

超高密度・超高速情報処理用短波長半導体光デバイスの研究開発

Research on Short-Wavelength Semiconductor Optoelectronic Devices for Ultra High-Density and Ultra High-Speed Information Processing

(研究プロジェクト番号：JSPS-RFTF 96R16201)

プロジェクトリーダー：主拠点リーダー

高橋 清 帝京科学大学理工学部・教授

コアメンバー：副拠点リーダー

吉川 明彦 千葉大学工学部・教授

コアメンバー

八百 隆文 東北大学金属材料研究所・教授

長谷川文夫 筑波大学物理工学系・教授

多田 邦雄 横浜国立大学工学部・教授

伊賀 健一 東京工業大学精密工学研究所・教授

藤田 茂夫 京都大学大学院工学研究科・教授

川西 英雄 工学院大学工学部・教授

岸野 克巳 上智大学理工学部・教授

赤崎 勇 名城大学理工学部・教授



1. 研究目的

可視短波長から紫外領域での短波長光デバイス材料としてきわめて優れた物性を有しているワイドギャップ半導体（窒化物系およびII-VI族系両材料）は、自らの「ワイドギャップ性」に起因する物性の特徴を反映して、エピタキシから物性制御までのすべての点において多くの困難性を有している。本研究プロジェクトでは、エピタキシプロセスおよび表面・界面物性の深い理解、そしてデバイスプロセスおよび短波長超高速デバイスの試作・評価までについて、窒化物系材料を中心に、主として以下の具体的研究課題・目的を設定して研究を推進した。

- (1) ワイドギャップ半導体におけるエピタキシ・物性制御および評価技術の確立（高橋清、吉川明彦、八百隆文、長谷川文夫、川西英雄）
- (2) 量子構造（量子井戸および量子ドット）を利用した短波長超高速光デバイス（レーザダイオードおよび変調器など）構造の設計・作製・評価技術の確立（高橋清、吉川明彦、多田邦雄、伊賀健一、藤田茂夫、赤崎勇、岸野克巳）

2. 研究成果概要

2.1 ワイドギャップ半導体におけるエピタキシ・物性制御および評価技術の確立

ワイドギャップ化合物半導体は、その多くが六方晶系の結晶構造を最安定状態としており、GaAsなどの従来の典型的な化合物半導体が立方晶系の結晶構造をとるのに比べて、対称性が低く、結晶の異方性および極性を有していることがおおきな特徴である。本研究プロジェクトでは、窒化物系結晶の分子線エピタキシ（MBE）および有機金属気相エピタキシ（MOVPE）において、サファイア基板の表面処理から、バッファ層の成膜、昇温過程、そしてエピタキシ

過程までのすべてにおいて、分光エリプソメトリ（SE）や直衝突同軸イオン散乱分光装置（CAICISS）などにより、各プロセスの「その場観察」を可能とするシステムを構築して詳細に解析した¹⁻³⁾。

RF-MBEにおける典型的なサファイア基板上へのGaNのエピタキシプロセスにおける分光エリプソメトリスペクトル信号の変化を図1に示す。各工程におけるGaN結晶の変化の様子が克明に捉えられており、MBEではバッファ層時点からエピタキシ成長が始まり、数分子層でS-Kモードによる緩和を起こすなど、全工程がMOVPE法とはまったく異なる成膜機構になっていることを明らかにした¹⁾。

また、図2に示すように、N極性に配向した窒化物結晶上に2モノ層以上の厚さの極めて薄いAl層を挿入することで、Ga極性に転換する技術をまず開発し、直衝突同軸イオン散乱スペクトロスコーピー（CAICISS）解析評価の結果などから、この結晶極性転換機構モデルを提案した^{2,3)}。また、このモデルにより、AlN中間層によるGaNエピ膜の極性転換機構を一般的に説明できることを明らかにした。つまり、図3に示すようにAlN中間層が存在しても、その表面ストイキオメトリがNリッチでは極性転換は起こらないが、表面ストイキオメトリが少しでもAlリッチになると、図2に示す機構でNからAl極性に転換する。一方、GaNでは、Gaリッチでも元の極性がそのまま保存されることを示した^{2,3)}。

さらに、GaおよびN両極性のエピ膜それぞれについて、表面モホロジーの微分干渉顕微鏡・FE-SEM・AFM解析、高分解能X線解析、表面と劈開断面の電子線励起発光スペクトル・像解析、および電気的・光学的特性解析などで、両極性では結晶の成膜機構、欠陥導入機構などが大きく異なることを明らかにし、結晶極性制御が極めて重要であることを示した。

2.2 量子構造（量子井戸および量子ドット）を利用した短波長超高速光デバイス

短波長光デバイス用量子ヘテロ構造の形成に関して、Inを含む窒化物系多元混晶成長における In リッチ量子ドットの自己形成、およびこれに関連した励起子局在効果の検討で、世界的に大きく注目される顕著な成果を出した⁴⁾。図4は、AlGaIn/InGaIn 多重量子井戸中の自己形成量子ドットの断面 TEM 写真を示す。井戸中に暗いコントラストのドット状領域が観測され、その直径は 3nm (2-5nm)、面密度 $5 \times 10^{11} \sim 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 、体積密度 2% ~ 9% となっている。この量子ドットは In リッチのため、バンドギャップが少し小さくなるために励起子が局在化して GaN 系発光素子の高効率化に大きく寄与することが示された。

