

まえがき

20世紀の終盤から、情報通信技術はもっとも重要な社会インフラの一つとなっており、われわれは、日常生活のさまざまな場面で情報通信技術の恩恵を受けている。その情報通信技術の基盤となっているのが、薄膜作製技術をフル活用して作られる集積回路である。シリコンをベースとする半導体集積回路の高性能化は、素子の微細化によって支えられてきたが、その微細化は物理的限界に近づきつつある。そのため、素子構造の工夫や、新材料の導入により高性能化を持続する技術の開発が進められている。その新材料の一つとして、酸化物半導体や強誘電体などの機能性酸化物が、トランジスタ、不揮発性メモリ等に導入され始めている。

機能性酸化物を用いたデバイス作製には、高品位の酸化物薄膜を作製する技術が不可欠である。酸化物薄膜の作製技術は、20世紀の終盤から急速に発展したが、その契機となったのが、1986年のK. A. MüllerとJ. G. Bednorz両博士による銅酸化物高温超伝導体の発見である。電気抵抗がゼロになる超伝導体は、薄膜化することでジョセフソン素子や超伝導トランジスタなどの超低消費電力の電子デバイスに応用できることから、高温超伝導体発見直後から、薄膜化とデバイス作製の研究が精力的に行われた。それらの超伝導デバイスを作製するためには、絶縁体を超伝導体で挟んだトンネル接合や、超伝導体とゲート絶縁膜の積層構造を作製する必要がある。その際、トンネルバリアの厚さ、接合界面の平坦性を、超伝導体のコヒーレンス長と同程度か、それ以下にする必要がある。高温超伝導体のコヒーレンス長は、超伝導転移温度(T_c)が高いことに起因して数ナノメートルと短いため、デバイス作製に用いる高温超伝導薄膜は、分子層レベルで膜厚を制御することが求められていた。そのような要求に応えるため、分子層レベル、さらには原子層レベルで酸化物薄膜の成長を制御する技術の開発が精力的に進められた結果、現在では、酸化物薄膜の作製技術は半導体薄膜と同レベルに達している。それを表す一例が、酸化亜鉛の界面において観測される整数および分数量子ホール効果であろう。量子ホール効果は、ガリウムヒ素(GaAs)など、電子の散乱が極限まで抑制されたクリーンな

半導体界面の2次元電子系において観測されてきた、そのような量子ホール効果が、酸化亜鉛の界面においても観測されたということは、今日の酸化物薄膜作製技術を使えば、半導体と同レベルのクリーンな界面を酸化物薄膜でも作製できることを表している。

薄膜作製技術の発展により、原子レベルで平坦かつ電子的にクリーンな表面、界面を持つ酸化物薄膜が作製できるようになった結果、機能性酸化物のヘテロ界面、超格子に特有の現象も発見されるようになってきた。特に、電子の電荷、スピン、軌道の自由度が協調することにより多彩な電子相が出現する強相関電子系酸化物の接合界面において、半導体接合界面では決して見られない現象が発見されている。

高品位の薄膜と接合は、前述の2次元電子系など、物性研究の重要なツールとなっているが、やはり、薄膜研究の本流は、電子デバイスなど、応用研究であることは言うまでもない。そのようなことから、本書では、酸化物薄膜の応用研究を主眼に置きながら、代表的な薄膜作製技術をその原理とともに紹介した後、半導体物理のモデル・理論をベースに、機能発現の舞台である各種接合界面の電子状態・バンド構造を説明する。それに続いて、酸化物接合界面の特徴と、そのデバイス応用の研究例を紹介する。酸化物薄膜の応用は、電子デバイス、光触媒、2次電池や燃料電池の電極、光電極など、さまざまな分野に広がっており、その研究開発は日進月歩であることから、応用研究の最前線を全て概観することは難しい。そのため、本書では、著者の専門である電子デバイス応用を中心に紹介したい。酸化物薄膜の研究を網羅して紹介することはできないが、酸化物材料の薄膜化と、界面機能のデバイス応用に関する基本的な考え方をお伝えできればと願っている。

本書の執筆にあたって、藤原毅夫先生、藤森淳先生、勝藤拓郎先生、内田老鶴圃の内田学氏から多大なご支援を頂きました。また、産業技術総合研究所の山田浩之氏、渋谷圭介氏には、本稿をまとめるにあたって有益な議論といくつかの図面を提供して頂きました。ここに感謝申し上げます。

2017年2月

澤 彰 仁