

氏名	長 康 雄
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学位論文題目	圧電性単結晶の高次の諸定数の測定・評価と弾性表面波非線形機能素子への応用に関する研究
指導教官	東北大学教授 山之内和彦
論文審査委員	東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 御子柴宣夫 東北大学教授 池田 拓郎

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

固体中を伝搬する音波の非線形現象を定量的に解析する場合、その固体の高次の諸定数は非常に重要なパラメータであり、また音波の非線形現象のように、媒質の境界が音響振動と共に変動する場合は、高次の諸定数を物質座標量間を結ぶ諸量として定義した方が有効な場合が多い。しかし、圧電結晶のように、固体中の電場を考慮しなければならない物質に関する、物質座標を基準座標に採った時の高次弾性論は、近年、その定式化が成されたのみであり、それら高次の諸定数（3 次の弾性、圧電、誘電定数及び電歪定数）を任意の結晶系の圧電結晶について、統一的に決定する理論は存在していない。また、非線形現象を定量的に評価するのに十分な、高結合圧電結晶の高次の諸定数も得られていない。しかし、近年、電子通信機能素子用材料として重要な LiNbO_3 等の高結合圧電結晶の高次の諸定数の必要性が益々高まってきており、それらを決定するための理論の定式化と共に、その理論に従った実験による、高次の諸定数の統一的かつ十分な精度での決定は重要な研究課題となっている。

一方、高次の諸定数の問題と並行して、バルク波より比較的容易に非線形効果の生ずる、弾性表面波の非線形伝搬を現象論的に取り扱える非線形スカラー波動方程式に関する研究が従来から行われている。しかし、その方程式に用いている非線形パラメータは SHG 係数の絶対値であり、基本波と高調波の位相関係、即ち、弾性表面波の非線形性による波形変形の問題は取り扱えないのが現

状である。ところが、近年、弾性表面波ソリトンに関する研究等が行われるようになり、弾性表面波の非線形性による直接の波形変形が取り扱える非線形スカラー波動方程式の定式化が望まれるようになってきている。

また、近年、電子通信機器用信号処理デバイスとして、弾性表面波の非線形性を応用したエラストティックコンボルバが盛んに研究されている。このエラストティックコンボルバの非線形出力の大きさの目安を与える性能指数Mは、一般に結晶基板のカット面及び伝搬方向に大きく依存し、コンボルバの性能を左右する重要な量である。しかし、現在エラストティックコンボルバ用材料として最も有望視されているLiNbO₃単結晶に於いてすら、その性能指数の測定値としては僅かに幾つかの報告があるのみで、どのカット面及び伝搬方向で性能指数が最大になるかといった問題や、曲がった導波路を用いたコンボルバの問題を扱うには、総ての伝搬方向に於ける性能指数Mのデータが必要である。しかし、確かな高次の諸定数が得られていない現状では、任意のカット面及び伝搬方向でのM値を決定するのは不可能である。また、コンボルバの情報処理量をも考慮した性能指数をどのように定義して良いかも不明である。

以上述べたコンボルバは、その出力電極を弾性表面波伝搬路上の基板上下面に取り付け、垂直方向の分極の非線形成分を検出しているが、近年、基板表面に対して水平方向に存在する非線形分極を取り出すタイプのコンボルバに関する報告が行われた。この水平取り出し型コンボルバは、従来から用いられている垂直取り出し型コンボルバに比べ、その高周波化に対して有利な特徴を持っているが、今までのところ、高効率なY・Z垂直取り出し型コンボルバに比べて効率が小さいという問題点を持っている。また、このタイプのコンボルバについては、その動作機構を明確にする理論は存在せず、純粋に基板の非線形性の大きさのみを示す量である性能指数Mをどのように定義して良いかも不明である。

本論文は、上記、圧電性単結晶の高次の諸定数の測定・評価及び弾性表面波非線形機能素子への応用に関する基礎的諸問題についての研究をまとめたものであり、以下に本研究の内容を要約する。

第2章 圧電性単結晶の高次の諸定数の測定に関する理論解析

この章に於いては、物質座標を基準座標に採った時の基礎方程式及び高次の諸定数の定義から出発して、物質内部の電場の効果を無視し得ない、高結合圧電結晶の高次の諸定数を測定するための理論解析を行い、以下に示すような一連の手続きにより、任意の結晶系の圧電結晶の総ての高次の諸定数を決定できることを明らかにしている。

