

(論文内容の要旨)

本論文は、情報通信機器におけるキーデバイスである高周波デバイスの設計技術に関するものである。デバイスの最適設計に必要な高周波電磁界の数値解析理論を確立し、受動素子に特性可変な機能を実現させるといった新しいコンセプトに言及している。特に、電磁構造の微細制御による人工電磁物性の発現効果に関する基礎検討と、MEMS技術を用いたリコンフィギュラな受動素子を実現するための機能化設計技術について研究成果をまとめたものであって、6章から成っている。

第1章では、高周波デバイス開発を取り巻く情報化社会の状況について言及し、特に、高周波デバイスの小型化・集積化などコスト・信頼性に関する課題について述べている。また、デバイス設計における電磁界のシミュレーション技術の役割や、機能面での課題を示している。そして、デバイス自体の高機能化を実現するための設計技術における本研究の目的について述べている。

第2章では、高周波電磁界の数値解析のための基礎方程式の導出と、定式化理論を示し、その物理的な意味の考察を行っている。従来、有限要素法を用いた高周波の電磁界解析では、スプリアス解と呼ばれる実際には存在しない固有値での電磁共振の解が発生する問題が指摘されていたが、このスプリアス解の発生を回避する方法として、新たに辺要素を用いた有限要素法を提案し、提案した方法が有効であることを示している。

第3章では、従来、経験則を基にして設計していたマイクロ波発振器の一種であるマグネトロン共振器に、2章で提案した解析手法を用いることで、共振周波数を定量的に算出できることを示している。また、電子レンジの設計への適用例において、庫内の食品の加熱状況を解析できることで、キャビティ内の電磁波分布を制御して、食品中の誘電加熱分布を最適化するなど、新たな機能設計に導出した理論および計算手法が有効であることを示している。

第4章では、電磁界解析のための新たな非線形解析理論について提案し、その理論について述べている。半導体など能動素子を含む高周波回路での信号波形の評価解析では、直接時間領域の電磁応答を解析することが必要となる場合が多い。また、電荷と高周波電磁界の相互作用による電磁波発振現象も、同様に時間領域の非線形な現象である。本論文では、新たな時間領域の非線形性を考慮できる電磁界解析法の定式化理論を提案している。この理論は、陽解法型の時間依存場の有限要素法の定式化理論であり、一連の数値実験を行うことにより、一般的に用いられている FDTD 法よりも導出した理論を用いる方が計算精度が高いことを示している。

また、時間領域の非線形解析の応用として、電荷と高周波電磁界の相互作用による電磁波発振現象を解析し、荷電粒子群の運動解析との非線形な連成解析理論を示した。そして、従来その発振メカニズムの定量的な解析がされていなかったマグネトロン¹⁾の発振メカニズムを解析し、マグネトロンの動作原理とされていた電磁界と電荷の相互作用によるマイクロ波発振現象を数値解析を用いて定量的に解析できることを示し、提案した方法の有効性を示している。

第5章では、近年着目されている高周波メタマテリアル理論について、微細電磁構造を用いた人工物性の発現効果と、マイクロ波、ミリ波デバイスへの応用するための理論を導出するとともに、導出した理論をもとに受動素子設計を行うための新たな考え方を示している。

受動素子の電磁気特性を直接制御する手段としてマイクロマシン技術を用い、受動素子に新たな機能を発現させることにより、従来の高周波デバイスでは実現できなかった新たな機能を実現でき、さらに低電圧で駆動できる高周波デバイスの設計理論を導いている。これは、動的に微細電磁構造を制御することにより、特性が可変な電磁メタマテリアル効果を実現する方法であり、導出した理論および考え方に基づく数値解析のみならず、実際に検証用のデバイスを試作し特性を評価することにより、理論および考え方の有効性を検証している。

さらに、無線通信状況の変化に応じて、アンテナ単体で通信仕様の変更に追従対応できる機能化アンテナについて、アンテナの原理、設計方法、デバイス構成など示し、数値計算結果と試作したデバイスにおける実測結果を比較することにより、導出した理論と考え方の応用性を示している。そして、動的な可変電磁メタマテリアル効果の発現について、接地導体の微細構造を用いた独自のメタマテリアル構造モデルを提案し、アンテナの指向性を可変にする動的メタマテリアル構造の有効性について述べ、研究成果の展開性について示している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高周波デバイスの特性解析に必要な有限要素法による電磁界の数値解析理論を示すとともに、電磁構造の微細制御による人工電磁物性効果の発現に関する考察と、MEMS 技術を用いた特性可変デバイスの機能化設計についての研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

(1) 高周波電磁界の数値解析のための基礎理論と定式化手法を提示し、その物理的意味の考察を行っている。従来の有限要素法を用いた電磁界解析ではスプリアス解と呼ばれる実際には存在しない固有値の電磁共振解が発生する問題が指摘されていた。このスプリアス解の発生を回避する方法として、新たに辺要素を用いた有限要素法を提案している。提案した方法を用いて、従来は経験則で設計していたマイクロ波発振器の共振周波数を定量的に算出できること、さらに電子レンジの庫内構造設計により電磁波分布を制御し食品の誘電加熱を最適化できることなど、新たな機能化設計に提案した方法が有用であることを示している。

(2) 非線形現象を伴う高周波デバイスの解析には、直接時間領域の解析が必要であり、そのための新たな電磁界解析理論を導出している。この理論は、陽解法型の時間依存場の有限要素法理論であり、一連の数値実験を行うことにより、一般的に用いられているFDTD法よりも導出した理論を用いる方が計算精度が高いことを示している。そして、荷電粒子群の運動解析との電磁波の非線形連成解析理論を構築し、発振メカニズムの定量的な解析がされていなかったマグネトロン発振メカニズムについて定量的に考察している。

(3) 微細電磁構造を用いた人工物性の発現効果について高周波メタマテリアル理論を新たに導出し、微小な構造変化を用いて顕著な特性可変効果を実現できることを示している。さらにMEMS技術を用いて、従来の高周波デバイスでは実現できない新たな機能化設計を行っている。特に、無線情報通信分野におけるキーデバイスであるアンテナに着目し、動的な指向性可変アンテナにおいて動的メタマテリアルの応用デバイスを提案し、その有効性を示している。

以上、本論文は、高周波デバイスの特性解析に必要な数値解析理論と、MEMS技術を用いた人工電磁物性効果のデバイスへの応用に関する先駆的な研究であり、導出した理論および開発した手法は今後のエレクトロニクス分野における高周波デバイス研究の基礎として極めて有用であり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成21年4月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。