

Separation by Implanted Oxygen(SIMOX) ウェーハの電気特性評価

Electrical Characterization of Separation by Implanted Oxygen (SIMOX) Substrate

川 村 啓 介^{*(1)}
Keisuke KAWAMURA

松 村 篤 樹^{*(2)}
Atsuki MATSUMURA

抄 録

高速・低消費電力LSI向けの半導体材料として期待されるseparation by implanted oxygen(SIMOX)ウェーハの品質を電氣的に評価した。まず、SIMOXウェーハの内部に存在する埋め込み酸化膜の絶縁破壊挙動を調査し、同挙動が埋め込み酸化膜の内部に存在するシリコン島欠陥(Si島)に支配されることを定量的に明らかにした。このSi島のサイズや密度を、酸素イオン注入量の調整とITOX処理により低減することを試み、条件最適化により、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界を熱酸化膜同等の約8 MV/cmにまで改善できることを実証した。さらにSIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性特性を評価し、同信頼性がミラーウェーハ同等以上であることを明らかにした。

Abstract

Electrical performance of low-dose separation by implanted oxygen (SIMOX) substrates was evaluated, which substrates are a promising semiconductor material for high speed, low power LSIs. It was quantitatively clarified that the dielectric breakdown behavior of buried oxide (BOX) in the SIMOX substrate was dominated by Si islands in the BOX. The size and density of the Si islands were found to be reducible by the oxygen dose control and the internal thermal oxidation (ITOX) process. Through optimization of these measures, a BOX breakdown field of about 8 MV/cm, comparable to that of thermally grown oxides, was attained. The gate oxide integrity of a low-dose SIMOX produced by the ITOX process (ITOX-SIMOX) was found to be equal or superior to that of the bulk CZ Si substrates.

1. 緒 言

Separation by implanted oxygen (SIMOX) ウェーハは、低消費電力および高速LSIへの適用が期待される薄膜silicon on insulator (SOI) ウェーハの1種である。SIMOXウェーハは、ウェーハ内部に埋め込み酸化膜を形成するために必要な酸素イオン注入量が 1.5×10^{18} ions/cm²以上となる高ドーズSIMOXウェーハ¹⁾と、ドーズウィンドウと呼ばれる $3 \sim 4 \times 10^{17}$ ions/cm²の範囲で埋め込み酸化膜が形成可能な低ドーズSIMOXウェーハ²⁾とに二分される。低ドーズSIMOXウェーハは、生産性やSOI膜の結晶性³⁾において高ドーズSIMOXに優るため近年脚光を浴びている。

一方その課題は、埋め込み酸化膜が約100nmと薄いことによる絶縁品質の不足であり、これを克服する技術として、高温下(>1300℃)にて埋め込み酸化膜上面に熱酸化膜を形成するinternal thermal oxidation (ITOX) 技術⁴⁾が提案されている。新日本製鐵では低ドーズSIMOXおよびITOX技術の優位性に着目し、両技術を利用した低ドーズITOX-SIMOXウェーハの開発を現在精力的に進めている。

SIMOXウェーハ上にLSIを形成する際に重要となる電気特性と

しては、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界と、ウェーハ表面に熱酸化によって形成されるゲート酸化膜の信頼性特性 (gate oxide integrity : GOI) が挙げられる。埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界は、パワーデバイス応用においてはウェーハ品質のなかで最重要となる特性であるが、CMOS-LSI応用においてもデバイス製造プロセス中での埋め込み酸化膜の絶縁破壊を防止するために、その値は高い方が望ましい。また、ゲート酸化膜信頼性特性はLSIの性能自体を左右する特性ゆえ、その重要性はSIMOXウェーハにおいてもミラーウェーハやエピタキシャルウェーハの場合と同様極めて高い。

本論文では、低ドーズITOX-SIMOXウェーハの埋め込み酸化膜絶縁破壊電界、およびゲート酸化膜信頼性を評価した結果について述べる。まず埋め込み酸化膜の絶縁破壊挙動を調査し、絶縁破壊が埋め込み酸化膜の内部に存在するシリコン島欠陥(Si島)に支配されることを定量的に明らかにした。このSi島のサイズや密度を、酸素イオン注入量の調整とITOX処理により低減することを試み、条件最適化により、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界を熱酸化膜同等の約8 MV/cmにまで改善できることを実証した。さらに低ドーズITOX-SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性を評価し、同信頼性がミラーウェーハ同等以上であることを明らかにした。

