

第二十回 半導体デバイスプロセスと電子顕微鏡原子スケール解析 ～先進ナノ解析による半導体産業への貢献～

五十嵐 信行 名古屋大学

2023年5月13日(土) 9:00～

モデレータ 中塚 理

概要

透過型電子顕微鏡 TEM (Transmission Electron Microscope) は、2000 年頃からの収差補正技術の導入により典型的な原子間距離を超える分解能の大幅な向上が実現され、現在では半導体デバイス開発における原子スケール解析に必要不可欠な観察技術となっている。五十嵐氏の最新の研究成果では、先進半導体デバイスに期待されている 2D 材料トランジスタの断面観察だけでなく上面からの平面観察により 2D 材料の原子観察に成功しており、デバイス開発において今後も TEM 技術の貢献が大きく期待されている。ご講演では、FinFET の次世代トランジスタに期待されているフォークシート FET の構造に含まれる SiO₂/Si 界面の観察例を挙げて高分解能 TEM (HR-TEM) と原子分解能 STEM (HAADF-STEM) の違いについてご説明いただいた。また、ホログラフィ技術を用いたトランジスタ動作中のポテンシャル分布のリアルタイム観察の例や最近のデバイス評価用技術に応用が期待できる 4D-STEM や DPC (Differential phase contrast imaging) 技術をご紹介いただいた。

SiO₂/Si 界面を HR-TEM と HAADF-STEM のそれぞれで観察した場合には分解能という点では前者が勝っているものの後者のみで結晶的界面の存在を観察することができる。この理由は議論の余地がまだまだ残されているが結像手法の違いが関係していると考えられる。SiO₂/Si 界面観察に話を戻すと、界面の原子周期は基板側とはズレが生じており、そのズレ量は弾性歪みの限界を超えており、酸素原子が Si 原子のバックボンドに結合した場合のズレ量とよく一致することが第一原理計算からもわかった。このように分解能や像の安定性という点で HAADF-STEM が優れている点は多々あるが、界面での結晶構造等の観察では HR-TEM が適している場合があり、観察目的に合わせて分析手法を選択することが重要である。

トランジスタ動作の観察に TEM によるホログラフィ技術が応用可能である。この観察法では、電子線の試料中の位相ズレを観察することが可能であり、試料のポテンシャルによって位相差が生じる現象を利用することで、MOSFET 内の pn-junction のポテンシャル分布を観察することが可能である。さらに Si-MOSFET の端子電圧を印加した状態で観察を行うことにより、チャンネル部のポテンシャルのゲート電圧やドレイン電圧に対する応答の可視化が実現できた。動作中の観察はデバイスデザインやプロセス開発への貢献が可能である。

最近の TEM 研究開発技術に STEM の検知器を CCD に置き換え結像部を 2D 検知する 4D-STEM 手法や電子線強度分布を計測する DPC 技術がある。DPC では電子線が電界の影響を受けることを利用し、結晶内のイオンや点電荷による電場を観察できることが報告されている。GaN のような分極材料では原子分解能である原子間の電場が観察されている。一方、デバイスで注目されるような GaN 基板に存在する貫通電位の計測では、(M. Tsukakoshi et. al., Appl. Phys. Express 14 (2021) 055504.) 電場以外に、格子歪みなど、の様々な要因を考慮する必要があるため、これらの影響を適切に考慮する方法の開発が今後の課題である。

最後に、半導体デバイスの解析は、TEM の重要な応用分野であり、そのための応用技術開発が TEM 技術の発展に大きく寄与してきたといっても過言ではない。これまでニーズが TEM 技術の発展を進めてきており、これからも TEM 研究者とデバイスやプロセス研究者との強い意思疎通がさらなる TEM 技術の発展につながっていくとまとめて頂き、本講座は終了した。(記：堤 隆嘉)