銅層形成誘電体基板のマイクロ波・ミリ波評価

小林 禧夫*

Microwave and Millimeter-Wave Evaluation of Copper-Clad Dielectric Substrates

Yoshio KOBAYASHI*

*サムテック有限公司 (〒338-0003 埼玉県さいたま市中央区本町東 1-6-1 大野ビル 201)

*SUMTEC, Inc. (Ohno Bldg. 2F, 1-6-1 Hommachi-Higashi, Chuo-ku, Saitama City, Saitama 338-0003)

1. はじめに

近年、情報機器の動作速度は高速化してギガビット領域に入り、また無線通信機器も高周波化してマイクロ波・ミリ波領域に入り、高周波数帯における低損失誘電体基板材料の開発が盛んになっている。さらに多品種少量生産時代の到来とともに、ますます情報機器の開発期間が短くなり、試作回数の減少を目的とした電子回路の高精度・短期間設計の実現が望まれている。

最近、誘電体基板の正確な材料定数の測定結果を用いた電磁界解析ソフトの計算によりマイクロストリップ線路やフィルタの高精度設計が可能になることを示した^{1),2)}。また、筆者らは設計に必要な誘電体材料の高精度測定法を種々開発し^{3)~11)}、マイクロ波・ミリ波帯にわたり種々の基板材料を評価してきた。この結果、低損失材としてよく用いられてきたポリテトラフルオロエチレン (PTFE) には 23°C 付近に相転移による比誘電率の急激な変化があることがわかった^{7),8),11)}。最近開発されたシクロオレフィンポリマー (COP)¹²⁾ は、PTFE と同程度の低誘電率低損失でありながら比誘電率の温度変化が緩やかなため電子回路基板として有望である。しかしガラス転移温度が 160°C 付近にあり、はんだ付が困難なため応用は限られるかもしれない。一方、液晶ポリマー (LCP) はマイクロ波・ミリ波回路用低損失材として有望視されている^{13),14)}。しかしロール状に巻き取られた LCP フィルムは比誘電率に面内異方性があることがわかった^{15)~17)}。最近 LCP 膜の改質方法が提案され、その有効性が実証された¹⁸⁾。

本論文では、有機材料を用いて構成されるいくつかの基板について、共振法による周波数依存性および温度依存性の測定方法および測定結果について紹介する。

2. 材料評価に用いた測定方法^{3)~10)}

電子回路基板として図 1 に示す銅層形成誘電体積層基板がよく用いられる。この回路設計を高精度に行うには、基板の垂直方向の比誘電率 ϵ_{rn} と誘電正接 $\tan\delta_n$ および平面方

向の ϵ_{rt} , $\tan\delta_t$ に加えて、基板表面に形成された銅箔の表面比導電率 σ_{sf} および界面比導電率 σ_{sb} に関する測定値が必要とされる^{1),2)}。これらの材料定数の測定には、高精度測定法として開発された種々の共振法を用いた^{3)~11)}。比誘電率は共振器の共振周波数の測定値から、また誘電正接 $\tan\delta$ および比導電率は共振器の性能指数 Q の測定値から、電磁界解析に基づいた計算から求められる。測定精度は比誘電率測定に関して 1~2%、誘電正接測定に関して 10~30%、比導電率測定に関して 3% 程度である。以下に測定法の概要を述べる^{3)~11)}。

(1) ϵ_{rn} と $\tan\delta_n$ の測定方法

本測定には図 2 に示す同軸励振平衡形円板共振器を用いた。この共振器は、高次 TM_{0m0} モードを用いることにより 6~110 GHz にわたる周波数依存性の測定が可能であり、また銅板からの試料の熱伝導が良好なため温度依存性の正確な測定にも有効である。

