

超ヘテロ構造によるフォトンクス材料の探索

Super-Heterostructures for Photonics Materials

(研究プロジェクト番号：JSPS-RFTF 96P00101)

プロジェクトリーダー

荒井 滋久 東京工業大学量子効果エレクトロニクス研究センター・教授

コアメンバー

浅田 雅洋 東京工業大学大学院総合理工学研究科・教授

宮本 恭幸 東京工業大学大学院理工学研究科・助教授

筒井 一生 東京工業大学大学院総合理工学研究科・助教授

宮本 智之 東京工業大学マイクロシステム研究センター・助教授

渡辺 正裕 東京工業大学大学院総合理工学研究科・助教授

山田 実 金沢大学工学部・教授



1. 研究目的

本研究プロジェクトでは、既存の材料が有する物性の限界を打破する光デバイス用の新しい材料を創成することを目的として、以下の二つの観点からの研究を推進した。

- (1) ナノ構造における超ヘテロ構造と新しい光デバイス（荒井滋久、宮本恭幸）
- (2) 絶縁体/半導体超ヘテロ構造の創成と光新機能（浅田雅洋、渡辺正裕、筒井一生、宮本智之、山田実）

2. 研究成果概要

2.1 ナノ構造における超ヘテロ構造と新しい光デバイス

GaInAsP/InP 光ファイバ通信波長帯材料を用いて、低次元量子ナノ構造を低損傷・高密度に形成する人工極微構造形成を開拓した。自己組織化成長法による量子細線および量子箱構造の形成法に対して、偏波異方性やサイズ依存性を利用した新しい光機能デバイスの実現可能性の観点から、任意形状量子ナノ構造を形成する上で有利な電子線リソグラフィ、高いアスペクト比の形成に有利なドライエッチング、および電気的・光学的に良質な界面の形成に有利な埋め込み再成長を用いる低損傷形成プロセスの研究を行った。

アスペクト比の小さな領域では、細線パターン周期 25nm の InP/GaInAs 極微ヘテロ構造を実現した¹⁾。メタンおよび水素の混合ガスを用いる反応性化学エッチング(CH₄/H₂-RIE)および酸素ガスによるアッシングを繰り返す新しいプロセスを考案し、アスペクト比 10 以上の垂直性に優れた極微構造を実現することに成功した。

埋め込み再成長を行う際の界面における格子不整合に起因する結晶欠陥は、光デバイスの性能および信頼性の劣化を引き起こす。われわれは、歪補償量子井戸構造を極微加工した後、InP 結晶を周囲に再成長する方法により、歪量子井戸構造の有する高光利得特性を維持し、なおかつ非発光再結合電流成分の小さな良質の界面を形成することに成功した²⁾。この極微加工・再成長プロセスを用いて、世界で初めて多

層量子細線レーザを実現した³⁾。図 1 に、周期 80nm、細線幅 23nm の 5 層量子細線レーザの断面写真を示す。室温から 85 °C まで、極微加工しない歪補償量子井戸レーザと同等の微分量子効率が得られた。

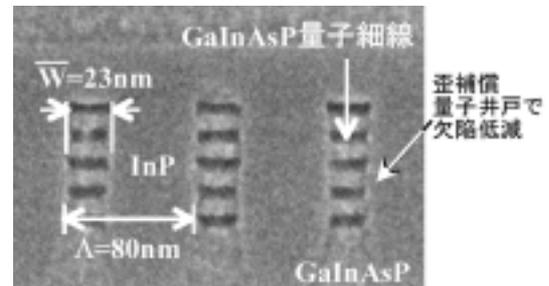


図 1 量子細線レーザの断面 SEM 写真

この低損傷極微構造形成技術を用いて、図 2 に示すように、幅 90nm の 2 層細線活性層を周期 240nm で配置した**新型分布帰還形 (DFB) レーザを試作した**。このレーザは、活性層体積の低減と回折格子反射鏡の高反射率化による極低電流動作を目的として考案したものであり、光ファイバ通信用 1.55μm 波長単一波長レーザの中で**世界最小電流動作 (0.7mA)**、**高微分量子効率動作 (23%/端面)** および**実用水準の動作寿命 (室温直流通作 8,000 時間経過後も、しきい値電流・微分量子効率・発振波長に劣化なし)**を実現した⁴⁾。

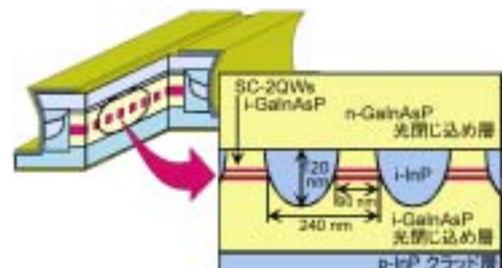


図 2 新型分布帰還形(DFB)レーザの構造図

2.2 絶縁体/半導体超ヘテロ構造の創成と光新機能

大きなヘテロ障壁差を有する新しい超ヘテ

口構造として、GaAs 基板上に格子整合する GaInNAs/GaAs 結晶材料、および Si 基板上にエピタキシャル成長する $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ ヘテロ構造や Si ナノ結晶 / CaF_2 絶縁体の実現と、それらの光デバイス応用のための基盤技術を開拓した。

