

ミリ波帯における低損失誘電体材料の評価

Evaluation of low-loss dielectric materials in millimeter wave region

清水隆志
Takashi Shimizu小林禎夫
Yoshio Kobayashi埼玉大学工学部電気電子システム工学科
Dept. of Electrical and Electronic Systems, Saitama University

1. はじめに

近年の情報通信のマルチメディア化、グローバル化の進展に伴い、映像やデータを大量に伝送する高速大容量移動体通信網の構築を実現するために、ミリ波帯の利用が期待されている。それに伴い、ミリ波デバイスの設計や新材料開発のために、ミリ波低損失誘電体材料の複素誘電率(比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan\delta$)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。

本報告では、ミリ波帯における誘電体材料の ϵ_r 、 $\tan\delta$ を高精度かつ高能率に測定する方法として、JIS原案に採用されている遮断円筒導波管法を用いて、様々な低損失誘電体材料の評価を行ったので報告する。

2. ϵ_r , $\tan\delta$ の測定原理

図 1 に測定に使用する共振器の断面図を示す。図 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 TE_{01} 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。この共振器の励振および検波は、先端に微小ループを持つ外径 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。

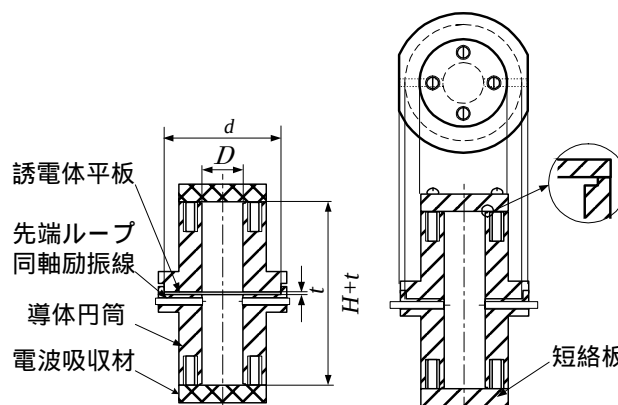
比誘電率 ϵ_r は TE_{0m1} ($m=1,2,\dots$)モードの共振周波数 f_0 の測定値より、また、誘電正接 $\tan\delta$ は無負荷 Q 、 Q_u の測定値より、次式を用いて縁端効果まで考慮した値を求める^{[1][2]}。

$$\det H(f_0; \epsilon_r, \epsilon_g, D, H, t, d, g) = 0 \quad (1)$$

$$\tan\delta = A/Q_u - BR_s \quad (2)$$

ただし、 R_s は導体表面の表面抵抗であり、 A, B は、式(1)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 1(b)に示す空洞共振器の用いて、 TE_{01p} ($p=1,2,\dots$)モードの f_0 および Q_u の測定値より、直径 D 、長さ H および比導電率 $\sigma_r (= \sigma/\sigma_0, \sigma_0=58 \times 10^6 \text{ S/m, 実効導電率}\sigma)$ を測定しておく^[5]。この際、 TE_{01p} モードと縮退する TM_{11p} モードの共振周波数を下げて、2つのモード間の縮退を解くために、導体円筒と短絡板との間に溝を設けた^[12]。



(a) 誘電体を装荷した共振器 (b) 空洞共振器

図 1 測定に使用する共振器の断面図

3. 測定結果^{[11][13]}

表 1 に本測定に用いた空洞共振器の D, H, σ_r の室温における測定結果を示す。表 2 に室温における 13 種類 14 枚の誘電体平板材料に関する複素誘電率の測定結果を示す。ただし、GaAs-1 のみ TE_{021} モードを用い、他は TE_{011} モードを用いた。ここで、MPO は改質ポリオレフィン、MPS は改質ポリスチレン、PC はポリカーボネート、BMT は $Ba(Mg, Ta, Sb)O_3$ 、LSAT は $(LaAlO_3)_{0.3}-(SrAl_{0.5}Ta_{0.5}O_3)_{0.7}$ である。

