

氏 名	こ じま かず のぶ 小 島 一 信
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2925 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 電 子 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	極性・非極性面 InGa _N 量子井戸レーザの光学特性に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 川 上 養 一 教 授 野 田 進 教 授 北 野 正 雄

論 文 内 容 の 要 旨

InGa_Nを活性層とする窒化物半導体の発光素子は、近紫外から青色領域の高効率発光ダイオード(LED)やレーザダイオード(LD)の開発など、近年目覚ましい発展を遂げている。しかしながら、発光波長が青緑色より長波長となると、LEDの発光効率が著しく低下し、緑色LDの室温連続発振に至っていないのが現状である。本論文は、比較的高いIn組成を持つInGa_Nにおける光物性について理論的・実験的研究を行ない、InGa_N-LEDやLDの高効率化・高性能化に対する指針を与えることを目的としており、6章からなっている。その要旨を以下に示す。

第1章は、窒化物半導体光デバイスの研究背景について紹介した後、InGa_N量子井戸LDの長波長化における問題を議論している。すなわち、緑・黄・橙・赤などの長波長発光を実現するにはIn組成比を増加させることが必須となるが、このことはInGa_NとGa_N障壁層との格子不整合を通して巨大なピエゾ分極を引き起こす。ピエゾ分極は量子井戸に強い量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)を誘起する原因となり、輻射再結合確率を抑制する要因となる。そこで、QCSEを低減できる非極性面上での結晶成長に関して研究の現状と課題を明確にしている。

第2章では極性面量子井戸の基本的な光学特性について述べている。まず異なるIn組成を持つ極性面InGa_N量子井戸のフォトルミネセンス(PL)及び励起PL(PLE)スペクトルを調べ、In組成の空間的な不均一分布による自然放出スペクトル幅やストークスシフトの増大といった基礎光物性を評価している。さらに、このようなInGa_N量子井戸の特徴的な物理がキャリアの局在や輻射・非輻射再結合過程にどのような影響を与えるかについて、レート方程式を用いて理論的に考察している。

第3章では、InGa_N量子井戸LDの電流駆動による発光減衰特性や光学利得スペクトルを詳細に評価している。その結果、長波長LDで局在準位に由来した利得の生成を観測し、局在準位と非局在準位では利得の温度特性が異なることを見出している。次に、 $k \cdot p$ 摂動法によって価電子帯を表現するハミルトニアンを導出し、前章で議論した不均一広がりQCSEを計算結果に反映させて、与えられた量子井戸構造の光学遷移エネルギー・遷移行列要素・状態密度及び発光・利得スペクトルを解析している。

第4章では、非極性面Ga_N基板上に成長したInGa_N量子井戸のPL偏光特性を測定し、これを定性的に説明するためにスピン・軌道相互作用を無視した場合の価電子帯の固有エネルギーと固有関数を解析的に導いている。その結果、歪の異方性による結晶対象性の変化が価電子帯のゾーンセンターにおける縮退を解き、偏光の基本的な性質に重要な役割を果たしていることを明らかにした。さらに、スピン・軌道相互作用及び量子閉じ込め効果を考慮した精密な数値解析を行い、非極性面InGa_N量子井戸を特徴付ける実効偏光度を定量的に解析している。

第5章では半極性面である(11 $\bar{2}$ 2)面Ga_N基板上のInGa_N量子井戸LD構造を実験的に評価している。まず(11 $\bar{2}$ 2)面InGa_N量子井戸LD構造の誘導放出スペクトルを光ポンプによって観測した。そこでは、観測する方向によってしきい値や発光ピークエネルギーに差が生じることを実験的に明らかにし、第4章の理論計算の有用性を実証する結果を得ている。次

に、利得の異方性を計算するために、非極性面 InGa_N 量子井戸の異方的分散関係及び状態密度を解析し、非極性面におけるレーザ発振しきい値を大幅に低減することが可能であることを示している。最後に、下地基板を選択することによって InGa_N 量子井戸の歪を異方的に導入し、それに伴う電子構造の変化を積極的に利用することで、発光の偏光状態を制御する方法を提案している。この成果は、劈開可能な方向へのレーザ発振を可能とし、しきい値キャリア密度を最小にするためのデバイス構造の条件を示すものである。

第 6 章は、結論であり、各章で得た成果を纏めるとともに今後の展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、InGa_N 半導体レーザ (LD) の動作波長の長波長化・高出力化を目的として、極性及び非極性 InGa_N 量子井戸構造の光物性に関する研究成果を纏めたものである。従来の極性面上 InGa_N の LD 発振波長は 488nm 程度 (青緑色) 以上の長波長化は困難であると考えられてきた。本研究では、これらの課題に対する詳細な検討を行い、以下のように成果を得た。

(1) 極性面上の InGa_N 量子井戸 LD の光学利得スペクトルを 400nm～470nm にわたる広い波長範囲で実測した。さらに、この結果を量子閉じ込めシュタルク効果 (QCSE) のクーロン遮蔽を考慮した計算結果と比較することで、470nm で発振する In リッチ InGa_N LD の光学遷移確率や光学利得が QCSE によって 3 割程度にまで抑制されていることを明らかとした。これらの知見から、非極性面上の結晶成長が InGa_N LD の動作波長の長波長化に有利であることを実証した。

(2) 非極性面上の窒化物半導体が有する光学異方性を、歪の異方性と 2 次元量子効果の双方を考慮して理論的に解析し、実測した光学異方性を説明できることを明らかとした。特に QCSE の著しい低減が期待できる (11 $\bar{2}2$) 半極性面や無極性面において、異方的な歪によって価電子帯の基底関数が方位依存性を持ち、これが偏光特性を支配していることを定量的に明らかにした。

(3) 非極性面 InGa_N 量子井戸 LD の誘導放出を 405～475nm の波長範囲で観測し、その光学利得スペクトルにおいて異方性を伴った強い偏光特性を観測した。また、非極性面 InGa_N の光学利得を理論計算することに成功し、実験結果を説明する手法を確立した。

(4) 非極性面窒化物半導体の光学特性が異方的な歪に強く依存していることに着目して、下地層の種類や組成比を変化させることで、活性層の偏光特性を制御できることを見出した。

以上、本論文は極性及び非極性 InGa_N 量子井戸 LD の光学特性の評価とその光学異方性を実験的・理論的に解析し、長波長化や偏光特性制御など光デバイスとしての可能性と設計指針を明確にしたものであり、学術上及び実際上の寄与が少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 20 年 2 月 1 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。