

ミリ波低損失誘電体の誘電率測定 『WGモード誘電体円板共振器法』

1. はじめに

本研究室では、ミリ波帯における低損失な誘電体材料の誘電率測定法として WG モード誘電体円板共振器法を提案している。

図 1 は実際の測定装置の一部を示しており、図 2 に示すように WG モード誘電体共振器は誘電体円板と励振及び検波用の二本の誘電体線路で構成される。誘電体円板内に WG モードを励振し、その共振周波数及び無負荷 Q の測定値より複素誘電率を評価する。

WG モードは、誘電体円板内を縁付近に沿って周方向に伝搬する進行波共振モードであり、周方向に高次のモードである。共振器の構成に遮蔽導体を用いることがないため、ミリ波帯における導体損の影響を受けることがなく、一つの円板寸法で広い周波数帯にわたって共振応答が得られるという特長がある。また、図 3 のように共振電磁界の大部分が円板縁付近に集中するため、高い Q 値を実現できる共振器である。

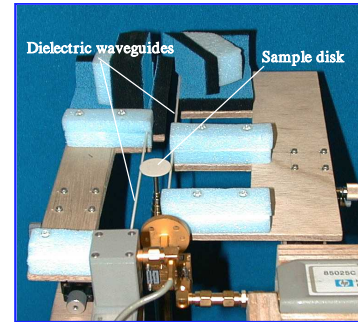


図 1. 測定装置（共振器部分）

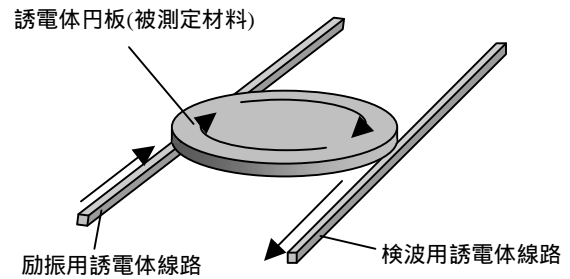


図 2. WG モード誘電体共振器の構成

2. WG モードの励振に関する検討

従来は WG モードの励振に、モノポールあるいはループアンテナによる方法を用いていた。この方法では、周波数の上昇に伴い励振が困難となり測定周波数帯の拡大が難しかった。しかし、誘電体線路を用いることで効率の良い励振が可能となり、現在のような 50 ~ 110GHz という広い周波数帯における測定が実現できている。

図 4 に誘電体円板内の WG モードの位相定数 β_d と誘電体線路内の導波モードの位相定数 β_g の分散特性、断面寸法の異なる誘電体線路を用いた時の共振応答を示す。測定周波数帯において $\beta_d \approx \beta_g$ となるような誘電体線路を用いることで、励振を可能としている。図中の WGE_{N11} は基本モードを示し、 WGE_{N21} 及び WGE_{N31} は半径方向の高次モードを示している。適当な断面寸法の誘電体線路を選ぶことにより、所望の基本モード以外の高次モードを抑制できる。1.4mm 角のものを用いた時は基本モードのみが励振され、断面寸法が小さくなるに従い β_g が高次モードの β_d に近くなるため、高次モードが現れやすくなる。

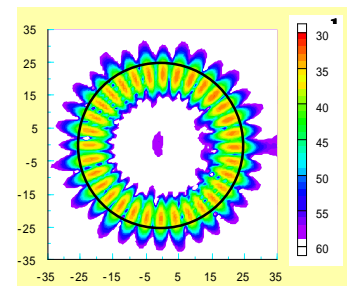


図 3. WG モードの共振電磁界分布

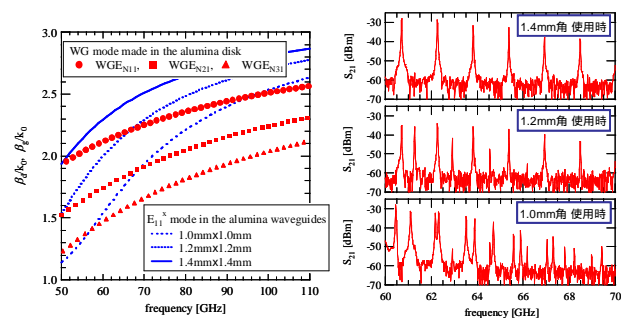


図 4. 誘電体線路による WG モードの励振

3. WGモード誘電体共振器のQ特性の把握

WGモード誘電体共振器のQ特性は図5のようになり、無負荷Q値 Q_u は誘電体損によるQ値 Q_d と放射損によるQ値 Q_r より構成される。

誘電率測定には、 $Q_r \gg Q_d$ となる周波数領域を用いる。これは、 $\tan \delta$ の測定公式が $Q_r \gg Q_d$ という条件の下に成り立っているためであり、この条件を満たすように円板寸法を設計する必要がある。