^{*(1)} 先端技術研究所 半導体材料研究部 主任研究員
山口県光市島田3434 ☎743-0063 ☎0833(72)5855

^{*(2)} 先端技術研究所 半導体材料研究部 主任研究員 工博

2. 埋め込み酸化膜の絶縁破壊とSi島

2.1 Si島について

写真1に、様々な酸素イオン注入量にて作製したSIMOXウェーハの断面を、透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した結果を示す。ここで、酸素イオン注入量 0.4×10^{18} ions/cm²及び 1.6×10^{18} ions/cm²の水準が、それぞれ低ドーズSIMOX、高ドーズSIMOXに対応している。この写真では、酸素イオン注入量が 0.6×10^{18} ions/cm²以上の2水準において、埋め込み酸化膜中に粒子状の内包物が存在していることが確認できる。この内包物はSi島と呼ばれるSiの粒子であり³⁾、高ドーズSIMOXウェーハの場合にはその密度が $10^8 \sim 10^9$ cm⁻²と高いため、一般に、TEMでその存在が容易に観察出来る。一方低ドーズSIMOXウェーハの場合は、Si島の密度は通常 10^6 cm⁻²以下となるため、TEM観察ではその確認が困難である。

このSi島については、埋め込み酸化膜の電気的品質に悪影響を与える可能性が以前より指摘されており、中でも、Si島の存在箇所でも局所的に酸化膜が薄くなることによる絶縁破壊電界の劣化が特に問題であると考えられている。上記悪影響の度合いは、埋め込み酸化膜が高ドーズSIMOXに比べて薄い低ドーズSIMOXウェーハではより顕著になると容易に予想される。このため低ドーズSIMOXウェーハでは、Si島が埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界に与える影響の把握と、埋め込み酸化膜中のSi島密度の定量的把握が非常に重要になる。

以上を受け我々は、低ドーズSIMOXウェーハにおける埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界の詳細な解析と、選択性エッチングを用いたSi島密度の評価法の確立とを行い^{5,6)}、この結果、絶縁破壊電界とSi島密度の定量的相関の把握に成功した。次節以降ではその結果について述べる。またウェーハ製造条件の最適化により、Si島欠陥のサイズや密度を低減化することを試みた結果⁶⁾についても紹介する。

2.2 埋め込み酸化膜の絶縁破壊メカニズム解析

低ドーズITOX-SIMOXウェーハと、その埋め込み酸化膜とほぼ同じ厚さの熱酸化膜を成長させたミラーウェーハの表面に、それぞ

れ金属-酸化膜-半導体(metal-oxide-semiconductor : MOS)キャパシタを形成した。図1にその構造を示す。 2.5×10^{-7} cm²～ 2×10^{-2} cm²までの様々な電極面積のキャパシタがウェーハ表面に周期的に多数形成された。各キャパシタにランプ電圧を印加し、キャパシタ毎に酸化膜の絶縁破壊電界を測定した。

図2に評価結果を示す。熱酸化膜については電極面積によらず8～9 MV/cmの絶縁破壊電界が得られていることがわかる。一方SIMOXの埋め込み酸化膜の場合は、電極面積が 10^{-2} cm²程度と大きいときにはその絶縁破壊電界が約5 MV/cmと熱酸化膜より低く、電極下の埋め込み酸化膜中に絶縁品質不良部分が存在していることがわかる。しかし、図から明らかなように、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界は電極面積が小さくなるにつれて徐々に改善し、さらに重要なことには、図2における最小の電極面積(2.5×10^{-7} cm²)においては、キャパシタの約80%が熱酸化膜同等の8～9 MV/cmの絶縁破壊電界を示すに至る。この結果から、埋め込み酸化膜の絶縁品質不良部分は局在しており、それ以外の部分は、少なくとも電気的には熱酸化膜同等の特性を有すると考えられる。

上述の局在した絶縁品質劣化箇所は埋め込み酸化膜中にランダムに分布していると仮定すると、Poisson分布関数を利用した下記の式を用いて、図2に示した絶縁破壊電界の電極面積依存性のデー

