信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE. MW99-25 (1999-05)

# 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

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 埼玉県浦和市下大久保 255 電話: 048-858-3477, Fax: 048-857-2529 E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本報告では、ミリ波帯において、低損失誘電体平板材料の複素誘電率を測定するために、 モードマッチング法による厳密な数値解析に基づいた同軸励振空洞共振器法を提案する。

この測定方法を用いて、GaAs 平板、PTFE 平板、Crythnex 平板の複素誘電率を室温において測定した。また、GaAs 平板の複素誘電率の周波数依存性を 10GHz-40GHz の範囲で測定した。

キーワード ミリ波 同軸励振 複素誘電率測定

# Millimeter wave measurements of complex permittivity of dielectric plates by a cavity resonance method based on coaxial excitation

Takashi Shimizu and Yoshio Kobayashi

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

Abstract A novel circular resonance method based on a rigorous analysis by the mode matching technique is proposed to measure the complex permittivity of low loss dielectric plates accurately in the millimeter wave region.

By this method, the complex permittivity for GaAs plate ,PTFE plate and Crythnex plate were measured at room temperature, and the frequency dependence of complex permittivity for GaAs plates were measured in the frequency range 10 to 40G Hz. It is verified that this method is useful as a precise measurement method of the permittivity of low loss dielectric plates in the microwave and millimeter wave regions.

Key words Millimeter wave Coaxial cable excitation Complex permittivity measurement

空洞共振器法は、誘電体平板試料の比誘電率 $\varepsilon_r$ と 誘電正接 $\tan\delta \varepsilon$ 、マイクロ波帯において非破壊かつ 高精度に測定する方法として知られている[1]-[3]。 この方法では誘電体平板材料を長さ方向に2等分し た空洞の間に挟み構成する。 $\varepsilon_r$ と $\tan\delta$ は $TE_{0m1}$ モー ドの共振周波数 $f_0$ と無負荷Q、Quより計算すること ができる。

近年、ミリ波帯において、励振及び検波にWRJ-500 方形導波管を用いた誘電体平板の測定が行われてい る[4][5]。しかしながら、この方法では共振器の構造 上、挿入損失の調整が容易ではない。現在ではミリ 波帯においても、同軸系によって構成される Vector network analyzers を利用できる。

本報告では、励振及び検波に同軸線路を用いるこ とにより、50GHzにて誘電体平板材料の複素誘電率 を正確に測定することができる同軸励振空洞共振器 法を提案する。

# <u>2. 測定原理</u>

図1にRitz-Galerkin法による解析図を示す。比誘電 率 $\epsilon_g$ 、厚さgの支持誘電体に挟まれた比誘電率 $\epsilon_r$ 、厚 さt、直径dの誘電体平板が直径D、高さHの導体空 洞の間に置かれる。試料の $\epsilon_r \ge \tan\delta$ はTE<sub>011</sub>モード の共振周波数f<sub>0</sub>と無負荷Q、Q<sub>u</sub>の測定値から、モー ドマッチング法による厳密な解析[1]に基づいて開発 された Windows 用プログラムを用いて求めることが できる。

 $\epsilon_r$ 、 $tan\delta$ は次式で求められる。

det F ( $\mathbf{f}_0$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}_g$ , t, g, D, H, d) = 0 (1)

$$\tan \delta = A / Q_{\mu} - BR_{s}$$



さらに、R<sub>s</sub>は導体空洞の表面抵抗であり、次式で与 えられる。

$$R_{s} = \sqrt{\pi f_{0} \mu_{0} / \sigma} \quad (\Omega) \tag{3}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \ (\text{H} / \text{m}) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_0 \boldsymbol{\sigma}_r \tag{5}$$

$$\sigma_0 = 58 \times 10^6 \text{ (S/m)}$$
 (6)

ここで、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\sigma$ 、 $\sigma_0$ はそれぞれ導体 の導電率、万国標準軟銅の導電率であり、比導電率  $\sigma_r$ は後述のように空洞の $Q_u$ の測定値より実験的に 決定される。また、A とBはD、H、gの導体摂動に よる共振周波数の摂動量から計算される定数であ り、次式により与えられる。

$$A = \frac{f_0}{-\left(\frac{\Delta f_0}{\Delta \varepsilon_r}\right)}$$
(7)

$$\mathbf{B} = \frac{1}{120\pi k_0} \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\Delta \varepsilon_r}{\Delta f_0} \left( \frac{\Delta f_0}{\Delta H} + \frac{\Delta f_0}{\Delta R} + \frac{\Delta f_0}{\Delta g} \right)$$
(8)

