

A Study on Theoretical Characterizations of Microwave Integrated Circuit Transmission Lines

(マイクロ波集積回路用プレーナ線路の理論的特性評価法に関する研究)

学位論文内容の要旨

携帯電話や PHS (Personal Handy Phone System) 普及に伴い、マイクロ波集積回路 MIC (Microwave Integrated Circuit) やモノリシックマイクロ波集積回路 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) の民生応用が飛躍的な伸びを見せている。こうした MIC、MMIC を構成するには、マイクロストリップ線路、スロット線路、プレーナ線路など、いわゆるコプレーナ線路が不可欠で、その設計技術や製造技術の研究開発が活発化している。プレーナ線路を伝わる電磁波は TEM (Transverse Electromagnetic) 波に類似しているため、その解析、設計は、従来、準 TEM 波近似のもとで行われてきた。準 TEM 波近似は低周波領域ではよく成り立つが、最近の MIC、MMIC の微細化、複雑化、高周波化の流れのなかになって、厳密なフルウェーブとしての解析が必須になっている。プレーナ線路のフルウェーブ解析を支援する手法は、これまでも種々開発されてきたが、とりわけ、有限要素法は線路の構造によらず適用が容易で、最近では、マイクロ波回路設計のためのソフトウェアとしても利用されつつある。しかしながら、フルウェーブ解析のためのベクトル有限要素法には様々なものがあり、必ずしもプレーナ線路への適合性に優れたものばかりではない。特に、プレーナ線路の場合には、導体エッジにおける電磁界の特異性を考慮できるものでなければ、実用性に乏しい。ところが、こうした導体エッジにおける電磁界の特異性を考慮できる有限要素法は、これまで皆無に等しかったために、プレーナ線路を主体とする MIC や MMIC の解析、設計に有限要素法を導入する試みは、他の分野に比べて立ち遅れていた。

本論文は、こうした状況のもとで、最近開発されたエッジ要素と従来から用いられているノードル要素をハイブリッド使用した有限要素法をプレーナ線路の解析、設計に初めて適用し、その有効性を種々の数値実験を通して実証した研究成果をまとめたものである。また、有限要素法解析によって得られた伝搬定数や界分布の情報から、実際のマイクロ波回路の設計に必要な回路パラメータを抽出する方法も新たに考案している。

第 1 章では、本研究の背景ならびにマイクロ波伝送路解析、設計のための有限要素法の研究開発動向について述べている。

第 2 章では、マイクロストリップ線路の伝送特性解析にエッジ／ノードルハイブリッド要素を用いた有限要素法を初めて適用し、具体的な適用事例を通して、本手法が通常の導波モードのみならず、減衰モードや複素モードの評価にも有効に利用できることを実証している。また、この章では、プレーナ線路の解析、設計に定評のあるスペクトル領域法を複素モード解析に応用するための定式化も新たにを行い、有限要素法とスペクトル領域法を相補的に利用する方法について述べている。

第 3 章では、スロット線路の伝送特性解析にハイブリッド要素を用いた有限要素法を初めて適用し、その伝送電力、線間電圧、特性インピーダンスの評価法を案出している。また、ス

ロット線路における複素モードの振舞いを明らかにしている。

第4章では、マイクロストリップ線路の伝送電力、線路電流、特性インピーダンスの評価法を案出するとともに、ハイブリッド要素を用いた有限要素法を駆使して、製作の過程で生ずるマイクロストリップ線路の様々な断面形状が、伝送特性やインピーダンス特性に与える影響を詳細に調査し、設計許容度に対する一指針を与えている。また、マイクロストリップ線路の導体損失を見積もるための簡便な摂動公式も提示している。

第5章では、プレーナ線路の伝送損失を厳密に評価するための一方法を提案している。具体的には、線路導体を損失誘電体とみなして導体損失を直接算出することに成功している。

第6章では、多導体プレーナ線路の伝送特性解析にハイブリッド要素を用いた有限要素法を初めて適用し、多導体系に特有な全 (total) 特性インピーダンスやモード (modal) 特性インピーダンスの評価法を案出するとともに、これらの特性インピーダンス間の関係を明確にしている。

第7章では、ハイブリッド要素を用いた有限要素法をプレーナ線路の解析、設計に有効に利用するために、有限要素法行列のスパース性を活用し、あわせて部分空間反復法を導入した高速計算アルゴリズムを新たに開発している。これによって、プレーナ線路のフルウエーブ解析がワークステーションやパソコン上でも実施可能となり、従来、長時間の計算を要していたプレーナ線路の解析、設計に対して、いわゆるリアルワールドコンピューテーションを実現し得る見通しを得ている。さらに、こうした成果を基にして、キラル基板マイクロストリップ線路の伝送特性を解析し、キラル性の影響についても種々検討している。