光通信に実用化されている GaInAsP/InP 結晶より大きな伝導帯バンド不連続 (570meV) を有し、優れた高温動作特性が理論的に予測されている GaInNAs/GaAs レーザを作製した。その結果、図 3 に示すように、光通信波長帯である $1.23\mu\text{m}$ において、しきい値電流の特性温度が GaInAsP/InP レーザの 2-3 倍の 150K となる **高温安定性** を実現し、温度制御不要の低コストレーザの可能性を実証した⁵⁾。

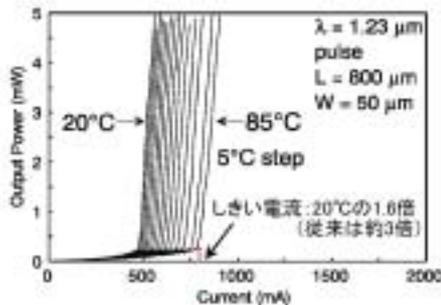


図 3 GaInNAs/GaAs レーザの温度特性

図 4 に示すように、量子カスケードレーザをはじめとするサブバンド間遷移を用いる光デバイスの実現を目指して、大きな伝導帯バンド不連続 (2.9eV) を有する $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ 超ヘテロ構造による二重障壁共鳴トンネルダイオードを作製した。その結果、図 5 に示すように、**室温での電流オン・オフ比 10 万** という値 (半導体 / 半導体ヘテロ接合の千倍以上) が得られ、量子カスケードレーザおよび超高速電子デバイスに应用可能な高品質・高均一の超ヘテロ構造の可能性を実証した⁶⁾。

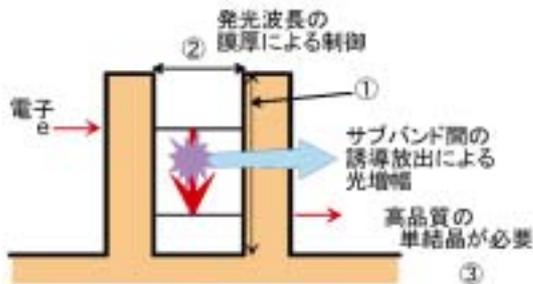


図 4 サブバンド間遷移の模式図

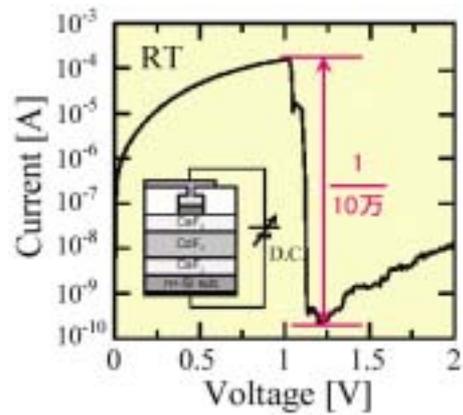


図 5 $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$ 二重障壁共鳴トンネルダイオード

3. 結論

光通信デバイス用材料である GaInAsP/InP 系結晶の低損傷ナノ構造形成法および高品質 GaInNAs/GaAs 結晶成長法を開拓し、高性能半導体レーザを実現した。また、約 3eV のバンド不連続を有する $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ 超ヘテロ構造の高品質・高均一成長法を開拓した。

主な発表論文

- (1) A. Kokubo, T. Hattori, H. Hongo, M. Suhara, Y. Miyamoto and K. Furuya: "25 nm pitch GaInAs/InP buried structure by calixarene resist," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** [7A] (1998) L827-L829.
- (2) N. Nunoya, H. Yasumoto, H. Midorikawa, S. Tamura and S. Arai: "Low threshold current density operation of GaInAsP/InP lasers with strain-compensated multi-layered wirelike active regions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** [10B] (2000) L1042-L1045.
- (3) N. Nunoya, M. Nakamura, H. Yasumoto, S. Tamura and S. Arai: "GaInAsP/InP multiple-layered quantum-wire lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** [6A] (2000) 3410-3415.
- (4) N. Nunoya, M. Nakamura, M. Morshed, S. Tamura and S. Arai: "High-performance $1.55\mu\text{m}$ wavelength GaInAsP/InP distributed feedback lasers with wirelike active regions, to be published in *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **7** [3] (2001).
- (5) T. Kageyama, T. Miyamoto, S. Makino, F. Koyama and K. Iga: "High-temperature operation up to 170°C of GaInNAs-GaAs quantum-well lasers grown by chemical beam epitaxy," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12** [1] (2000) 10-12.
- (6) M. Watanabe, T. Funayama, T. Teraji and N. Sakamaki: " $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ double-barrier resonant tunneling diode with high room-temperature peak-to-valley ratio," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** [7B] (2000) L716-L719.