

氏 名（本籍）	なか 川 やす ひこ 彦 （山梨県）
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 3 8 5 号
学位授与年月日	昭和 4 8 年 3 月 2 7 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電子工学専攻
学位論文題目	弾性表面波の非線形問題に関する研究
	(主査)
論文審査委員	教授 柴山 乾夫 教授 菊池 喜充 教授 清水 洋 教授 池田 拓郎 助教授 山之内和彦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

弾性表面波は半無限媒体の表面に沿って伝搬する弾性波であり，バルク波では困難であった表面からの制御が容易に行なえること，従って現用の集積回路技術を活用できることから，マイクロ波素子への応用にあたり，機器の小型化をはかることができる。また光や半導体中のキャリア等の他の物理現象と結合させ，光偏向器，弾性表面波増幅器などの弾性表面波を用いた新しい素子が考えられて，開発研究が行なわれている。更に，表面状態の物性研究の手段として弾性表面波を利用する研究も考えられている。

弾性表面波の特筆すべき性質として，固体表面から一波長以内にそのほとんどのエネルギーを

集中させて伝搬することがあげられる。したがって、バルク波に比べて、比較的小さな入力パワーでも容易に高密度の弾性エネルギーが得られ、非線形効果の起ることが予想される。本論文はこの弾性表面波の非線形効果に着目して行なった研究である。

すなわち、圧電性による効果ならびに速度分散性の効果を含めて、非線形効果に起因する伝搬特性について、理論および実験的に検討を行ない、合せてその応用について述べたものである。特に、速度分散性については、表面のわずかな凹凸による速度分散性と二層構造の速度分散性の二つの場合に分けて、詳細な検討を行なっている。

第 2 章 弾性表面波の非線形効果に対する理論解析

弾性表面波の基本的な非線形効果として、第 2 次高調波の発生（以下 S H G）とパラメトリック増幅を取りあげ、理論解析および数値解析を行ない、その結果について述べている。

理論では、ひずみの効果、3 次の諸定数（弾性定数、圧電定数、電歪定数等）を考慮した非線形運動方程式、非線形圧電基本式を用いて、S H G とパラメトリック増幅の大きさを決める非線形係数 K_2 、 K_1 をそれぞれ解析している。それに基づいて、水晶と LiNbO_3 単結晶の rotated Y-Cut X 方向伝搬を例にとって、 K_2 、 K_1 を数値計算している。これらを通じて、3 次の定数を含む場合とそうでないひずみだけの効果とで、 K_2 、 K_1 の値に大きな差があること、また圧電表面すべり波の場合には、非線形係数が零になり、非線形効果が起らないことを明らかにしている。

第 3 章 第 2 次高調波の発生とパラメトリック増幅の実験

本章では、S H G とパラメトリック増幅の実験を行ない、前章で解析した非線形係数を実験的に確認している。すなわち、 LiNbO_3 単結晶を用いた実験で得られた非線形係数の値は理論値と良い対応を示している。

さらにパラメトリック増幅は周波数 287 MHz と 143.5 MHz で行ない、約 6 dB/cm の増幅度を得ている。

第 4 章 分散性媒質上を伝搬する弾性表面波の伝搬特性

非線形効果を考慮した弾性表面波の伝搬特性について理論および実験的検討を行なっている。

まず、弾性表面波の伝搬損失と表面の凹凸に起因する非常にわずかな速度分散性の効果を考慮して、基本波と第 2 次高調波の振幅に対する非線形結合方程式を導出し、その近似解を摂動法から求めている。この解析によって、第 2 次高調波の振幅が余り大きくない場合には、伝搬特性を良く説明できることを明らかにした。実験は LiNbO_3 rotated Y-Cut 131° X 方向の弾性

表面波で行ない理論と対応させている。図1はその結果である。図1には、近似解と同時に厳密解も示されているが、その両者はほとんど一致しており、近似解の精度が高いことを意味している。また、実験値と理論値は良く一致している。なお、第2次高調波のパワーが入力パワーの約1/2まで発生し、基本波の振幅より大きくなることも実験的に観測されている。

