

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	A Study on Reliability and Scalability of Ferroelectric AlScN Films
著者(和文)	TSAISung Lin
Author(English)	Sung Lin Tsai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12383号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:角嶋 邦之,筒井 一生,若林 整,渡辺 正裕,飯野 裕明,右田 真司
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12383号, Conferred date:2023/3/26, 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

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	TSAI Sung-Lin	
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	筒井 一生		教授	右田 真司	産総研 総括研究 主幹
		若林 整		教授		
	渡辺 正裕		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は“A Study on Reliability and Scalability of Ferroelectric AlScN Films”と題し、英文 8 章からなっている。

第 1 章 “Introduction”ではメインメモリで消費する電力の削減を行うためには不揮発性メモリの導入が必要であることを示し、中でも強誘電体メモリで最も消費電力の削減が期待できることを述べている。また、強誘電体 PZT 膜と HfO₂ 膜の材料特性とデバイスの電気特性の研究動向を述べている。また、近年報告された高い残留分極値を示す強誘電体 AlScN 膜の強誘電体スイッチングの原理を説明し、デバイス特性の報告をまとめている。さらに、強誘電体 AlScN 膜には信頼性と薄膜化の課題があること述べ、本論文の目的を強誘電体特性の劣化と絶縁破壊メカニズムを明確化して、薄膜化と信頼性向上を可能とするプロセスを提案することであると述べている。

第 2 章 “Experimental Methods”では本論文で用いた物理分析手法、電気特性の評価方法を述べている。

第 3 章 “Low-temperature formation of ferroelectric AlScN films”では配線工程に強誘電体メモリを形成することを想定し、低温プロセスで強誘電体 AlScN 膜を得る手法を提案している。反応性スパッタリングを用いた堆積によって、AlScN 膜の c 軸配向を確認しており、室温堆積でも残留分極値 77 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ が得られたことを示している。一方、形成した AlScN 膜は堆積後に N-face が表面であることを電氣的に示している。

第 4 章 “Reliability and breakdown mechanism of ferroelectric AlScN films upon switching cycles”では AlScN 膜の強誘電体スイッチングに伴う信頼性の課題について述べ、AlScN 膜中、および界面の変化が要因であると説明している。各スイッチング回数直後の残留分極値はスイッチング初期段階で増加し、その後低下することを示している。容量特性から、強誘電体スイッチングに必要な電圧が下がることを示しており、膜中の窒素欠損の形成によって抗電界が低下したと述べている。また、漏れ電流の解析の結果、AlScN 膜の伝導帯がベンディングすることで伝導電子の透過確率が増加するモデルを構築し、その要因を界面付近の窒素欠損の形成であるとしている。さらに、スイッチング試験の最終段階でみられる AlScN 膜の絶縁破壊は、過剰な伝導電子によるジュール熱で素子が破壊されるとし、酸化物の強誘電体材料で見られる電極間に局所的に架橋する酸素欠損という破壊メカニズムとは異なることを示している。

第 5 章 “Thickness Scaling in Ferroelectric AlScN Films”では、AlScN 膜の薄膜化に伴う強誘電体特性の劣化について述べている。10nm の膜厚の AlScN 膜で結晶の信号を取得できているものの、薄膜化に伴い c 軸の配向性が劣化することを示している。一定の電界を用いたスイッチング試験の結果、40nm 以下の膜厚で残留分極値が低下することを示している。このことは、AlScN 膜の薄膜化によって抗電界が増加することに起因するとし、下部電極界面による歪みに関与していると述べている。

第 6 章 “Oxygen atoms incorporation for thickness scaling”では AlScN 膜に酸素原子を混入することで強誘電特性への影響と薄膜化への効果を述べている。酸素原子を混入することで窒素原子との価数の違いや結合距離が変わるため、窒素原子が変位しやすくなり、強誘電特性が向上することが述べている。混入する酸素量を制御した AlScON 膜の実験では抗電界が低下できることを示し、最適な酸素混入量である Al_{0.2}Sc_{0.3}O_{0.2}N_{0.8} 試料では抗電界を 3.8MV/cm から 2.8MV/cm まで低下できたことを示している。この最適酸素混入量の組成で 7nm の膜厚のキャパシタで強誘電特性の取得に成功しており、10nm の膜厚では残留分極値が 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ と低くなるものの 5V 以下の動作が可能であることを示している。

第 7 章 “AlScON/AlScN stacking for reliable ferroelectric films”では AlScON 膜の高い漏れ電流の課題に対して、5nm の膜厚を有する AlScN との積層を行うことで解決する手法を提案している。様々な積層構造を検討した結果、下部電極と AlScON 膜の間に AlScN 膜を導入することが漏れ電流抑制に効果

的であることを示し、抗電界も 3.1MV/cm と低い値を維持することができると述べている。薄膜化に伴い抗電界の増加は確認されたが、 6.7nm の膜厚の積層膜で強誘電特性の取得に成功している。一方、 12nm の膜厚の積層膜で残留分極値 $75\mu\text{C/cm}^2$ が得られたことを示しており薄膜化が可能であることを示している。他機関から報告された強誘電体 AlScN 膜の特性と比較するとどの膜厚の領域でも抗電界を低く保てることを示し、AlScN 膜への酸素混入と漏れ電流抑制のための AlScN 膜の積層構造が効果的であることを述べている。

第 8 章 “Conclusions” では、本論文で得られた結果を総括し結論としている。

以上を要するに、本論文は強誘電体 AlScN 膜の信頼性の課題となる要因を明らかにし、薄膜化に伴う強誘電特性劣化を抑制する技術を提案する内容であり、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認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大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。