

遮断円筒導波管法における共振器構造の改善とその測定精度

清水 隆志 小林 禧夫

埼玉大学工学部電気電子システム工学科

〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: shimizu@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 遮断円筒導波管法に用いる従来の共振器構造には、軸方向および半径方向の不要な共振モードが存在し、測定に悪影響を及ぼすことが実験により明らかとなった。この度、これらの不要な共振モードを抑制するための新しい共振器構造を提案し、実験によりその有効性を検討する。さらに、新しい共振器構造を用いて、ラウンドロビン試験を行い、本測定法の測定精度の検討を行う。提案した共振器構造が不要共振モードの抑制に有効であることを計算および実験により実証した。また、ラウンドロビンテストの結果、本測定法の測定精度は、比誘電率に関しては、1%程度であり、誘電正接に関しては、15%程度と見積もられる。

キーワード 遮断円筒導波管法, ラウンドロビン試験, 複素誘電率測定, ミリ波

Improvement of the resonator structure in the cut-off waveguide method and its measurement accuracy

Takashi Shimizu and Yoshio Kobayashi

Department of Electrical and Electric Systems, Saitama University

255 Shimo-ookubo, Saitama-shi, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

E-mail: shimizu@reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract A novel structure of a circular cylindrical resonator for the cut-off waveguide method are proposed to suppress unwanted TE modes in the axial direction and TM modes in the radial direction, respectively. Moreover, the round robin test is performed by using seven copper cavities and three low loss dielectric plates. It is verified numerically and experimentally that the novel structure of the resonator is useful to suppress the unwanted resonance modes. Moreover, it is found that the measurement accuracies of this method are estimated within 1 percent for ϵ_r and within 15 percents for $\tan\delta$.

Keyword Cut-off circular waveguide method, Round robin test, Complex permittivity measurements, Millimeter wave

1. はじめに

近年の情報通信の急速な進展に伴い、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、ミリ波回路への応用のために低損失かつ低価格な新材料の開発が求められている。

ミリ波帯において、それらの誘電体材料を評価する測定法がいくつか報告されている[1]-[4]。筆者らは、低損失誘電体材料の複素誘電率の温度依存性を高精度かつ高能率に測定する方法として、遮断円筒導波管法[5]-[7]を提案してきた。

遮断円筒導波管法では、円筒導体の両端に導体板を取り付けたとき、不要な軸方向の共振モードが存在す

ることがわかっている[8]。この不要な共振モードを抑制するため、電波吸収体を導体板の代わりに取り付ける必要がある。しかしながら、その吸収特性が十分でないと、不要モードがわずかに共振し、無負荷 Q 測定に影響をおよぼす。さらに、最近の研究において、不要な半径方向の共振モードも存在することがわかった。

本報告では、遮断円筒導波管法に用いる不要な共振モードを抑制するための新しい共振器構造を提案する。提案した構造を用いることにより、不要な軸方向の TE モードと半径方向の TM モードがそれぞれ抑制されることを計算および実験により実証する。さらに、本測定法の測定精度を調べるために、4 個の従来構造の共振器および 3 個の新構造の共振器と 3 枚の低損失誘電体平板を用いて、ラウンドロビン試験を行う。

2. 新しい共振器構造

新しい共振器構造を図 1(a)に示す。直径 D 、長さ H の導体円筒の中央に厚さ t 、直径 d (ただし、 $d > D$) の誘電体平板を装荷し、遮断 TE_{0m1} モード誘電体円板共振器を構成する。この共振器には、2 つの改善点がある。

- (1) 導体円筒両端に取り付けられる電波吸収体部の構造であり、軸方向で共振する不要なモードの抑制に関係する。その新構造を図 2(a)に示す。この構造は、導体円筒ホーンの内側にスポンジ形状の電波吸収体を挿入することによって構成される。
- (2) 導体円筒中央の試料挿入部の構造であり、半径方向で共振する不要なモードの抑制に関係する。その新構造の写真を図 3(a)に示す。この構造は、試料挿入部の半分を開放することによって構成される。

