

## 高機能化 High-k 絶縁膜研究の現状と将来展望

阪大院工 渡部平司  
早大ナノテク 山田啓作

高誘電率 (High-k) ゲート絶縁膜は、シリコン ULSI の高性能化と低消費電力化を可能にする技術として注目を集め、いよいよ本格的な実用化技術へと移行しつつある。その材料選択に関しては、耐熱性や各種の電気特性評価を通じて、Hf 系酸化物に収束した。研究開発当初に検討が進められた Poly-Si 電極との組み合わせでは、MOSFET の閾値電圧制御が困難となる現象が明らかとなり、金属電極と High-k 絶縁膜との複合技術、Metal/High-k ゲートスタックへと研究対象がシフトしてきた。一方、デバイス作製プロセスについても、集積化と製造コスト面で優位な Gate-first プロセス、High-k 絶縁膜の耐熱性や MOSFET の閾値制御に対して大きな自由度を与える Gate-last プロセス、さらには High-k First / Gate-last などの工程が考えられるが、それぞれ一長一短を有するのが現状である。よって、次の目標である、酸化膜換算膜厚 (EOT) 1nm 以下の Metal/High-k ゲートスタック技術の研究開発では、EOT のさらなる薄層化や MOSFET の閾値制御に対して、製造コストや適用デバイスの拡張性を念頭に置きながら、物理現象に基づいた本質的な改善策を提案し、その優位性を実証することが求められている。

今回のシンポジウムでは、次世代の高機能化 High-k 絶縁膜の研究開発について、上記課題の解決に向けて、より薄い EOT を目指した希土類元素の応用や多元系 High-k 膜における材料設計、さらには各種の元素添加や電極界面へのキャップ層の挿入などの新技术を中心に最新の研究成果をご報告いただいた。はじめに、阪大の渡部より、シンポジウム企画の経緯や、EOT < 1nm 世代に向けて High-k 絶縁膜あるいは Metal/High-k スタックに要求される特性のまとめと、今後の研究開発の方向性についての問題提起がなされた。これを受けて、東工大の角嶋邦之氏からは、La 系 High-k 絶縁膜に関する報告があり、EOT の薄層化と界面特性改善における同材料系の優位性を示す研究成果の紹介があった。また、東大の喜多浩之氏からは、多元系材料から構成される High-k 絶縁膜の高誘電率化のための材料設計指針についての講演があった。これらの新しい High-k 膜材料の探索に加えて Metal/High-k デバイスの閾値制御に関しては、Poly-Si 電極の場合と同様に未だにその抜本的な解決策が提示されていない。広大の大田晃生氏からは、X 線光電子分光法による物性評価から、High-k 絶縁膜への低価数イオン添加が及ぼす影響を評価し、Metal/High-k 界面での実効仕事関数変調現象を詳細に調べた結果についての紹介があった。続いて、半導体

MIRAI-ASET の生田目俊秀氏からは、先述の上部電極界面の影響に加えて、下側 (High-k/SiO<sub>2</sub>) での界面ダイポールの影響にも着目すべきであるとの報告がなされた。シンポジウムの後半では、半導体先端テクノロジーの三瀬信行氏から Metal/High-k 界面に MgO や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を挿入することで、閾値制御やキャリア移動度の向上が可能であることが示された。これらの新元素添加の効果について、筑波大の白石賢二氏からは、第一原理計算結果をベースとして議論がなされた。Hf 系酸化物への La 元素の添加によって、閾値変調の原因と考えられている High-k 膜中の酸素空孔の生成が抑制できる可能性を理論的に予見する報告があった。東芝の犬宮誠治氏からは、Metal/High-k 界面への Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層挿入の効果と、そのプロセス最適化に関する発表があり、トランジスタレベルでの有効性について詳細な実験結果が報告された。

今後、High-k 絶縁膜の実用化がさらに加速することは明らかであるが、現時点ではそのメリットと応用範囲は限定的である。High-k 絶縁膜導入の効果を最大限に享受するためには、EOT 薄層化や閾値制御技術を確実なものとして、トータルでのプロセス設計を進める必要がある。本シンポジウムを通じて、これらの最新技術に関して産官学の研究者が議論を深めることで、次の研究開発戦略とブレイクスルー技術が生まれることを期待したい。