

外 98-17

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

シリコンウェーハの電気的特性評価
に関する研究

申 請 者

村 上 義 男

YOSHIO MURAKAMI

1998 年 7 月
(西暦)

シリコン半導体を用いた LSI デバイスとして、DRAM(Dynamic Random Access Memory)、フラッシュメモリ、FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) 等のメモリデバイス、および CCD(Charge Coupled Device)等の画像デバイス、さらにはマイクロプロセッサを中心とした各種のロジックデバイスが開発され、年々、高集積化が図られている。

これらのデバイスの高性能化、高信頼化、あるいは、歩留まり向上のため、シリコンウェーハ（シリコン結晶）に対する要求も年々厳しくなっている。化学的特性、機械的特性、構造的特性、電気的特性のどれもデバイスの微細化とともに厳しい仕様になっている。特に、電気的特性の酸化膜耐圧特性、再結合、発生ライフタイムに高性能化が求められている。デバイスの歩留まりに影響を及ぼす要因は、ウェーハ起因では、酸化膜耐圧、Oi（格子間酸素）、BMD（Bulk Micro Defect）、OSF（Oxidation Induced Stacking Fault）が重要であり、プロセス起因では、パーティクル、酸化膜耐圧、表面清浄度等が重要な不良要因であることが明らかになっている。

本研究は、シリコンウェーハ（シリコン結晶）を、LSI デバイスの歩留まり、特性に直接影響する電気的特性の観点から、評価する目的で行われたものである。半導体プロセス技術を用いて、簡単な、TEG(Test Element Group)を作成し、酸化膜絶縁破壊特性、pn 接合リーク電流のウェーハ依存性について調べ、特に結晶の grown-in 欠陥、プロセス誘起欠陥の影響を中心に調べた結果について述べる。さらにこれらの電気特性を劣化させるもう一つの要因である重金属汚染の最も高感度な評価法として光導電減衰法によるライフタイム、DLTS（Deep Level Transient Spectroscopy）法を適用した結果について述べる。

第 1 章では、シリコンウェーハの電気的評価の重要性について述べた後、シリコンプロセス、電気的特性評価法の概要についてまとめる。さらに、本論文の目的、構成及び概要について述べ、本研究の意義を明らかにする。

第 2 章では、従来の Al 電極に代わって、絶縁破壊時に電極が蒸発しにくく、正確な評価が可能なポリシリコン電極を用いた MOS キャパシタを採用し、酸化膜絶縁破壊特性の評価法として、TZDB(Time Zero Dielectric Breakdown)、TDDB(Time Dependent Dielectric Breakdown)の 2 つの評価法を用い、これらの特性の電極面積、酸化膜厚依存性を解析することで、酸化膜の絶縁破壊の原因を特定する手法を開発した経緯について述べる。次に、これらの評価法を用いて、各種のシリコン結晶（CZ、FZ、エピ）に形成した酸化膜の絶縁破壊特性のウェーハ依存性の評価を行い、CZ 結晶に形成した酸化膜の TZDB 特性にのみ特徴的に見られる欠陥性の破壊（B モード不良）を見いだした結果について示す。酸化方法（ドライ酸化、ウェット酸化）により、B モード不良率、B モード耐圧が変化する現象について酸化膜厚依存性から詳細に解析し、従来から知られていた酸化方法による酸化膜絶縁破壊特性の相違は、欠陥性の破壊の差が主であり、真性破壊の差は小さい

ことを明らかにする。さらに、電極材料、プロセス条件、ドーピング濃度、ウェーハ伝導型の酸化膜絶縁破壊特性に及ぼす結果について検討した結果について示す。ポリシリコンを用いた測定においても、高濃度ドーピングのウェーハでは、ウェーハの直列抵抗が小さいために、絶縁破壊時に、急激に電流が流れ、電極材料の蒸発によるセルフヒーリングが生じること、また、電荷注入をポリシリコン電極側から行った場合、基板側から行った場合に比べて TDDB 特性が劣化する等の結果について述べる。