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、半径方向より磁界結合で行う。

導体円筒の D, H 、比導電率 σ_r ($=\sigma_0/\sigma$, $\sigma_0=58 \times 10^8$ S/m、実効導電率 σ) は、図 1(b)に示す空洞共振器を用いて、 TE_{01p} と TE_{01p} モード ($p, q=1, 2, \dots, p \neq q$) の共振周波数 f_p, f_q および、無負荷 Q, Q_{up} の測定値より求める。この際、導体円筒と短絡板との間に設けた溝により、 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いている[9]。

縁端効果まで考慮した比誘電率 ϵ_r および誘電正接 $\tan \delta$ は TE_{0m1} ($m=1, 2, \dots$) モードの f_0 および Q_u の測定値より次式を用いて求める。

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

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

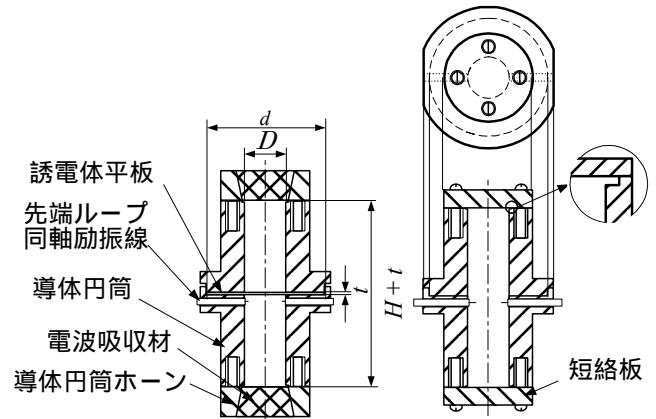
ただし、 R_s は導体表面の表面抵抗である。また、 A, B は式(1)を用いて導体寸法の摂動量から計算される定数であり、これらの式は参考文献[5]に示す。

3. 電波吸収体に関する検討

本測定法において、電波吸収体は重要な役割を果たすにもかかわらず、その検討が不十分であった。そこで、本測定法に適した電波吸収体を見出すために、40-60GHz 帯において、4 種類の電波吸収体の反射特性の比較測定を行う。

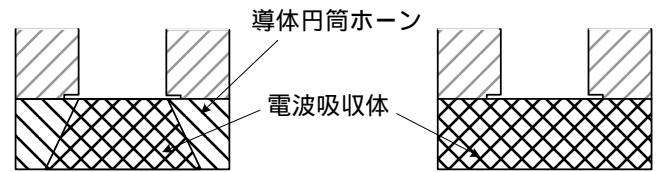
3.1. 測定方法

図 4 にスカラーネットワークアナライザを用いて構成される反射量の測定システムを示す。導波管開口部に測定試料を装着し、周波数特性の測定を行い、そ



(a) 誘電体を装荷した共振器 (b) 空洞共振器

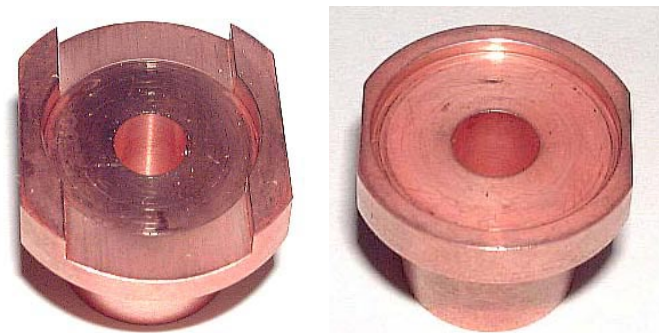
図 1 測定に使用する共振器の断面図



(a) 新構造

(b) 従来構造

図 2 電波吸収体部の構造



(a) 新構造

(b) 従来構造

図 3 共振器の試料挿入部の写真

の測定結果を比較することで反射特性の評価を行う。ただし、導波管開口部に短絡板を装着したときの反射量を 0dB とする。

3.2. 測定結果

測定した電波吸収体は、吸収体 A (固体形状、従来)、吸収体 B (固体形状)、吸収体 C (シート形状)、吸収体 D (スポンジ形状) の 4 種類である。その周波数特性の測定結果の比較を図 5 に示す。