よって、円板寸法の設計においてQ特性の把握が重要となる。寸法設計のためのQ特性の計算には、実効誘電率法(E.P.M.)を用いている。図6に $\tan \delta$ の値を変えた時の実効誘電率法とFDTD法とのQ特性の計算結果の一例を示す。

横軸は周方向モード次数を示し、周波数に比例する。 Q_u の立ち上がり部分については両者の間に差があるものの、誘電率測定に用いるような領域ではほぼ一致した結果となっている。誘電率測定においては放射損が支配する領域から誘電体損が支配する領域への移り変わる状態を把握することが重要であり、FDTD法によるシミュレーション結果より実効誘電率法によるQ特性の計算結果の妥当性が確認できる。

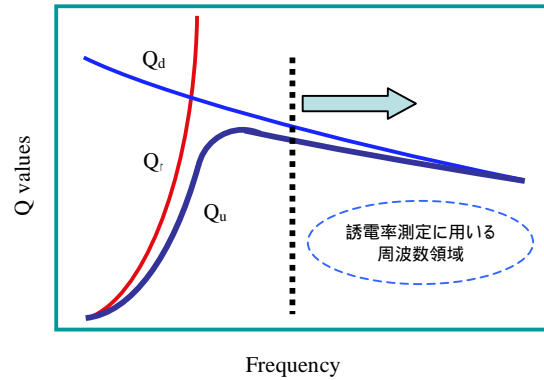


図5. WGモード誘電体共振器のQ特性

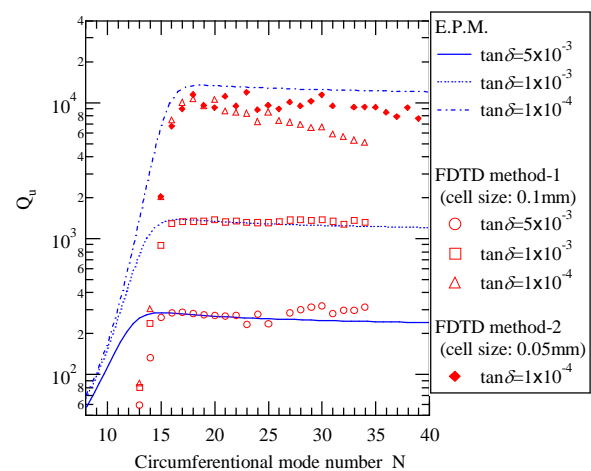


図6. Q_u 特性の計算結果

4. 誘電率測定

比誘電率は、周方向モード次数 N 、試料円板寸法(直径 D ,厚さ t)、共振周波数測定値 f_0 を用いて以下のような固有値方程式より算出される。

$$\det \mathbf{H}(\varepsilon_r; N, f_0, D, t) = 0 \quad (1)$$

$\tan \delta$ は、以下の(2)式で表される。

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_u} \frac{1}{W} \frac{1}{1 + Q_d/Q_r} \quad (2)$$

ここで W は、誘電体内外のエネルギー比である。

放射損が誘電体損に比べ非常に小さい場合、つまり $Q_r \gg Q_d$ の場合(2)式は(3)式となる。

$$\tan \delta \approx \frac{1}{Q_u} \frac{1}{W} \quad (3)$$

また W は、摂動原理を用いることにより以下の(4)式で表される。

$$W = \frac{(-\Delta f_0 / \Delta \varepsilon_r) 2\varepsilon_r}{f_0} \quad (4)$$

よって(3)、(4)式より $\tan \delta$ の測定公式は(5)式となる。

$$\tan \delta \approx \frac{1}{Q_u} \frac{f_0}{(-\Delta f_0 / \varepsilon_r) 2\varepsilon_r} \quad (5)$$

$\tan \delta$ は、比誘電率の測定結果より得られる ε_r の値を用いて、 ε_r の微小変化量 $\Delta \varepsilon_r$ に対する共振周波数 f_0 の変化量 Δf_0 の計算値と測定値 Q_u より算出される。

(1)式の固有値計算には、近似変数分離法(A.S.V.method)を用いる方法とモードマッチング法を用いる場合がある。近似変数分離法は、近似解析のため計算精度は周波数及び誘電率の大小に依存してしまうが、一定の誤差の範囲内での誘電率算出を効率的に行うことができる。モードマッチング法は、固有値の計算過程が非常に複雑であるが、近似変数分離法に見られる計算精度の周波数特性を改善ことができ、高精度な誘電率測定を実現できる。開放型共振器である本共振器の解析を行う場合、円板の周りに仮想的に遮蔽導体を配置する。