図 2 に PTFE 平板($t=1.073\text{mm}$, 熱線膨張係数 $\tau=100\text{ppm/K}$)、Crythnex 平板($t=0.823\text{mm}$, $\tau=70\text{ppm/K}$)、MPO 平板($t=2.050\text{mm}$, $\tau=70\text{ppm/K}$)を TE_{011} モードにより測定した複素誘電率温度依存性の測定結果を示す。PTFE 平板は 170K、300K 付近で ϵ_r に変曲点があり、150K 以下で $\tan\delta$ が 0.5×10^{-4} 程度になることがわかった。また、Crythnex 平板は、常温付近で $\tan\delta$ が一定になる傾向があることがわかった。さらに、MPO 平板は、Crythnex 平板と同程度の比誘電率であり、常温付近での $\tan\delta$ は 1.3×10^{-4} である。

表 3 に PTFE および MPO の一般特性の代表値を示す^{[13]-[15]}。

以上の結果より、MPO および Crythnex 平板は、PTFE 平板と同程度以上の電気特性をもつことがわかった。ただし、MPO は軟化温度が 121 と低いとため、アンブ等の能動素子用としては問題が生じるかもしれない。

表 1 空洞共振器の D, H, σ_r の測定結果 (at 25 °C)

Mode	f_0 (GHz)	Q_u for TE ₀₁₁	D (mm)	H (mm)	σ_r (%)
TE ₀₁₁	52.520 ± 0.001	11230	6.991	30.917	85.7
TE ₀₁₃	54.282 ± 0.001	± 80	± 0.002	± 0.079	± 1.2

表 2 各種低損失誘電体の複素誘電率の測定結果 (at 25 °C)

Sample	t (mm)	f_0 (GHz)	Q_u	ϵ_r	$\tan \delta$ ($\times 10^{-4}$)
PTFE	1.073 ± 0.004	46.571 ± 0.001	5020 ± 70	2.016 ± 0.005	1.65 ± 0.05
Crythnex	0.823 ± 0.046	46.645 ± 0.003	4240 ± 60	2.333 ± 0.011	2.61 ± 0.07
MPO	2.050 ± 0.001	38.010 ± 0.001	3950 ± 100	2.310 ± 0.002	1.29 ± 0.08
MPS	1.178 ± 0.001	42.833 ± 0.002	3950 ± 70	2.472 ± 0.003	7.22 ± 0.37
PC	0.978 ± 0.001	42.931 ± 0.005	260 ± 10	2.759 ± 0.003	54.7 ± 1.6
Polyimide	0.515 ± 0.001	46.833 ± 0.002	340 ± 10	3.083 ± 0.006	62 ± 1
Alumina	0.391 ± 0.001	34.432 ± 0.002	7820 ± 20	9.920 ± 0.020	0.49 ± 0.01
MgO	0.505 ± 0.001	31.785 ± 0.001	9030 ± 70	9.801 ± 0.017	0.19 ± 0.02
Sapphire	0.524 ± 0.001	32.032 ± 0.001	8310 ± 40	9.354 ± 0.015	0.22 ± 0.05
GaAs-1 (TE ₀₂₁)	0.607 ± 0.001	39.310 ± 0.001	2980 ± 40	12.96 ± 0.02	2.36 ± 0.05
GaAs-2	0.108 ± 0.001	45.050 ± 0.001	4970 ± 10	12.79 ± 0.11	2.77 ± 0.08
LaAlO ₃	0.521 ± 0.001	21.054 ± 0.002	6770 ± 50	24.04 ± 0.04	0.32 ± 0.03
BMT	0.508 ± 0.001	21.127 ± 0.001	5640 ± 10	24.34 ± 0.04	0.72 ± 0.01
LSAT	0.484 ± 0.001	22.091 ± 0.008	3530 ± 10	23.07 ± 0.09	1.83 ± 0.03

4. まとめ

本測定法の測定精度は、 ϵ_r に関しては、0.1%程度であり、 $\tan \delta$ に関しては、5%程度であり、本測定法は、材料の温度依存性を測定するのに十分な高精度性を有している。改質ポリオレフィンミリ波デバイスの低価格化に有望である。