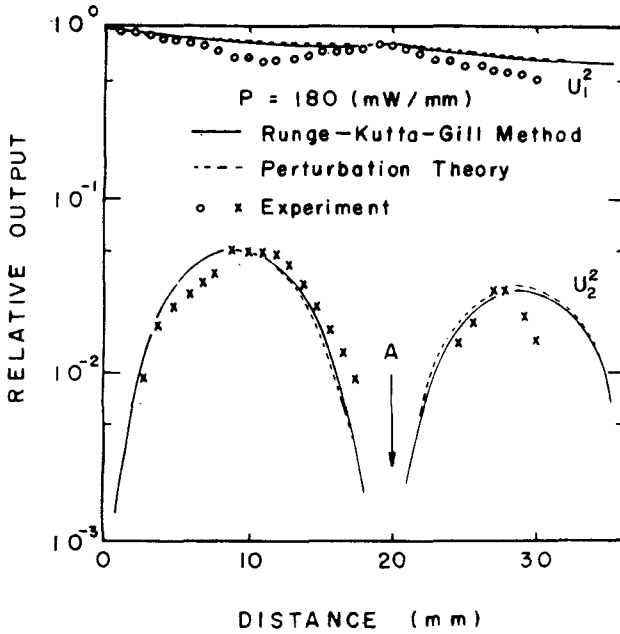


図1 伝搬特性の理論計算および測定結果

次に、表面の凹凸に起因する速度分散性について、二、三検討がなされている。簡単なモデル計算から凹凸の高さを概算し、電子顕微鏡による観察から求めた表面粗さと対応させた。さらに、表面に速度の早い物質を蒸着し、速度分散性を零にする方法を提案し、実験的に確認している。

また、筆者は分散性媒質上を伝搬する弾性表面波の第2次高調波の振幅は周期的に変化し、その1周期の長さを測定することにより速度分散の大きさを求めることができることを明らかにした。周波数を高くすれば感度は上がり、速度変化が $\Delta V/V$ で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度の微小変化を容易に測定できる。この現象は表面状態を探る物性手段の1つになりうると考える。

一方、速度分散性を積極的に利用し、低い周波数でも任意に制御できる方法として、二層構造の分散性媒質上を伝搬する弾性表面波を取りあげて、非線形効果の理論解析を行なっている。その結果、第2次高調波の振幅は伝搬しながら周期性を示し、その一波長 λ_N は周波数の2乗と膜

厚に反比例することを見い出している。LiNbO₃ 単結晶上に銀を蒸着した場合に対する λ_N の理論値と実験値を図 2 に示すが、非常に良い一致を示している。

速度分散性が原因となり、非線形効果に周期性が生ずる現象は弾性表面波において、いままで見られなかった新しい非線形効果である。

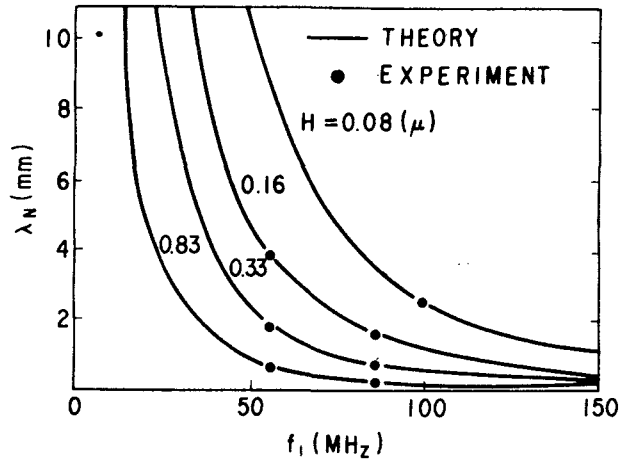


図 2 λ_N の周波数特性

第 5 章 LiNbO₃ 単結晶の 3 次の弾性定数の測定

3 次の弾性定数は弾性表面波の非線形問題を定量的に解析する上で、非常に重要な定数である。本章では、これまで報告されていない圧電性を考慮した 3 次の弾性定数の測定法を述べ、LiNbO₃ 単結晶を例にとって測定した結果について述べている。