図7に各種円板試料の誘電率測定結果を示す。(a)及び(b)は、等方性誘電体である石英、アルミナの測定結果を示し、(c)は、C軸に関して垂直方向と平行方向の誘電率が異なる一軸異方性誘電体であるサファイアの測定結果を示している。

(a),(b)の比誘電率の結果よりモードマッチング法を用いた場合は、近似変数分離法を用いた場合に比べ値の周波数特性を大きく改善できている。モードマッチング法を用いた場合、石英円板の結果では $\epsilon_r = 3.81$ 、アルミナ円板の結果では $\epsilon_r = 9.746$ 、サファイア円板の測定結果では $\epsilon_t = 9.388$ 、 $\epsilon_z = 11.57$ という結果を得ている。また $\tan \delta$ の結果では、どの測定試料においても周波数特性を持っていることが分かり、周波数に対してほぼ比例して増加するような結果となっている。値を比較すると石英、アルミナ、サファイアの順で右に行くほど低損失な材料であることが分かる。

文献

- [1] Y.Kobayashi, T.Senju, "Resonant Modes in Shielded Uniaxial-Anisotropic Dielectric Rod Resonators," IEEE Trans. on microwave theory and tech., vol.41, no.12, pp.2198-2205, Dec. 1993.
- [2] Y.Tomabechi and K.Matsumura, "Resonance characteristics of Whispering gallery mode on a dielectric disk," IEICE Trans. Electron. (Japanese Edition), vol.J75-C-I, no.11, pp.687-693, Nov. 1992.
- [3] H.Tamura, Y.Kogami, K.Matsumura, "Improvement of the Relative Permittivity Evaluation with a Whispering-Gallery Mode Dielectric Resonator Method," IEICE Trans. on Electronics, vol.E86-C, no.8, pp.1665-1671, Aug. 2003.
- [4] 古神 義則, 田村 先, 松村 和仁, "ウィスパーリングギャラリーモード共振器法による 100GHz 帯複素誘電率測定," 電子情報通信学会論文誌, J-84-C, no.8, pp.703-706, Aug. 2001.

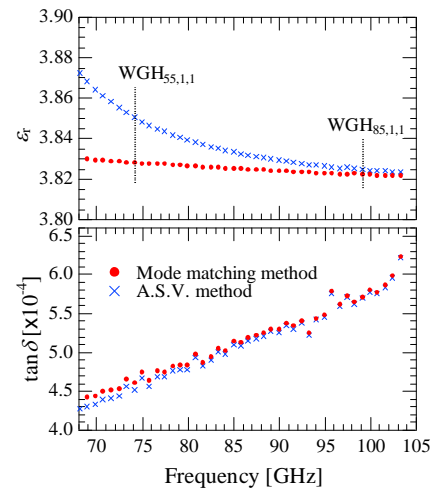


図 7(a). 石英円板

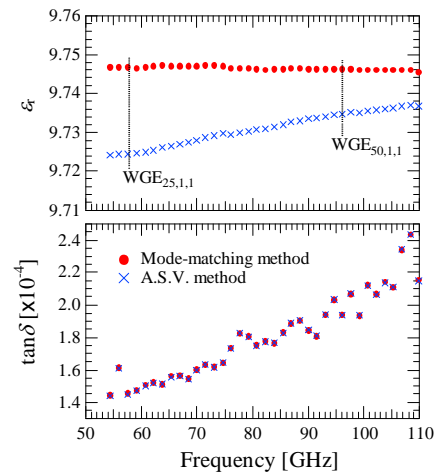


図 7(b). アルミナ円板

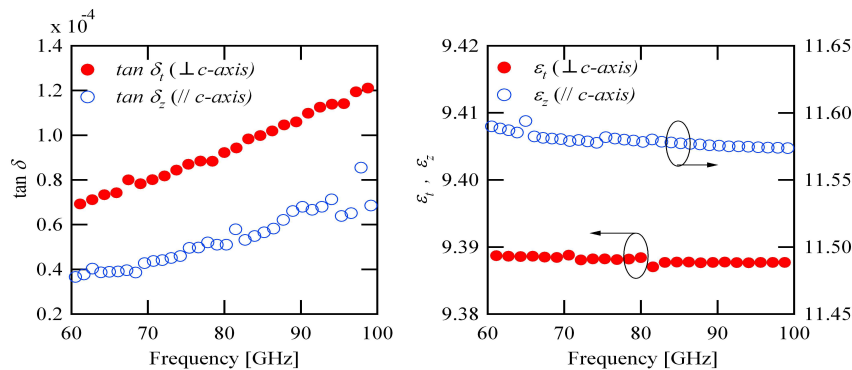


図 7(c). サファイア円板

図 7. 各種円板試料の誘電率測定結果