<参考文献>

- [1] 清水, 篠原, 小林, 2000 電子情報通信学会総合大会, C-2-117, pp.168, Mar. 2000.
- [2] 清水, 小林, 信学技報, ED2000-188, MW2000-145, pp.1-6, Nov. 2000.
- [3] T.Shimizu, and Y.Kobayashi, 2001 *Topical Symposium on Millimeter Waves. Digest*, No.P-10, Mar. 2001.
- [4] 清水, 小林, 2001 電子情報通信学会総合大会, C-2-48, pp.95, Mar. 2001.
- [5] T.Shimizu, and Y.Kobayashi, 2001 *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, THIF-51, pp.2195-2198, Jun. 2001.
- [6] 小林, 清水, 信学技報, ED2001-143, MW2001-103, pp.35-40, Nov. 2001.

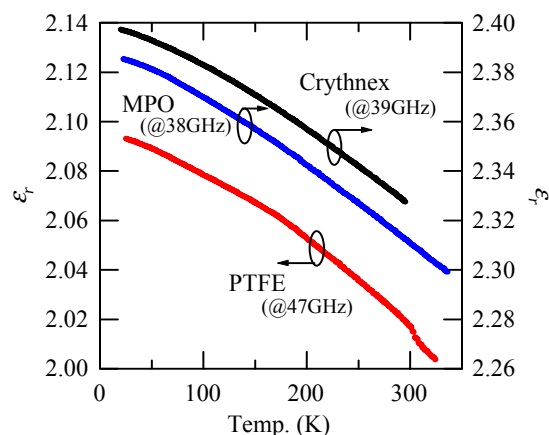
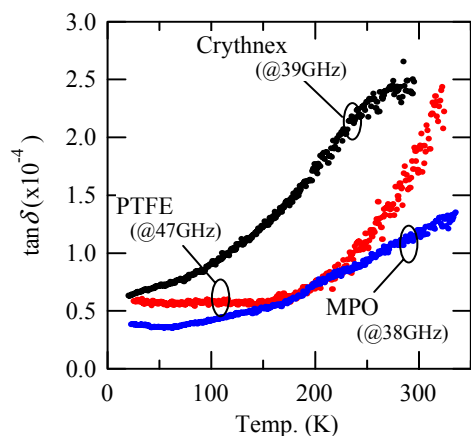
(a) ϵ_r (b) $\tan \delta$

図 2 有機材料の温度依存性測定結果

表 3 PTFE および MPO の一般特性(代表値)

項目	単位	PTFE	MPO
曲げ強さ	MPa	-	100
曲げ弾性率	MPa	550	2300
ガラス転移温度		-	140
軟化温度		327	121
熱伝導率	W/(m·K)	0.24	0.2
価格			

- [7] 針谷, 清水, 小林, 信学技報, MW2001-137, pp.85-90, Dec. 2001.
- [8] T.Shimizu, Y.Kobayashi, 2002 *Topical Symposium on Millimeter Waves. Digest*, No.P-17, Mar. 2002.
- [9] 清水, 針谷, 小林, 2002 電子情報通信学会総合大会, C-2-87, pp.124, Mar. 2002.
- [10] T. Shimizu and Y. Kobayashi, 32nd *European Microwave Conf. Proc.*, pp. 825-828, Sep. 2002
- [11] 西野, 清水, 小林, 2003 電子情報通信学会総合大会, 本誌, Mar. 2003.
- [12] T. Shimizu, Z. Ma and Y. Kobayashi, 2002 *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, TH4D-5, pp. 1019-1022, Nov. 2002.
- [13] <http://www.enplanet.com/Company/00000006/Ja/Data/p014.html>
- [14] <http://members.edogawa.home.ne.jp/katuo-murata/jyusitikusei.htm>
- [15] <http://www.hitachi-cable.co.jp/ewc/pdf/technical/3-1.pdf>