

学位論文題名

弾性表面波すだれ状電極の励振特性解析法の開発と
その弾性表面波デバイス低損失化への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

弾性表面波 (Surface Acoustic Wave : SAW) デバイスは、現在、オーディオ・ビデオ機器や移動体通信機器において、フィルタ、発振子などに応用され、その使用周波数帯は数十MHz帯から数GHz帯に及び、10GHz帯での応用も研究されている。特に最近、移動体通信第2世代のデジタル携帯電話、PHS用のデュプレクサ、フィルタ、CDMA用のマッチドフィルタ、コンボルバとして用いられており、第3世代であるW-CDMAでの応用も含めて、移動体通信機器におけるキーデバイスとなっている。

このような状況下で、SAWデバイスはより一層の高性能化、特に低損失化、小型化、高安定化が望まれている。このため、電気機械結合係数が大きく、温度特性に優れた基板の探索や、SAWを一方方向にのみ励振するすだれ状電極 (Interdigital Transducer : IDT) の開発も活発化してきている。なかでもNSPUDT (Natural Single Phase Unidirectional Transducer) と呼ばれる、電極形状が正規型でありながら伝搬方位と電極幅・膜厚を適当に選ぶことで一方方向性が得られるIDTは、電極構造が簡単で、高周波化に有利なことから、注目されており、NSPUDT動作可能な圧電結晶、NSPUDTと逆の方向性を実現する方向性反転電極の検討が活発に行われている。

さて、これらのSAWデバイスを設計するためには、その構成要素であるIDTやグレーティング反射器の諸特性を調べておく必要がある。そのための代表的な方法として、等価回路法とモード結合理論に基づく方法が挙げられる。等価回路法は、電気系技術者にとっての扱い易さ、工学的見通しの良さを特徴とする。一方、モード結合理論は、その適用範囲の広さ、特に、複雑な構造のIDTの動作記述の簡便さから、最近、特に広く用いられている。

ところで、等価回路法あるいはモード結合理論を用いてIDTの特性解析を行う場合には、等価回路法においては等価回路定数、モード結合理論においてはモード結合方程式中のパラメータをあらかじめ決定しておく必要がある。しかしながら、基板の異方性、電極による電氣的摂動および弾性的摂動、電極端部における非放射バルク波に起因するエネルギー蓄積効果などをすべて考慮して、これらの諸パラメータを決定することは容易ではない。

本論文は、このような状況のもとで、双方向性正規型IDT、ダブル電極型IDT、NSPUDT、方向性反転電極といった広範囲にわたるIDTについて、基板の異方性、電氣的摂動効果、弾性的摂動効果、エネルギー蓄積効果などをすべて考慮して等価回路パラメータやモード結合パラメータを理論的に決定し、SAWデバイスの特性を精度良く評価することが可能な方法についての研究結果をまとめたものである。具体的には、等価回路法と有限要素法 (Finite Element Method : FEM) を組み合わせた方法、モード結合理論とFEMを組み合わせた方法、モード結合理論とハイブリッドFEMを組み合わせた方法を開発している。これらの方法では、等価回路パラメータ、あるいはモード結合パラメータを、IDTの電気端子を短絡あるいは開放とした場合に対応する無限長グレーティングのストップバンドの上下限の周波数と電位定在波分布、IDT1対当り

の静電容量を有限要素法を用いて求め、それらを等価回路、あるいはモード結合方程式から求まる分散方程式および電位定在波分布に適用することで決定している。また、従来から用いられている代表的な双方向性基板上のSAWデバイス、および最近特に注目されているNSPUDT基板上のSAWデバイスに対して、設計に有用な多くのデータを提供している。以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、双方向性正規型IDTの励振特性を精度良く評価することが可能な方法を開発することを目的として、等価回路法と有限要素法を組み合わせた解析法を提案し、その定式化を行っている。実際に、代表的なSAW圧電基板について特性評価を行い、実験値との比較から本手法の妥当性、有用性を確認している。

第3章では、第2章で開発した手法を、ダブル電極型IDTに応用し、その等価回路定数を理論的に決定する方法の定式化を行っている。等価回路定数の決定においては、まず、等価回路パラメータの一つである特性アドミタンスの不整合量について、同じ電極幅の正規型IDTの値を用いる根拠を示し、その後、他のパラメータを決定している。

第4章では、ビルディング・ブロック法を用いて、SAW共振器の一つである1ポートキャビティ型共振器について、共振特性、およびIDTとグレーティングの結合長の共振特性への影響を調べている。1ポートキャビティ型共振器で用いるIDTには正規型、およびダブル電極型を、また、グレーティング反射器としては短絡グレーティング、正負反射型反射器、SOMSA (split open metal strip array) を取り上げ、第2章、第3章で導出した等価回路をビルディング・ブロック法に応用し、共振特性について実験値と良く一致する結果を得ている。

第5章では、SAWデバイス低損失化の鍵を握る一方向性IDTの一つであるNSPUDTについて、Adlerらの考察に基づく等価回路を提案し、第2章で開発した手法を基に、有限要素法を用いてその等価回路定数をすべて理論的に決定する方法の定式化を行っている。実際に、STカット $25^\circ X$ 伝搬水晶基板上のNSPUDTについて特性評価を行っている。

