

高品質量子ドットを用いた低消費電力面発光レーザの研究開発 (092103008) Research and development of surface emission laser with high quality quantum dot

研究代表者

天野建 産業技術総合研究所

Takeru Amano National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

研究期間 平成 21 年度～平成 23 年度

概要

本研究は 2 分子砒素材料などの新規化合物半導体成長技術を用いることで、半導体量子ドットの高密度化、高均一化を含む高品質化を実現し、これを用いた高性能な通信用面発光レーザの実現を目標としている。実際に本研究では MBE 成長法において 2 分子砒素材料を用いることで、量子ドットの高密度化と高均一化を同時に実現した。またそれを用いた量子ドットレーザを試作し良好な特性を実現し、低消費電力面発光レーザの指針を得た。最後に本研究の量子ドットを用いた 2 種類の面発光レーザ構造に関して報告する。

Abstract

My purpose is to be realized high-performance communication transmitter using the semiconductor quantum dot (QD) with a high density and quality grown by MBE using As_2 source. I really realized a QD active layer with high density and high uniformity grown by MBE using As_2 source. In addition, I obtained low threshold current case of QD laser using stripe structure. Finally I reported two kinds of QD surface emitting laser structure.

1. まえがき

近年イーサネットや光インターコネクションに代表される近距離大容量光通信の重要性が高まってきている。本研究では低消費電力かつ高性能な次世代半導体レーザを実現するべく、量子ドット活性層を用いた半導体レーザの研究を行った。量子ドット構造は δ 関数の状態密度を持つことから高い量子効率や温度無依存特性などその優れた特性から新しい発光材料として非常に期待されている。しかし、量子ドットは従来構造の量子井戸に比べて離散的に存在しており、扱えるキャリアの数が非常に少ない等も課題もある。これらの問題を解決するために本研究では As_2 分子線を用いて量子ドットの高密度化、高均一化を行った。またそれを用いた量子ドットレーザを試作し良好な特性を実現し、低消費電力面発光レーザの指針を得た。最後に本研究の量子ドットを用いた 2 種類の面発光レーザ構造に関して報告する。

2. 研究内容及び成果

自己形成量子ドットは高密度化と高均一化を両立するのが困難であり、また下地基板の影響を受けやすいため、半導体レーザ構造で用いる AlGaAs クラット層上での実現はさらに困難となる。本研究では 2 分子の砒素材料を用いた MBE 成長法を使用することで、 $6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ の高い面密度、発光半値幅 28 meV 以下の高均一、11 層の多層化を同時に満たす $1.3 \mu\text{m}$ 帯量子ドットを実現した。図 1 は 11 層目の量子ドット成長を終えた後に成長を止めた試料の SEM 写真である。SEM 写真から表面上に量子ドットが分布していることが分かり、この面密度は $6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ と高い値である。また、レーザ特性に悪影響を及ぼす巨大ドットは非常に少なく、このことから 11 層に多層化されても良好に高密度量子ドットが作製されている事が分かる。また 11 層に多層化された高密度量子ドットの室温フォトルミネッセンス測定結果からも発光半値幅 28 meV と非常に狭く良好な結果を示している。これらの結果から本課題で実現を目指している真に省電力駆動が可能な通信用光源の活性層として用いることが可能だと考える。

