信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE. ED2001-143,MW2001-103(2001-11)

ミリ波低損失誘電体材料とその測定法の技術動向

小林禧夫 清水隆志

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科 〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255 電話:048-858-3487, Fax:048-857-2529 E-Mail: yohsio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 最近、ミリ波低損失誘電体材料の複素誘電率(比誘電率_{*E*_n、誘電正接 tan*ð*)を正確に測定 する必要性が高まっている。ミリ波帯における低損失誘電体材料の測定法として、ファブリペロー共振器 法、ウィスパリングギャラリーモード共振器法、NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法、遮断円筒導波管 法等が報告されている。本報告では、これらミリ波帯における複素誘電率測定法の最近の技術動向とミリ 波低損失誘電体材料、およびミリ波測定標準化の現状について述べる。}

キーワード ミリ波測定 複素誘電率 低損失誘電体材料

Low-loss dielectric materials for millimeter wave and technical trend of its measurements

Yoshio Kobayashi Takashi Shimizu

Dept. Electrical and Electronic System, Saitama University Shimo-ookubo 255, Saitama, Saitama 338-8570, Japan Phone: +81-48-858-3477, Fax: +81-48-857-2529 E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract As measurement methods of low loss dielectric materials in the millimeter wave region, the Fabry-Perot resonator method, the Whispering-Gallery mode resonator method, the dielectric resonator method excited by NRD guide and the circular cut-off waveguide method excited by coaxial cables are reported.

This report describes the latest technical trend for the millimeter wave measurement of complex permittivity, measured results of low loss dielectric materials at 30-100GHz, and the present condition of millimeter wave measurement standardization.

Key word Millimeter wave measurements Complex permittivity Low-loss dielectric materials

1. はじめに

最近、ミリ波帯の応用研究が盛んに行われ、ミリ 波低損失誘電体材料の複素誘電率(比誘電率*ε*、誘電 正接 tan*d*)を正確に測定する必要性が高まっており、 その測定法の開発に対する期待もまた高まっている。

現在、国際標準創成事業「通信器用ファインセラ ミックスの試験評価方法」の標準化技術委員会にお いて、ミリ波帯における低損失誘電体の標準測定方 法として、ファブリペロー共振器法^{[1][2]}、NRD ガイ ド励振誘電体円柱共振器法^{[3][4]}、同軸励振遮断円筒 導波管法^{[5][6]}が検討されている。さらに最近、ウィ スパリングギャラリーモード共振器法^{[7][8]}による方 法が報告されている。

本報告では、これらミリ波帯における複素誘電率 測定法の最近の技術動向とミリ波低損失誘電体材料 および、ミリ波測定標準化の現状について述べる。

2. 種々の測定法^[9]

ファブリペロー共振器法は、球面反射鏡を用いて おり、1~3×10⁵程度の高 Q 値が比較的容易に実現 できる。この方法は、マイクロ波帯からサブミリ波 帯までの広い周波数範囲帯での誘電体測定に用いる ことが原理的に可能である。しかし、波長の長い低 周波数帯では、被測定試料及び測定装置全体が大き くなりすぎるため、ミリ波帯からサブミリ波帯で重 要であるものと考えられる。

NRD ガイド励振誘電体共振器法は、同軸線路による励振の困難さを解決するために NRD ガイドを用いている。NRD ガイドの基本伝搬モードであるLSM₀₁モードの電磁界分布は比較的大きく空間に広がるため、誘電体共振器の TE_{0mð}モードの Hz 成分と容易に、かつ低損失に磁界結合させることができる。つまり、共振系の無負荷 Q を劣化させることなく、再現性よく測定することが可能である。

ウィスパリングギャラリーモード共振器法は、しゃへい導体を測定用共振器の構成に用いないので、 ミリ波帯における導体表面抵抗の増加の影響を受け ることが無く、従来の共振器法と比較して、高い測 定分解能で誘電正接を評価することが可能である。 また、測定に使用できる共振モードが、一定の周波 数間隔をおいて現れるので、ある周波数範囲にわた って、複素誘電率を測定できるという特徴がある。