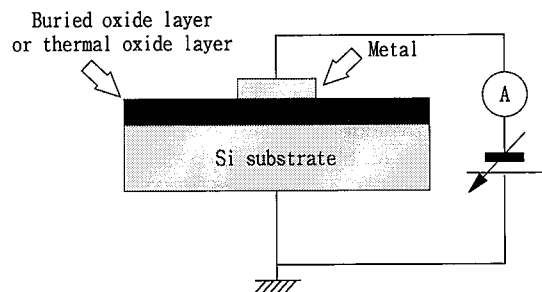


図1 SIMOXウェーハの埋め込み酸化膜評価用MOSキャパシタの構造

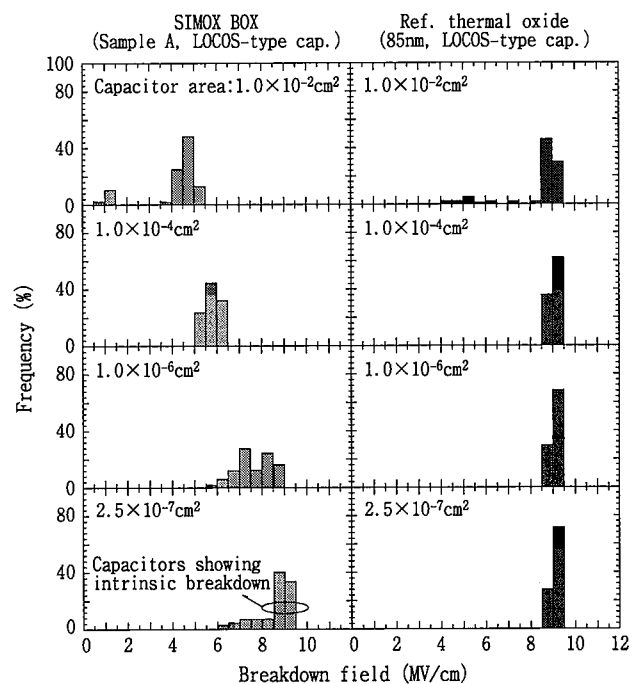


図2 SIMOXウェーハの埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界ヒストグラムおよびミラーウェーハに形成した熱酸化膜の絶縁破壊電界ヒストグラム

Implantation Energy : 180 keV

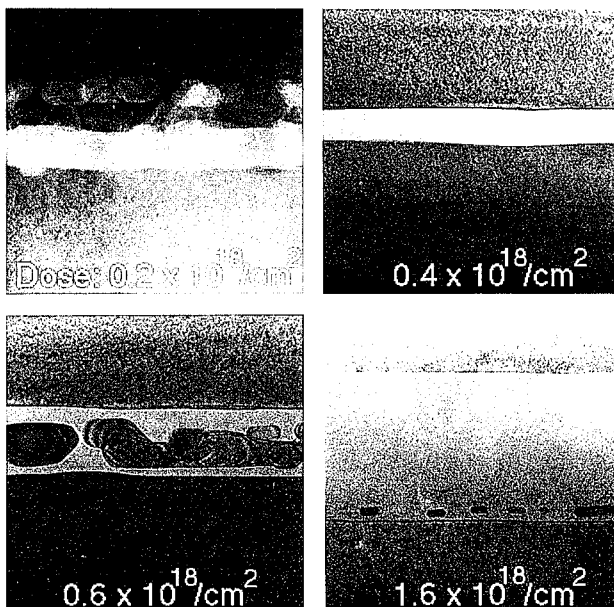


写真1 様々な酸素イオン注入量にて製造されたSIMOXウェーハの断面TEM観察結果

タから絶縁品質劣化箇所の密度が推定できる⁶⁾。

$$D(E_{BD}) = -\ln(1 - F(E_{BD})) / S_{cap} \quad (1)$$

ここで、 $D(E_{BD})$ は絶縁品質劣化箇所のうち絶縁破壊電界値が0～ E_{BD} の範囲にあるものの総密度、 S_{cap} はキャパシタ面積、 $F(E_{BD})$ は埋め込み酸化膜に印加される電界値が E_{BD} に達するまでに破壊したキャパシタの発生率である。

図3には、式(1)を図2のデータに適用した解析結果を示す。この図では、横軸に埋め込み酸化膜に印加される電界を、縦軸にはそれぞれの電界までに破壊した絶縁品質劣化箇所の累積密度を示した。図3においては、評価に用いた電極面積により導出可能な密度範囲が異なるものの、異なる電極面積を用いた評価結果から導出した絶縁品質劣化箇所の密度に良い一致と連続性が得られており、解析の正当性が示されている。

2.3 反応性イオンエッチングによるSi島の密度評価法

以上に述べた埋め込み酸化膜中の絶縁品質劣化箇所の実体は、2.1節での議論からSi島である可能性が高いと推定されるが、その実証に向けてはSi島密度自体の直接的評価結果との比較が必要である。そこで我々は、低ドーズSIMOXウェーハ中に存在する比較的低密度なSi島の直接観察手法として、反応性イオンエッチング(reactive ion etching: RIE)法による選択性エッチングと走査型電子顕微鏡(SEM)観察を組み合わせた方法を検討した^{7,8)}。以下にその詳細を述べる。

選択性エッチングによるSIMOXウェーハの断面構造の変化の様子を図4に模式的に示す。エッチングは3工程からなり、Step 1では表面Si膜をウェットエッチまたは選択性RIEにて除去、Step 2、3ではそれぞれ埋め込み酸化膜、基板表面を選択性RIEで除去する。ここでStep 2、3では、RIEの特性を生かした異方性エッチングを行っている。一連の処理完了後には、Si島の存在していた箇所に、 SiO_2 で上面が覆われた柱状構造が残存することになる。

