

氏名	え はた やす お 江 畑 泰 男
授与学位	工 学 博 士 の まちがいでと ちゅう
学位授与年月日	昭和 62 ⁶³ 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 46 年 3 月 横浜国立大学工学部電気工学科卒業
学位論文題目	金属グレーティング反射器を用いた弾性表面波共振子 に関する研究
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 中鉢 憲賢 東北大学助教授 竹内 正男

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

1974年に、電気-弾性表面波 (SAW) の変換器であるすだれ状変換器 (IDT) とその両側に多数の反射体からなるグレーティング反射器を設けることにより、Q 値の高い SAW 共振子が構成出来ることが報告された。以来、高周波化と高 Q 化を中心に SAW 共振子の基本性能の向上の研究が進められてきた。その一方で通信機器のみならず民生機器でも使用周波数帯の高域化が進むにつれ、VHF 及び UHF 帯での高安定発振器のニーズが急速に広がりつつある。

本研究は民生用機器への応用に十分見合う量産性、経済性及び長期信頼性を満足する SAW 共振子を実用化することを目的として行われたものである。本論文では、生産性に優れた Al 薄膜ストリップによるグレーティング反射器の反射特性の基板依存性、発振器用 SAW 共振子の設計法、共振子内の応力解析、小形高 Q 化共振子の構成法と理論的解析、Al 粒界マイグレーションによる特性劣化とその対策について論ずる。

第 2 章 金属グレーティング反射器を用いた SAW 共振子の解析

グレーティング反射器の反射体として Al 薄膜ストリップを用いる構造は、他の溝 (グループ) や誘電体ストリップによるものに比べ、IDT と同時に同一プロセスで形成出来るため SAW 共振子を構成するのに極めて生産性に優れた構造である。本章では Al ストリップの反射特性について検

討するとともに、発振器用 SAW 共振子の設計法について論じた。

A1 ストリップの反射効率の基板依存性をモード結合理論による解析と実験的手法とにより検討した。その結果、 LiTaO_3 ($X-112^\circ Y$) 基板では水晶に匹敵する反射効率を得られると同時に、ストリップのエッジ部におけるエネルギー蓄積効果が水晶基板の $1/2$ 以下であるため A1 膜厚による共振同波数の偏差が小さい SAW 共振子の製造が可能となることを見出した。また、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 基板では従来の反射ストリップに比べ 5 倍以上の高反射効率を有することが明らかになった。

発振器への応用を考えると、SAW 共振子には与えられた発振回路に対し無調整で確実に発振することが要求される。発振条件と SAW 共振子の等価定数近似式とを対比することにより、(1) グレーティング反射器、(2) IDT 対数、(3) 開口長、の順に決定してゆく設計手順を導いた。設計例として VTR・RF コンバータ用 SAW 共振子を LiTaO_3 基板を用いて試作した結果を示すとともに、本構造は製造偏差に対し有利なことを確認した。

第 3 章 SAW 共振子の応力解析

SAW 共振子の解析は従来、主としてその電気的特性に重点が置かれていた。しかしながら機械的振動現象を利用している以上、共振子における機械的エネルギーの集中度、歪及び応力の解析は重要である。

はじめに共振子内での最大応力と励振電流との関係式を得るために、IDT 電極指の反射及び再励起効果を無視した SAW 強度分布と等価集中定数回路を用いて、歪、応力の近似式を導出した。これにより共振子のディメンジョン及び等価定数から、共振子表面での歪、応力の絶対量を見通しの良い式で求めることが可能になった。

次に、IDT 電極指の反射、再励起効果を考慮し、更に任意電極構造での共振子の歪、応力を求めるためスミスの等価回路モデルにより SAW 共振子を表示し、その機械端子の任意部分での電圧、電流成分を共振子の励振電流の関数として求めた。ついで波動論的解析から SAW に伴う機械振動の各成分が、前述の等価回路の機械端子のどの成分に対応するかを導き、任意基板の共振子における歪分布及びその絶対量を求める解析法を示した。本手法による解析の結果、IDT 電極指の音響反射が無視出来ないとき IDT とグレーティング反射器の境界部に SAW が集中し先に仮定した SAW 分布とは異なってくることが明らかとなった。

第 4 章 小形、高性能 SAW 共振子の構成法

SAW 共振子の小形化及び高 Q 化をはかるには、反射ストリップの反射効率を上げることが最も効果的である。しかしながら、一般に反射効率を上げるに従い SAW から放射バルク波へのモード変換による損失が増加し Q の低下を招くことが知られている。本章では、放射バルク波へのモード変換損失の発生メカニズムの検討とともに、その損失を抑圧する共振子の構造を提案し実験による検証を行った。最後に理論解析により本構造でのモード変換抑圧効果の妥当性とその適用の可能性について検討を行った。