遮断円筒導波管法は、マイクロ波帯において誘電 体平板の複素誘電率を非破壊かつ高精度に測定する 方法として知られる空洞共振器法^[10]を、ミリ波帯に 応用した測定法である。この方法では、共振器の励 振及び検波に同軸線路を用いることにより、結合量 の調整を挿入長の変化によって行うことができる。 このため、測定の簡易化が可能である。また、導波 管励振に比べ、周波数帯域を広くとることができる ため、最低次の TE₁₁₁ モードを利用して、モード判 別が容易に行えるという利点がある。

3. ファブリペロー共振器法^{[1][2][11]}

図 3.1 にファブリペロー共振器の構成図を示す。 この測定法では、開放型共振器の基本モード TEM_{00q} (q=1,2...)を用いて測定を行い、その共振周波数 f₀ は、 次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{c}{2D} \left[q + 1 + \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{D}{R_0} \right) \right]$$
(1)

測定試料を共振器中央に挿入すると、比誘電率の 1/2 乗分だけ共振周波数が低い方へシフトする。こ のときの共振周波数を f とすると、 *ε*, は次式で与え られる。

$$\frac{1}{n}\cot\left(\frac{cnt}{2\pi f}-\phi_t\right) = \tan\left(\frac{c}{2\pi f}\left(\frac{D}{2}-t\right)-\phi_d\right) \quad (2)$$
$$\frac{1}{n}\tan\left(\frac{cnt}{2\pi f}-\phi_t\right) = -\tan\left(\frac{c}{2\pi f}\left(\frac{D}{2}-t\right)-\phi_d\right) \quad (3)$$

ただし、式(2)は、対称モード、式(3)は非対称モードのものであり、屈折率 $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ である。

また、 $tan \partial d$ は空の状態での共振器のQ、 Q_0 、および試料を共振器内においた場合のQ、 Q_L を用いて、

(4)

 $\tan \delta \approx \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0}\right) \frac{t\Delta + d}{t\Delta + \frac{1}{2L}\sin 2(kd - \phi_d)}$



R:鏡面反射鏡の曲率半径、D:共振器長 a:鏡面反射鏡の開口径、w₀:最小スポットサイズ w_a:鏡面上のスポットサイズ

図 3.1 ファブリペロー共振器



図 3.2 ミリ波材料測定システムの構成例

で与えられる。ここで、1 ⊿ (ε)であり、⊿は、次 式で与えられる。ただし、対称モードは式(5)、非対 称モードは式(6)で与えられる。

$$\Delta = n^2 / \left[n^2 \sin^2 \left(nkt - \phi_t \right) + \cos^2 \left(nkt - \phi_t \right) \right]$$
(5)

$$\Delta = n^2 / \left\lfloor n^2 \cos^2\left(nkt - \phi_t\right) + \sin^2\left(nkt - \phi_t\right) \right\rfloor \tag{6}$$

この測定法では、50-110GHz 付近での測定試料寸 法は約 76mm 程度の平行かつ平面度が高いものが 要求される。また、tan δの測定値は温度変化に対し て、影響を受けやすいため、恒温環境で測定を行う 必要がある。さらに、正確な測定を行うためには、 試料の厚さをλ/2 の整数倍にする必要がある。

図 3.2 にミリ波材料測定システムの構成例を示す。 このとき、ファブリペロー共振器と励振線路との結 合が取りにくく、励振が難しい。しかし、最近では、 0.1mm 精度の位置検出が実用的になっており、自動 位置決め機構などを加え、測定の自動化を行うこと で、高精度なミリ波材料測定装置としての実用化が 期待される。

4. NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法^{[3][4][12]}

図 4.1 に NRD ガイド励振による誘電体円柱共振器の構造を示す。 ϵ_r は、図 4.1 (1)に示された TE₀₂₁ モード共振器の共振周波数 f_0 より、 $\tan \delta$ は無負荷Q、 Q_u より次式によって求まる。