図 1. 銅層形成誘電体積層基板の構造図

図 2. 同軸励振平衡形円板共振器

図3. 円筒空洞共振器の構造

図4. 遮断円筒導波管の構造

図5. 両端短絡形誘電体円柱共振器の構造

(2) ϵ_r と $\tan\delta_t$ の測定方法

本測定には、図3に示す空洞共振器法（6～30 GHz）および図4に示す遮断円筒導波管法（30～80 GHz）を用いた。周波数依存性測定には寸法の異なる複数の共振器を用いた。温度依存性の測定には平面試料への熱伝導時間を十分に考慮して行なった。

(3) σ_{rf} と σ_{rb} の測定方法

σ_{rf} の測定には図5に示す2個の両端短絡形誘電体円柱共振器を用いた。まず両共振器のQ値の測定結果から銅箔の表面抵抗 R_{sf} を求め、さらに計算により σ_{rf} の値を求める。 σ_{rb} の測定は、同様の誘電体共振器を用いて行った^{7),8)}。周波数依存性の測定には複数の誘電体共振器を用いて行う必要がある。

3. 測定結果

3.1 ガラスクロス・エポキシ樹脂積層基板 (FR-4)

2種類のFR-4基板（R-1766：パナソニック，ELC-4765：住友ベークライト）について、比誘電率と誘電正接の周波数特性を5～25 GHzの範囲で測定した^{7),8)}。その結果、両基板の比誘電率には周波数依存性はなく、R-1766では $\epsilon_{rn} = 4.01$, $\epsilon_{rt} = 4.43$ ，またELC-4765では $\epsilon_{rn} = 4.22$, $\epsilon_{rt} = 4.55$ であった。さらに $\tan\delta_n$ と $\tan\delta_t$ は両基板で異なり、また周波数とともに0.015～0.25の間で直線的に上昇する傾向が見られた。このようにFR-4基板特性は材料供給メーカにより特性が異なるので、使用する基板ごとに測定する必要がある。

3.2 PTFE 基板

比誘電率と誘電正接の周波数特性を7～76 GHzの範囲で測定した⁸⁾。その結果、 $\epsilon_{rn} = \epsilon_{rt} = 2.05$ であり、比誘電率に周波数依存性は見られなかった。 $\tan\delta_n = \tan\delta_t$ は周波数の増加に伴い、0.0002～0.0004の間で直線的に上昇する結果となった。また、 ϵ_m と $\tan\delta_n$ の温度特性を-40～80℃の範囲で測定した結果、23℃付近において急激に変化することが明らかとなった^{8),11)}。

3.3 ガラスクロス PTFE 積層基板 (CGA500：中興化成)

比誘電率と誘電正接の周波数特性を6～60 GHzの範囲で測定した⁸⁾。その結果、 $\epsilon_{rn} = 3.1$, $\epsilon_{rt} = 3.7$ であり、比誘電率に周波数依存性は見られなかった。 $\tan\delta_n$ は周波数の増加に伴い、0.002～0.004の間で直線的に増加した。また、 $\tan\delta_t$ は、6～40 GHzにおいて周波数の増加に伴い、0.0038～0.007で直線的に増加した。平衡円板共振器のTM₀₁₀モードを用いた同一基板の温度依存性の測定結果²⁰⁾を図6に示す。共振周波数 f_0 の温度依存性の測定結果より ϵ_{rn} の温度依存性を求め、無負荷Q、 Q_u の温度依存性の測定結果より $\tan\delta_n$ の温度依存性を求めた。各特性において23℃付近でみられる大きな変化は、PTFEの影響によるものである。

図6. ガラスクロス PTFE 基板の温度依存性測定 (CGA500)

