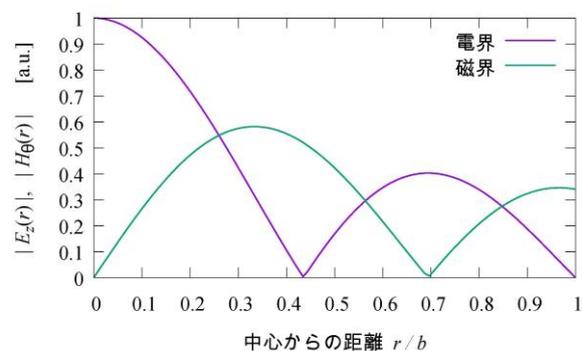


図1 誘電率測定用空洞共振器の外観



(a) 電界および磁界の方向



(b) 電界強度 $|E_z(r)|$ および磁界強度 $|H_\theta(r)|$ の分布

図2 空洞共振器内部の電界と磁界(TM₀₂₀モード)

いことを意味します。

ここで、TM₀₂₀モードで共振する半径 b の空洞共振器内の電界および磁界の模式図を図2(a)に示します。また、中心軸からの距離 r を b で規格化した値 r/b を横軸に、電界強度 $|E_z(r)|$ および磁界強度 $|H_\theta(r)|$ を縦軸にとった電磁界強度分布を図2(b)に示します。

図2(b)に示したように、中心軸上($r/b = 0$)で電

界強度が最大となり、磁界強度はゼロとなります。このことは、試料を共振器の中心軸付近に挿入すれば、試料の透磁率(磁界に対する物質の応答)にほとんど影響されることなく、誘電率(電界に対する物質の応答)を測定できることを意味します。これは、本測定法の利点の一つです。

誘電率の測定

誘電率の測定は、ネットワークアナライザのポート1-ポート2間に空洞共振器を接続し、試料未挿入時と試料挿入時のそれぞれについて共振特性を計測することで行います。

円筒空洞の断面積を S 、試料の断面積を s 、試料未挿入時の共振周波数および Q 値を f_0 および Q_0 、試料挿入時の共振周波数および Q 値を f_s および Q_s とします。また、試料の挿入により空洞共振器内の電磁界分布がわずかしか変化しないと仮定したとき、複素比誘電率の実部 ϵ_r' および虚部 ϵ_r'' は次の(1)式および(2)式の摂動公式で近似されます。

$$\epsilon_r' = 1 + \frac{S}{\alpha_n s} \cdot \frac{f_0 - f_s}{f_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{s}{2\alpha_n S} \cdot \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (2)$$

ただし、 $\alpha_n = 1/\{2J_n^2(j_{0n})\}$ 、 $J_n(x)$ は第1種 n 次ベッセル関数、 j_{0n} は第1種0次ベッセル関数の n 番目のゼロ点[$J_0(x) = 0$ となる x]です。

表1に1から5までの n に対する α_n の値、および、 TM_{0n0} モードの共振周波数を TM_{010} モードの共振周波数で規格化した値 ν_n を示します。

共振周波数 f_0 、 f_s および Q 値 Q_0 、 Q_s の算出は、高精度な計算アルゴリズムが実装された製造元(株式会社関東電子応用開発)提供の計測ソフトウェアにより行っています。

表2に、弊所(和泉センター)が保有する TM_{0n0} モード空洞共振器の一覧を各空洞共振器の標準的な共振周波数、対応する共振モード、および試料挿入孔の直径とともに示します。

測定例

固体ではなく、液体や粉体の誘電率を測定する場合には、誘電損失の小さな管状の容器に試料を充填して計測します。この場合、試料が入っていない

表1 α_n および ν_n の値($n = 1 \sim 5$)

n	α_n	ν_n
1	1.85519	1
2	4.31853	2.29542
3	6.78552	3.59848
4	9.25282	4.90328
5	11.7202	6.20873

表2 和泉センターが保有する空洞共振器

型式	共振周波数 (GHz)	共振モード	試料挿入孔直径 (mm)
CP431	1	TM_{010}	2.5
CP461	2	TM_{010}	2.5
CP481	2.45	TM_{020}	2.5
CP501	3	TM_{020}	2.5
CP511	5	TM_{020}	2.5
CP521	5.6	TM_{020}	2.5
CP531	10	TM_{020}	2.5
CP561	20	TM_{020}	1.0

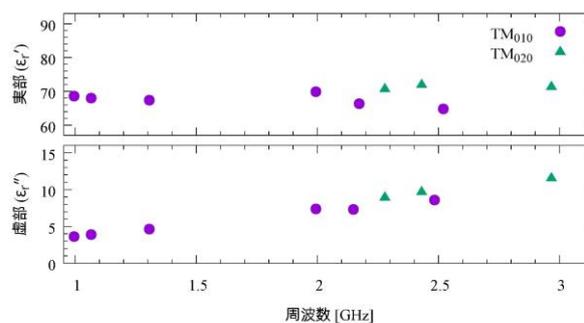


図3 水の複素比誘電率測定結果

い容器のみを測定したデータを用いて測定値を補正する必要があります。

測定例として、内径1mmの樹脂製チューブに水を充填し、測定した結果(補正後)を図3に示します。測定結果では、2GHzにおける複素比誘電率の実部は約70となつていますが、これは一般に知られている値(25℃において77.6)より約10%低い値です。これは、摂動近似による誤差と考えられ、本測定法で高誘電率材料を測定する際には注意すべき点です。

おわりに

測定値の補正方法や測定周波数ポイントを増やす方法を含め、本測定法に興味がありましたら、ご遠慮無く担当職員までお問合せください。