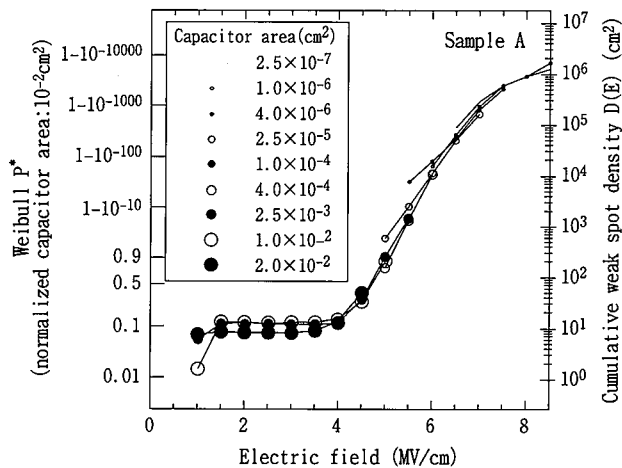


図3 埋め込み酸化膜中の絶縁品質不良箇所の累積密度と破壊電界との関係

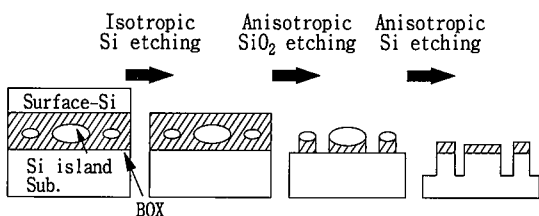


図4 Si島観察用のピラー構造を形成するためのエッチングシーケンス

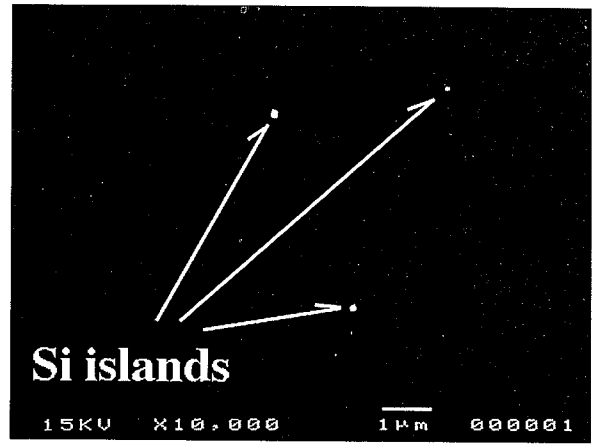


写真2 エッチング処理後のSi島部のSEM観察結果

表1 SIMOXサンプルの埋め込み酸化膜厚、Si島の密度および絶縁品質不良箇所の密度

Sample	BOX thickness (nm)			Si island density by SEM (cm ⁻²)	D (8.5MV/cm) (cm ⁻²)	Mean breakdown voltage (V)
	Total	Base	ITOX			
A	105	85	20	6.5×10^6	1.7×10^6	~45
B	116	96	20	1.9×10^7	1.0×10^7	~40
C	103	83	20	1.0×10^6	6.5×10^5	~50
D	98	78	20	N.D.($<10^6$)	7.1×10^4	~55
E	115	80	35	N.D.($<10^6$)	2.0×10^4	~60
F	100	65	35	N.D.($<10^6$)	4.0×10^1	~80

上記構造をSEM観察した結果を写真2に示す。 SiO_2 の残存した部分のみがチャージアップすることにより明瞭なコントラストが得られており、観察視野内のチャージアップ箇所の数からSi島の密度を導出できる。

2.4 埋め込み酸化膜の絶縁品質劣化部とSi島の密度比較

埋め込み酸化膜中の絶縁品質劣化箇所がSi島に対応するかどうかを確認するため、表1に示す低ドーズITOX-SIMOXウェーハ6サンプルについて、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界評価と選択性エッチング+SEM観察の両方を行って結果を対比した。6サンプルは、酸素イオン注入量、ないし埋め込み酸化膜上に成長する熱酸化膜(ITOX膜)の厚みを変えて製造されており、これによって埋め込み酸化膜中のSi島の密度を変化させてある。

表1に、各サンプルの選択性エッチング+SEM観察から得られたSi島の密度、絶縁破壊電界測定から導出した絶縁品質劣化箇所密度をそれぞれ示す。尚、後者については8.5MV/cm以下の絶縁破壊電界を示す劣化箇所の密度が計上されている。表1に見られるように、各サンプルとも、2つの密度が誤差はあるものの概ね一致していることがわかる。一致の傾向をより明確にするため、同一のITOX膜厚を持つサンプルA～Dから得られた絶縁品質劣化箇所の密度とSi島の密度とを図5に対比させて示した。図からあきらかに、両者には良い相関が見られ、埋め込み酸化膜中の絶縁品質劣化の主因がSi島であることが明らかとなった。

