

氏 名	かど 門 田 道 雄
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 1 月 12 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 49 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	酸化亜鉛圧電膜を用いた弾性表面波フィルタの研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 僖良

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

弾性表面波フィルタは、小型、無調整、高安定、高信頼性等を兼ね揃えた性質をもっているため、テレビ、VTR（ビデオテープレコーダ）用の中間周波数増幅回路におけるフィルタとして、実用化を目指した研究が行われてきた。弾性表面波フィルタ用基板材料としては、水晶、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等の単結晶、チタン酸ジルコン酸鉛等の圧電セラミック、酸化亜鉛圧電膜等の薄膜などがある。そのなかで、 LiNbO_3 や LiTaO_3 等の単結晶は音速ばらつきが小さい、安定して供給される、大量生産に適している等の理由から多くの研究者により取り上げられた。一方、酸化亜鉛圧電膜は、音速ばらつきが大きい、成膜速度が遅い、再現性のよい膜が得られない、安定してc軸配向膜が得られない、成膜時の大量生産が困難等の多くの理由から、実用化をめざした弾性表面波フィルタ用材料として取り上げられることは少なかった。しかし、酸化亜鉛圧電膜を用いると、下地の基板として安価なガラス基板を選ぶことができ、材料の酸化亜鉛粉末も安価で世の中に多く存在するなど、単結晶に比べて材料の価格の点で有利である。著者はこの利点に着目して、酸化亜鉛圧電膜を用いた弾性表面波フィルタの研究に取り組んだ。その研究の過程で、当初予想していなかった多くの問題に直面したが、それらの問題に対し、理論と実験とから詳細に検討を進め、様々な新しい事象を発見するとともに、それらの問題を解決する手法を見出し、酸化亜鉛圧電膜による弾性表面波フィルタの工業化に世界で初めて成功することができた。

本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編9章よりなる。

第2章 弾性表面波伝搬特性の理論解析

本章では本論文で用いた理論計算の解析方法について述べている。第2節では酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板の2層構造の解析方法について、第3節では非圧電薄膜／酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板の3層構造の解析方法について述べている。また第4節では、すだれ状電極の電極指やその電極指によって生じる酸化亜鉛圧電膜上の凸部による影響を考慮した有限要素法（FEM）による弾性表面波の解析について、さらに第5節では水で表面が覆われたガラス基板を伝搬する漏洩弾性表面波の解析方法について述べている。これらの解析は次章以下における理論的検討の際に用いられている。

第3章 酸化亜鉛圧電膜を用いた弾性表面波フィルタの作成方法

本章では弾性表面波フィルタの作成方法および酸化亜鉛圧電膜の成膜方法について述べる。酸化亜鉛圧電膜、すだれ状電極、ガラス基板の組合せに対して、理論的検討を行い、最も大きい電気機械結合係数が得られる酸化亜鉛圧電膜／すだれ状電極／ガラス基板構造を取り上げた。ガラス基板の選択に関しては理論と実験から検討を行い、膜の膜厚ばらつきに対して弾性表面波の音速の変化が小さく、しかも電気機械結合係数の大きくとれるガラスを採用した。また、酸化亜鉛圧電膜の成膜に関しては、成膜速度が速く、良好なc軸配向が得やすく、大量生産に適したプラネタリウム回転方式RFマグネトロンスパッタ装置を用い、詳細な実験を行い、成膜方法、成膜条件を決定し、さらに本章では、このようなプロセスにおいては当初予想できなかった多くの問題について、それらを整理して述べている。

第4章 酸化亜鉛圧電膜用の新考案金属マスク

本研究で取り上げた弾性表面波フィルタを構成するために、すだれ状電極と外部電極との接続にあたって当初、引き出し電極部を、従来型金属マスクによりマスクングして、酸化亜鉛圧電膜を成膜していた。本章ではこのようにして作られた弾性表面波フィルタのなかから異常な周波数特性や大きいリップルを生じる素子が存在することを発見し、その問題の解決法について述べる。まず、それらの原因について有限要素法による解析や実験から検討した結果、従来型金属マスクで成膜された酸化亜鉛圧電膜端部のガラス表面に大きい歪が生じ、場合によってはガラスにひびが生じることや、その膜端部で不要な弾性表面波の反射が生じることを明らかにし、その対策として、酸化亜鉛圧電膜成膜用マスクとして片側に円弧状の段差をもつ金属マスクを新しく考案している。このマスクを採用することにより膜端部が丸みをおび、徐々に傾斜した酸化亜鉛圧電膜が得られるので、ガラス基板上の歪や不要な弾性表面波の反射を極めて少なくすることができる。この成果について有限要素法による理論解析と実験により確かめている。