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{\pi D f_0}\right)^2 \left(u^2 + v^2\right) + 1 \tag{7}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{B_1} \left(\frac{1}{Q_u} - \frac{A_1}{\sqrt{\sigma}} \right) \tag{8}$$



図 4.1 誘電体共振器の構造

また、tan*d*測定に必要な導体板の実効比導電率*σ*, は、同じ複素誘電率を持つ誘電体により構成された TE₀₂₁共振器とTE₀₂₈共振器の*Q*_uの差から次式によっ て求まる。

$$\sigma_{r} = \left(\frac{A_{1}B_{2}f_{2} - A_{2}B_{1}f_{1}}{B_{2}f_{2}/Q_{u1} - B_{1}f_{1}/Q_{u2}}\right)^{2}$$
(9)

ただし、

$$v^{2} = \left(\frac{\pi D f_{0}}{c}\right)^{2} \left[\left(\frac{c}{2H f_{0}}\right)^{2} - 1 \right]$$
(10)

$$A_{1,2} = \sqrt{\frac{\mu}{8\omega_{1,2}}} \iint \left| H_{1,2} \right|^2 ds \left/ W_{1,2}^{e} \right|^e$$
(11)

$$B_{1,2} = W_d^{e}{}_{1,2} / W_{1,2}^{e}$$
(12)

ここで、*c* は光速、μは導体板の透磁率、 |*H*|²ds は 導体板表面の積分、*W*^e は共振器内の電界エネルギー、



図 4.2 測定装置の構造

W^eは誘電体内の電界エネルギーである。

図 4.2 に測定装置の構造を示す。入出力 NRD ガイ ドは変換器を通して、W バンド導波管に接続される。 結合量の調整は、入出力 NRD ガイドの間隔を調整 することで行う。また、測定系の校正は、入出力 NRD ガイド間に誘電体ストリップを挿入した状態で測定 した挿入損失を用いて行う。

5. ウィスパリングギャラリーモード共振器法^{[7][8][13]}

図 5.1 に等価型ウィスパリングギャラリーモード (WG モード)誘電体共振器の基本構成を示す。誘 電体円板の縁付近に励振用の誘電体線路を近づける と、円板内を周方向に伝搬する進行波共振を成起す ることができる。円板の直径を媒質内波長の数十倍、 厚さを半波長程度にすると、WG モード以外の共振 モードは漏洩モードとなり、WG モードの共振ピー クのみが、周方向モード次数の順に現れるものとな る。このときの共振周波数間隔 *F_N*を前後の共振周波 数*f_{N-1}、f_{N+1}*を用いて、次式のように定義する。



$$F_N = \frac{f_{N-1} + f_{N+1}}{2} \tag{13}$$

式(13)を用いて、測定した各共振周波数における F_N を求めておくと、この F_N 値を持つべき円板共振器の ε_r を、図 5.2 に示すように数値的に決定することが できる。ここで、用いる数値解析の計算精度が誘電 率の測定精度を左右する。現在は、簡便で誤差数% の計算精度である近似変数分離法を用いている。

また、誘電体の $tan \delta$ は、各共振周波数の Q_u の測定 値より、次式から求まる。

$$\tan \delta \simeq \frac{1}{Q_u} \frac{f_0}{\left(-\Delta f / \Delta \varepsilon_r\right) \cdot 2\varepsilon_r}$$
(14)

測定周波数が高い場合や、測定試料が高誘電率材料の場合、誘電体円板の位相定数と励振及び検波用の誘電体線路の位相定数を一致させると、WGモードの励振効率が向上する。また、WGモード共振器法は温度依存性の測定も可能であり、-45 ~+60の範囲で測定が行われている。さらに、温度変化に伴う誘電体線路や支持台の変形による励振状態の変化を測定装置にステッピングモータを用いた励振状態の制御機構を取り入れることで改善している(図 5.3)^[14]。

6. 遮断円筒導波管法^{[5][6]}

図 6.1 に遮断円筒導波管法の構成図を示す。この 測定法では、TE_{0ml} モードを用いて複素誘電率測定 を行う。これは、TE_{0ml} モードが周方向に変化がな いためにモード分離を起こさないこと、および縁端 効果まで考慮した厳密な解析がリッツガレルキン法 により行うことができるため、高精度測定が可能な ためである。