3.4 COP 基板 (ZF16: 日本ゼオン)¹⁹⁾

測定に用いた COP 基板 (ZF16) は、無色透明で固く、厚さの均一性はマイクロメータの測定により $1\mu\text{m}$ 以内のばらつきに抑えられていた。円形銅箔直径 15 mm の平衡円形板共振器を用いたときの厚さ $t = 0.378\text{ mm}$ 、面積 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ の平板試料の周波数応答波形を図 7 に示す¹⁹⁾。10～110 GHz にわたり 8 個の TM_{0m0} ($m = 1 \sim 8$) モードの共振波形が観測されている。各モードの測定値から求めた ϵ_r および $\tan\delta_n$ を図 8 に示す。同図には複数の空洞共振器と遮断円筒導波管を用いて測定した ϵ_{rt} および $\tan\delta_t$ の測定結果も示す¹⁹⁾。これより、ZF16 試料は $\epsilon_{rn} = \epsilon_{rt} = 2.35$ で周波数依存性のない等方性材料であることがわかった。また $\tan\delta_t = \tan\delta_n = 0.0002 \sim 0.0006$ の間で周波数と共に直線的に上昇する傾向を示した。さらに TM_{010} モードを用いて共振周波数および無負荷 Q, Q_u の温度依存性の測定結果から ϵ_{rn} および $\tan\delta_n$ の温度依存性を求めた。 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ にわたる測定結果を図 9 に示す²⁰⁾。測定値 f_0 から ϵ_{rn} を求める際、ZF16 試料の線膨張係数 $\tau_c = 70\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ および銅箔直径の線膨張係数 $16.8\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ を考慮して計算した。また測定値 Q_u から $\tan\delta_n$ を求める際、銅箔導電率の熱抵抗係数 $C_f = 0.00393$

図 7. COP 基板 (ZF16) の周波数応答波形

図 8. COP 基板 (ZF16) の複素比誘電率測定結果

図 9. COP 基板 (ZF16) の温度依存性の測定結果

を考慮して計算した。これより Q_u 値が温度上昇と共に減少するにも関わらず、導体損の増加が大きいため $\tan\delta_n$ は温度と共に減少する結果となった。

以上より COP 材は低誘電率低損失に加えて、PTFE のように 23°C 付近における急激な特性変化もないので、種々の測定法を比較する際の標準試料として有望であると結論される。

3.5 LCP 基板 (CT-Z: クラレ)

初期の LCP 基板は高分子の配向性が強く、図 10 に示すように、 z 方向の ϵ_{rn} に加えて面内でも x 方向と y 方向で比誘電率 (ϵ_x, ϵ_y) が異なる面内異方性をもつものであった^{15)~17)}。図 3 に示す円形空洞共振器には直交する TE_{111} モードが存在する。この共振モードの共振周波数が x 方向と y 方向で異なることを利用して ϵ_x と ϵ_y を分離測定する方法が提案された^{15)~17)}。この LCP 基板の測定結果は周波数依存性なく $\epsilon_{rn} = 2.72$, $\epsilon_x = 3.6$, $\epsilon_y = 3.3$ であり、 x 方向と y 方向で約 10% の比誘電率差があった^{15), 16)}。この面内異方性は電子回路の設計を困難にするため、望ましくない特性である。面内異方性の原因が基板の x 方向と y 方向の線膨張係数の差に関係することに着目して、 x 方向と y 方向で同じ比誘電率を持つように LCP 膜の改質が行われた¹⁸⁾。この改質 LCP フィルム (CT-Z) の測定結果を図 11 に示す¹⁷⁾。これより 6～25 GHz にわたり面内異方性がなく周波数依存性のない $\epsilon_{rn} = 2.87$, $\epsilon_x = \epsilon_y = 3.35$ の CT-Z 膜が開発された。また遮断円筒導波管法を用いて CT-Z フィルムと共に密度の高い CT-F に関する ϵ_{rn} と $\tan\delta_n$ の温度依存性の測定結果

