

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	先端メモリ技術に向けた強誘電体 AlScN 薄膜の高集積化と高信頼性に関する研究
Title(English)	Highly Reliable and Scalable Ferroelectric AlScN Thin Films for Future Advanced Memory Technology
著者(和文)	ChenSi-Meng
Author(English)	Si-Meng Chen
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第279号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:角嶋 邦之,若林 整,渡辺 正裕,大見 俊一郎,飯野 裕明,三谷 祐一郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第279号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	Chen Si-Meng	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	角嶋 邦之	准教授	飯野 裕明	准教授
	審査員	若林 整	教授	三谷 祐一郎	都市大/教授
		渡辺 正裕	准教授		
		大見 俊一郎	准教授		

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は“Highly Reliable and Scalable Ferroelectric AlScN Thin Films for Future Advanced Memory Technology”と題し、英文 9 章からなっている。

第 1 章“Introduction”では in-memory computing におけるメモリ技術の重要性について概説し、次世代の不揮発メモリとして強誘電体メモリが強力な候補であることを述べている。また、強誘電体の自発分極特性と動作原理に加え、強誘電体メモリの動作原理について説明をしている。

第 2 章“Ferroelectricity in Nitride Materials”では AlScN 膜の強誘電性の起源、堆積方法、Sc 濃度による物性値変化と強誘電性への影響について概説している。また課題として、高いリーク電流や、薄膜化に伴う抗電界の上昇やスイッチング回数を指摘し、本論文の目的を高信頼性と低電圧動作を実現する強誘電体 AlScN 膜の形成方法であると述べている。

第 3 章“Fabrication Process and Electrical Characterization of Aluminum Scandium Nitride Capacitors”では本論文で用いた強誘電体 AlScN キャパシタの作製方法について述べている。また、本論文で用いた強誘電特性の評価方法に加え、絶縁特性の評価方法についても述べている。

第 4 章“Exploration of Optimized Reactive Sputtering Conditions for Aluminum Scandium Nitride Thin Films”ではスパッタリングによる AlScN 膜の成膜パラメータが強誘電特性に与える影響をまとめている。パラメータとしてスパッタリングターゲットの Sc 濃度、スパッタ時の圧力、ターゲットと基板の距離を選択し、残留分極や抗電界、誘電率についてトレードオフの関係を明らかにしている。

第 5 章“Defect Engineering for Aluminum Scandium Nitride Thin Films by Oxygen Incorporated Sputtering”では AlScN 膜に欠陥を導入することで、抗電界を下げる試みが示されている。成膜時に酸素を導入することでアルミニウム原子欠損と窒素を置換した酸素原子の複合欠陥が形成されることを利用し、抗電界が下がることを示している。また、印加電界による残留分極の制御容易性が向上することを見出し、マルチレベル動作を実現したことを報告している。スイッチング回数によって残留分極が低減する疲労特性が酸素導入量と共にみられ、第 7 章で後述する酸素原子と結合した Sc 原子の存在が要因であることを示している。一方、酸素導入による強誘電体 AlScON 膜で、9nm の膜厚で 5V 以下のスイッチングを実現できたことを述べている。

第 6 章“Oxygen Profiling in Multi-Layer Aluminum Scandium Oxynitride Capacitors”では膜厚方向に酸素濃度に分布を導入し、堆積後の AlScN 膜の分極方向の制御性について述べている。AlScN の単層膜の表面は窒素面であるのに対し、AlScON 単層膜の表面は窒素面と金属面の結晶粒が共存すると述べている。AlScN 膜と AlScON 膜を交互にあるいは複数積層した場合でも窒素面と金属面に向けた結晶粒が共存すると述べている。得られた結果から酸素を導入することで AlScN 膜の分極方向を制御できることを説明している。

第 7 章“Interface Oxygen Depletion by Reducing Sputtering Ambient for Endurance Enhancement”では水素ガスを導入したスパッタリング成膜を行い、下部電極界面付近に存在する残留酸素の影響を除いた検討を報告している。水素の導入によって AlScN 膜の c 軸配向性が劣化するものの誘電率の低下、リーク電流の低下などの利点が得られることを示している。一方、成膜時の水素ガスの導入により絶縁破壊までのスイッチング回数が $\text{Al}_{0.88}\text{Sc}_{0.12}\text{N}$ では 10^6 回から 2×10^7 回、 $\text{Al}_{0.74}\text{Sc}_{0.26}\text{N}$ 膜では 10^4 回から 10^6 回に向上することを述べている。なお、疲労特性が見られる理由は酸化した Sc 原子の影響であると指摘している。過剰な水素ガス導入は c 軸配向性が劣化し残留分極値が減少する結果となるが、印加電界によって残留分極値の制御性が向上する利点も得られると述べている。

第 8 章“Optimized Model for Aluminum Scandium Nitride Thin Films for High Endurance and Low-Voltage Operation”では本論文で得られた知見に基づき、AlScN 膜の薄膜スケールと高信頼性が得られる指針について述べている。上部と下部電極には水素ガスを導入した成膜を用いた低 Sc 濃度

の AlScN を導入し、その間に酸素ガスを導入した成膜プロセスで高 Sc 濃度の AlScON 膜を用いることを提案している。本構造を採用することで低 Sc 濃度の AlScN 膜によってリーク電流を抑制することができ、高 Sc 濃度の AlScON 膜の採用で積層構造全体で低い抗電界を維持することができる。さらに、良好な電気特性を得るための最低限の膜厚や膜厚比について議論を行っている。

第 9 章 “Conclusions and Future Works” では本論文の独自性について述べ、それぞれの技術について結論をまとめている。また、電極材料の探索や他の堆積技術、AlScN 膜を導入したデバイスについて展望を述べている。

以上を要するに、本論文は不揮発メモリとして期待される強誘電体用 AlScN 膜の薄膜に伴う課題と信頼性を向上するプロセス技術について指針を示す内容であり、工学上ならびに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値があるものとして認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。