

「越境する絶縁膜／半導体界面技術 ～Si から Non-Si へ～」

世話人 渡邊孝信（早大）、財満鎮明（名大）、小山正人（東芝）

180 席あった会場は終始満席。ピーク時は 200 人に達し、立ち見を余儀なくされるほどの盛況ぶりであった。

本シンポジウムは、大分類 13「半導体」の分科企画として大会 2 日目、2015 年 9 月 14 日に開催された。薄膜・表面物理分科会の特別研究会「ゲートスタック研究会」が 20 周年を迎えたのを機に、この 20 年で飛躍的な発展を遂げた絶縁膜技術を振り返りつつ、現在様々な半導体で展開中の研究を俯瞰的に検討する目的で企画された。

Ge、III-V 族化合物半導体、ワイドギャップ半導体など様々な半導体の絶縁膜技術を先導する 6 名の招待講演者を迎え、たいへん活発な討論が行われた。

最初に、白石賢二先生（名大院工）に「High-k ゲートスタック開発を振り返って」と題してご講演いただいた。High-k 膜の導入によって生じたフェルミレベル・ピンニング (FLP) の問題が「酸素空孔モデル」よって解決に至るまでの経緯が、多くの秘話を交えてわかりやすく語られた。産学独連携の取り組み「High-k net」において、理論主導で酸素空孔モデルが誕生し、これが poly-Si 電極からメタルゲートへの大転換を促す。当時パナソニックが直面したしきい値のゲート幅依存性を理解する上でも酸素空孔モデルは重要な役割を果たした。酸素や電子のゲートスタック全体の中での挙動を、熱力学に立脚して考えることの重要性を訴える講演だった。

つづいて前田辰郎先生（産総研）に「High- μ チャンネル材料と絶縁膜の界面制御」と題して、GaAs を始めとする III-V 族化合物半導体の絶縁膜技術についてご講演いただいた。GaAs MOSFET は 1970 年代から研究されてきたが、ゲート絶縁膜の形成は困難を極め、1995 年、GaGdO_x (GGO) 膜堆積でようやく FLP 解除が達成された。2003 年には high-k 絶縁膜の堆積法として進歩した ALD 技術が適用され、Al₂O₃ 膜成長の標準プロセスが確立する。原料ガスに GaAs が晒される際に自然酸化膜が除去される「セルフクリーニング効果」が決め手となり、ex-situ で簡便に高品質の絶縁膜が形成できる。現在の MOSFET の移動度は着実に HEMT に近づきつつあり、残留欠陥の抑制や、界面ダイポールの影響の克服が更なる改善の鍵を握る。SiC、GaN の絶縁膜技術に多くのヒントを与える講演であった。

前半セッションの最後は、鳥海明先生（東大院工）に「Ge-CMOS のための GeO₂/Ge 界面制御」と題してご講演いただいた。鳥海先生の研究グループは、500～600℃で起こる GeO 脱離現象の解明を目的として試みた高圧酸化で、GeO₂/Ge 界面の質が劇的に向上することを発見した。次いで Ge 表面平坦化による高電界移動度の向上、酸化速度の特異な酸素分圧依存性を活かした EOT 削減にも成功。さらに今年、GeO₂ 膜の最大の弱点であった水溶性の問題を Y₂O₃ ドープで克服できることを見出し、GeO₂/Ge 界面の利用の妨げとなっていた諸問題をほぼクリアした。Y₂O₃ ドープは GeO₂ ネットワークの実効的な rigidity を高めると考えられる。絶縁膜に「しなやかさ」と「したたかさ」をあわせ持たせる工夫が重要という、先生の見解がユーモ