### 3. 共振器構造

図2(a)は50GHzでの測定に用いた空洞共振器の構 造を示す。この共振器は誘電体平板試料を挟むため に、直径D、長さHの導体円筒空洞が中央で2つに 分割されている。円筒空洞の両端部の溝は、縮退し ているTM<sub>11p</sub>モードの共振周波数をTE<sub>01p</sub>モードか ら分離するためのものである。空洞共振器の励振及 び検波は、短絡板側より先端に微小ループを持つ UT-47 セミリジッド同軸線路(外径1.2mm)によっ て行われる。誘電体平板の $\varepsilon_r$ 、tanδを測定する前に、 あらかじめ空洞共振器のD、H、σを測定しておく必 要がある。ここで、DとHはTE<sub>013</sub>とTE<sub>014</sub>モード の共振周波数f<sub>0</sub>の測定値から、 $\sigma_r$ はTE<sub>013</sub>モードの f<sub>0</sub>と無負荷Q、Q<sub>u</sub>から求められる[3]。表1にその 測定結果を示す。

厚さtの誘電体平板試料は図2(b)に示すように2 つに分割された共振器の間に挟み、クリップで固定 される。この時、不要な空洞共振モードを抑制する ために、円筒空洞の両端に電波吸収材をおく。高精 度な測定を行うためにTE<sub>0m1</sub>モードを用い、先端に ループを持つ同軸線路により円筒側面から励振を行 う。このような空洞共振器構造で、D = 3mmにすれ ば、100GHz での材料測定が可能である。

(2)

ここで、j<sup>'</sup>nm



#### 図5 GaAs 平板の測定結果

図4は図2(b)の構造での周波数応答の測定結果を 示す。モードチャートより計算された共振周波数か ら、測定された共振波形のモードを容易に判別する ことができる。また、図4の上に判別した各モード を示す。この場合、最も低い共振周波数17GHzがモー ドチャートからTE<sub>111</sub>モードであることがわかる。 これより、 $\epsilon_a$ が約13である。また、図4に示すよう に、TE<sub>011</sub>モードのf<sub>0</sub>が26.5GHz、TE<sub>021</sub>モードのf<sub>0</sub> が39GHzであると予想される。

# <u>5. 測定結果</u>

t=0.607mmのGaAs平板の周波数依存性の測定を室 温 20 にて行った。図 5 にその測定結果を示す。 13GHzと15GHzの測定結果は寸法の異なる他の 2 つ の空洞共振器によるものであり、26.5GHzと39GHz の測定結果は図 2(b) に示す共振器の TE<sub>011</sub>、TE<sub>021</sub> モードを用いて測定したものである。これらの測定 結果は参考文献[6]に示す値とよく一致している。 参考文献[4]では、GaAs平板のεrは約10であるが、 これは測定に使用する共振モードを間違えたためで ある。

また、PTFE 平板とCrythnex 平板の複素誘電率測 定を室温にて行った。表2にその測定結果を示す。こ れらの測定結果は参考文献 [4] に示す値と誤差の範 囲内で一致している。

## <u>6. まとめ</u>

同軸励振空洞共振器法は、50GHzのミリ波帯において、低損失材料誘電体平板材料のε<sub>r</sub>とtanδの測定に有効であることが実証された。また、本法は100GHzまでの測定に有効であると期待される。

# <u>謝辞</u>

本研究に際し、GaAs 材料のご提供を頂いた株式 会社日立製作所中央研究所の近藤博司氏、Crythnex 平板をご提供いただいた富士通カンタムデバイス株 式会社の平地康剛氏、実験装置の製作にご尽力いた だいた埼玉大学の加藤正之技官に深く感謝いたしま す。

#### 参考文献

[1] Y.Kobayashi and J.Sato, "Nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate materials bt a cavity resonance method,"信学技報, MW87-53, pp.41-48, Oct. 1987.

[2] Y.Kobayashi and J.Sato, "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method," 信学技報, MW88-40, EMCJ88-58, Nov. 1988.

[3] G. Zhang and Y. Kobayashi, "Compelx permittivity measurement of dielectric platees using the lowest  $TE_{111}$  mode of a circular cavity resonator," 1996 China-Japan Joint Meeting on Microwaves, Proc., p32-35, Apr. 1996.

[4] 中岡,小林; "50GHz帯における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,MW97-118, pp.27-30. Nov. 1997.

[5] G. Zhang, S. Nakaoka, and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temprature dependence of complex permittivity of dielectric plates by the cavity resonance method," 1997 Asia Paciffic Microwave Cof. Proc., pp.913-916, Dec. 1997.

[6] W. E. Courtney, "Complex permittivity of GaAs and CdTe at microwave frequencys," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-25, pp.697-701, Aug. 1977.