1. 動的ひずみ零の状態、結晶に一軸応力を加えた時の静電容量変化率の測定値と、変形前の結晶の形状及び線形定数から、電歪定数が他の高次の諸定数と独立に決定できる。
2. 1と同様に動的ひずみ零の状態、結晶に高電界を加えた時の静電容量変化率の測定値と、変形前の結晶の形状及び線形定数から、電歪定数が1の手続きで決定されていれば、3次の誘電率が決定できる。
3. 結晶に高電界及び一軸応力をそれぞれ独立に加えた時の、物質座標上での音速変化率の測定値と、結晶の変形前の形状及び線形定数から、電歪定数と3次の誘電率が1及び2の手続きで決

定されていれば、3次の弾性定数及び3次の圧電定数を同時に決定することができる。

以上の研究により、従来は不明であった、物質記述での応力及び電束密度を物質記述での電界及びひずみで展開した時の2次の係数である高次の諸定数を任意の結晶系について総て統一的に決定する理論が確立された。

第3章 LiNbO₃ 単結晶の高次の諸定数の測定

この章に於いては、エラストックコンポルバ等の弾性表面波非線形機能素子用材料として最も有望な、LiNbO₃ 単結晶の総ての高次の諸定数を、第2章で与えた理論解析結果及び測定手順に従い決定している。

即ち、高結合圧電結晶で点群3mに属するLiNbO₃は、それぞれ独立な、8個の電歪定数、3個の3次の誘電率、13個の3次の圧電定数及び14個の3次の弾性定数を持っており、一軸応力または高電界を加えた時の微小静電容量変化の測定及び微小音速変化の測定を、種々の結晶方位について行い、それらを決定している。

また、従来から、分極を独立変数とする場合の定数は周波数依存性が小さいと考えられていたが、今回測定した弾性振動領域の定数と従来から報告のある光領域の定数とを比較検討することにより、弾性振動領域から光領域までの広範囲な周波数領域に於いても、そのことが成り立っていることを確認している。即ち、電歪定数の測定値から光弾性定数の低周波極限を求め、光弾性定数の報告値と比較することにより、光弾性定数は光領域から音響振動領域まであまり大きな変動をしないことを、また、3次の誘電率の測定値にミラーの関係式をあてはめて得られる定数と、光領域のSHG係数の報告値を比較することにより、オーダーを見積る上ではミラーの関係式は有効であることを確認している。

第4章 線形弾性表面波の伝搬に伴う非線形現象の基礎的研究

この章に於いては、LiNbO₃ 単結晶基板上を伝搬する非線形弾性表面波の基礎的問題を扱い、縦波からの類推で得られる非線形スカラー波動方程式が、弾性表面波の非線形性による波形変形の問題にまで適用できることを明らかにしている。

即ち、まずLiNbO₃ 単結晶基板上を伝搬する弾性表面波のSHG係数を数値計算し、回転128° Yカット X伝搬を含む X-axis boule 上で、垂直方向を基準に採ったときのSHG係数の位相が90°になることを見だし、ついで、レーザプローブ法を用いた実験により確認している。また、X-axis boule 上では、垂直方向変位に対する伝搬軸方向変位の位相が-90°であることから、このような伝搬方向では、比較的簡単に非線形スカラー波動方程式が波形変形の問題にまで適用できることを明らかにしている。その具体例として、回転128° Yカット X伝搬の場合には、非線形波動方程式のスカラー量として伝搬方向変位を採り、非線形パラメータ β を-1.2と採ればよいと結論している。さらに、その非線形スカラー波動方程式を特性曲線法を用いて解き、その方程式の与えられた初期値に対する適用限界を与える Discontinuity Length を求め、回転128° Yカット X伝搬の線形デバイスとしての使用限界及び非線形デバイスとしての使用条件を、入力パワー及び周波数の関数とし

て表現することにより，明らかにしている。

第5章 LiNbO₃ 単結晶コンボルバの性能指数及び高次の諸定数の評価

この章に於いては，LiNbO₃ 単結晶エラスティックコンボルバの性能指数Mの問題を取り上げている。

まず，LiNbO₃ 単結晶の代表的カット面を4種類選び，その面内で伝搬方向を変えることにより，計25点の伝搬方向でのM値を測定している。次に，第3章で決定したLiNbO₃ 単結晶の高次の諸定数を用いてM値を計算した結果，測定値と非常に良い対応を示すことを確認し，第2章の定数決定のための理論解析結果及びそれを用いて第3章で決定したLiNbO₃ 単結晶の高次の諸定数の妥当性を証明している。