機械的加工が行いやすい固体・シート形状の吸収体 A-C は、反射量が多く、本測定法に用いるには、その

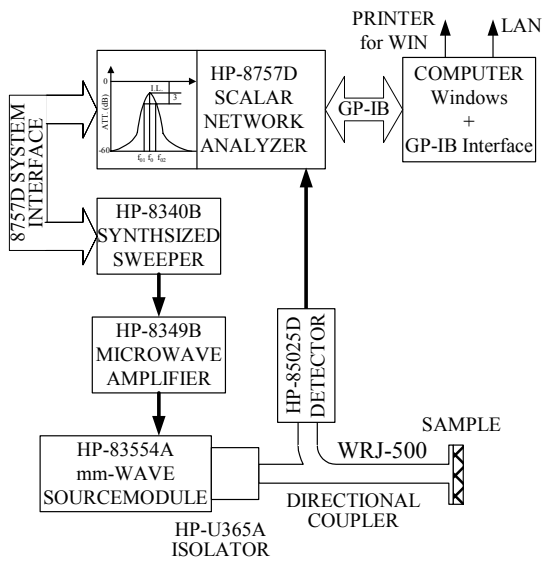


図 4 スカラーネットワークアナライザによる反射量の測定システム

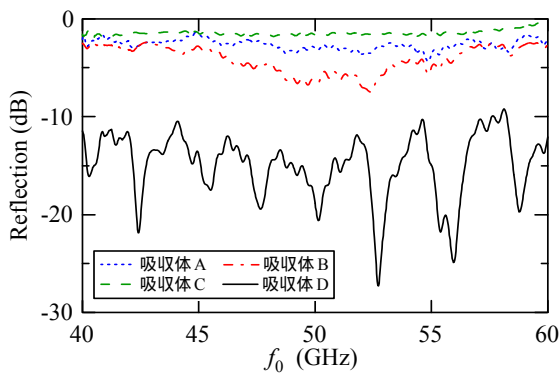


図 5 4 種類の電波吸収体の周波数特性の比較

特性が不十分であることがわかった。また、スポンジ形状の吸収体 D は、良好な特性を有していることがわかった。しかしながら、スポンジ形状であるため、機械的強度が低く、そのまま使用するのは困難である。そこで、図 2(a)に示すような導体円筒ホーンを製作し、その内側に吸収体 D を挿入することにより、本測定法に適した電波吸収体部構造にした。

4. 共振器構造に関する検討

不要な共振モードを抑制する共振器構造に関する検討を行う。これらの共振モードは軸方向の不要 TE モードおよび半径方向の不要 TM モードに分類できる。

4.1. 軸方向の不要 TE モード

図 2(b)に示す従来構造の電波吸収体を取り付けた 3 つの共振器を用いて、2 枚のサファイア平板(A:厚さ $t=0.298\text{mm}$ 、B: $t=0.506\text{mm}$)の複素誘電率測定を行う。た

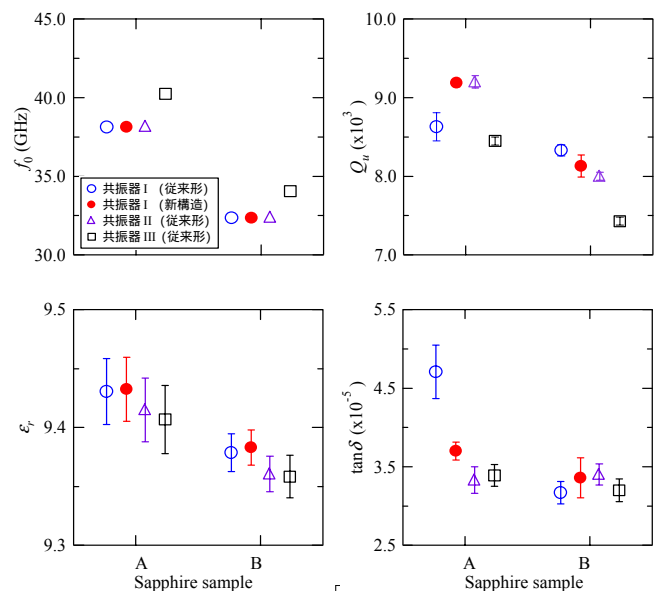
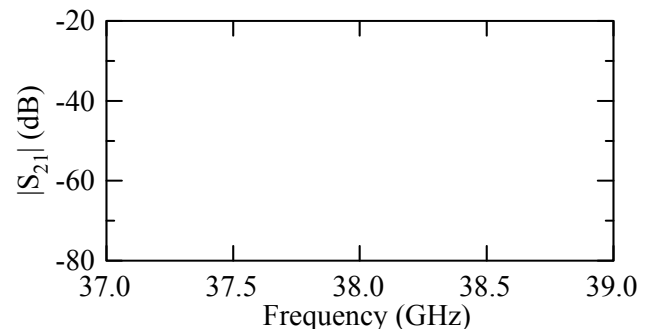


