

氏 名	にし 西 尾 弘 司
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 乙 第 99 号
学位授与の日付	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	Quantitative high-resolution transmission electron microscopy and its application to structural analysis of semiconductor materials
審 査 委 員	(主査) 教 授 遠 藤 久 満 教 授 熊 尾 章 宏 教 授 西 野 茂 弘 助教授 一 色 俊 之

論 文 内 容 の 要 旨

現代社会の基幹技術であるエレクトロニクスを支える様々な電子デバイスは、高機能化、高速化に向けてナノメートルオーダーの微細加工を要求され、その解析、評価にも原子オーダーの空間分解能が求められている。これに応える観察・測定装置として、電子顕微鏡は現在、原子 1 個の空間分解能を持ち、各種材料の構造を解析するために不可欠な装置となっている。したがって、電子顕微鏡像コントラストの正確な解釈は材料構造の同定にとって不可避の最重要課題である。

電子顕微鏡像コントラストは電子波が試料中や結像系内で受けた位相変化に基づく位相コントラストである。しかも、これは、多くの回折波間の相互作用として現れるため精密な理論解析を必要とする。すなわち、動力的回折理論や結像理論に基づくシミュレーションを行い、観察結果と比較検討する必要がある。

本研究は、電子顕微鏡像強度の精密測定により蓄積した定量的データを用いてシミュレーションの検証を行い定量的高分解能電子顕微鏡法の確立を図り、またそれを半導体デバイスの評価に適用して得られた成果をまとめたものであり、以下の 2 章で構成されている。

第 1 章では、まず楔形単結晶の電子顕微鏡像に現れる等厚干渉縞の強度を精密に測定した結果について述べている。

等厚干渉縞は電子回折強度が電子顕微鏡像として可視化されたものであり、その強度解析は動力的回折理論の構築や結晶の構造解析に極めて有効な手段として古くから盛んに研究が行われ多くの成果を挙げてきた。それらのほとんどは二波励起の Bragg 条件下で行われたものであったが、本研究では晶帯軸照射条件下で観察を行い、通常の高分解能電子顕微鏡法で用いられる多波励起状態で等厚干渉縞強度測定を行った。像記録には、近年電子顕微鏡像記録装置として開発され、従来の写真フィルムや撮像管の欠点を補う特長を備え普及が進みつつある、スロースキャン CCD カメラやイメージングプレートを用いることで測定精度及び定量性を高めることに成功した。試料には単体として Si、イオン結晶として MgO、化合物半導体として GaAs 及び InP を用いているが、この内 Si、MgO については弾性散乱電子と非弾性散乱電子を分離した上で等厚干渉縞強度を得ており、その結果に基づいて結晶の複素ポテンシャルや温度因子、イオン性についても議論している。

本章ではまた、マルチスライス法による電子顕微鏡像シミュレーションの計算手法について検証した結果について述べている。Cowley と Moodie により定式化されたマルチスライス法は動力的電子回折強度の計算方法として電子顕微鏡像の理論計算に広く用いられているが、計算の実施に当たって慎重な取り扱いを怠ると簡単に誤った結論を導く恐れがある。[001] InP の計算像を例にとり、マルチスライス法にお

ける位相格子を様々に設定した時に各位相格子から導かれる電子回折強度及び電子顕微鏡像を明らかにし、定量的高分解能電子顕微鏡法という視点からその優劣を議論している。

第2章では、定量的高分解能電子顕微鏡法を半導体デバイスの評価に適用して得られた結果について述べている。

はじめに、InGaAs/InP多層膜構造の異相界面を高分解能電子顕微鏡法により詳細に検討した結果について述べている。高分解能電子顕微鏡像コントラストからは、異相界面において結晶の成長方向に沿って隣接層へ原子が拡散しているように見える。この界面の組成変動を高分解能像シミュレーションと比較することにより決定し得ることを明らかにした。

次に液相エピタキシー法により成長させたGaAs/AlGaAs異相構造中に偏析した析出物の構造を断面透過型電子顕微鏡法により解析した結果について述べている。

高分解能電子顕微鏡像の解析により、析出物はFeAsであること、母層のGaAsとは

[110] (1-11) GaAs/[101] (010) FeAs,

[110] (-111) GaAs/[001] (010) FeAs,

[110] (1-1-1) GaAs/[13-4] (-310) FeAs,

の関係にあることを明らかにした。

さらに分子線エピタキシー法で作製されたGaAs/AlAs/GaAs/AlGaAs/GaAs多層膜構造について、高分解能電子顕微鏡法により観察し、高分解能像シミュレーション及び画像処理を併用して、異相界面の状態を議論している。

デバイスの正確な構造を知ることは、その特性を理解し、さらに高性能な新デバイスを開発する上で大変重要である。本研究は、高分解能電子顕微鏡観察象コントラストの値を高精度で定量化して求め、これを精密に解析することにより、原子オーダーでの構造評価を可能とするもので、今日のデバイス開発にとって非常に重要な研究である。

論文審査の結果の要旨

本論文は高分解能透過型電子顕微鏡像コントラストを定量的に取り扱う新しい方法を開発し、さらにそれをヘテロ構造をもつ多層膜半導体デバイスの解析に応用し、界面構造の精密な解析の可能なことを確認した。この手法は原子レベルでの精密な構造制御・解析を要する新機能材料開発に大きな貢献をするものと判断できる。

本論文の内容は下記の6編の論文に掲載され、その内4編で申請者が筆頭著者となっている。

- 1) Intensity Measurement of Equal-Thickness Fringes in TEM Images of Wedge-Shaped GaAs and InP Crystals by a Slow-Scan CCD Camera, K. Nishio, H. Kakibayashi, T. Isshiki, H. Saijo and M. Shiojiri, Journal of Electron Microscopy 43, 198-202 (1994)
- 2) Quantitative Intensity Measurement of Equal Thickness Fringes in Si and MgO Crystal Images with an Energy-Filtering Transmission Electron Microscope Using an Imaging Plate, K. Nishio, T. Isshiki and M. Shiojiri, Journal of Electron Microscopy 49, 607-619 (2000)
- 3) Multi-slice Calculation for InP Crystals Using Different Slices, K. Nishio, T. Isshiki, H. Saijo and M. Shiojiri, Ultramicroscopy 54, 301-309 (1994)
- 4) Quantitative Structure Images of Interfaces in InGaAs/InP Multilayer Heterostructures, M. Shiojiri, T. Isshiki, K. Nishio, M. Tsujikura, H. Saijo, Y. Takahashi, N. Ohtsuka and Y. Yabuuchi, Journal of Electron Microscopy 41, 438-444 (1992)
- 5) Transmission Electron Microscopy Analysis of FeAs Precipitates Formed in GaAs/AlGaAs

Heterostructures, J. Katcki, M. Shiojiri, T. Isshiki, K. Nishio, Y. Yabuuchi and N. Y. Jin-Phillipp, Journal of Electron Microscopy 47, 575-580 (1998)

- 6) High-Resolution Transmission Electron Microscopy of AlAs/GaAs/AlGaAs Multilayer Heterostructure, K. Nishio, J. Katcki and M. Shiojiri, Electron Technology 32, 348-353 (1999)

以上より、本論文は博士論文として十分な内容を備えていると認められる。