白石賢二先生



前田辰郎先生



鳥海 明先生

アを交えて語られ、会場を大いに沸かせた。

後半セッションでは、SiC と GaN に関する 3 件の講演が行われた。まず木本恒暢先生（京大工）より「SiC パワーデバイスの本格的実用化に向けた MOS 界面の課題」と題してご講演いただいた。SiC パワーMOSFET はすでに小規模量産が始まっており、鉄道車両で高い省エネ効果を実証されている。酸化膜の絶縁耐性、高いしきい値電圧の実現と安定性、移動度の向上など依然多くの課題を抱えているが、これらも年々改善がなされている。最大の問題は極端に低いチャンネル移動度の原因が解明されていないこと。これまで界面準位密度自体が正確に測定できていなかったが、先生が開発された「C- ϕ s 法」で界面準位密度と移動度の線形な対応関係が得られ、移動度向上にむけた取り組みの足場がようやく固まった。酸化機構、界面欠陥の起源、MOS 界面におけるキャリア輸送特性など、学理的に解明すべき課題が沢山あることを強調された。

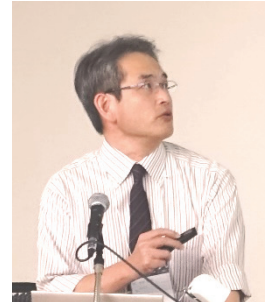
続いて渡部平司先生（阪大院工）より「SiC パワーデバイス高性能化に向けた MOS 界面設計と絶縁膜開発」と題してご講演いただいた。Si 表面のレイヤー・バイ・レイヤー酸化の実証から Metal/High-k スタック、Ge 酸化、SiC 酸化まで、余すことなく取り組んでこられた経験に基づいて、Si 酸化膜との対比を基軸に諸問題をわかりやすく整理していただいた。Si ではサブオキไซด์が少ない極めて急峻な界面が形成されるが、SiC では酸化の進行とともにサブオキไซด์が増え、電気特性を劣化させる界面欠陥が蓄積される。換言すれば、SiC の熱酸化膜界面の質は薄いほど良い。SiC 界面の欠陥は窒素導入で改善されるが、かつて Si デバイスで Si₃N₄ ゲート絶縁膜が信頼性を確保できず失敗に終わった事例を上げ、窒素導入を必要としない界面制御の重要性を訴えた。

最後に、橋詰保先生（北大・量集センター）に「GaN パワーデバイスのための MOS 界面技」と題してご講演いただいた。GaN パワーデバイスでも AlGaN/GaN の HEMT 構造が用いられるが、ノーマリオフ動作を実現するためには、順バイアス印加時の障壁を形成するため絶縁ゲート構造が必須となる。バンドオフセットが大きい高誘電率絶縁膜が要求されることから、主に Al₂O₃ 膜が用いられる。絶縁ゲート構造では、しきい値がバイアス条件によって変動するが、Al₂O₃/AlGaN 界面のアクセプタライクな準位に捕獲される電子密度が開始バイアスに依存することが原因であることが先生の研究で明らかにされた。GaN-HEMT 構造においても絶縁膜/半導体界面の質の向上が重要なカギを握ることがよくわかる講演であった。

本シンポジウムを通じて、熱酸化型の絶縁膜も堆積型の絶縁膜も、共に飛躍的な進歩を遂げてきたことが概観できた。高温酸化、高压酸化、ALD、セルフクリーニング、界面層スカベンジング、ドーピング等々、様々な手法が開発された。分析技術やシミュレーション技術の進歩も研究の進展に大きく貢献した。「神からのギフト」とかつて SiO₂ 膜に送られていた賛辞が、

「エジプトはナイルの賜物」と同じ響きに感じられるほど、時代の変化を実感する。現在いろいろな困難を抱えている絶縁膜も、皆で頑張れば、やがて必ず使えるようになるのではないか。そんな希望を持てるシンポジウムであったと思う。

最後に、ご多忙の中すばらしい講演をご準備いただいた 6 名の講師の先生方、活発な討論で会を盛り上げていただいた方々、40 分近くスケジュールを超過したにもかかわらず、最後まで聴講してくださった皆様に、紙面を借りて厚く御礼申し上げます。



木本恒暢先生



渡部平司先生



橋詰 保先生