図3に示した絶縁品質劣化箇所密度の電界強度依存性をさらに詳細に解析すると、Si島の深さ方向サイズ、即ち厚さの分布を推定できる。この解析では、Si島上下の埋め込み酸化膜は熱酸化膜と同等の絶縁破壊電界を持つこと、またSi島内では電圧降下が起こらないことを仮定する。すると、Si島の存在箇所での見かけ上の絶縁破壊

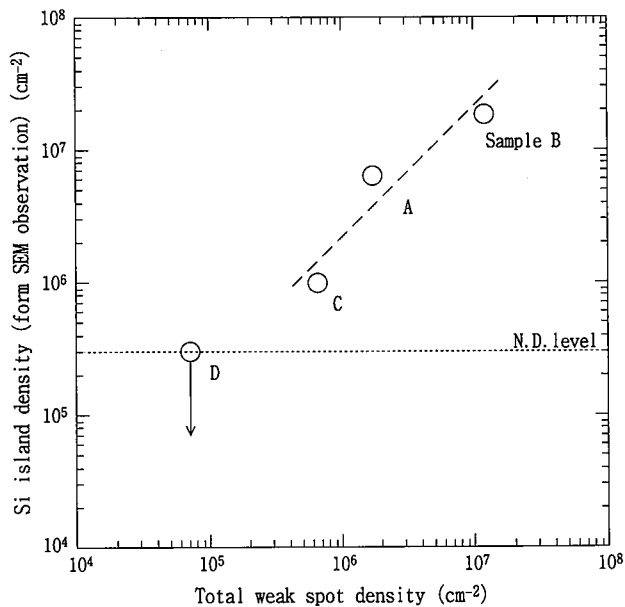


図5 SEM観察から得られたSi島の密度と埋め込み酸化膜中の絶縁品質不良箇所密度との比較

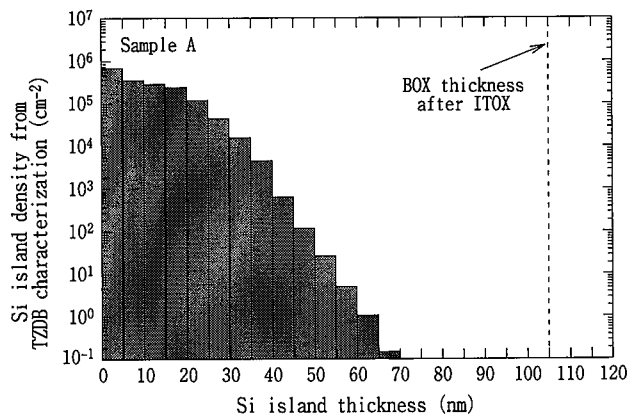


図6 図3データから導出したSi島の縦方向厚み分布(サンプルA)

電界 E_{BD}^{BOX} は以下の式で表される。

$$E_{BD}^{BOX} = E_{OX}(t_{BOX} - t_{Si\ Island}) / t_{BOX} \quad (2)$$

ここで、 E_{OX} はSi島の存在しない箇所での絶縁破壊電界、 t_{BOX} は埋め込み酸化膜の厚み、 $t_{Si\ Island}$ はSi島の縦方向の厚みである。この式によれば、Si島の存在箇所では埋め込み酸化膜の実効膜厚低下に比例して見かけ上絶縁破壊電界が低下することになる。式(2)を図3のデータに適用すると、横軸の絶縁破壊電界がSi島の厚さに変換されるため、Si島の厚さ毎の密度を推定できる。結果を図6に示す。Si島の密度はその厚さの増加に伴って急減していることが分かる。

2.5 埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界に対する酸素イオン注入量とITOX膜厚の影響

前節までに述べた解析により、埋め込み酸化膜中の絶縁破壊電界とSi島の密度、サイズとが定量的に対応づけられた。そこで本節では、解析結果を利用して埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界に対する酸素イオン注入量とITOX膜厚の影響を考察する。表1には、各サンプルについてITOX処理前の埋め込み酸化膜厚(base)が記載されているが、この厚さは原理的に酸素イオン注入量と比例関係にあり、従って注入量の指標と見なすことが出来る。

そこで、表1において同一のITOX膜厚を有するサンプルA～Dについて、baseの膜厚と埋め込み酸化膜中の絶縁品質劣化箇所の密度との相関を見ると、base即ち酸素イオン注入量が低下するにつれ、絶縁品質劣化箇所の密度が低下する明らかな傾向が見られる。1章に述べたように、低ドーズSIMOXでは“ドーズウィンドウ”と呼ばれる酸素イオン注入量約 $3 \sim 4 \times 10^{17}$ ions/cm²の範囲で良好な品質の埋め込み酸化膜が形成可能であるが、上記結果より、ドーズウィンドウの範囲内においても酸素イオン注入量を低めに設定することで、埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界がさらに改善可能であるとわかった。しかしながらドーズウィンドウ下端以下にまで注入量を低下させると、ピンホール欠陥と呼ばれる埋め込み酸化膜の局所的欠陥が多数発生するようになるため、イオン注入量を低下させる際の条件設定は極めて慎重に行う必要がある。