さらに、レーザ発振・利得機構に関連する高密度キャリアダイナミクスの解析、発振モード制御に関する理論および実験の両面での解析、および励起子効果・量子効果を利用した超高速変調器の提案で、先駆的かつ世界でトップ位置にランクする研究成果を得た^{4,5)}。

3. 結論

ワイドギャップ半導体の結晶異方性に起因した極性決定機構を理解し、極性制御可能なエピタキシー法を開発し、きわめて高品質なエピ膜と完全性の高いヘテロデバイス構造の作製を可能とした。また、AlGaInN 系窒化物混晶膜を利用した量子ヘテロ構造の形成と励起子効果・量子効果などを利用した短波長超高速光デバイスについて検討を進め、超高密度・超高速情報処理用短波長半導体光デバイスの作製法を開拓した。

4. 主な発表論文

- (1) K. Xu, N. Yano, A.W. Jia, K. Takahashi, and A. Yoshikawa: In-situ real time analysis on strain relaxation process in GaN growth on sapphire by RF-MBE, J. Crystal Growth, **237/239** (2002) 998-1002
- (2) K. Xu, N. Yano, A.W. Jia, K. Takahashi, and A. Yoshikawa: Polarity control of GaN grown on sapphire substrate by RF-MBE, J. Crystal Growth, **237/239** (2002) 1003-1008
- (3) A. Yoshikawa, K. Xu, Y. Taniyasu, and K. Takahashi: Spectroscopic Ellipsometry in-situ Monitoring/Control of GaN Epitaxial Growth in MBE and MOVPE, phys. stat. sol. (a), 190 (2002) 33-41
- (4) Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura: Role of self-formed InGaIn quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm, Appl. Phys. Lett., **70** (1997) 981-983
- (5) T. Arakawa, K. Tada, N. Kurosawa, and J.H. Noh: Anomalous Sharp Dip of Large Field-Induced Refractive Index Change in GaAs/AlGaAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 6329-6333

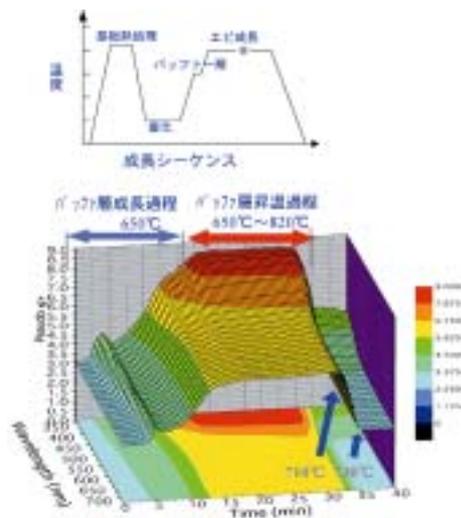


図1 GaN の RF-MBE 成長初期プロセスの典型的な SE シグナル変化

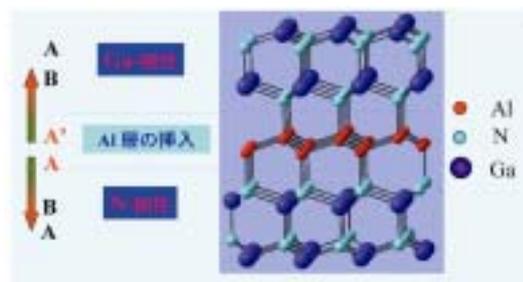


図2 “2モノ層厚さの Al”による極性転換モデル

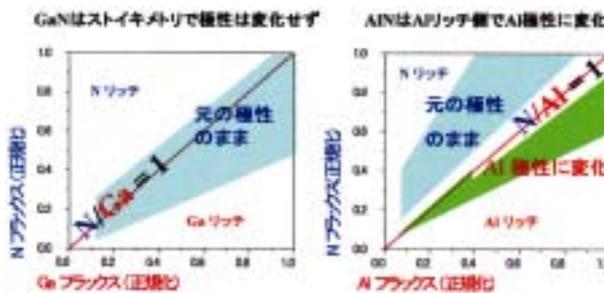


図3 GaNおよびAlNエピ中での極性決定に対する表面ストイキオメトリの影響 (色でハッチした部分が実験で確かめた領域)

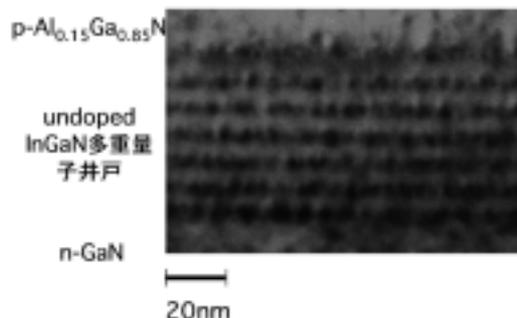


図4 InGaIn 多重量子井戸断面 TEM 像：自己形成された In リッチ量子ドットを示す