第6章では、NSPUDTおよび方向性反転電極の励振特性を精度良く評価することが可能な方法を開発することを目的として、モード結合理論と有限要素法を組み合わせた解析法を提案し、その定式化を行っている。ただし、NSPUDT基板においては、基板内の電位定在波分布に深さ方向の依存性があるため、無摂動状態における電位の基板の深さ方向の分布関数をモード結合理論に組み込み、基板内部の電位定在波分布を基にモード結合理論で必要な基板表面での電位定在波分布を決定している。実際に、新しい圧電基板として注目されている $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 基板上のNSPUDTおよび方向性反転電極について特性解析を行い、それらの最適動作を実現するための電極膜厚に関する設計指針を与えている。

第7章では、第6章の方法ではモード結合パラメータが決定できない実効的な電気機械結合係数の大きな基板上のNSPUDTや方向性反転電極に対応することを目的として、モード結合理論とハイブリッド有限要素法を組み合わせた解析法を提案し、その定式化を行っている。具体的には、基板内全域で界分布の重なり積分を評価することによってモード結合理論で必要な基板表面における電位定在波分布を決定している。また、 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 基板、および $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ 基板上のNSPUDTおよび方向性反転電極について、それらの諸特性の電極形状に関する依存性を検討し、より低損失な方向性反転電極の構造を見出すなど、SAWデバイス低損失化に有用な知見を得ている。

第8章では本研究で得られた成果の総括を行っている。

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
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

弾性表面波すだれ状電極の励振特性解析法の開発と その弾性表面波デバイス低損失化への応用に関する研究

弾性表面波 (Surface Acoustic Wave : SAW) デバイスは、現在、デジタル携帯電話、PHS (Personal Handy phone System) など、移動体通信機器のキーデバイスとして多用されているが、最近ではCDMA (Code Division Multiplexing Access) やW (Wide) - CDMAといった次世代移動体通信への応用も活発化している。

このため、SAWデバイスは、より一層の高性能化、特に低損失化が望まれており、電気機械結合係数が大きく、温度特性に優れた基板の探索や、SAWを一方向にのみ励振するすだれ状電極 (Interdigital Transducer : IDT) の開発が急務となっている。なかでもNSPUDT (Natural Single Phase Unidirectional Transducer) と呼ばれる一方向性IDTは、電極構造が簡単で、高周波化に有利なことから注目されており、NSPUDT動作可能な圧電結晶、NSPUDTと逆の方向性を実現する方向性反転電極の検討が活発に行われている。

本論文は、このような状況のもとで、双方向性正規型IDT、ダブル電極型IDT、NSPUDT、方向性反転電極といった多岐にわたるIDTに対して、基板の異方性、電氣的摂動効果、弾性的摂動効果、エネルギー蓄積効果をすべて考慮し、SAWデバイスの特性を精度良く評価することが可能な解析法についての研究結果をまとめたものである。また、従来から用いられている代表的な双方向性基板上のSAWデバイスはもちろんのこと、最近特に注目されているNSPUDT基板上のSAWデバイスに対して、設計に有用な多くのデータを提供している。以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、双方向性正規型IDTに対して、等価回路法と有限要素法を組み合わせた解析法を提案し、代表的なSAW圧電基板について励振特性評価を行い、実験値との比較から本手法の妥当性、有用性を確認している。

第3章では、第2章で開発した手法をダブル電極型IDTに応用し、その等価回路定数

を理論的に決定する方法について述べている。等価回路定数の決定においては、まず、等価回路パラメータの一つである特性アドミタンスの不整合量について、同じ電極幅の正規型 IDT の値を用いる根拠を示し、これを基に残る回路パラメータを決定している。

第4章では、ビルディング・ブロック法を用いて、SAW共振器の一つである1ポートキャビティ型共振器の共振特性、およびIDTとグレーティングとの間の結合長の共振特性への影響を調べている。1ポートキャビティ型共振器で用いるIDTには正規型およびダブル電極型を、またグレーティング反射器としては短絡グレーティング、正負反射型反射器、SOMSA (Split Open Metal Strip Array) を取り上げ、第2章、第3章で導出した等価回路をビルディング・ブロック法に応用し、得られた共振特性が実験値と良く一致することを示している。

第5章では、SAWデバイス低損失化の鍵を握る一方向性IDTの一つであるNSPUDTの等価回路定数をすべて理論的に決定する方法について述べるとともに、STカット 25° X伝搬水晶基板上のNSPUDTについて、その励振特性を詳細に調査している。

第6章では、NSPUDTおよび方向性反転電極に対して、モード結合理論と有限要素法を組み合わせた解析法を提案し、新しい圧電基板として注目されている $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 基板上のNSPUDTおよび方向性反転電極の特性解析を行い、最適動作実現のための電極膜厚に関する設計指針を与えている。

第7章では、第6章の方法では対応が困難な実効的電気機械結合係数の大きな基板上のNSPUDTや方向性反転電極に対して、モード結合理論とハイブリッド有限要素法を組み合わせた解析法を提案している。また、 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 基板、あるいは $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ 基板上のNSPUDTおよび方向性反転電極について、それらの諸特性の電極形状依存性を詳細に調査し、より低損失な方向性反転電極構造を見出すなど、SAWデバイス低損失化に有用な知見を得ている。

第8章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、移動体通信機器のキーデバイスになっている弾性表面波すだれ状電極の励振特性を高精度かつ高効率で評価することが可能な解析法を開発するとともに、双方向性のみならず一方向性の電極も含めて、弾性表面波デバイスの低損失化を図るうえで有益な新知見を得たものであり、情報通信工学の分野に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。