一方、ITOX処理によってもSi島のサイズと密度を低減することが可能である。一例として、表1に示した6サンプルのうち、ほぼ同一のイオン注入量にて製造され、ITOX膜厚のみ異なるサンプルDとEに対し、図6と同じ解析を行った結果を図7に示す。この図では、ITOX膜厚の大きいサンプルEにおいてSi島の密度とサイズが全体的に小さくなっていることが分かる。この結果より、ITOX処理においてはSi島が酸化されることによりそのサイズが縮小し、さらには元々小さなSi島は消滅してしまう⁹⁾ことが推察される。

以上に述べたとおり、低ドーズSIMOXにおいては、酸素イオン注入量を可能な範囲で低下させること、ITOX処理を用いることにより埋め込み酸化膜中のSi島が低減可能である。図8には、表1において最も酸素イオン注入量が少なく、かつITOX膜厚が35nmと

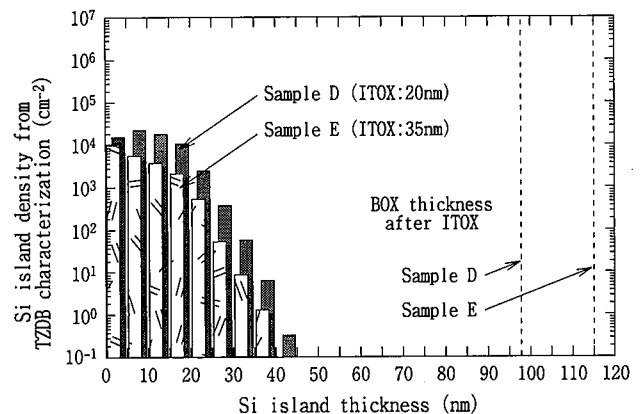


図7 サンプルDおよびEについて図6と同様の手法にて導出したSi島の縦方向厚み分布

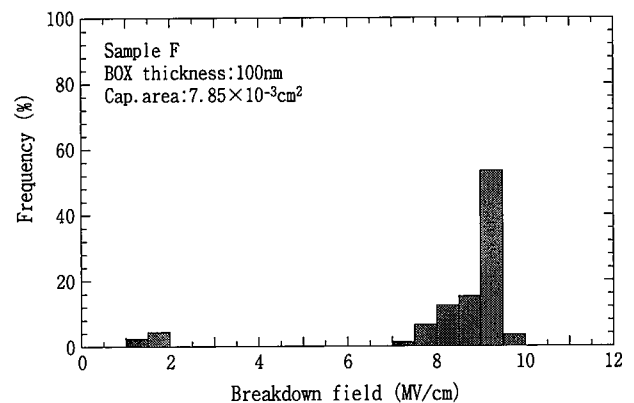


図8 サンプルFにおける埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界ヒストグラム

厚いサンプルFにおける埋め込み酸化膜の絶縁破壊電界ヒストグラムを示す。同図では、電極面積約 $8 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ の比較的大きなキャパシタが測定に用いられているにもかかわらず、絶縁破壊電界として熱酸化膜とほぼ同等の $8 \sim 9 \text{MV/cm}$ が得られており、上記に述べたSi島低減指針の正当性が実証されている。

3. ゲート酸化膜信頼性評価

ゲート酸化膜信頼性は、2章に示したランプ電圧による絶縁破壊電界評価、および経時絶縁破壊評価により評価される。このうち後者は、ゲート酸化膜に即時破壊が起こらない程度の定電流を印加し、絶縁破壊に至るまでに酸化膜を通過した電荷総量 (charge to breakdown: Q_{BD}) を測定する手法であり、得られた Q_{BD} 値からLSIの実用耐用年数などを推定できる。

冒頭でも述べたとおり、ゲート酸化膜信頼性はLSIの性能自体を左右する特性であるため、その評価はSIMOXウェーハにおいてもミラーウェーハやエピタキシャルウェーハの場合と同等に極めて重要である。しかしながら、SIMOXウェーハの場合には埋め込み酸化膜の存在のために、ミラーウェーハやエピタキシャルウェーハと同じ構造の評価デバイスにてゲート酸化膜の信頼性を評価することは不可能であった。このため我々は、SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性評価を可能とするデバイス構造の検討を行い、その確立に成功した。さらに確立したデバイス構造を用いて低ドーズITOX-SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性を評価した。本章では、デバイス構造検討の概要、および経時絶縁破壊の最新評価例につき紹介する。尚、ランプ電圧による絶縁破壊電界評価の結果については、本書収録のSIMOXウェーハ技術の総論記事にも紹介されているため、本報では省くこととする。