第8章では、本研究で得られた結論をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

A Study on Theoretical Characterizations of Microwave Integrated Circuit Transmission Lines

(マイクロ波集積回路用プレーナ線路の理論的特性評価法に関する研究)

携帯電話や PHS (Personal Handy Phone System) の普及に伴い、マイクロ波集積回路 MIC (Microwave Integrated Circuit) やモノリシックマイクロ波集積回路 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) の民生応用が飛躍的な伸びを見せている。こうした MIC、MMIC を構成するには、マイクロストリップ線路、スロット線路、コプレーナ線路など、いわゆるプレーナ線路が不可欠で、その設計技術や製造技術の研究開発が活発化している。プレーナ線路を伝わる電磁波は TEM (Transverse Electromagnetic) 波に類似しているため、その解析、設計は、従来、準 TEM 波近似のもとで行われてきた。準 TEM 波近似は低周波領域ではよく成り立つが、最近の MIC、MMIC の微細化、複雑化、高周波化の流れのなかにあつて、厳密なフルウェーブとしての解析が必須になっている。プレーナ線路のフルウェーブ解析を支援する手法は、これまでも種々開発されてきたが、とりわけ、有限要素法は線路の構造によらず適用が容易で、最近では、マイクロ波回路設計のためのソフトウェアとしても利用されつつある。しかしながら、フルウェーブ解析のためのベクトル有限要素法には様々なものがあり、必ずしもプレーナ線路への適合性に優れたものばかりではない。特に、プレーナ線路の場合には、導体エッジにおける電磁界の特異性を考慮できるものでなければ、実用性に乏しい。ところが、こうした導体エッジにおける電磁界の特異性を考慮できる有限要素法は、これまで皆無に等しかったために、プレーナ線路を主体とする MIC や MMIC の解析、設計に有限要素法を導入する試みは、他の分野に比べて立ち遅れていた。

本論文は、こうした状況のもとで、最近開発されたエッジ要素と従来から用いられているノード要素をハイブリッド使用した有限要素法をプレーナ線路の解析、設計に初めて適用し、その有効性を種々の数値実験を通して実証した研究成果をまとめたものである。以下に本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第2章では、マイクロストリップ線路の伝送特性解析にエッジ/ノードハイブリッド要素を用いた有限要素法を初めて適用し、具体的な適用事例を通して、本手法が通常の導波モードのみならず、減衰モードや複素モードの評価にも有効に利用できることを実証している。また、この章では、プレーナ線路の解析、設計に定評のあるスペクトル領域法を複素モード解析に応用するための定式化も新たにを行い、有限要素法とスペクトル領域法を相補的に利用する方法について述べている。

第3章では、スロット線路の伝送特性解析にハイブリッド要素を用いた有限要素法を初め

て適用し、その伝送電力、線間電圧、特性インピーダンスの評価法を案出している。また、スロット線路における複素モードの振舞いを明らかにしている。

第4章では、マイクロストリップ線路の伝送電力、線路電流、特性インピーダンスの評価法を案出するとともに、ハイブリッド要素を用いた有限要素法を駆使して、製作の過程で生ずるマイクロストリップ線路の様々な断面形状が、伝送特性やインピーダンス特性に与える影響を詳細に調査し、設計許容度に対する一指針を与えている。また、マイクロストリップ線路の導体損失を見積もるための簡便な摂動公式も提示している。

第5章では、プレーナ線路の伝送損失を厳密に評価するための一方法を提案している。具体的には、線路導体を損失誘電体とみなして導体損失を直接算出することに成功している。

第6章では、多導体プレーナ線路の伝送特性解析にハイブリッド要素を用いた有限要素法を初めて適用し、多導体系に特有な全 (total) 特性インピーダンスやモード (modal) 特性インピーダンスの評価法を案出するとともに、これらの特性インピーダンス間の関係を明確にしている。

第7章では、ハイブリッド要素を用いた有限要素法をプレーナ線路の解析、設計に有効に利用するために、有限要素法行列のスパース性を活用し、あわせて部分空間反復法を導入した高速計算アルゴリズムを新たに開発している。これによって、プレーナ線路のフルウェーブ解析がワークステーションやパソコン上でも実施可能となり、従来、長時間の計算を要していたプレーナ線路の解析、設計に対して、いわゆるリアルワールドコンピューテーションを実現し得る見通しを得ている。さらに、こうした成果を基にして、キラル基板マイクロストリップ線路の伝送特性を解析し、キラル性の影響についても種々検討している。

これを要するに、著者は、マイクロ波集積回路用プレーナ線路の高精度な理論的特性評価法を、実際のマイクロ波回路の設計に必要な回路パラメータの抽出法も含めて開発するとともに、各種プレーナ線路の伝送特性に関する有益な新知見を得たものであり、光・波動エレクトロニクスに対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。