第 3 章では、B モード不良の原因の 1 つとして従来考えられていた酸素析出核の酸化膜絶縁破壊特性に及ぼす影響について調べ、酸素析出核とは異なる新しい grown-in 欠陥：COP（Crystal Originated Particle）欠陥が、酸化膜絶縁破壊に支配的な欠陥であることを明らかにする。また、OSF（Oxidation-induced Stacking Fault）欠陥の影響は小さいことについても述べる。さらに、結晶引き上げの熱履歴を変化させることで、故意に、異なる密度の酸素析出物を形成し、プロセス誘起欠陥の酸化膜絶縁破壊特性への影響について検討した結果、酸素析出物が存在することで、酸化膜の絶縁破壊特性が劣化することを明らかにした結果について述べる。また、プロセス中の金属汚染をデバイス領域から取り除く目的で用いられる IG（Intrinsic Gettering）プロセスによって生ずる無欠陥層(Denuded Zone)内の欠陥の、酸化膜絶縁破壊特性に及ぼす影響について調べ、光学顕微鏡で見えない欠陥でも酸化膜絶縁破壊特性に影響を与えること、IG の高温熱処理の雰囲気欠陥の形成に重要であり、窒素雰囲気では、酸素雰囲気に比べて、DZ 中の欠陥の形成密度が高いことを明らかにする。最後に、これらの grown-in 欠陥、プロセス誘起欠陥等のバルク微小欠陥による酸化膜絶縁破壊が、ストレスによる酸化膜の薄膜化によって起こると考えたモデルを提案し、酸化方法によって、酸化膜絶縁破壊特性に違いが生じた理由について述べる。

第 4 章では、P 拡散を用いて形成した n^+p 接合を用いた pn 接合リーク電流の評価法の開発について述べる。接合リーク電流の各種成分（拡散、発生、表面発生）を分離して評価する方法を開発し、特に、電流密度（J）の空乏層幅（W）依存性をプロットすることで（J-W プロット）、拡散、発生の二つの成分を分離する方法を開発した経緯について述べる。次に、この手法を用いて、各種のウェーハについて、接合リーク電流の拡散成分、発生成分について検討した結果について示す。まず、拡散成分は、通常の CZ ウェーハでは、ドーパント濃度の増加により減少し、エピウェーハ（ P/P^+ ）では、CZ ウェーハに比べ、極端に小さく、反対に、IG ウェーハでは、大きいことを示す。これらの拡散成分の変化は、少数キャリアの拡散方程式を解くことで定量的に解釈できることを述べる。次に、発生成分には、ウェーハの種類による違いは小さく、基板ドーパント濃度の影響が支配的であり、空乏層の電界により、Poole-Frenkel 型のキャリアの電界放出が起こることを示す。最後に、CZ ウェーハに形成した pn 接合のリーク電流にのみ、定常成分に加えて、ト

ランジェントなリーク成分が存在することを見だし、それらが、酸素に起因したホールトラップによるものであることを明らかにした結果について述べる。

第 5 章では、pn 接合リーク電流に影響する要因として、熱処理によって導入された酸素に関係した各種のプロセス誘起欠陥（酸素析出物、転位ループ、積層欠陥）の影響について検討した結果を示す。IG ウェーハの場合、接合リーク電流の DZ (Denuded Zone) 幅依存性が、第 4 章の解析から定量的に説明できることを示す。また、バルク欠陥密度とリーク電流の増大は、極めて良い相関があり、積層欠陥、酸素析出物のどちらとも相関があり、欠陥 1 個あたり 0.1pA のオーダーのリーク電流の増大であることを明らかにする。次に、デバイスのプロセス温度の低温化にもなつて、ウェーハの格子間酸素濃度[Oi]、及びフィールド酸化温度が、pn 接合のリーク電流を決定する重要な要因であることを示す。さらに、酸化膜絶縁破壊特性で問題となった grown-in 欠陥としての OSF 核、COP 欠陥の影響について調べた結果、接合リーク電流に対して OSF 核の影響が大きく、これに比べて COP 欠陥の影響は、小さいことが明らかになった結果について述べる。最後に、これらの欠陥による pn 接合リーク電流増大のメカニズムについて、界面準位、転位等の二次欠陥の影響について検討した結果、これらのリークの増大には、界面準位の効果よりも、過飽和な格子間シリコン、あるいは、それらによって形成された転位等の二次欠陥の影響が重要であることを明らかにした結果について述べる。

第 6 章では、酸化膜絶縁破壊特性、pn 接合リーク電流に影響するもう一つの要因としての重金属汚染の重要性について述べ、SEMILAB 社の開発したライフタイム、DLTS 装置を実際にウェーハ評価に適用した結果について示す。通常の CZ ウェーハのライフタイムの面内ばらつきについて調べ、ライフタイムの測定値と、DLTS により測定したその点の Fe-B 濃度が極めて良い相関を示すことから、これらが加工プロセス中の Fe 汚染によるものであることを明らかにした結果について述べる。さらに、二つの方法を組み合わせて、ゲッタリング能力評価に用いた結果について示し、これらの評価法の有効性について述べる。

第 7 章では、本論文の主な結果をまとめて結論とし、さらに、今後の課題について述べる。