図 10. 誘電体基板の複素比誘電率の異方性

図 11. 改質 LCP フィルム (CT-Z) の測定結果

図 12. 2 種類の LCP の ϵ_r , $\tan \delta$ の温度依存性測定結果

を図 12 に示す²⁰⁾。図中○印は最初の測定中、温度上昇と共に試料が伸びて空洞内でたわんだためとわかり、以後の測定では膜に重りをつけてぴんと張るようにした²¹⁾。 ϵ_m はともに温度依存性の少ない良好な特性が得られた。また $\tan \delta_n$ はともに同じ温度依存性を示した^{20), 21)}。

3.6 表面および界面比導電率の測定

誘電体基板の両面には回路を形成するための銅箔が接着される。従来より接着強度を上げるために基板と接する銅箔面は 2~5 μm 面粗しされていた。マイクロ波・ミリ波帯では表皮効果により電流は銅表面しか流れないため、周波数上昇とともに導体損が急激に上昇する。この影響を評価するために標準軟銅の導電率 $58 \times 10^6 \text{ S/m}$ に対する実効比導電率を導入した。複数個の誘電体共振器を構成して測定した種々の銅張基板の σ_{rf} および σ_{rb} の測定結果を図 13 に示

図 13. 表面および界面比導電率の測定結果

す⁸⁾。特に ZF-16 基板表面への銅層形成は UV 照射による表面改質後、無電解銅めっきを 0.5 μm 施し、さらに電界めっきで 10 μm の厚さの銅箔層が形成されたものである²²⁾。銅張積層板に比べて、マイクロ波特性が良好であり、今後この種の銅箔形成の開発が期待される。

4. まとめ

各種共振器法により測定された銅層形成誘電体基板について、面方向・垂直方向複素比誘電率および銅箔表面・界面比導電率の測定結果を紹介した。これらの測定値を用いた電磁界解析ソフトの計算よりマイクロ波・ミリ波回路の高精度設計が実現されれば、試作による検証過程を相当省略できるものと期待する。またこれらの測定法は新基板材料の開発にも有用である。

謝 辞

本研究で使用了測定装置の開発にご協力頂いた川島製作所の赤坂清三氏に深甚の謝意を表します。

(2015.6.25- 受理)

文 献

- 1) 吉富了平, 小林禧夫, 馬哲旺: “銅張り誘電体積層基板に関する材料定数の測定結果を用いたマイクロストリップ線路の伝搬定数の高精度評価,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 114–120, Mar. 2011
- 2) 相羽 英, 小林禧夫, 馬哲旺: “誘電体積層基板の一軸異方性を考慮したマイクロ波フィルタ設計に関する検討,” 信学論 (C), Vol. J91-C, No. 12, pp. 728–735, Dec. 2008
- 3) Y. Kobayashi: “Microwave characterization of copper-clad dielectric laminate substrates,” IEICE Trans. ELECTRON., Vol. E90-C, No. 12, pp. 2178–2184, Dec. 2007

