

# 論文の内容の要旨

論文題目 サブ 100nm CMOSFET 用極薄ゲート酸化膜の研究

氏 名 東郷 光洋

本論文の背景として、マルチメディア社会を構成するシステム実現のために要求される半導体デバイス特性を概観し、シリコン電界効果トランジスタ (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) の特性および近年の研究開発を概要し、MOSFET の基本構造であるゲート絶縁膜に関する本論文の研究目的と概要を述べた。次に、本論文「サブ 100nm CMOSFET (Complementary MOSFET, CMOSFET) 用極薄ゲート酸化膜の研究」と題して、i) MOSFET の高性能・低消費電力化を実現するための極薄ゲート酸化膜形成プロセスに関する研究結果 (以下に示す①, ②, ③, ④) と、ii) デバイス統合プロセスが MOSFET のゲート酸化膜に与える影響に関する研究結果 (以下に示す⑤, ⑥, ⑦) をまとめた。

①ダイレクトトンネル電流が流れる極薄ゲート酸化膜において、ゲートリーク電流の影響を受けない酸化膜換算膜厚を求める方法を検討した。CV 測定法により求めることができるゲート酸化膜厚を検討した結果、LCR メーターを用いた通常 CV 測定で求めることができる酸化膜厚は 2nm 以上であり、2 周波補正 CV 測定で求めることができる酸化膜厚は膜厚誤差 4% まで許すと 1.8nm、13% の誤差まで許すと 1.5nm であることが分かった。1.5nm 以下の酸化膜換算膜厚を求める方法として、ゲートリーク電流の顕著な影響を受けない MOSFET のしきい値電圧の基板電圧依存性を用いる方法を提案した。本膜厚導出方法は、酸化膜換算膜厚 1.3nm まで導出可能であることが分かり、極薄ゲート絶縁膜の開発に有効であることを示した。

②サブ 100nm CMOSFET に必要である低リーク 1.5nm 級ゲート絶縁膜の形成技術としてラジカル酸化法を用い、ゲート酸化膜中の窒素プロファイルがゲート酸化膜の諸特性・デバイス

特性に与える影響を検討した。酸素ラジカルと窒素ラジカルを用いたラジカル酸窒化法により、膜厚 2nm 以下の極薄膜中の窒素プロファイルを急峻に制御できることが分かった。また、ラジカル酸化後にラジカル窒化を行うプロセスを用いることにより、i) 酸窒化膜表面近傍に窒素を高濃度かつ急峻に分布することができること、ii) 誘電率を 3.9 から 6.5 に増加し、酸化膜換算膜厚を 1.5nm に維持しながら物理膜厚を 1.5nm から 2.5nm へ厚くすることができることが分かった。その結果、n 型 MOSFET のオン電流を維持したままゲートリーク電流を約 2 桁低減し、かつ TDDB 信頼性を 10 倍以上向上することができることが分かった。また、ラジカル酸窒化法で形成した酸窒化膜の薄膜での使用限界を実験結果とシミュレーションにより検討した結果、デバイス特性を維持しながらゲートリーク電流が低減される膜厚は 1.12nm まで、ゲートリーク電流がスケーリング則に従った各世代の MOSFET のサブスレッショルドリーク電流以下に低減される膜厚は 1.3nm までであることを示した。

③低リーク・高信頼 1.5nm 級ゲート絶縁膜形成技術として、ゲート酸窒化膜形成時の酸化種・窒化種が n/p 型 MOSFET のデバイス特性へ与える影響を検討した。i) 窒化用ベース酸化膜形成の酸化種に、酸素イオンを用いた場合より酸素ラジカルを用いた場合の方が、その後に行う窒化の際に生じるデバイス特性劣化を抑制できることが分かった。酸素イオンで形成した酸化膜より酸素ラジカルで形成した酸化膜は、密度が高く、高信頼な膜であり、その後の窒化時の酸化膜/Si 基板界面への窒素（または欠陥）導入が抑えられたためと考えられる。ii) また、窒素イオンで窒化した酸窒化膜より窒素ラジカルで形成した酸窒化膜の方が、窒化の際に生じるデバイス特性劣化を抑制できることが分かった。窒素ラジカルは、反応性が強いいため、窒化の際にベース酸化膜の表面側に急峻な窒素プロファイルを形成することができ、酸化膜/Si 基板界面への窒素（または欠陥）導入が抑えられたためと考えられる。従って、酸素イオン・窒素イオンを減らし、酸素ラジカル・窒素ラジカルが主成分となるゲート酸窒化膜形成方法がデバイス形成に適していることが分かった。

