

電子分光によるナノ領域の光学特性評価

ナノテクノロジーを支える計測・分析技術

ナノテクノロジーを支えているのは“見る”ための計測・分析技術の飛躍的進歩である、と言っても過言ではありません。東芝は、走査型透過電子顕微鏡を用いた、電子エネルギー損失分光スペクトルを数値解析し、より高精度に光学特性を得るための新しい手法を開発しました。

ナノレベルの微細化に加えて、構成材料の多様化が進む先端LSI開発において、電子デバイスの極微小領域での、新しい絶縁膜の性質を調べる方法としてもたいへん有効です。

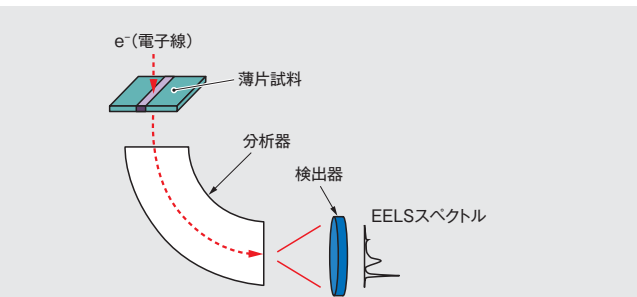


図1. STEM-EELS法の原理 — 収束した電子線を走査し、薄片試料を透過、散乱した電子のエネルギー損失分布を測定することで、試料の局所的な情報が得られます。

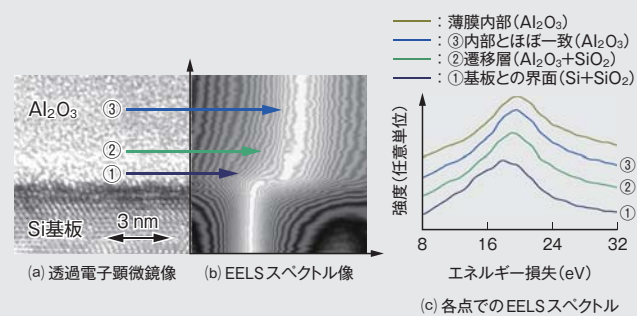


図2. Al₂O₃薄膜のSTEM-EELSスペクトル例 — (a)はシリコン(Si)基板上にたい積されたAl₂O₃薄膜断面の透過電子顕微鏡像、(b)は試料上を走査して一点一点得た価電子EELSスペクトルのピーク部を像として表示したもので、縦軸は顕微鏡像の位置、横軸はエネルギー、(c)は各点でのスペクトルを示し、界面で1 nm以下の急激な変化に加え、Al₂O₃薄膜の内部でもピーク位置の変化が見られます。

STEM-EELSによる先端LSI分析

ナノテクノロジーとは、物質を原子のレベルで制御し、様々な機能を持たせることにあるといえます。その制御のためには、まずは物質を原子レベルで“見る”技術が必要です。ここで“見る”とは、形状や物理的性質などを計測できるということです。

先端LSIは、素子のサイズが数十 nm です。素子を構成する薄膜の形成に、1 nm以下の制御が求められており、その違いを観測する方法が必須となっています。例えば、絶縁性能向上のために新しい材料で構成された絶縁膜を開発する場合、その性質を直接調べる方法が必要です。

走査型透過電子顕微鏡(STEM: Scanning Transition Electron Microscope)を用いた電子エネルギー

損失分光(EELS: Electron Energy Loss Spectroscopy)分析では、非常に小さい領域に収束可能な高速電子線の性質を利用して、微小領域の元素の存在や状態を調べることができます(図1、図2)。

電子分光と数値処理による光学関数の導出

電気的特性に関する価電子EELSと呼ばれる領域のスペクトルは複雑で、単純な解釈ができませんが、理想の場合はクラマースクローニツヒ(K-K)解析と呼ばれるスペクトル解析により、解釈のしやすい誘電関数や、反射率といった光学関数が得られることが知られています。ここでいう光学関数を表す特性の身近な例に、物質の色があります。ある色の波長の可視光だけを吸収したり透過したりするため

宝石には色がありますし、また、ガラスが透明なのはすべての可視光を透過する光学特性があるためです。

光学特性は電気特性と密接なかわりがあり、間接的に電気特性がわかります。しかし、可視光では、波長が400~800 nmのため、その波長より短いナノの世界は色の違いを判別できません。電子分光と数値処理でそれが可能になります。

