

氏 名 江 利 口 浩 二
 学 位 の 種 類 博 士 (工 学)
 学 位 記 番 号 論 工 博 第 3764 号
 学 位 授 与 の 日 付 平 成 16 年 1 月 23 日
 学 位 授 与 の 要 件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
 学 位 論 文 題 目 A study of wear-out and breakdown phenomena in thin silicon
 dioxide films and the evaluation techniques
 (薄膜シリコン酸化膜の劣化・破壊機構およびその評価手法に関する研究)

論文調査委員 (主 査) 教 授 藤 本 孝 教 授 藤 田 静 雄 教 授 立 花 明 知

論 文 内 容 の 要 旨

申請者はMOS (Metal-Oxide-Silicon) 電界効果型トランジスタにおけるシリコン酸化膜の初期電気特性とその信頼性寿命の経時劣化過程に関する系統的な研究を行い、従来の手法による評価結果を統一的に説明する相関モデルを提案した。そのモデルをいくつかの種類のシリコン酸化膜に対する特性評価に応用することにより、その有効性を示した。

第1章は本論文が対象とする諸現象、以下の議論の基礎となる概念を提供することを目的としている。MOSトランジスタのゲート絶縁膜として用いられるシリコン酸化膜の電気特性評価手法及びその信頼性寿命の経時劣化過程モデルを概観し、プラズマ処理工程によるシリコン酸化膜の特性劣化モデルを紹介した。シリコン酸化膜の原子的描像にもとづいて、以降の章で議論されるシリコン酸化膜中の欠陥の描像を分類した。

第2章では、MOSトランジスタにおけるシリコン酸化膜信頼性寿命の経時劣化の評価手法であるTDDB (Time-Dependent Dielectric Breakdown) 評価を、2.4nmから10nmの膜厚をもつ薄膜シリコン酸化膜を対象に、423Kから223Kの温度範囲で系統的に実施した。評価結果を活性化エネルギーの視点から整理し、経時劣化過程が温度領域によって3つのモードにわけられることを明らかにした。膜厚4 nm以上の酸化膜に対しては、HおよびH₂の拡散過程が経時劣化過程を支配していると結論づけた。活性化エネルギーのストレス極性依存性 (電気的ストレスが正負の場合の違い) をゲート絶縁膜を流れるリーク電流の温度依存性によるものと主張し、酸化膜の経時劣化過程を膜中での欠陥生成過程で表現するモデルにより説明した。

第3章では、広く用いられているTDDB評価の2手法、すなわち定電圧印加ストレス (CVS: Constant Voltage Stress) 法と定電流注入ストレス (CCS: Constant Current Stress) 法それぞれにおいて信頼性寿命が決定されるメカニズムについて考察し、第2章で提案した膜中での欠陥生成過程にもとづいて両評価手法の相関モデルを導出した。このモデルは両手法の本質的同等性を主張するものである。また、このモデルは金属材料分野での疲労破壊現象とのアナロジーにもよっている。膜厚2.4nmから10nmの範囲の酸化膜に対して、そのモデルの有効性を実験的に検証した。

最先端の半導体製造工程のひとつであるプラズマ処理工程 (ドライエッチ工程) に付随するいわゆるチャージングダメージによって、シリコン酸化膜のTDDB信頼性寿命が劣化するが、第4章では、その劣化量の定量的評価手法 (ΔQ_{bd} 法) を提案した。この ΔQ_{bd} 法にもとづいて、MOSトランジスタのゲート電極に用いられる多結晶シリコン膜形成のためのドライエッチング工程でのチャージングダメージを解析した。磁場印加型の反応性ドライエッチング工程では、ダメージが印加磁場強度に大きく依存することを見出し、ダメージ低減の指針を与えた。また、チャージングダメージを受けた膜厚6nm以上の酸化膜に対しては、CVS法とCCS法によって得られる2つのTDDB信頼性寿命に見かけ上矛盾が生じることを実験的に示し、それを第3章で確立したモデルにより説明した。このような場合にはCCSによって得られるTDDB信頼性寿命がチャージングダメージの指標として適していると結論づけた。

第5章では、膜厚2.4nmの2種類のシリコン酸化膜、すなわちバッチ式縦型炉により作製した膜 (Dry膜) と高速酸化炉

により作製した膜（RTO膜）それぞれに対して、希釈HF水溶液によるシリコン酸化膜エッチング速度法とフーリエ変換赤外線吸収分光法を適用し、シリコン基板との界面近傍約1nm厚のひずみ層における力学的ひずみ量の違いを決定した。Dry膜のひずみ量が、RTO膜のそれよりも大きいことを確認した。Dry膜はRTO膜に比べてゲート電流値が大きく、CVS-TDDB信頼性寿命が短く、かつ、CVS-TDDB信頼性寿命の活性化エネルギーが小さいことを見出した。これらの電気的特性の違いが、ひずみ量の違いに起因していると結論づけた。これらDry膜、RTO膜について、CVS法とCCS法によるTDDB信頼性寿命に見かけ上の矛盾が生じることを示し、それを第3章で確立したモデルにより解決した。膜厚3nm以下の酸化膜では、CVS法によって得られるTDDB信頼性寿命が指標としてより適していると結論づけた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、申請者がMOS（Metal-Oxide-Silicon）電界効果型トランジスタにおけるシリコン酸化膜の初期電気特性とその信頼性寿命の経時劣化過程に関して系統的な研究を行い、従来の手法による評価結果を統一的に説明する相関モデルを提案、実験的に検証したことを記述しており、そこで得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) MOSトランジスタにおけるシリコン酸化膜の信頼性寿命がこうむる経時劣化を評価する手法であるTDDB（Time-Dependent Dielectric Breakdown）評価を、2.4nmから10nmの膜厚をもつ薄膜を対象に、423Kから223Kの温度範囲で系統的に実施した。評価結果を活性化エネルギーの視点から整理し、経時劣化過程が温度領域によって3つのモードにわけられることを明らかにした。
- 2) 広く用いられているTDDB評価の2手法、すなわち定電圧印加ストレス（CVS：Constant Voltage Stress）法と定電流注入ストレス（CCS：Constant Current Stress）法それぞれにおいて信頼性寿命が決定されるメカニズムにもとづいて両手法の結果を結びつける相関モデルを確立し、その有効性を実験的に検証した。
- 3) プラズマ処理工程（ドライエッチ工程）に付随するチャージングダメージの定量的評価手法を確立し、それにもとづいてダメージ低減の指針を与えた。CVS法とCCS法によって得られる2つのTDDB評価寿命に見かけ上の矛盾が生じることを示し、それを2)で確立したモデルにより説明した。
- 4) 極薄シリコン酸化膜の信頼性寿命が、シリコン基板との界面近傍約1nm厚のひずみ層における力学的ひずみ量によって決定されることを、製造工程の異なる2種類の膜厚2.4nm酸化膜に対して示した。CVS法とCCS法によるTDDB評価寿命に生ずる見かけ上の矛盾を2)で確立したモデルにより解決した。

以上要するに本論文は、絶縁酸化膜の信頼性寿命評価に関して新たな知見を開いたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年11月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。