まず、電気的ギブスの熱力学関数から 3 次の諸定数を定義し、外部から加えた静的圧力による音速の微小変化の理論式を非線形運動方程式、非線形圧電基本式より導出している。その解析を LiNbO₃ 単結晶に適用し、圧力の方向、伝搬方向、変位方向に対する 24 個の組合せについて、音速の微小変化を測定している。

圧電の補正を行なうために、Miller の関係式を用いて、光弾性定数から電歪定数を概算し、14 個の独立な 3 次の弾性定数を決定している。このようにして得られた 3 次の弾性定数の値は、第 2 章で弾性表面波の非線形係数の数値計算に用いられており、その理論値と実験値がほぼ一致していることから考えて、ある程度信頼できるものとする。

第 6 章 弾性表面波の非線形効果の応用

弾性表面波の非線形効果に対する解析結果を二、三通信素子に応用し、基礎実験を行なっている。

まず、分散性媒質上を伝搬する弾性表面波を用いて、正弦波数 $\{ \sin x \}$ を内蔵した新しい形のコンボルバーを試作し実験している。また、光と弾性表面波の相互作用を利用した光コンボルバーも提案されている。

弾性表面波を線形素子に適用する場合、非線形効果の及ぼす影響について考察を行ない、速度分散性が大きく影響することを明らかにしている。特に、速度分散性を大きくすれば非線形効果の影響を押えることができることを提案し、理論および実験的に検討を行なっている。図3にその計算例を示す。 Δk を10倍にすれば、第2次高調波は 10^{-3} 以下に減少し、基本波は非線形効果の影響をほとんど受けずに、伝搬損失だけの効果で減少しているのみである。さらに S_i と A_i を蒸着し、実験的にも確認している。

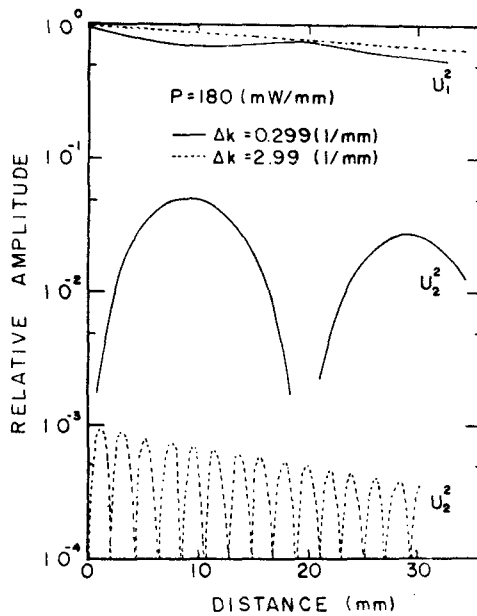


図3 速度分散性の大きさによる伝搬特性の変化

第7章 結 論

従来のバルク波に対する非線形問題の研究に比べて、弾性表面波の非線形問題についての研究は数が少なく、ほとんど未知の分野であった。また、最近工学的応用の立場から弾性表面波が注目されており、弾性表面波の非線形現象の究明も必要である。このような観点から、弾性表面

波の非線形問題を取りあげ、圧電性による効果ならびに速度分散性の効果を含めて、非線形効果を理論および実験的に検討し、次の諸点を明らかにした。

(1) 第2次高調波の発生とパラメトリック増幅に関する非線形係数を圧電性を加味して解析し、非線形現象を十分説明することができた。(2) 伝搬損失と表面の凹凸に起因する速度分散性を考慮した非線形結合方程式を用いれば、弾性表面波の伝搬特性を良く説明できる。(3) 二層構造の分散性媒質上で、第2次高調波は正弦関数的に周期変化し、その一波長はほぼ周波数の2乗および膜厚に反比例する。(4) 非線形効果を用いれば、速度分散性を非常に感度良く測定できる。(5) 速度分散性を大きくすれば、非線形効果の影響を抑えることができる。(6) 圧電性を考慮した3次の弾性定数の測定法を理論解析し、 LiNbO_3 単結晶の3次の弾性定数を測定した。

