

基板材料のミリ波対応誘電率計測技術

(国研)産業技術総合研究所 Kato Yuto
加藤 悠人

物理計測標準研究部門電磁気計測研究グループ・主任研究員
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
☎029-861-3541

はじめに

近年、高速大容量の無線通信を可能にするミリ波帯電磁波の利用が急速に拡大している。2020年3月より日本でも5G(第5世代移動通信システム)の商用サービスが開始されたが、日本では5G用の周波数としてすでに28 GHz帯などが割り当てられ、最大で71 GHzまでの割り当てが国際的に合意されている¹⁾。通信インフラとしての5Gの事業化が進む一方で、2030年頃の導入が見込まれる6G(第6世代移動通信システム)についても、実現に向けた研究開発が世界的に進められている。6Gでは5G以上の高速大容量通信を実現するために100 GHz超の周波数帯の利用が見込まれる²⁾。一般に回路の伝送損失は周波数が上がるほど増大する一方で、6Gでは5Gの1/100の超低消費電力性能が目指されているため³⁾、低損失化に向けた先端材料開発と、それを支えるミリ波対応の材料計測技術が6G実現の鍵となっている。

本稿では、基板材料の誘電率計測技術について述べる。一般に、マイクロ波～ミリ波帯の誘電率

を測定する方法としては反射伝送法と共振器法があるが、低損失の基板材料には共振器法が用いられる。共振器法の概論を述べたのちに、ミリ波帯を含む超広帯域での測定が可能な平衡型円板共振器法について説明し、最後に同方法の誘電率計測への展開について述べる。

ミリ波帯基板材料評価のニーズ

一般に高周波回路では、誘電体基板の複素誘電率で決まる誘電損失と、金属線路の導電率で決まる導電損失、回路構造などで決まる放射損失の合計で回路全体の伝送損失が決まる(図1)。そのため、低損失な誘電体基板と金属線路の使用により、誘電損失と導電損失の両者を低減することが高周波回路の低損失化には不可欠である。特に5Gや6Gで使用されるミリ波帯では、金属線路と誘電体基板の接着性を保持するための誘電体表面の粗化処理による、実効的な導電率の低下が問題になっている⁴⁾。そのため、FPCを含めて回路基板材料の開発を行うにあたっては、材料の低誘電率・低誘電正接化と同時に、表面に高導電率の金属層を形成する実装プロセス技術の確立が必要になり、ミリ波帯を含む広帯域での高精度な誘電率・導電率計測技術が強く求められている。

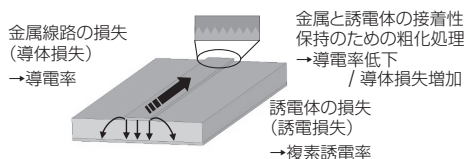


図1 高周波回路の伝送損失

共振器法の概要と高周波化の課題

低損失材料の複素誘電率を高感度・高精度に計

測する方法としては共振器法が利用される。共振器法では、誘電体サンプルを挿入した共振器に対し、励振線を通じて電磁波を入射し、共振器内に特定の電磁界モードを励振させる。共振波形を測定し、その共振周波数と共振の鋭さを表すQ値よりサンプルの複素誘電率を決定する。

共振器法を6Gで利用する100 GHz超のミリ波帯で利用するにはいくつかの課題がある。まず、多くの共振器法では基底モードを利用した測定に制限されており、基本的には一つの共振器で単一周波数の測定しか行えない。基底モード周波数の高周波化には周波数と反比例して共振器を小型化する必要があるため、共振器や励振機構の加工精度の制限などから、100 GHz超のミリ波帯での基底モード共振器による材料計測の実現は困難である。基底モードだけでなく高次の共振モードを利用することにより、複数周波数で誘電率計測を行うためには、モードの同定やモード間の干渉を回避するために、計測に利用しない不要モードの抑制が不可欠である。本稿で紹介する平衡型円板共振器法では、計測に利用される TM_{0m0} モード以外の不要モードの励振が抑制された構造を取ることで、高次モードを利用した複数周波数での測定が可能になり、マイクロ波～ミリ波帯にわたる超広帯域での材料計測が単一共振器で実現される。

● 平衡型円板共振器法による誘電率計測^{5)~7)}

平衡型円板共振器の写真と模式図を図2に示す。この方法では、誘電体サンプルとして、同一の厚み t と比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan \delta$ をもつ薄膜シートを2枚用意する。2枚のシートサンプルの間に厚さ $t_c=0.06$ mm、直径 D の銅箔円板をはさみ、これらを合わせて2枚の銅板ではさむ。シートサンプルで構成された誘電体共振器に対し、銅板の中央に位置する上下の励振孔から1 mm同軸線路で励振し、透過を検出する。シートサンプル間にはさまれた銅箔円板の中心と励振孔の中心のアライメントが確保されたとすると、中心に非零の電界を有する TM_{0m0} モードのみが選択的に励振され、ほかの不要モードは

十分に抑制される[図3(a)]。したがって、高次のモードを含めて TM_{0m0} モードの励振を誘電率測定に利用でき、各共振周波数とQ値の測定値から、その周波数における誘電体サンプルの複素誘電率を決定できる[図3(b)]。なお、この方法では TM モードを利用するため、電界の向きは誘電体シートに垂直であり、面直方向の誘電率が測定される。

平衡型円板共振器法の特徴は2点ある。一つは、 TM_{0m0} モードの選択的励振により、単一の共振器で20 GHz以下から100 GHz超にわたる超広帯域での誘電率測定が可能である点である。もう一つは、測定周波数の可変性である。使用する銅箔円板の直径を変えることで、同一の誘電体サンプルに対して異なる周波数における測定が可能であり、円板径の調整により特定の周波数に合わせた測定を実現できる。これらのことから、単一の平衡型円板共振器と径を変えたいくつかの銅箔円板を組み合わせれば、低損失の誘電体材料に対するほぼ任意の周波数での超広帯域な誘電率測定を実施できるといえる。

筆者らは、平衡型円板共振器法による誘電率計測に対し、測定再現性の向上や、共振器の電磁界解

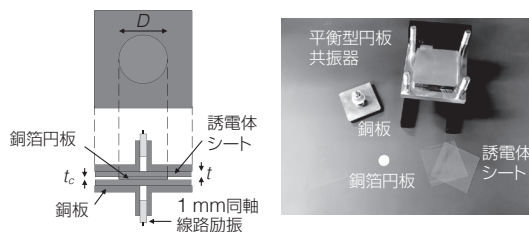


図2 平衡型円板共振器の模式図と写真

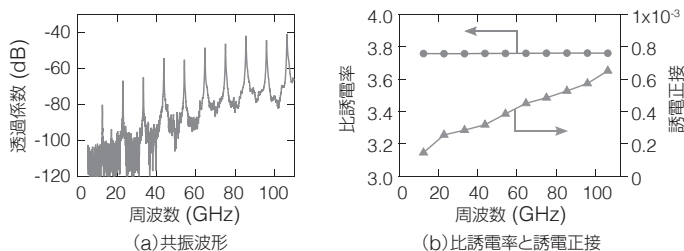


図3 平衡型円板共振器による誘電率計測の測定結果例。誘電体サンプル： $t=0.23$ mm厚の合成石英、銅箔円板：直径 $D=15$ mm。