図 6.1(a)に示すように、厚さ t の誘電体平板を導体円筒の中央に装荷し、遮断 TE_{0m1} モード誘電体円板共振器を構成する。このとき、導体円筒部は TE₀₁



(a) 誘電体を装荷した共振器 (b) 空洞共振器図図 6.1 遮断円筒導波管法

モード遮断円筒導波管を構成するが、不要な空洞共振モードを抑制するために、導体円筒の両端に電波吸収材を配置する。比誘電率 ϵ_r は TE_{0m1} (m=1,2,...) モードの f_0 の測定値より、また、誘電正接 tan δ t無負荷 Q、 Q_u の測定値より、縁端効果まで考慮した値が次式を用いて求められる。

$$\det H(f_0; \mathcal{E}_r, \mathcal{E}_g, D, H, t, d, g) = 0$$
(15)

$$\tan\delta = A/Q_u - BR_s \tag{16}$$

ただし、*Rs* は導体表面の表面抵抗であり、*A*, *B* は、 式(15)を用いて、導体寸法の摂動量から計算される 定数である。

また、この際、図 6.1(b)に示す空洞共振器の用い て、TE_{01p} (p=1,2,...)モードの f₀ および、Q_uの測定値 より、直径 D、長さ H および比導電率 σ, を測定して おく必要がある。ここで、円筒空洞の両端部の溝は 縮退している TM_{11p} モードの共振周波数を TE_{01p} モ ードから分離するためのものである。これらの共振 器の励振および検波は、先端に微少ループを持つ外 径 1.2mm の UT-47 セミリジッド同軸線路を用いて、 半径方向より行う。

さらに、遮断円筒導波管法は温度依存性測定も可



図 6.2 遮断円筒導波管法の温度依存性測定システム 能であり、20K~293Kの範囲で測定が行われている。 図 6.2 にその測定システムのブロック図を示す

7. ミリ波低損失誘電体材料

本節では、各測定法により、ミリ波帯において測 定した低損失誘電体材料の測定結果を示す。

まず、ファブリペロー共振器法による誘電体平板の測定結果を表 7.1 に示す^{[11] [15]}。

次に、NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法による 誘電体円柱の測定結果を表 7.2 に示す^{[12][15]}。試料寸

表 7.1 ファブリペロー共振器法による測定結果

Samples	t (mm)	f ₀ (GHz)	Qu	\mathcal{E}_r	tanδ (x10 ⁻⁴)
PTFE	11.518	71.516	61900	2.06	1.26
PIFE	± 0.007	± 0.001	Q_u ε_r 61900 2.06 \pm 620 \pm 0.01 114770 9.41 \pm 1150 \pm 0.03 40994 9.73 29491 8.63 48673 3.81	± 0.02	
sapphire	1.332	73.371	114770	9.41	0.85
	± 0.002	± 0.001	± 1150	± 0.03	± 0.10
Alumina (99.5%)	2.005	49.884	40994	9.73	2.06
Alumina (92.0%)	2.003	48.955	29491	8.63	5.29
quartz	2.013	50.133	48673	3.81	1.19

表 7.2 NRD 励振誘電体共振器法による測定結果

Samples	f ₀ (GHz)	Qu	\mathcal{E}_r	tanδ (x10 ⁻⁴)
PTFE	56.610	2820	2.065	1.88
	± 0.010	± 12	± 0.020	± 0.02
sapphire	76.594	7439	9.42	0.80
	± 0.002	± 47	± 0.02	± 0.01
Ma(Mg _{1/2}	76.110	2542	21.44	3.85
$W_{1/2})O_3$	± 0.006	± 2	± 0.04	± 0.01