図 6 サファイア平板(A: $t=0.298\text{mm}$, B: $t=0.506\text{mm}$)の測定結果



だし、使用した3つの共振器の D , H , σ_r は空洞共振器の f_0 および Q_u の測定値より決定され、共振器 I: $D=6.991\text{mm}$, $H=30.917\text{mm}$, $\sigma_r=84.8\%$ 、共振器 II: $D=6.985\text{mm}$, $H=26.117\text{mm}$, $\sigma_r=76.2\%$ 、共振器 III: $D=6.480\text{mm}$, $H=24.289\text{mm}$, $\sigma_r=75.0\%$ である。

従来構造の電波吸収体付き共振器による測定結果を図6に白抜きの各印で示す。共振器Iを用いたとき、サファイア平板Aの $\tan\delta$ の値が他の共振器を用いたときに比べ、かなり高いことがわかる。また、サファイア平板AとBで ϵ_r の値が異なっている。これは、試料によるばらつき、またはc軸の不一致が原因と考えられる。

サファイア平板Aを装荷した共振器Iの周波数応答の測定結果を図7に示す。図中、破線が従来構造の電波吸収体を取り付けた場合、点線が導体板を取り付けた場合である。図7より、従来構造の電波吸収体を取り付けた時は、他の共振モードが観測されていない。しかし、導体板を取り付けた時は、38.2GHz付近に不要な共振モードが存在することがわかる。

そこで、この共振モードの電界分布を3次元電磁界シミュレータAnsoft HFSS™ [10]を用いて計算した。その計算結果を図8に示す。これより、導体円筒部分で共振する軸方向の TE_{116} モードであることがわかった。さらに、導体円筒中央部で θ 方向に電界が一様な TE_{01} モードが存在し、それが軸方向の不要な TE_{116} モードと結合していることがわかる。以上より、従来構造の電波吸収体が軸方向の不要TEモードを抑制するのに十分な減衰特性を有していなかったため、軸方向の不要TEモードがわずかに共振した。このため、測定モードである TE_{011} モードに影響をおよぼし、 Q_u の測定値が低下したと結論される。

次に、図2(a)に示す新構造の電波吸収体部を取り付けた共振器Iを用いて、サファイアAの測定を行った。その結果を図6に丸印で示す。また、周波数応答の測定結果を図7に実線で示す。図より、 $\tan\delta$ の値が他の共振器を用いた時の値と測定誤差の範囲で一致していることがわかる。

以上の結果より、新構造の電波吸収体部が長さ方向のTEモードの抑制に有効であることを実証した。

4.2. 半径方向の不要TMモード

図3(b)に示す従来構造の試料挿入部をもつ共振器を用いて、 $t=1.165\text{mm}$ の改質ポリオレフィン平板の周波数応答の測定を行った。その測定結果およびHFSSによる計算結果を図9(a)に実線および破線でそれぞれ示す。また、図の上部に、誘電体円板装荷遮断円筒導波管形共振器のモードチャート[5]から求めた共振周波数および共振モード名を示す。結果より、モード