第5章 ガラス基板に起因した弾性表面波フィルタの中心周波数ばらつきの低減

本章では、酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板構造の弾性表面波フィルタのガラス基板に起因したフィルタの中心周波数のずれやばらつき（特に製造ロット内）の原因について検討している。従来、酸

化亜鉛圧電膜／ガラス基板構造の弾性表面波フィルタの中心周波数ばらつきの原因には、酸化亜鉛圧電膜の弾性的ばらつきや、酸化亜鉛圧電膜厚のばらつき、すだれ状電極のばらつき、ガラスのばらつき等が指摘されていたが、それらを細かく分離してばらつきの原因を解析することができなかった。著者は酸化亜鉛圧電膜の成膜法が確立されてくると、ばらつきの原因としてガラス基板も大きく関わっていることに気がついた。そこで、非圧電体でも非接触で音速測定できる超音波顕微鏡を導入し、ガラス基板の漏洩弾性表面波音速を測定した。その結果、ガラスの漏洩弾性表面波の音速はガラス成形ロット間で、またガラス成形ロット内で大きくばらついていることを初めて明らかにしている。さらに、ガラスの漏洩弾性表面波の音速ばらつきが弾性表面波フィルタの周波数ばらつきの大きな原因になっていることを理論と実験から明らかにするとともに、ガラス基板の漏洩弾性表面波の音速ばらつきの原因は、ガラスの形成製造後のガラス熱処理温度の不均一に起因していることを詳細な実験により明らかにしている。そしてガラスの熱処理工程の熱分布を均一化することにより、そのガラスの漏洩表面波音速のばらつきやガラスに起因した周波数ばらつきを大きく低減することに成功している。また、理論と実験とから検討を行い、ガラス基板の音速の差異は、ガラス基板の密度より弾性定数の差異に起因していることを明らかにしている。

第6章 酸化亜鉛成膜ロットに起因する弾性表面波フィルタの周波数ばらつきの低減

本章では、酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板構造の弾性表面波フィルタにおける中心周波数ばらつきを酸化亜鉛圧電膜の成膜ロット間に起因しているという観点から、中心周波数ばらつきを低減する方法について述べている。酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板構造の弾性表面波フィルタではあらかじめガラス基板上にすだれ状電極が形成された基板を用いているが、酸化亜鉛圧電膜成膜後に得られる中心周波数が目標とする周波数と異なることを経験していた。この目標とする中心周波数と異なる製造ロットは不良ロットとして処分されていた。本章ではこの周波数のずれたロットを救済するために、ロット間の周波数ばらつきを低減する新しい周波数調整方法について検討している。従来、弾性表面波フィルタの吸音剤の材料として用いられていた有機高分子材料を、弾性表面波フィルタの周波数調整用材料として初めて取り上げて、その有効性について理論と実験の両面から詳細な検討を行っている。その結果、ポリイミド樹脂を用いて、簡便な薄膜作成法による周波数調整方法の開発に成功している。この方法を製造工程に取り入れることにより、生産工程で懸案であった周波数ずれによる不良ロットの低減や周波数ばらつきの低減に大きな成果をあげることができ、大量生産の場でもこの有効性を確認している。

第7章 酸化亜鉛圧電膜表面研磨による弾性表面波フィルタ振幅特性の改良とばらつき低減

酸化亜鉛圧電膜を用いた弾性表面波フィルタでは中心周波数が一致していても、振幅特性にばらつきがある。そのばらつきをなくすために、種々な対策を試みたところ、酸化亜鉛圧電膜の表面を鏡面研磨することが効果的であることに気がつき、その理由について理論と実験の両面から考察し

ている。酸化亜鉛圧電膜／ガラス基板構造の弾性表面波フィルタでは酸化亜鉛圧電膜上にすだれ状電極の電極指と同じ周期で同じ厚みの凸部、および酸化亜鉛圧電膜全体にも細かい凹凸が生じる。これらの凸部が弾性表面波フィルタ特性に及ぼす影響について検討し、この凸部やその側面の形状ばらつきが、弾性表面波の音速ばらつきや不要反射ばらつきを引き起こし、さらに、これらのばらつきが弾性表面波フィルタの振幅特性ばらつきの原因となっていることを明らかにしている。