表 7.3 WG モード共振器法による測定結果

Samples	<i>f</i> ₀ (GHz)	F _N (GHz)	Qu	$\boldsymbol{\mathcal{E}}_r$	tanδ (x10 ⁻⁴)
DTEE	50.34	0.94	5300	2.01	2.01
PIFE	~ 69.76	0.84	± 300	± 0.04	± 0.08
Dolumnonulono	59.97	0.95	4600	2.23	2.3
Polypropylene	~ 75.26		± 300	± 0.04	± 0.4
Alumina	93.67	1.52	6300	9.75	1.61
	~ 107.45	1.55	± 600	± 0.05	± 0.18

表 7.4 遮断円筒導波管法による測定結果

Samples	t (mm)	f ₀ (GHz)	Qu	E r	tanδ (x10 ⁻⁴)
PTFE	0.930	47.197	5430	2.078	1.61
	± 0.004	± 0.001	± 70	± 0.005	± 0.05
Co. the	0.823	49.644	4240	2.333	2.61
Crytillex	± 0.046	± 0.002	± 60	± 0.011	± 0.06
Doluimida	0.515	46.833	340	3.083	62
Polyimide	± 0.001	± 0.002	± 10	± 0.006	± 1
Alumina	0.391	34.432	7820	9.920	0.49
	± 0.001	± 0.002	±20	± 0.020	± 0.01
sapphire	0.506	32.356	8290	9.370	0.34
	± 0.001	± 0.002	± 50	± 0.015	± 0.01
GaAs	0.110	44.894	4910	12.772	2.78
(TE_{011})	± 0.001	± 0.001	± 70	± 0.105	± 0.07
GaAs (TE ₀₂₁)	0.607	39.310	2980	12.956	2.36
	± 0.001	± 0.001	± 40	± 0.016	± 0.05
LaAlO ₃	0.522	21.026	7290	24.047	0.30
	± 0.002	± 0.007	± 506	± 0.078	± 0.02

法は、PTFE 円柱(直径:5.456mm、高さ:2.267mm)、 sapphire 円柱(直径:2.420mm、高さ:1.805mm)、 $Ma(Mg_{1/2}W_{1/2})O_3$ 円柱(直径:1.548mm、高さ:1.799mm) である。ここで、測定に使用した銅板は σ =88.0%で ある。

さらに、WG モード共振器法による誘電体円板の 測定結果を表 7.3 に示す^{[5][13]}。試料寸法は、PTFE 円 板(直径:79.98 mm、厚さ:6.03mm)、Polypropylene 円板 (直径:66.54mm、厚さ:4.03mm)、Alumina 円板(直径: 20.08mm、厚さ:1.02mm)である。

最後に、遮断円筒導波管法による誘電体平板の測 定結果を表 7.1 に示す^{[16] [17]}。また、参考文献[16] [17] に温度依存性の測定結果を示す。ここで、導体円筒 空洞の *D*=6.991mm、*H*=30.917mm、*σ*=87.1%である。

PTFE より安価な Crythnex 平板は、PTFE 平板と同 程度の電気特性が得られる。このことから、Crythnex はミリ波回路への応用、特に低価格化に高い可能性 を持っているといえる。

8. ミリ波測定標準化の現状

ミリ波複素誘電率測定の標準化を行うために、フ ァブリペロー共振器法、誘電体共振器法、遮断円筒 導波管法によるラウンドロビン試験が各機関で行わ れた。2001 年 11 月現在、計画されていた試験がす べて終了し、標準化文書作成の段階に入っている。

現在までの結果をまとめると、表 8.1 に示す通り である。表記のように、4 種類の測定法は測定周波 数帯、試料形状と寸法、tan &の測定範囲においてそ れぞれ違った特徴を有している。従って、ミリ波複 素誘電率測定は、目的にあった測定法を用いるのが

	試料形状			
测定法	測定範囲 / 測定精度			
	<i>f</i> ₀ (GHz)	E r	tan <i>S</i>	测定
		$\Delta \epsilon_r$ (%)	$\Delta tan \delta(\%)$	
ファブリペロー	平板(円板/角板)形状材料			
ノアノリハロー	50 ~ 300	1.1 ~ 50	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	
六川以留石		~ ± 0.5	~ ± 10	
NDD ガイド団炬	円柱形状材料			
NRD カイト励振 季雪休士振哭法	30~100	2 ~ 50	$10^{-3} \sim 10^{-6}$	
仍电冲六派 品 / 公		~ ± 0.4	~ ± 10	
	基板形状材料			
遮断円筒導波管法	30~100	1.1 ~ 50	$10^{-3} \sim 10^{-6}$	
		~ ± 1.0	~ ± 10	
	円板形状材料			
	50~150	2 ~ 50	$10^{-2} \sim 10^{-5}$	
开加的石		~ ± 2.0	~ ±10	