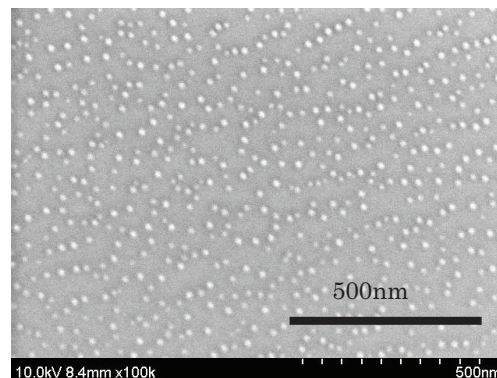


図1 高密度量子ドットのSEM写真

次に高密度かつ高均一な量子ドット活性層の特性を評価するために、ストライプレーザを試作した。レーザ層構造はクラット層に $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ 層を用い、活性層には高密度量子ドットを 9 層用いた。製作したレーザの室温パルス条件での電流出力特性結果を図 2 に示す。レーザ構造は反射膜コートなし、共振器長 0.75mm であり、ミラー損失に換算すると 16cm^{-2} となる。この時のしきい値電流 7mA 、しきい値電流密度は 373A/cm^2 、スロープ効率は 0.045W/A となっている。ミラー損失 16cm^{-2} において、 10mA 以下のしきい値電流動作は最小値だと思われる。また、本デバイスの最低しきい値電流密度は共振器 2mm 時で 164A/cm^2 となっている。これまで報告されている他研究機関の量子ドットレーザでは 1 層あたり (面密度: $1.4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$) で $7 \text{A/cm}^2/\text{layer}$ と非常に低い値である。本研究では 1 層あたり (面密度: $6.8 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$) で $18.2 \text{A/cm}^2/\text{layer}$ と大きい、量子ドット 1 つ当たりに換算すると $2.7 \text{A/layer}/10^{10}$ 個となり、最低値 ($5 \text{A/layer}/10^{10}$ 個) より低い値となる。つまり、本課題では高品質な量子ドットが実現できたため、量子ドット 1 個当たりのしきい値電流は非常に小さくなった。本量子ドットを使用することで、非常に低消費電力な量子ドットレーザが実現可能となる。

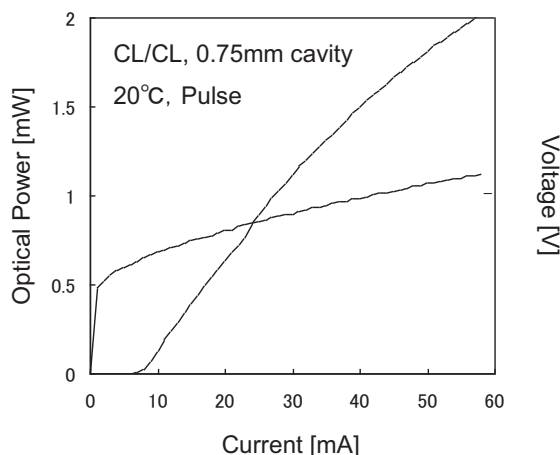


図2 量子ドットレーザのI-V、I-L特性

次に面発光レーザの検討を行った。現在、面発光レーザ構造には従来の垂直共振器構造 (VCSEL) と新しく LISEL と呼ばれるミラー集積 DFB レーザ構造の2種類がある。本研究でも2種類の面発光レーザについて検討を行った。まずミラー集積 DFB レーザに関してはエッチングによりグレーティングを使用した DFB レーザ構造を試作した。この特徴は埋め込みプロセスを使用せずに DFB レーザ構造の作製となる。室温パルス条件でしきい値電流 23 mA、しきい値電流密度は 383 A/cm^2 を得た。また波長温度依存特性結果とレーザ構造を図3に示す。温度依存性 0.077 nm/K と通常の DFB レーザと同じく、ストライプレーザ (0.4 nm/K) より小さな値が得られた。

従来の垂直共振器量子ドット面発光レーザ構造に関しては設計が重要となる。量子ドット活性層は利得が小さいことからキャビティ長を 2λ とし、11層の量子ドット活性層を配置したレーザ構造とした。また、量子ドット面発光レーザの反射鏡には高い光閉じ込めを実現可能な高反射膜が必要なため、下部には GaAs/AlAs 半導体多層膜反射鏡を用い、反射率 99.96% を想定した。上部の誘電体には Si/Al₂O₃ 多層膜反射鏡複合反射鏡を最適設計する事で、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯で 99% を超える高い反射率を得ることを示した。また低損失化を実現するために AlAs 酸化狭窄層とコンタクト層の設置場所を最適化した。実際に酸化狭窄層をもつイントラキャビティ構造面発光レーザを作製した。上部の多層膜反射鏡は一般的には誘電体多層膜反射鏡 (酸化チタン、酸化タンタル等) を用いるが、これらは真空蒸着法により成膜される。今回、面発光レーザの光出射部分のみに反射鏡を形成するためにフォトリソによりパターンニングを行ったが、成膜温度が 300°C ほどとなり、レジスト膜が劣化しまい使用することが出来なかった。そこで本研究ではスパッタ法による Si/Al₂O₃ 多層膜反射鏡を検討した。スパッタ法により、レジスト膜が劣化せずに多層膜反射鏡を形成することができた。非酸化直径 $10 \mu\text{m}$ で作製した量子ドット面発光ダイオードの室温 I-L 特性を図4に示す。電流 8 mA 以上で発行がみられたが、今回、レーザ発振はしなかった。今回ダイオード特性となった理由は上部反射率が所用の値を満たしていなかったためである。今後最適なミラーを作製することでレーザ発振が得られると考えている。