第 8 章 GHz 帯用酸化亜鉛圧電膜の作成

本章では弾性表面波フィルタの高周波化をめざし、GHz 帯用の酸化亜鉛圧電膜の作成について研究している。前章までに RF マグネトロンスパッタを用いて、テレビ・VTR の VIF 用弾性表面波フィルタの実用化に成功しているが、これらの成膜方法では、得られる酸化亜鉛圧電膜の断面が針状や柱状の微結晶体の集まりであって、高周波帯では伝搬損失が大きく、電気機械結合係数が小さくなり、そのままでは使用が難しいとされていた。著者はより高周波帯で実用できる酸化亜鉛圧電膜を得るため電子サイクロトン共鳴 (ECR) を利用した ECR スパッタ装置を用いて酸化亜鉛圧電膜を成膜し、その特性について評価している。その結果、断面に針状や柱状構造のない酸化亜鉛圧電膜が得られ、しかも音速が遅いので高周波帯では不利とされているガラス基板を用いても、1.1GHz のレイリー表面波の基本モードを効率よく励振できる酸化亜鉛圧電膜の作成に初めて成功している。またこの弾性表面波フィルタの特性の解析結果より、ECR スパッタによる酸化亜鉛圧電膜は、RF マグネトロンの膜と比較して、良好な高周波特性、大きい電気機械結合係数を有することが明らかになり、特に電気機械結合係数は、有限要素法により得られた理論値に対し 97 % の値を示している。

第 9 章 結 論

本研究によって得られた内容を要約し、結論としてまとめている。

審 査 結 果 の 要 旨

酸化亜鉛圧電膜は弾性表面波デバイス用材料として注目されていたが、圧電的性質や音速のばらつき、あるいは再現性など、膜の作成上問題があり、実用化が困難であった。著者は詳細な基礎実験と解析により、音響的に均一で良質な圧電膜の作成条件を明らかにし、VHF帯用圧電膜弾性表面波フィルタの実用化に成功した。本論文はその研究経緯をまとめたもので、全編9章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では圧電膜を用いた弾性表面波フィルタの特性解析に必要な弾性表面波伝搬特性およびフィルタ特性の理論解析方法を詳述している。また、本研究で圧電膜/すだれ状電極/ガラス基板の3層構造をとりあげた理由も述べている。

第3章はこの3層構造に対する酸化亜鉛圧電膜の作成方法についての研究で、ガラス基板上に弾性表面波速度のばらつきが少なく且つ大きな圧電性をもつ圧電膜の作成条件を明らかにしている。とくにプラネタリウム回転方式RFマグネトロンスパッタ装置の導入により、均質な圧電膜の大量生産を可能にしたが、これは産業的にも高く評価できる。

第4章では、本フィルタの特性を劣化させる原因として構造上圧電膜周辺部分に生じる機械的歪みが問題であることを明らかにし、とくに熱膨張の変化が急峻となるすだれ状電極の引出し電極部付近に大きな機械的歪みが生じることを指摘し、その対策として新しい段差付き円弧状金属マスクを考案している。この金属マスクの使用によって圧電膜端部がなだらかに傾斜した円弧状の膜となり、機械的歪みを解消するとともに膜端部で生じる不要な弾性波の反射をも抑圧できて良好なフィルタの特性を得るのに成功している。

第5章と第6章は大量生産のために重要なフィルタの周波数特性のばらつきの低減に関する研究である。第5章ではガラス基板の性質の均一性が問題となることを超音波顕微鏡により明らかにするとともに、超音波顕微鏡の生産ラインへの導入方法を開拓し、特性の均一なガラス基板の確保に成功している。また、第6章ではガラス基板のロット内あるいはロット間の特性のばらつきに起因する周波数特性のばらつきを有機高分子樹脂の塗布により低減する方法を開発している。これらは産業上重要な成果である。

第7章はフィルタの振幅特性のばらつきの低減に関する研究である。ガラス基板と酸化亜鉛圧電膜の間に介在するすだれ状電極により、圧電膜表面に現れる段差とその表面乱れが音速のばらつきや不要反射の原因になっていることを理論と実験で明らかにし、酸化亜鉛圧電膜の表面を研磨することにより振幅特性のばらつきを低減できることを示している。

第8章は酸化亜鉛圧電膜によるGHz帯用フィルタの可能性を明らかにする研究で、膜厚が1 μm 程度で結晶性の優れた酸化亜鉛圧電膜をECRスパッタ法により世界で初めて作成し、さらにこの圧電膜で中心周波数が1.1GHzの表面波フィルタをガラス基板上に試作している。これは将来有望な新しい技術として注目される。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、酸化亜鉛圧電膜の新しい作成方法を開発し、その弾性表面波フィルタへの適用に関し、基礎的研究から弾性表面波フィルタの工業化に至るまでの研究をまとめたもので、

通信工学及び電子工学の発展に寄与するところが少なくない。
よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。