表 8.1 測定法の比較

望ましいといえる。

<参考文献>

- A.L.Cullen and P.K.Yu;"The accurate measurement of permittivity by mean of an open resonator," Proc. Roy Soc. A, vol.325, pp.493-509, 1971.
- [2] Ph. Coquest, T.Matsui and M.Kiyokawa;"Dielectric Measurement in the 60-GHz Band Using a High-Q Gaussian Beam Open Resonator," IEICE Trans. On Electronics, E78-C, pp.1125-1130, 1990.
- [3] 石川,田中,西田,西川; "NRD ガイドを用いたミリ波用
 誘電体共振器材料の複素誘電率測定法,"信学技法, MW90-13, pp.31-36, 1990.
- [4] 中山,福浦,西村; "NRD ガイド励起誘電体共振器によるミリ波導電率と複素誘電率測定," 信学総大, SC-2-10, pp.448-489, Mar. 1997.
- [5] 清水,小林; "ミリ波同軸励振空洞共振器法による誘電 体 平 板 の 複 素 誘 電 率 測 定," 信 学 技 報, MW99-25, pp.73-76, May,1999.
- [6] 清水、小林、"ミリ波同軸励振空洞共振器法による誘電体 平板の複素誘電率の温度依存性の測定"、信学技報、 ED2000-188, MW2000-145, pp.1-6, Nov. 2000.
- [7] 古神,松村;"ウィスパリングギャラリーモード共振器 を用いたミリ波誘電体材料の温度特性の測定,"信学総 大, C-2-120, pp.171, Mar, 2000.
- [8] 古神,田村,松村;"ウィスパリングギャラリーモード共振器による 100GHz 帯複素誘電率測定,"信学論,J84-C, No.8, pp.703-706, Aug, 2001.
- [9] "最近のミリ波・サブミリ波デバイスの技術とその応用," 電気学会技術報告, vol.811, pp.7-24, 2000.
- [10] Y.Kobayashi and J.Sato, "Nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate materials by a cavity resonance method," 信学技報, MW87-53, pp.41-48, Oct. 1987.
- [11] R.Katsumi, Y.Itoh, and Y.Higashida, "Complex Relative Permittivity Measurement in the Frequency Range 40-60GHz by Fabry-Perot Resonator Method", 2000 Topical Symposium on Millimeter Waves. Digest, Mar. 2000.
- [12] 中山, 福浦, 西村; "NRD ガイド励起誘電体共振器による 77GHz 複素誘電率測定," 信学技報, SCE2000-27, MW 2000-91, pp.111-117, Aug. 2000
- [13] 古神, 松村; "ウィスパリングギャラリーモード共振器 を用いた低誘電率誘電体材料のミリ波複素誘電率測定," 信学論, J83-C, No.6, pp.553-558, June, 2000.
- [14] 田貝, 古神, 松村; "ウィスパリングギャラリーモード共振器法による誘電体材料の温度特性評価に関する検討," 信学ソ大, C-2-78, pp.102, Sep, 2001.
- [15] "通信機用ファインセラミックスの試験評価方法の標準 化,"新エネルギー・産業開発機構成果報告書, pp. 7-47, Mar, 2001
- [16] T.Shimizu, Y.Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of GaAs plates by a circular waveguide method", 2001 IMS. Digest, THIF-51, pp.2195-2198, Jun. 2001.
- [17] T.Shimizu, and Y.Kobayashi, "50GHz measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by a cut-off circular waveguide method", 2001 Topical Symposium on Millimeter Waves. Digest, P-10, Mar. 2001.