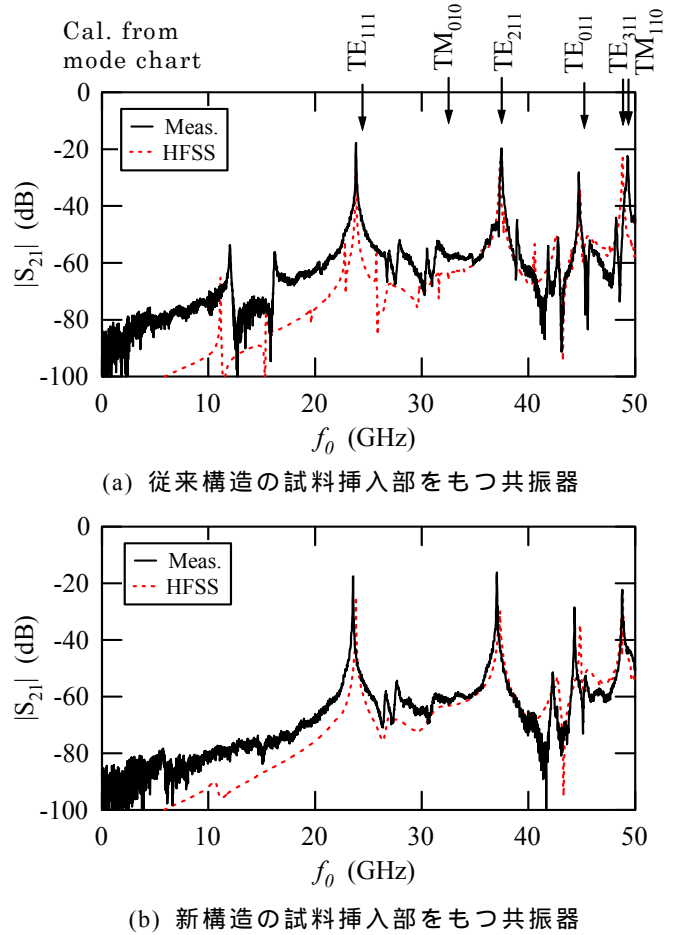


図9 改質ポリオレフィン($t=1.165\text{mm}$)の周波数応答の測定結果

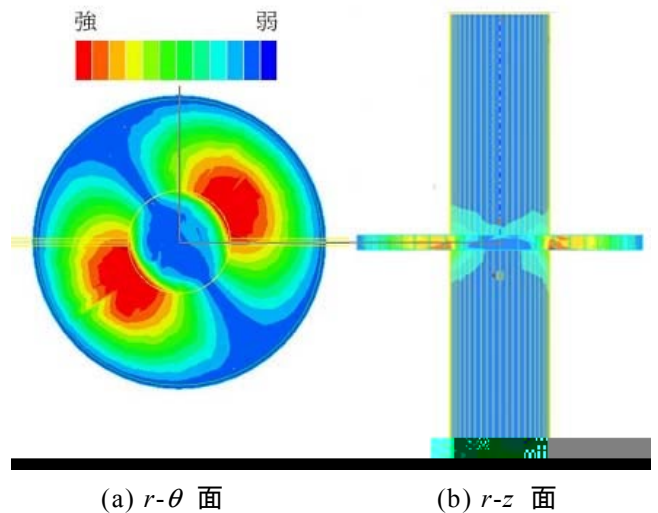


図10 従来構造の試料挿入部をもつ共振器を用いたときの12GHzにおける電界分布

チャートに存在しない共振モードが12, 16, 30, 38, 41, 48GHz付近に現れていることがわかる。

そこで、これらの共振モードの電界分布をHFSSに

より計算した。一例として、図 10に 12GHz における従来構造の試料挿入部をもつ共振器の電界分布を示す。これより、この不要モードが試料挿入部で共振する半径方向の TM_{110} モードであることがわかった。これらのモードは、 TE_{011} モードに近接したとき、 Q_u の測定値に影響をおよぼす。

半径方向の不要 TM モードを抑制するために、試料挿入部の半分を開放にした共振器構造を図 3(a)に示す。この共振器構造による周波数応答の測定結果および計算結果を図 9(b)に示す。これより、12, 16, 30, 38, 41, 48GHz 付近で共振していたモードチャートに存在しない半径方向の不要 TM モードが抑制されていることがわかる。

