

氏名(本籍)	つちやとも のぶ 土屋朋信(東京都)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博乙第2605号			
学位授与年月日	平成24年6月30日			
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	有機金属気相成長法による光通信用半導体レーザの結晶成長に関する研究			
主査	筑波大学教授	理学博士	秋本克洋	
副査	筑波大学教授	工学博士	山部紀久夫	
副査	筑波大学教授	博士(工学)	末益崇	
副査	筑波大学教授	博士(理学)	関口隆史	

論文の内容の要旨

本研究では光通信用半導体レーザの高性能化に向けて、主に InGaAsP 系多重量子井戸 (MQW) 活性層に歪を導入すること、および InGaAlAs 系で歪 MQW 活性層を作製することを検討し、歪が光学的、電気的性質へ与える影響、欠陥形成への影響を解析するとともに実際に素子構造に応用しその効果を確認したことをまとめている。

光通信では光ファイバーの分散が $1.3\mu\text{m}$ でゼロになり、損失が $1.55\mu\text{m}$ で最低になることから、光源である半導体レーザの発振波長は 1.3 、 $1.55\mu\text{m}$ 付近に固定されていた。このため、古くからこの波長域をカバーする材料としては InP 基板上の InGaAsP 系材料が用いられてきており、光通信用半導体レーザの開発は主に構造を変えることにより進められてきた。特に半導体レーザの高性能化において、発振特性を大きく左右する活性層は、バルク構造から格子整合系の MQW 構造へと発展することにより、高速化や駆動電流の低減が図られてきた。このような背景の下、本研究では光通信用半導体レーザの高性能化に向けて、歪の効果を取り入れ、InGaAsP 系歪 MQW レーザの特性向上を達成し実用化にまで至った成果を上げた。

高品質な歪層を作製するためには、成長条件の最適化、歪層の結晶性評価、臨界膜厚の把握などが必要であることから、InP 基板上の結晶成長条件を検討し、結晶成長時に歪層を in-situ で評価しなければならないためその専用装置を開発した。また、InGaAsP 系歪 MQW レーザにおける歪量の最適化を行うとともに、歪による臨界膜厚を克服するため、歪の緩和過程を把握し、歪の応力補償構造を検討した。一方、歪の導入においても InGaAsP 系レーザの温度特性は改善度合いが小さかったため、InGaAlAs 系を歪 MQW 活性層に導入し、高温・高速動作を実現した。InGaAlAs 系の適用範囲を拡大するため、InGaAlAs 系の選択成長や表面酸化層を除去するための in-situ エッチングを検討した。以下、各項目の研究結果をまとめる。

実験装置開発：結晶作成には高真空を必要としない有機金属気相成長法を用いた。反応炉は横型であり、Ⅲ族の有機金属原料には TMIIn (トリメチルインジウム)、TEGa (トリエチルガリウム)、TMAI (トリメチルアルミニウム)、V族の水素化物原料に AsH₃ (アルシン)、PH₃ (ホスフィン)、p型のドーパントには DMZn (ジメチル亜鉛)、n型のドーパントには Si₂H₆ (ジシラン) を用いた。結晶成長時での歪層評価のため、in-situ X線モニター付きの有機金属気相成長装置を開発した。その結果、InGaAs/InP 構造の微妙な熱膨張係

数差による歪量変化や GaAs 基板上の InP ヘテロ成長における格子緩和の様子を in-situ で評価することができた。さらに厚膜において高精度に歪量を制御するための Feedback 機構を開発した。

InGaAsP 系歪 MQW： PL 評価や素子特性から歪応力の効果を明確にし、歪量の最適化および極低閾値の半導体レーザを実現した。また歪 MQW における圧縮歪と引っ張り歪の比較では、引っ張り歪の方が緩和し難いことを明らかにした。InGaAsP 系歪 MQW において $\pm 0.5\%$ の応力補償構造では、井戸層と障壁層の歪が補償することにより MQW 内での歪の蓄積が無く、周期数の増大が可能であった。一方、高歪 ($\pm 1.25\%$) ではヘテロ界面の歪量差が増大し、MQW 内に 3 次元成長や欠陥が発生する。このため、応力補償構造を導入することにより、逆に歪 MQW の結晶性が劣化することを明らかにした。

InGaAlAs 系歪 MQW： 光通信用半導体レーザの温度特性改善に向け活性層に InGaAlAs 系材料を導入した。InGaAlAs 系の成長条件を最適化し、活性層の残留キャリア濃度を InGaAsP 系と同等レベルにまで低減した。その結果、PL 特性や素子の信頼性を改善し、高温においても素子特性の劣化が少ない光通信用半導体レーザを実現した。また InGaAlAs 系歪 MQW の応力補償構造において、高品質なヘテロ界面を実現し、高歪の井戸層における多周期化を可能とした。井戸層の歪量が $+1.4\%$ と大きいにも拘わらずヘテロ界面において欠陥が発生しなかったことから応力補償構造が有効に働き、周期数の増大が可能であった。さらに InGaAlAs 系の再成長において、in-situ クリーニングにより無効電流や閾電流値を低減し、InGaAlAs 系埋め込み型レーザの長期信頼性を実現した。

審査の結果の要旨

活性層に歪を加えた効果について物理的解釈、作成手法、素子特性などの側面から、学術的意義、考察の深さ、オリジナリティ、実施能力、結果のインパクトについて審査した。歪によるバンド構造変化が理論と実験でほぼ一致することを示した結果は重要である。また、これらの効果が実用レベルで使えることを示しており、技術的インパクトは大きい。学術的および技術的に重要な内容を含んでいると評された。

平成 24 年 5 月 25 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員の出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。