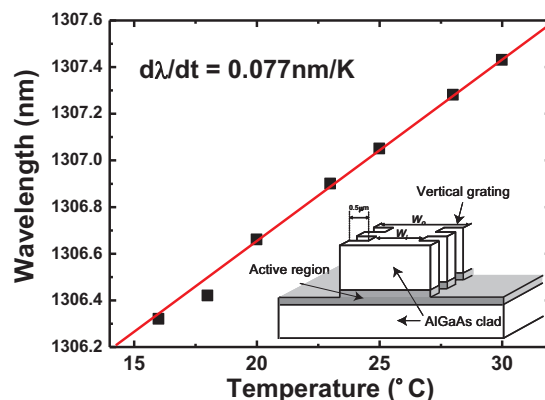


図3 量子ドット DFB レーザの波長温度依存性

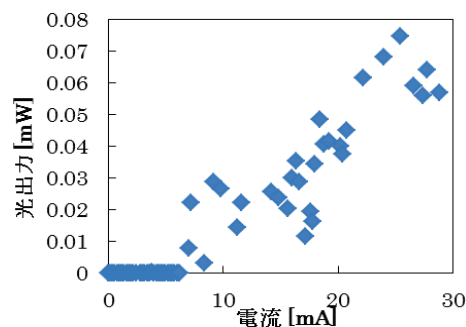


図4 量子ドット面発光光源のI-L特性

3. むすび

本研究では高密度かつ高均一な量子ドットを作製することで、量子ドットレーザの低しきい値動作を実現した。これは量子ドット 1 つ当たりに換算すると $2.7 \text{ A/layer}/10^{10}$ 個となり、これまでの最低値 ($5 \text{ A/layer}/10^{10}$ 個) より低い値となる。次に面発光レーザの検討を行った。現在、面発光レーザ構造には従来の垂直共振器構造 (VCSEL) と新しく LISEL と呼ばれるミラー集積 DFB レーザ構造の2種類があるが、本研究でも2種類の面発光レーザについて検討を行った。まずミラー集積 DFB レーザに関してはエッチングによりグレーティングを使用した DFB レーザ構造を試作し、温度依存性 0.077 nm/K と通常の DFB レーザと同じく、ストライプレーザ (0.4 nm/K) より小さな値が得られた。垂直共振器量子ドット面発光レーザ構造において、ダイオード特性を得た。

【誌上発表リスト】

- [1] T. Amano, T. Sugaya, R. Hettiarachchi, K. Komori, M. Mori, “Low threshold current operation of $1.3 \mu\text{m}$ Quantum Dots Laser with high mirror loss structure”, IEEE CFP09LEO-CDR pp670-671 (2009年10月)
- [2] T. Amano, M. Suwa, A. J. Mohammed, T. Sugaya, K. Komori, M. Mori, Y. Takanashi, “ $1.3\text{-}\mu\text{m}$ Quantum-Dot Optical Pre-amplifier with Narrow Bandwidth”, IEEE CFP10SLC-CDR pp96-97 (2010年10月)
- [3] T. Sugaya, T. Amano, M. Mori, and S. Niki, “Miniband formation in InGaAs quantum dot superlattice”, APL Vol.97 pp043112 (2010年7月29日)

【申請特許リスト】

- [1] 天野建、量子ドットを用いた半導体増幅器、日本、2010/05/21

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://unit.aist.go.jp/esprit/group/nano-photo-g.html>