3.1 評価デバイス構造の確立

SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性を評価する際に問題となるのは、埋め込み酸化膜の存在のために図1に示したような単純なMOSキャパシタ構造を評価に利用できない点にある。この問題を回避するため、図9に示すように接地用の電極をウェーハ表面側に設けた横型の独自デバイスを考案し、評価に用いた。

このタイプのデバイスでは、ゲート電極の形状によっては、ゲート酸化膜直下の表面Si膜中に大きな寄生抵抗が生じ、評価に悪影響を及ぼす場合がある¹⁰⁾。一例として、図10に正方形のゲート電極を持つキャパシタにて測定した厚さ約9nmのゲート酸化膜の真性破壊寿命(真性 Q_{BD} 値)と、ゲート電極面積との関係を示す。真性 Q_{BD} 値としては、同一電極面積の多数のキャパシタについて測定を行った中で、上位20%相当の破壊寿命を示したキャパシタの Q_{BD} 値を用いた。

一般に、ミラーウェーハやエピタキシャルウェーハ上に、図2に示すようなシンプルな構造のMOSキャパシタを形成してゲート酸化の経時絶縁破壊評価を行った場合には、得られた真性 Q_{BD} 値はゲート電極面積に対して弱い依存性を持ち、図10と同様のプロットを行うと負の傾きを持った線形関係が得られることが知られている¹¹⁾。一方図10では、ゲート電極面積 10^{-4}cm^2 以上の領域において、 Q_{BD} 値が点線で示された予想特性よりも顕著に低下していることがわかる。この異常は、電極面積増大とともに表面Si膜中の寄生抵抗値が増大し、これに伴う寄生抵抗部の発熱あるいはゲート電極端部でのホットエレクトロン発生により、酸化膜の劣化が加速されたことを示していると推察される。

