（様式第６号）

論　文　要　旨

2025 年　1 月　9 日

※報告番号	甲 第　397 号	氏　名	勅使河原　明彦

主論文題名

ScAlN 圧電薄膜のスパッタ成膜と高機能化技術に関する研究

内容の要旨

第 1 章 序論

近年、移動体通信デバイスの高性能化に伴い、高周波信号を処理するバルク弾性波（BAW）共振器の重要性が増している。BAW 共振器には圧電材料が用いられており、中でも窒化アルミニウム（AlN）は CMOS プロセスとの整合性や優れた特性から広く採用されてきた。しかし、通信の広帯域化には、より高い電気機械結合係数を持つ圧電材料が不可欠であった。

このような背景から、AlN にスカンジウム（Sc）を添加することで圧電特性が大幅に向上する ScAlN が発見された。ScAlN は次世代の圧電材料として期待される一方で、高 Sc 濃度化に伴う結晶性の低下（異常粒の発生）、誘電損失の増加、および成膜時の不純物酸素に対する脆弱性といった、実用化に向けた重要な課題を抱えている。

本研究は、これら ScAlN の主要課題を解決し、そのさらなる性能向上と実用化、そして研究の裾野を広げることを目的とした。具体的には、以下の 3 つのテーマに取り組み、ScAlN 薄膜の安定的な高品質成膜と特性改善に貢献する技術を確立した。

下地平坦化による異常粒の抑制

成膜後アニールによる誘電損失の低減

不純物酸素の影響を軽減する新たな成膜手法の確立

第 2 章 ScAlN の基礎特性と成膜条件に関する知見

本章では、ScAlN の圧電性向上メカニズム、物性、および関連する先行研究について詳細に説明した。特に、ScAlN が直面している課題（異常粒、誘電損失、不純物酸素）について掘り下げ、本研究がこれらの課題解決にどのように貢献するかを論じた。また、新たなウルツァイト系材料の開発動向についても触れ、本研究の成果が ScAlN だけでなく、将来的な新規材料研究にも応用可能であることを示唆した。

第 3 章 下地平坦化による異常粒抑制と電気特性向上

本章では、これまで十分に検討されてこなかった下地膜の表面粗さに着目し、これが ScAlN の結晶性と異常粒の発生に与える影響を検証した。下地膜表面を Ar エッチングによって平坦化することで、異常粒が効果的に抑制され、c 軸配向性が向上することを確認した。この下地

平坦化は、圧電特性の向上と誘電損失の低減にも寄与することを実証した。この手法は、高精度なドライプロセスであるため、既存の MEMS プロセスとの整合性も高く、実用的なソリューションとなり得る。

第 4 章 成膜後アニールによる誘電損失低減

本章では、ScAlN の誘電損失増加の問題に対し、そのメカニズムを究明し、成膜後アニール処理による低減手法を提案した。誘電損失の周波数特性を解析した結果、周波数帯域ごとに誘電損失の起源となる要因を明らかにした。比較的低温の成膜後アニール処理を施すことで、低～中周波数帯域において誘電損失が効果的に低減されることを実証した。これは、アニールによって結晶欠陥の低減や構造的な変化が起こったことに起因すると考察した。本手法は、BAW 共振器の Q 値向上に直接貢献する。

第 5 章 不純物酸素に対するロバスト性改善

本章では、成膜時の不純物酸素が ScAlN の結晶性に与える影響を定量的に評価し、不純物酸素の影響を軽減する新たな手法「Al シート法」を提案した。この手法は、スパッタリングターゲット上に Al シートを敷設することで、高真空環境が整っていない実験環境においても、高品位な ScAlN 膜を安定的に成膜することを可能にした。Al シートが雰囲気中の不純物酸素をゲッタリングするメカニズムを考察したが、膜中酸素濃度の分析結果から、単純なゲッタリング効果だけでは説明できないことが判明した。さらに、本手法は不純物酸素に対するロバスト性の向上に加え、成膜レートの増大と圧縮応力の低減という副次的な効果をもたらすことも明らかにした。

結論と今後の展望

本研究は、ScAlN の実用化における主要な課題である異常粒の発生、誘電損失の増加、不純物酸素に対する脆弱性に対し、それぞれ効果的な解決策を提示した。下地平坦化、低温アニール、Al シート法という 3 つの技術は、いずれも ScAlN 膜の高品質化と特性向上に大きく貢献するものである。

本研究で得られた知見は、特に高 Sc 濃度 ScAlN 膜の安定的な成膜を可能にし、次世代の広帯域 BAW フィルタや高感度センサなど、ScAlN を応用した MEMS デバイスのさらなる発展に寄与する。

今後の展望として、Al シート法の作用メカニズムの詳細な解明や DC スパッタリングへの適用可能性の検証、誘電損失低減メカニズムのより深い解析など、本研究で得られた成果をさらに発展させるための研究が期待される。

さらに、下地平坦化、低温アニール、Al シート法という 3 つの技術は、AlN、ScAlN 以外の材料に対しても有効であることが予想される。今後は、他材料に対しても有効性を実証し、これらの技術の意義を訴えていきたい。