

論文の内容の要旨

専攻名 システム創成工学専攻

氏名 平山 直樹

次世代高速大容量通信(5G、6G等)を支える基板材料開発のためには、マイクロ波からミリ波に渡る広帯域の周波数において、回路基板の基材部分の複素誘電率ならびに銅箔部分の実効導電率に関する評価技術のさらなる発展が不可欠である。本論文では、マイクロ波・ミリ波における複素誘電率ならびに実効導電率の測定方法の高精度化に関する知見をまとめる。

第一章では、研究背景と既存の測定技術の課題を明らかにする。マイクロ波からミリ波に渡る広帯域の周波数が使用される次世代高速大容量通信(5G、6G等)の発展に、低電力損失化に向けた基板材料開発の推進が必要であり、誘電体材料の複素誘電率と導体材料の実効導電率の測定技術の向上が特に重要であることを示し、本研究の具体的な目標を掲げる。

第二章では、誘電体の複素誘電率測定法の開発について述べる。回路基板の基材として用いられるガラスクロス含浸材料、または分子配向する有機材料では、複素誘電率の異方性があることが知られている。そのため、基板の厚み方向と、面内方向で複素誘電率の異方性を測定することが求められる。基板の厚み方向複素誘電率の測定方法として、平衡形円板共振器が用いられている。しかし、高周波では基板の薄層化が進むが、平衡形円板共振器では薄い(0.1mm以下)、樹脂のような中損失材料($\tan \delta \simeq 10^{-3} \sim 10^{-2}$)では、 Q_u 値が低く、複素誘電率の測定を行うことが困難となる課題がある。そのため、本研究では薄い中損失材料に適した厚み方向の複素誘電率測定法の検討を行う。従来の平衡形円板共振器に比べて Q_u 向上を狙うため、PTFEシートを装荷した TM_{0m0} モード平衡形円板共振器を考案した。PTFEシートを平衡形円板共振器に装荷すると、導体間隔が広がることにより導体損による Q_c が向上する。また、測定試料への電界エネルギー集中度が低下することで誘電体損による Q_d が向上する。 Q_c と Q_d がそれぞれ向上することにより、測定試料単体に比べて Q_u が高くなる。一方、解析としては、複雑となるため、3つの解析モデルを併用することで共振周波数と Q_u の計算において簡便化を図り複素誘電率算定に適用を行う方法を提案する。また、実際に、ガラスクロス含浸エポキシ樹脂や、液晶ポリマー(LCP)、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)基板材料において本手法を用いて複素誘電率を測定することにより、その有効性を示す。

第三章では、銅張り基板材料の界面導電率および表面導電率測定法の開発について述べる。マイクロ波～ミリ波では表皮効果によりサブ μm オーダーの導体表面に電流が集中する。銅張り基板において、導体は誘電体との接着のため粗化されており、実効導電率は直流に比べて大きく劣化する。回路の導体損を見積もるには、導体の誘電体との界面側の実効導電率(界面導電率)と、表面側の実効導電率(表面導電率)を切り分けた測定が必要とされる。マイクロ波帯では既に測定方法の標準化が行われている。しかし、ミリ波帯では未だ無いことが課題である。マイクロ波

帯における界面導電率と表面導電率の測定法として、ループアンテナ励振による誘電体円柱共振器が用いられているが、ミリ波帯において誘電体円柱共振器の高さが1mm程度と小さくなり過ぎるためループアンテナ（同軸外径0.9mm Φ ）を使った測定系の構築が難しくなること、共振器を飛び越えたループアンテナ間同士の直接結合が増加し、バックグラウンドレベルの増大と共振ピークの歪みが生じ、界面導電率と表面導電率の測定が困難となることが課題である。そのため、本研究ではミリ波帯におけるNRDガイド励振によるTE₀₂ δ モードサファイア円柱共振器を用いた界面導電率と、表面導電率測定法を新たに考案する。NRDガイドの主伝送モードであるLSMモードが誘電体円柱共振器のTEモードの磁界と結合しやすく、ループアンテナ励振よりも誘電体円柱共振器とNRD間の距離を大きくとることができる。NRDガイドではアンテナ間同士の直接結合が低減でき、バックグラウンドレベルを抑制した測定が可能となる。また、高次の共振モードを用いることで共振器サイズを大きくすることが可能となる。特に、TE₀₂ δ モードを採用することで、上下遮蔽導体間隔に対して誘電体円柱の高さを低くし空間をあけることができる。NRD励振では遮蔽導体間隔がNRDの誘電体ストリップの高さで固定されるが、その空間に任意の厚みの試料を配置可能となるため、測定の利便性が向上できる。実際に、液晶ポリマー（LCP）、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）の銅張り基板材料において本手法を用いて界面導電率および表面導電率を測定することにより、その有効性を示す。

第四章では、本研究で開発した2種類の測定技術による測定結果を活用し、各種の回路基板を用いた伝送線路の伝送特性のシミュレーションを行った。その結果、伝送損失の周波数依存性において、導体損失、誘電体損失それぞれの割合の変化の様子が、従来の予想と大きく異なるという結果を得た。このことは、次世代高速大容量通信様の回路設計において、重要な知見となる。

第五章は結論であり、本論文で得られた知見を整理し総括する。