以上を通じて、弾性表面波の伝搬路における非線形問題は一応解明されたものと考えることができる。

審 査 結 果 の 要 旨

弾性表面波は波の伝搬にあたってそのエネルギーが伝搬媒質の表面近くにはほとんど集中しているため、体積波の伝搬と異なり比較的小さな入力パワーでも弾性エネルギー密度が高くなり、非線形効果が起きやすい。

本論文はこのような弾性表面波の非線形現象に起因する伝搬特性を解明し、合せてその応用について述べたもので、全編7章および附録より成る。

第1章は序論である。

第2章は非線形効果の理論解析で、第3章はその実験的確認である。理論は、ひずみの非線形効果、3次の弾性定数、3次の圧電定数等を考慮し、運動方程式、圧電の基本式を出発点として展開され、非線形効果は第2次高調波発生に寄与する係数 K_2 とパラメトリック増幅にあたってその大きさに寄与する係数 K_1 とに整理され、実際の結晶（水晶：X-Cut, Y方向伝搬, LiNbO_3 : Rotated Y-Cut, X方向伝搬）を例にとって K_1 , K_2 を計算した。さらに実際に第2次高調波成分の振幅測定、およびパラメトリック増幅実験をおこない、その結果より K_1 , K_2 を求め理論と対比して良い対応を得ている。これらは弾性表面波による非線形問題を論ずる際の基礎となるものである。

第4章は非線形効果によって生じた高調波成分の伝搬特性について詳細に検討したものである。すなわち LiNbO_3 単結晶上を伝搬する第2次および第3次高調波は伝搬距離に対して単調に増大するのではなく、振幅が大きく波を打って周期的に変化することを見出した。これは伝搬減衰だけでは説明できない。著者はかかる特性を結晶表面に存在する微小凹凸による速度分散性に原因があるとして種々の観点から検討している。すなわち第2章で得た K_1 , K_2 を用いて基本波 U_1 , 第2次高調波 U_2 に対する非線形結合方程式を与え、これを摂動法で解いた結果、 U_2 は速度分散性のある場合は周期性を示し、ある距離で極小値を示すことを見いだした。一方表面の研磨程度、周期の周波数依存性、電子顕微鏡による凹凸の観測などを通して得た観察結果は理論上予測される傾向とすべて符合していることを示している。さらに LiNbO_3 結晶上に銀を蒸着した二層構造の速度分散性を示す試料について実験をおこない、理論と良い対応を得ている。

第5章では、これまで報告されていない圧電性を考慮した3次の諸定数の定義式を与えさらに測定法を述べ、 LiNbO_3 を例にとって測定した結果について述べている。

弾性表面波の非線形効果の応用として二つの波のコンボル्यूション特性を得る方法が最近注目されているが、第6章では著者の提案した新しい型のコンボルバー2種について述べている。

すなわち一つは正弦波形 $\sin x$ を内蔵した形のもので、他は光と弾性表面波との相互作用を利用したものである。またこの章では弾性表面波を線形素子に利用する際に生ずる非線形効果について言及し、この場合には伝搬媒質に速度分散性をもたしたものを使用すれば非線形効果の影響を軽減できることを提案している。これは極めて重要な結果である。

第7章は結論である。なお、付録では主として本文における諸式の誘導について述べている。

以上要する本論文は、弾性表面波の非線形効果について、基礎的理論よりその応用に至るまで詳細に検討したものであって、その成果は電子工学および電気音響工学に寄与するところが少ない。

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。