- 4) 小林禱夫: “銅張り誘電体積層基板のマイクロ波評価技術,” 信学論 (C), Vol. **J89-C**, No. 5, May 2006
- 5) 蓮池健一, 川端広一, 小林禱夫: “マイクロ波帯における誘電体基板の一軸異方性複素誘電率の周波数依存性測定,” 信学論 (C), Vol. **J89-C**, No. 12, pp. 1039–1046, Dec. 2006
- 6) 小林禱夫, 蓮池健一: “実装回路用誘電体基板のマイクロ波・ミリ波評価,” エレクトロニクス実装学会 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会, 平成 18 年度第 3 回公開研究会論文集, Vol. **6**, No. 3, pp. 23–28, Nov. 2006
- 7) 中井 宏, 小林禱夫, 吉富了平, 馬哲旺: “銅張り有機材料基板の複素誘電率及び導電率のマイクロ波特性,” エレクトロニクス実装学会 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会 平成 20 年度第 2 回公開研究会論文集, Vol. **8**, No. 2, pp. 1–6, Aug. 2008
- 8) 小林禱夫: “銅張りプリント配線基板のマイクロ波・ミリ波特性と実測例,” RF ワールド, No. 12, pp. 57–69, Nov. 1, 2010, CQ 出版社
- 9) 小林禱夫, 吉富了平, 馬哲旺: “銅層形成シクロオレフィンポリマー基板のマイクロ波特性評価,” エレクトロニクス実装学会 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会 平成 21 年度第 3 回公開研究会論文集 Vol. **9**, No. 3, pp. 1–4, Nov. 6, 2009
- 10) H. Kawabata, K. Hasuike, Y. Kobayashi, and Z. Ma: “Multi-frequency measurement of complex permittivity of dielectric plates using higher-order modes of a balanced-type circular disk resonator,” Proc. 36th European Microwave Conf., pp. 388–391, Sep. 10–15, 2006
- 11) 清水隆志, 小林禱夫, 馬哲旺: “同軸励振円板共振器法による誘電体基板の複素誘電率温度依存性測定,” 2007 年 電子情報通信学会ソサエティ大会, C-2-79, Sep. 2007
- 12) 宮澤慎介: “情報機器の進化に貢献する素材 “シクロオレフィンポリマー”, ” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **16**, No. 5, pp. 394–398, Aug. 2013
- 13) H. Kanno, H. Ogura, and K. Takahashi: “Surface mountable liquid crystal polymer Package with vertical via transition compensating wire inductance up to V-vand,” IEEE MTT-S nt. Microwave Symp. Dig., pp. 1156–1162, June 2003
- 14) D. C. Thompson, O. Tantot, H. Jallageas, et al.: “Characterization of liquid crystal polymer (LCP) material and transmission lines on LCP substrates from 30 to 110 GHz,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. **52**, pp. 1343–1352, Apr. 2004
- 15) S. Wadayama, Y. Kobayashi, and Z. Ma: “Discussions on microwave measurement of permittivity anisotropy in the plane of dielectric laminate substrates,” Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC2010), FR3C-3, pp. 1773–1776, Dec. 7–10, 2010
- 16) 和田山修平, 小林禱夫, 馬哲旺: “誘電体積層基板の複素誘電率の面内異方性の周波数依存性測定,” 第 25 回エレクトロニクス実装学春季講演大会講演論文集, 10E-01, Mar. 10, 2011
- 17) 和田山修平, 小林禱夫, 馬哲旺: “液晶ポリマーフィルムの複素誘電率の異方性改善の評価,” エレクトロニクス実装学会 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会 平成 23 年度第 3 回公開研究会論文集, Vol. **11**, No. 3, pp. 21–26, Nov. 4, 2011
- 18) 小野寺, 砂本, 小林: “回路基材としての液晶ポリマーフィルムの誘電特性改善,” 第 26 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 8A-02, pp. 51–52, Mar. 2012
- 19) 金子彰吾, 小林禱夫, 馬哲旺: “平衡形円板共振器法による 110GHz にわたる誘電体基板の複素誘電率測定,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, C-2-50, Mar. 14–17, 2011
- 20) 金子彰吾, 小林禱夫, 馬哲旺: “平衡形円板共振器を用いた有機基板の複素誘電率の温度依存性測定,” 2011 信学ソ大会, C-2-76, Sept. 2011
- 21) 常光理志, 小林禱夫, 小野寺 稔: “液晶ポリマーフィルムの複素比誘電率の温度依存性測定,” 第 27 回エレクトロニクス実装学春季講演大会講演論文集, 15C-01, Mar. 5, 2013
- 22) 渡辺充広, 松井貴一, 杉本将治, 本間英夫: “シクロオレフィンポリマーへの平滑回路形成,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **10**, No. 3, pp. 229–233, May 2007

著者紹介

小林禱夫 (こばやし よしお)
 2005 年 3 月 埼玉大学工学部定年退職
 埼玉大学名誉教授。工学博士。
 2004 年 7 月サムテック有限会社創業,
 現在代表取締役
 電子情報通信学会フェロー。
 IEEE Life Fellow