以上の結果より、新構造の試料挿入部が半径方向の TM モードの抑制に有効であることを実証した。

5. ラウンドロビン試験の測定結果

本測定法の測定精度を検討するために、7 個の共振器 (No. 1-7) を製作した。ただし、共振器 No. 1-4 は、図 3(b)に示す従来構造の試料挿入部をもつ共振器であり、共振器 No. 5-7 は、図 3(a)に示す新構造の試料挿入部をもつ共振器である。表 1に室温での各共振器の寸法および比導電率の測定結果を示す[11]。ただし、 D , H は、数組の TE_{01p} と TE_{01p} モード ($p, q=1, 2, \dots, p \neq q$) の f_0 の測定値から計算した値の平均値である。

7 個の共振器を用いて、 $t=0.508\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ の BMT セラミクス平板 (以下 BMT)、 $t=0.506\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ の sapphire 平板 (以下 MPO) の複素誘電率を TE_{011} モードにより、室温にて測定した。測定は 10 回行い、そのうち、 Q_u 値が高い 5 つを選び、その平均値を測定値とし、その平均二乗誤差を測定誤差とした。その測定結果を図 11に示す[11]。

新しい共振器を用いるにつれ、 ϵ_r が低く評価される傾向にあることがわかる。これは、導体円筒と試料間の隙間が製作技術の向上により改善されているためと考える。

個々の共振器における ϵ_r の測定精度は、いずれの測定試料でも $\pm 0.3\%$ 程度であり、おもに D, t, f_0 の測定誤差によって決定される。さらに、共振器間の測定値のばらつきを考慮した ϵ_r の測定精度は 1% 程度である。また、個々の共振器における $\tan\delta$ の測定精度は、BMT と MPO が $\pm 4\%$ 、sapphire が $\pm 6\%$ であり、おもに Q_u, σ_r の測定誤差によって決定される。さらに、共振器間の測定値のばらつきを考慮した $\tan\delta$ の測定精度は 15% 程度である。

さらに、最近製作した共振器 No.5-7 に着目すると、共振器間の測定値のばらつきが小さいことがわかる。これより、共振器の製作技術が向上し、安定した共振器製作が行われれば、共振器間のばらつきを考慮した

表 1 7 個の共振器の寸法と比導電率の室温での測定結果

共振器 No. 製作(年/月)	$f_0(\text{GHz})$	Q_u	$D(\text{mm})$	$H(\text{mm})$	$\sigma_r(\%)$
1 (1999/10)	52.521 ± 0.001	11130 ± 50	6.991 ± 0.002	30.917 ± 0.080	84.8 ± 0.7
2 (2000/02)	52.646 ± 0.001	11050 ± 40	6.993 ± 0.006	23.770 ± 0.283	82.3 ± 0.5
3 (2000/03)	56.735 ± 0.001	10210 ± 20	6.480 ± 0.003	24.289 ± 0.008	75.0 ± 0.2
4 (2000/03)	52.640 ± 0.001	10680 ± 40	6.985 ± 0.002	26.118 ± 0.105	76.2 ± 0.5
5 (2002/09)	52.366 ± 0.001	10560 ± 50	7.011 ± 0.002	31.066 ± 0.044	76.1 ± 0.7
6 (2002/09)	52.286 ± 0.001	10650 ± 60	7.022 ± 0.002	31.045 ± 0.045	77.3 ± 0.8
7 (2002/09)	52.292 ± 0.001	10360 ± 60	7.020 ± 0.002	31.033 ± 0.031	73.2 ± 0.8