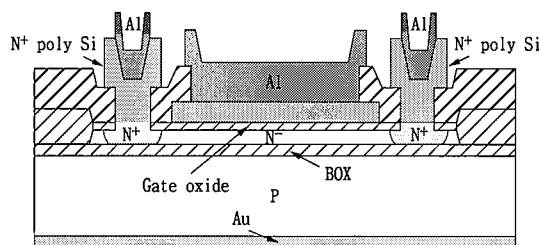


図9 SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性評価のための模型デバイスの構造

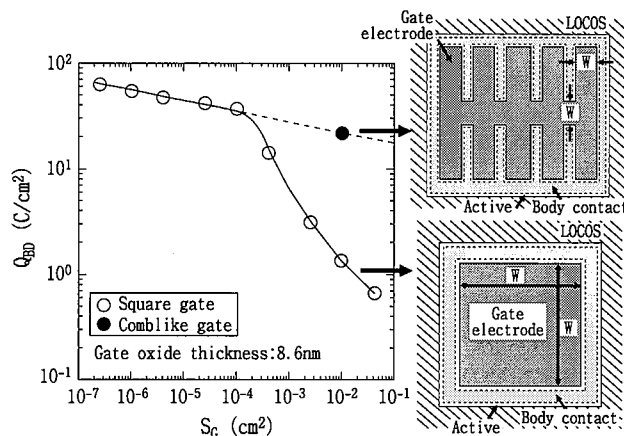


図10 正方形および櫛形のゲート電極をもつ評価デバイスから得られた真性 Q_{BD} 値のゲート電極面積依存性

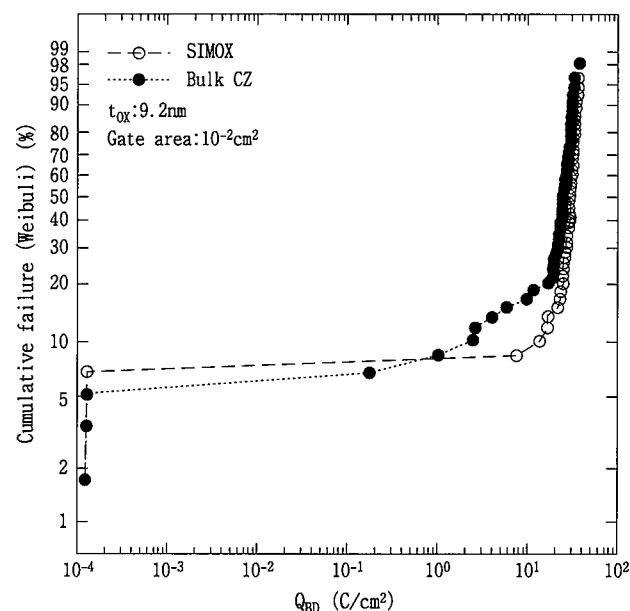


図11 SIMOXウェーハおよびミラーウェーハ上に形成したゲート酸化膜の Q_{BD} 特性

上述の寄生抵抗の悪影響は、ゲート電極を櫛形として櫛幅を十分に小さくすることで抑制可能である。図11には、ゲート電極を櫛形として櫛幅を $20 \mu\text{m}$ にした場合のデータも併せて示した。ゲート酸化膜厚は正方形ゲートの場合と同じく約9nm、電極面積は 10^{-2}cm^2 である。ゲート電極を櫛形にした場合には、電極面積が比較的大きい場合にも Q_{BD} 値が点線で示された予想特性とほぼ等しく、寄生効果が抑制されていることがわかる。以上の結果を受け現在では、櫛幅 $20 \mu\text{m}$ 以下の櫛形のゲート電極を持つ評価デバイスにて、SIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性評価が行われている。

3.2 SIMOXウェーハ上に形成したゲート酸化膜の Q_{BD} 特性

図11には櫛幅 $20\mu\text{m}$ の櫛形ゲート電極を持つキャパシタを用いて測定された低ドーズITOX-SIMOXウェーハの Q_{BD} 特性を、SIMOXウェーハのスタート材向け仕様のミラーウェーハとの比較にて示す。ゲート酸化膜厚は約 9nm 、ゲート電極面積は 10^{-2}cm^2 である。ITOX-SIMOXウェーハでは、ゲート酸化膜の信頼性低下の度合いを示す偶発不良($Q_{BD} < 20\text{C/cm}^2$)の発生頻度がミラーウェーハより少なく、ゲート酸化膜信頼性に優れていることが明らかとなった。この結果は、SIMOX製造プロセス中の高温アニール工程において、ミラーウェーハの表面にもともと存在していた欠陥の一部が消滅あるいは Q_{BD} 値の劣化に影響しないような形態に変化したことによるものと推察される。

4. 結 言

高速・低消費電力LSI向けの半導体材料として期待されるseparation by implanted oxygen (SIMOX) ウェーハの品質を電氣的に評価した。SIMOXウェーハの内部に存在する埋め込み酸化膜については、絶縁破壊電界評価を利用した製造条件の最適化により、熱酸化膜にせまる約 8MV/cm の絶縁破壊電界を得ることに成功した。さらにSIMOXウェーハのゲート酸化膜信頼性を評価し、同信頼性がミラーウェーハ同等以上と良好であることを明らかにした。これらの品質は、量産LSIへの適用検討期、適応初期における材料品質として十分なものである。しかしながらSIMOXウェーハは、

現在その最先端LSIへの本格適用が加速度的に進みつつあり、この中でウェーハ品質の電氣的評価とそれを利用した更なる品質改善は、今後も益々その重要性を増すものと推測される。

参考文献

- 1) Izumi, K., Doken, M., Ariyoshi, H. : Electron. Lett. 14, 593(1978)
- 2) Nakashima, S., Izumi, K. : Electron. Lett. 26, 1647(1990)
- 3) Nakashima, S., Izumi, K. : J. Mater. Res. 8, 523(1993)
- 4) Nakashima, S., Katayama, T., Miyamura, Y., Matsuzaki, A., Kataoka, M., Ebi, D., Imai, M., Izumi, K., Ohwada, N. : J. Electrochem. Soc. 143, 244(1996)
- 5) Kawamura, K., Matsumura, A., Yano, T., Hamaguchi, I., Nagatake, Y., Takayama, S., Tachimori, M., Kurumada, K. : Proc. 1997 IEEE Int. SOI Conf. 1997, p.122
- 6) Kawamura, K., Yano, T., Hamaguchi, I., Nagatake, Y., Takayama, S., Matsumura, A. : Jpn. J. Appl. Phys. 38, 2477(1999)
- 7) Nakashima, S., Harada, M., Tsuchiya, T. : Proc. 1993 IEEE Int. SOI Conf. 1993, p.14
- 8) Nakashima, S. : Private communication
- 9) Kawamura, K., Nakajima, T., Hamaguchi, I., Yano, T., Tachimori, M. : Proc. 1995 IEEE Int. SOI Conf. 1995, p.156
- 10) Kawamura, K., Deai, H., Morikawa, Y., Skamoto, S., Yano, T., Hamaguchi, I., Nagatake, Y., Takayama, S., Matsumura, A., Tachimori, M., Nakashima, S. : Proc. 1996 IEEE Int. SOI Conf. 1996, p.162
- 11) Degraeve, R., Groseneken, G., Bellens, R., Ogier, J. L., Depas, M., Roussel, P. J., Maes, H. E. : IEEE Trans. on Electron. Devices, 45(4), 904(1998)