ストリップが半波長以下の無限構造周期の場合、SAW から放射バルク波へのモード変換は生ぜ

ずエネルギーの散逸はない。従って IDT 及びグレーティング反射器内部ではモード変換損失は少なく、主として IDT とグレーティング反射器の境界部すなわち IDT 電極指及びグレーティングの反射ストリップの周期が半波長からずれた部分にモード変換が集中していると考えられる。このことから IDT とグレーティング反射器の間隔も半波長に揃え、更に共振条件を満足するよう IDT の電極指周期を $1/2$ 波長より僅かに小さくして、グレーティング反射器及び IDT 全体にわたってストリップ、電極指の配列周期をほぼ半波長にした準定反射周期 (Quasi-constant Acoustic Reflection Periodicity: QARP) 構造によるモード変換抑圧法を新たに提案した。

QARP 構造による効果を検証するため、(1)従来構造、(2)QARP 構造、(3)QARP 構造で IDT ととの境界部の反射ストリップを各 1 本間引いた構造、の 3 種類のパターンで Al 膜厚 (すなわちストリップの反射効率) を変えた SAW 共振子を作製し Q 値を比較した。その結果、図 1 に示すように、従来構造では反射効率の増加に伴うモード変換損失による Q 値の低下が顕著であるのに対し、QARP 構造ではモード変換による損失が抑圧され Q 値の低下が全く観測されない一方、(3)のパターンでは若干の差があるものの従来構造と同様に Q 値の低下が見られる。このことは QARP 構造でのモード変換抑圧効果は、共振子全体にわたってほぼ半波長の周期でストリップ及び電極指が連続的に配列されることが重要であることを意味する。

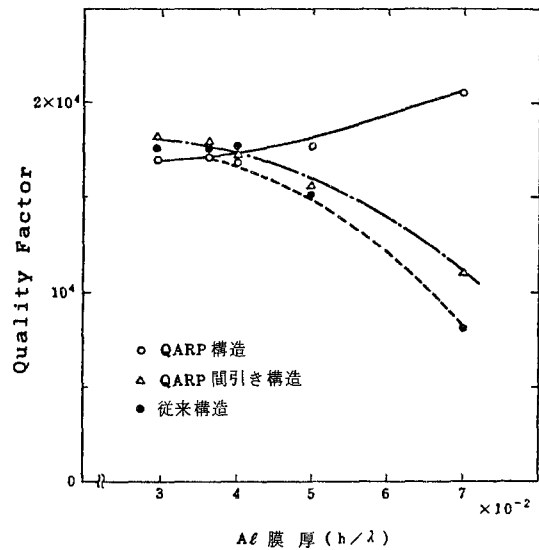


図 1 各構造における Q 値の Al 膜厚依存性

QARP 構造によるモード変換抑圧効果を理論的に解析しその妥当性を確認するため、前章で導いた応力分布解析から求まるストリップ及び電極指での応力を励振源としたフィールド解析を行い放射バルク波への変換効率を上記各パターンに対して求めた。この結果を図 2 に示す。同図より理論解析結果は図 1 の実験結果と同様の傾向を示すことが分かった。更に一連の理論解析を行い以下の結論が得られた。

- (1) QARP 構造の効果は放射バルク波の抑圧によるものである。
- (2) 反射ストリップ、電極指が連続的

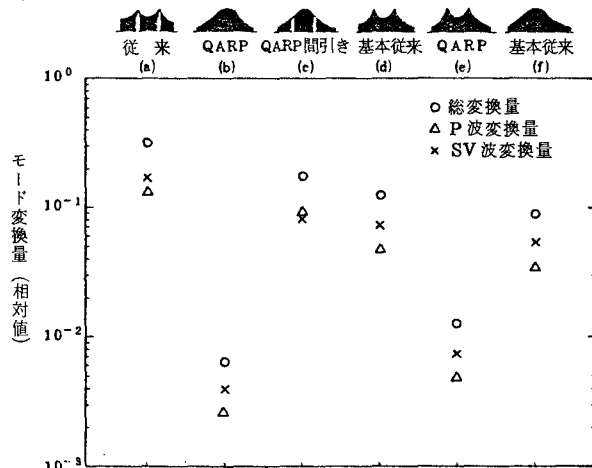


図 2 各種電極構造でのモード変換量

に存在することが重要であり、これらの間引きは放射バルク波の増大につながる。

- (3) 実効的な放射バルク波抑圧による効果から考えると、IDT電極指の周期補正量には比較的広い範囲が許される。
- (4) IDT対数による放射バルク波抑圧効果の低下は実用上問題にならない。
- (5) 中心周波数付近ではQARP構造によるモード変換抑圧効果の周波数依存性は極めて小さい。