数値処理の改善と適用例

実際のEELSスペクトルには、装置によるエネルギー分解能の劣化やノイズなどが重畳されています。特に、微小領域からの信号量は少なく、正しい解析結果を得ることは困難です。そこで、この数値処理に以下の改善を行いました(図3)。

スペクトルの分解能を向上させるに

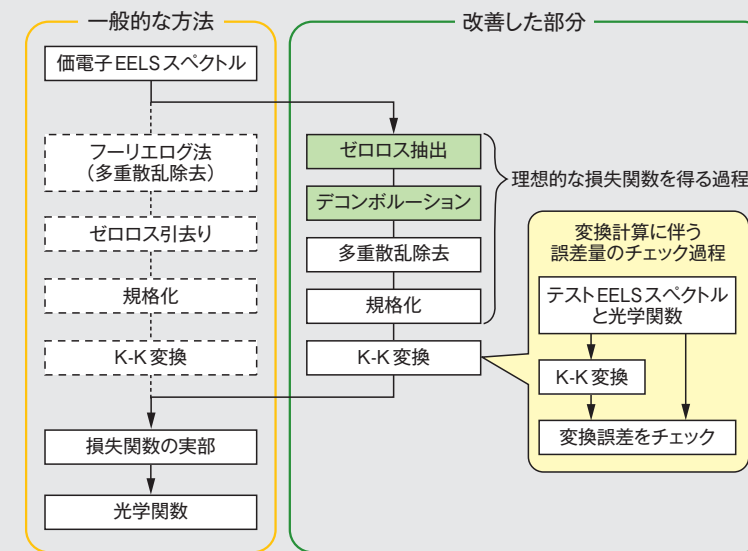
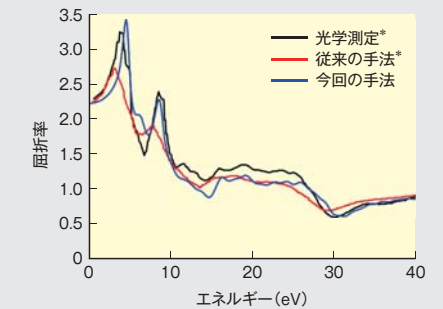


図3. 光学特性を得るための数値解析の流れ — 理論的なエネルギー分布を考慮したゼロロスの抽出とノイズに強いデコンボリューションを行うことで、K-K変換計算前に理想損失関数を得る過程を取り入れ、K-K変換そのものの変換誤差を最小限にする確認計算を行うことで、精度を高めました。



*出典: J. Appl. Phys. (2001)⁽¹⁾

図4. SrTiO₃の屈折率 — 今回の手法では、屈折率のエネルギー依存性はピークの位置がほぼ光学測定に一致し、より細かい形状が得られており、エネルギー分解能や定量性が共に改善していることがわかります。

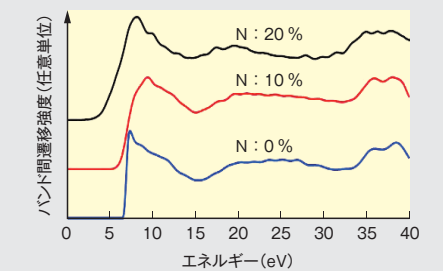


図5. HfSiONのバンド間遷移強度とN濃度の関係 — バンド間遷移強度の立ち上りの位置と急しゅんさからそれぞれ、N濃度の増加に従い、バンドギャップが小さくなること、及び電子状態密度が広がるのがわかります。

今後の展望

最新のSTEMの性能向上は著しく、0.1 nm程度と原子間の距離以下に電子ビームを絞ることも可能になってきています。これを用いて測定したEELSスペクトルと数値処理を組み合わせ、ナノレベルを越えた原子1個レベルの極微小領域における、究極の電子分光分析を実現する取組みを進めていきます。

文献

- (1) French, R. H., et al. Bulk electronic structure of SrTiO₃: Experiment and theory. J. Appl. Phys. 90, 12, 2001, p.6156-6164.

田中 洋毅

研究開発センター
LSI基盤技術ラボラトリー