④ラジカル酸窒化法を用いたゲート酸窒化膜形成における、極薄領域での膜厚・膜質制御性向上のために、ラジカル酸化・窒化のメカニズムを検討した。i) 酸素ラジカルは、活性なまま酸化膜中を浸透できる距離は約 1.4nm であることが分かった。酸化膜厚が 1.4nm より薄い場合は反応律速の酸化が進み、1.4nm より厚い場合は、活性な酸素が酸化膜中を浸透する際に失活し、拡散律速で酸化が進むと考えられる。ii) 窒素ラジカルを用いた酸化膜の窒化は、酸化膜表面で窒化が生じる。窒化過程で生じた酸素は、酸化膜が薄い場合は Si 基板の表面まで拡散し、界面酸化膜層を増膜すると考えられる。酸化膜が厚い場合は、窒化過程で生じた酸素は外方拡散し、物理膜厚は変わらない。窒素イオンを用いた酸化膜の窒化の場合、窒素イオンは電界加速されるため、窒素ラジカルより長い距離を失活せずに酸化膜中を浸透することができ、酸化膜とシリコンの界面まで拡散して窒化すると考えられる。ラジカル酸窒化法を極薄ゲート酸窒化膜形成に用いる場合、ベース酸化膜厚および窒化種の制御が重要であることを示した。

⑤シャロウ・トレンチ・アイソレーション (STI, Shallow Trench Isolation) がゲート絶縁膜の膜質に与える影響を検討した。STI は、微細素子領域を実現するために有効な技術であるが、チャネル幅が狭い場合、逆狭チャネル効果 (RNCE, Reverse Narrow Channel Effects) や信頼性劣化が生

じることが分かった。これは、STI と接するチャンネル端部に Si (100) 面と異なる面方位が生じ、従来の熱酸化法では酸化膜成長速度に面方位依存性があるため、局所的にゲート酸化膜の膜厚が薄くなるためである。一方、反応性の強い酸素ラジカルを用いた場合、酸化速度に面方位依存性がないため、均一な膜厚かつ高信頼なゲート酸化膜を形成できることが分かった。酸素ラジカルを用いて形成した酸化膜においても、膜厚が 1.5nm 以下では、チャンネル幅が狭いほど信頼性改善効果が小さくなるが、更に窒素ラジカルを用いて窒素処理を行うことにより、酸化膜換算膜厚を変えずに信頼性の弱い部分を含む酸化膜全体を強化できることが分かった。従って、ゲート酸窒化膜を酸素ラジカル・窒素ラジカルを用いて形成した場合、STI を有する MOSFET において逆狭チャンネル効果が抑制され、低リークかつ高信頼な 1.3~1.7nm ゲート酸窒化膜が形成されることが分かった。

⑥ MOSFET のしきい値電圧制御用不純物の注入時に生じるロックオン酸素が、サブ 100nm CMOSFET 用の膜厚 1.5nm ゲート酸窒化膜の膜質および膜形成機構に与える影響を検討した。しきい値電圧制御用の不純物イオン注入時、酸素が犠牲酸化膜から Si 基板内へロックオンされる。ロックオン酸素を含む Si 基板上に、膜厚 2nm 以下の酸窒化膜を形成した場合、ロックオン酸素またはロックオン酸素により生じた欠陥によって、酸化のメカニズムが変わり、膜厚制御性・膜質およびデバイス特性が劣化されることが分かった。一方、しきい値電圧制御用の不純物イオン注入を、犠牲酸化膜を用いずに直接 Si 基板へ行った場合、ロックオン酸素が Si 基板へ導入されないため、ゲート酸窒化膜の膜質劣化およびデバイス特性劣化が改善されることが分かった。p 型 MOSFET の場合、しきい値電圧制御用砒素イオンを注入する際、ロックオン酸素のないプロセスを用いることにより、酸化膜厚の制御性が向上し、ゲートリーク電流が 1/3 に低減され、TDDB 信頼性は 100 倍改善され、ドレイン電流が 20%改善された。また、不純物イオン注入時に生じたロックオン酸素を、ゲート酸窒化膜形成前の熱処理によって Si 基板から取り除くことができると分かり、ゲート酸窒化膜の膜厚・膜質制御性が向上されることが分かった。膜厚 1.5nm 以下の高品質ゲート酸窒化膜形成のためには、ロックオン酸素のない Si 基板を用いることが重要であることを示した。

⑦ マルチオキサイド膜厚のゲート酸化膜形成技術を開発した。酸化前の Si 基板への窒素イオン注入により、酸化が抑制され、膜厚の均一性が改善される。しかし、過剰な窒素注入（ドーズ量が  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  以上）は膜質を劣化させることが分かった。Si 基板中の過剰の窒素が酸化膜中に取り込まれ、膜質が劣化するためと考えられる。一方、酸化前の Si 基板へのアルゴンイオン注入により、酸化が促進され、膜厚の均一性が改善される。しかし、過剰なアルゴンイオン注入（ドーズ量が  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  以上）は、膜厚の均一性と膜質を劣化させることが分かった。過剰のアルゴンイオン注入は、酸化前の Si 基板に欠陥を生じ、形成した酸化膜の密度を低下させ、膜の均一性と膜質を劣化させると考えられる。DOSE 量  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  の窒素注入と DOSE 量  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  のアルゴンイオン注入により、酸化膜の信頼性とデバイス特性を劣化させずに 20%の膜厚差のマルチオキサイドを形成できることを示した。

これらの極薄ゲート酸窒化膜に関する研究の工学的応用効果を、サブ 100nm CMOSFET における低消費電力化、高性能化として実証した。