第5章 SAW共振子におけるAl薄膜の粒界マイグレーション

Al電極を用いたSAWデバイスの信頼性は既に確かめられている。しかしながらSAW共振子では高いQ値を持つため、励振電力の何倍ものエネルギーが基板表面付近に機械振動エネルギーとして存在する。本章ではSAW共振子の長期動作条件でのAl薄膜の信頼性、劣化のメカニズム、劣化抑圧の方策について論ずる。

実験による検討から、励振レベル依存性をもつ非可逆性のAl薄膜の劣化が観測された。Al変質の形態、発生部位の分布の検討から、これはSAWによって引き起こされる基板表面の歪がAl薄膜に与える応力の繰返し印加によるAl結晶粒界のマイグレーションと推定できる。これらを検証するため種々の結晶基板における2ポート形SAW共振子及びQARP構造共振子のマイグレーション発生分布を実験結果と3章の解析法による計算結果と対比して検討した。その結果、歪の大きい部分でのみマイグレーションが生じており、その発生のしきい値は歪 $S_{11} = 3.2 \times 10^{-4}$ Al薄膜の内部応力 $\sigma = 3.3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ であることが明らかになった。

マイグレーション抑圧の方策としてAlに微量のCuをドーピングすることを、半導体集積回路のAl配線でのエレクトロマイグレーション対策から類推し提案した。実験による検証から、純粋Alに対しCuドーピングAlでは少なくとも5倍以上のしきい値の向上が見られた。この結果は前述のしきい値同様、蒸着条件、基板依存性、膜厚依存性などを考慮すると必ずしも普遍性のある値とは言い難いが一つの指針を与えるものと考えられる。

第6章 結 論

本論文における研究結果を総括するとともに、今後の展望を加えて結論とした。

生産性に優れたAl薄膜グレーティング反射器を用いて、量産性、経済性、信頼性をも考慮したSAW共振子を構成する具体的問題について検討した。これら一連の技術は、SAW共振子の本格的実用化の第一歩となった、VTR・RFコンバータ用発振子の製品化に大きく寄与した。

審査結果の要旨

情報・通信量の増大に伴い、VHF及びUHF帯での高安定の信号源に対する必要性が急速に高まっているが、従来の水晶振動子では実現困難であり、またLC共振回路では安定性に難点があるなど、新しいデバイスの実現が待たれていた。弾性表面波(SAW)共振子は、これらの周波数帯で、小型軽量、高安定、かつ量産性に優れたデバイスとして注目されている。本論文は、金属薄膜グレーティング反射器を用いたSAW共振子の実用化を目的として行った研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、圧電性基板上に設けられたAlグレーティング反射器の反射特性をモード結合理論と実験により解析し、 $X-112^\circ Y \text{ LiTaO}_3$ 基板がAl膜厚に対する共振周波数変化が小さいこと、また $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 基板が大きな反射効率を持つことなど、実用化に重要な結果を得た。また、SAW共振子を用いた発振器の設計法を確立した。

第3章では、波動論及びスミスの等価回路モデルを用いて、任意基板上の共振子のSAWに伴う歪・応力の各成分と機械端子の電流・電圧の対応関係を明らかにすると共に、機械的エネルギーの集中度、及び歪・応力の絶対量を求める解析法を示した。これらは、SAW共振子の設計に有用な知見である。

第4章では、SAW共振子の小型化と高Q(共振尖鋭度)化に重要な放射バルク波へのモード変換による損失増加のメカニズムを解明した。その結果にもとづき、グレーティング反射器とすだれ状電極(IDT)全体にわたってストリップ電極指の配列周期をほぼ半波長にした準定反射周期構造によるモード変換抑圧法を提案し、理論的解析と実験によりQの低下が小さいことを明らかにした。

第5章では、SAW共振子の長時間使用による特性劣化の原因とその対策について述べている。即ち、劣化の原因がAlグレーティング薄膜に生じた大きな繰り返し応力によるAl粒界マイグレーションであること、またその対策として、Alに微量のCuをドーピングすることにより、マイグレーションが生ずるしきい値が純粋なAlの場合の5倍以上に増加することが明らかにした。これらの成果をもとに、信頼性の高い共振子を実現した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、金属グレーティング反射器を用いた弾性表面波共振子に重要な反射率の基板材料依存性、小型化、高Q化、長期安定性について検討し、SAW共振子の高性能化と実用化に有用な知見を与えたもので、その成果は、通信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。