さらに，弾性表面波の励振をすだれ状電極を使う場合については，コンボルバの非線形出力の大きさの目安となるM値，情報処理量の目安を示すBT積及び電気機械結合係数 K_s^2 との間の関係を考察し，コンボルバの情報処理量をも含めた新評価法として， $K_s^2 M$ を提案している。そして，LiNbO₃ 単結晶の任意のカット面及び伝搬方向でのM及び $K_s^2 M$ を与えるマップを理論計算により作成し，LiNbO₃ エラスティックコンボルバの最適カットはYカットZ伝搬近傍であると結論している。

第6章 LiNbO₃ 水平取り出し型コンボルバ

この章では，水平取り出し型コンボルバの問題を取り上げ，まずその構造を単純化したモデルについて理論解析を行い，その動作機構を明らかにすると共に，結晶基板の形状，使用周波数及び取り出し電極形状等の設計パラメータに依存せず，非線形性の大きさのみを示す性能指数Mが，水平取り出し型コンボルバに対しては，単位ビーム幅当たりの表面波パワーで規格化した，単位相互作用長当たりの短絡電荷量で定義できることを明らかにしている。また，実用上有効な等価回路も提案し，上記Mの定義及び等価回路は一般の構造の水平取り出し型コンボルバに対しても有効であることを示している。

次に，第3章で決定したLiNbO₃ 単結晶の高次の諸定数を用いて総てのカット面及び伝搬方向でのM値を上記定義に従って計算することにより，大きなM値と電気機械結合係数 K_s^2 を持つカット面及び伝搬方向としてオイラー角で(90°, 90°, 95°)の点が最も有望であることを示すと共に，実験により理論値とよい対応を示すことを確認している。また，上記カット面及び伝搬方向上で動作する水平方向取り出し型コンボルバは，従来から用いられてきた高効率なY・Z垂直取り出し型コンボルバに比べて同程度以上の効率(F値)を持つことも明らかにしている。

第7章 結 論

本章では，各章の内容を要約し，結論としてまとめている。

審査結果の要旨

弾性波、特に弾性表面波の非線形現象は、種々の工学的応用の可能性をもつ重要なテーマである。この非線形現象の解析には高次の諸定数を明らかにする必要があるが、電子通信機能素子に有用な十分な精度をもつ統一的なデータは全くない。本論文は、圧電性単結晶の非線形定数の総てを測定する方法を確立し、機能素子材料として重要な LiNbO_3 の非線形諸定数を決定すると共に、この結果を弾性表面波機能素子に応用した研究成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、物質座標記述を用いた諸定数の定義式を基に、高結合圧電体の非線形諸定数が一連の手続きにより決定できることを明らかにしている。

第3章では、第2章での解析結果を基に LiNbO_3 単結晶の3次の誘電率、電歪定数、3次の圧電定数及び弾性定数の総てを測定により求めている。また、得られた電歪定数及び3次の誘電率と光領域の測定から得られる諸定数の従来との関係が有用であることを確かめている。これらは重要な知見である。

第4章では、弾性表面波の非線形伝搬特性について検討し、二次高調波発生係数の測定値が上記の諸定数を用いた理論値と良く対応することを示している。さらに、一次元非線形波動方程式が弾性表面波の特定の基板に適用できること、また、その適用限界である不連続距離を求めている。これらは、弾性表面波素子の線形動作限界の目安を与えるものとしても重要である。

第5章では、 LiNbO_3 を用いた従来の弾性表面波弾性コンボルバの性能指数を種々のカット面及び伝搬方向について測定し、先に示した非線形諸定数を用いて計算した性能指数と良く一致することを示している。更に、コンボルバ用基板の新評価法を提案し、 LiNbO_3 の最適なカット面及び伝搬方向を明らかにしている。これらは実用上重要な知見である。

第6章では、水平取り出しコンボルバの理論解析を行い、この場合の性能指数を新しく定義している。更に LiNbO_3 の性能指数を上記の非線形諸定数を用いて種々のカット面及び伝搬方向について計算すると共に実験的にもこれを求め、従来よりも優れたコンボルバ用基板が存在することを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、圧電性単結晶の非線形諸定数の測定法を明らかにすると共に、高結合 LiNbO_3 単結晶の非線形諸定数を決定し、弾性表面波非線形機能素子の高性能化並びに新しい機能素子の開発に有用な知見を与えたもので、その成果は電子工学及び音響工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。