成膜技術の革新が支えた酸化物エレクトロニクスの発展とその未来

Advanced thin film technology towards oxide electronics

○川﨑雅司 [1,2] (1. 東大工、2. 理研 CEMS)

○M. Kawasaki[1,2] (1. Univ. of Tokyo, 2. RIKEN CEMS)

E-mail: kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp

1986 年に銅系複酸化物で発見された高温超伝導は、1980 年に半導体の二次元電子系で発見された量子ホール効果と合わせて、20 世紀後半以降において物性物理学に最も大きなインパクトを与えた「2 大発見」と言えよう。21 世紀の物性物理学の新たな潮流の勃興は、これら「2 大発見」が源流となり、様々なトピックスが現れ、現在では運動量空間と実空間における電子状態の「トポロジー」を活用する物性や機能の開拓が大きな注目を集めている。一方で、本講演の主題である酸化物の薄膜技術は、高温超伝導の天然超格子構造を模した人工超格子の構築やジョセフソントンネル接合の作製などを動機に、原子レベル制御技術が格段に進歩した。酸化物の持つ多彩な物性を原子平坦界面で組み合わせて、界面で新量子相を創成し、新原理に基づいて超低消費電力デバイスの実現をはじめとする様々な機能化研究が大きく進展している。機会をい頂いたので、30 年を振り返って、著者自身が強く関わった酸化物薄膜技術の革新とその将来を議論したい。

この期間の前期のキーワードを列挙すると、酸素雰囲気に適合した基板ヒータ、多元素からなる複酸化物の薄膜成長における熱力学と動力学の制御、パルスレーザ堆積法(PLD)とレーザ MBE、基板の原子平坦化技術、RHEED その場観察の活用とパルス原料供給、公倍数マッチングヘテロエピ、コンビナトリアル PLD、基板温度傾斜法、組成傾斜法などが挙げられる。これらを駆使して、高温超伝導ジョセフソントンネル接合、酸化亜鉛による室温励起子紫外レーザ発振、酸化亜鉛の p 型化と発光ダイオード、抵抗変化型メモリデバイス、酸化亜鉛ヘテロ接合における整数量子ホール効果、強相関界面･超格子による新電子相の創成などの研究を展開した。また、新たな薄膜化技術の多くは多数の知的財産として登録され、(株)パスカル等から成膜装置が多数販売され、コンビナトリアルテクノロジーは創設したベンチャー、(株)コメットに引き継がれた。

その後期には、PLD から MBE へと大きく舵を切り、不純物や点欠陥の導入を極力抑える酸化物薄膜の成長に取り組んだ。ここでは、高純度原料の探索、基板ヒータ周りの材料探索、有機金属ガスソースによる原料供給、超高温での薄膜結晶成長を突き詰めた。結果、酸化亜鉛ヘテロ接合に閉じ込めた二次元電子の量子散乱時間は、この世の中で最もきれいな半導体としてのレコードを樹立し、トポロジカル量子計算の有望な候補である偶数分母の分数量子ホール効果を実現した。また、$SrTiO_3$のデルタドープ量子井戸では*d*電子系で初めての量子ホール効果が実現し、$EuTiO_3$超薄膜ではトポロジカルな磁気渦（スキルミオン）の生成を示唆する結果が得られている。これら、電子状態の「トポロジー」の概念は、整数量子ホール効果で初めて具現化されたが 20 世紀にはその認識が十分な広がりを示さず、21 世紀になって物質系やその特異な物性が大きくクローズアップされている。科学技術の発展にありがちな螺旋階段を登るような進展が、酸化物エレクトロニクスにも現れていると感じている。20 世紀後半の「2 大発見」は酸化物と量子機能を舞台に融合し、「トポロジー」を key word にさらに大きなインパクトを科学技術に与えると期待している。そこを制する者は、成膜技術と物質/材料を独自の視点で突き詰めたグループだと思う。

© 2016年 応用物理学会