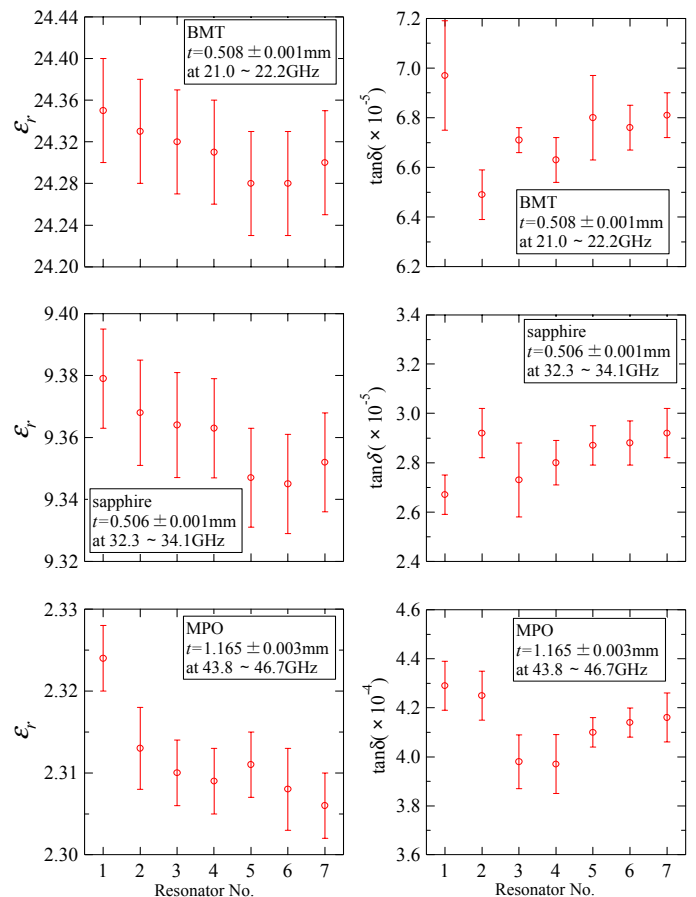


図 11 7 個の共振器による誘電体平板の室温での測定結果

測定精度は、個々の共振器の測定精度に近づいていくと期待できる。

6. まとめ

提案した共振器構造が軸方向の不要 TE モードおよび半径方向の不要 TM モードの抑制に有効であることを計算および実験により実証した。この共振器構造を用いることにより、不要モードの影響を気にすることなく、安定した測定が実現された。また、本測定法の測定精度は比誘電率測定に関しては、 $\epsilon_r=2\sim30$ の範囲で 1%以内であり、誘電正接測定に関しては、 $\tan\delta=10^{-2}\sim10^{-5}$ の範囲において、15%以内であると推定される。

この結果、新しい共振器構造は、遮断円筒導波管法の測定精度および安定性の向上に有効であると結論される。

謝辞

サファイア平板を御提供頂いた(株)信光社に深謝いたします。また、実験に御協力頂いた本学の三井裕司氏および実験装置の製作して頂いた本学の加藤正之氏に感謝いたします。なお、本研究の一部は、文部科学省の平成 15 年度科学研究費補助金(課題番号 14550318)によって行われた。

参 考 文 献

- [1] A.L.Cullen and P.K.Yu, "The accurate measurement of permittivity by mean of an open resonator," *Proc. Roy. Soc. A*, Vol.325, pp493-509, 1971
- [2] Y. Kogami, H. Tamura and K. Matsumura, "Measurements of complex permittivities in 100GHz band by the Whispering-gallery mode resonator method," *IEICE Trans.*, vol. J84-C, no. 8, pp703-706, Aug. 2001.
- [3] Y. Ishikawa, T. Tanizaki, A. Saitoh, and T. Yoneyama, "Complex permittivity measurement of dielectric materials using NRD guide at millimeter wave length," *IEICE Trans.*, vol. J-78-C-1, no. 9, pp.418-429, Sept. 1995.
- [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] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of GaAs plates by a circular waveguide method", *2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, THIF-51, pp.2195-2198, Jun. 2001.
- [6] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of some low-loss dielectric plates by a novel cut-off circular waveguide method," *32nd European Microwave Conf. Proc.*, pp. 825-828, Sep. 2002.
- [7] 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.
- [8] 針谷, 清水, 小林, "遮断円筒導波管法によるミリ波複素誘電率の測定結果に関する検討," 信学技報, MW2001-137, pp.85-90, Dec. 2001.
- [9] T. Shimizu, Z. Ma and Y. Kobayashi, "Design of a grooved circular cavity for separating degenerate TE and TM modes in dielectric substrate measurements", *2002 Asia-Pacific Microwave Conf. Digest*, vol.2, TH4D-5, pp.1019-1022, Nov. 2002.
- [10] Ansoft HFSS (High-Frequency Structure Simulator) ver.8.5, 3D EM simulation software, Ansoft Co., Pittsburgh, PA, 1989.
- [11] 西野, 清水, 小林, "遮断円筒導波管法による複素誘電率測定のラウンドロビンテスト," 2003 電子情報通信学会総合大会, C-2-78, pp.110, Mar. 2003.