

## 審査の結果の要旨

論文提出者 大塚 節文

本論文は, " Study on Mass-transported InAsP Quantum Wire for the Active Grating of the Distributed Feedback Laser Diodes (分布帰還形レーザーダイオードの活性回折格子に向けたマス輸送 InAsP 量子細線に関する研究)"と題し, 利得結合分布帰還型レーザーの活性層兼回折格子として機能する 1.55  $\mu\text{m}$  帯 InAsP 圧縮歪み量子細線(quantum wire; QWR)を, 有機金属気相エピタキシー(MOVPE)におけるマス輸送法で再現性よく作製する技術, および同量子細線における歪み分布を解析し最適な構造を決定する手法に関し研究を行った結果について英文で纏めたもので, 6章より構成されている.

第1章は序論であって, 研究の背景, 動機, 目的と, 論文の構成が述べられている. 分布帰還型(DBF)半導体レーザーは, 現代の最重要な光通信光源であるが, 縦モード縮退が問題である. 利得結合を用いればこの問題が解消できるが, そのための利得結合回折格子の作製技術には, 従来決定的なものなかった. 一方, 量子細線におけるキャリアの閉じ込めは, 半導体レーザーに静的および動的な性能の向上をもたらすものと予想されている. もし量子細線を活性回折格子とする利得結合 DBF レーザが実現すれば, 利得結合と量子細線の長所を併せ持つ優れた性能を期待することができる. 本研究は, そのような DBF レーザを実現するために基盤となる知見を提供するものである.

第2章は"Fabrication of mass-transported InAsP QWR arrays"と題し, 本研究で扱う InP 基板上 InAsP 圧縮歪み量子細線の形成方法について論じている. ここでは, MOVPE リアクター中でのマス輸送現象を利用して量子細線を形成せんとすることが大きな特徴となっている. 同現象によれば, InGaAsP/InP の V 溝基板上に寄生構造のない高品質な InAsP 量子細線列を形成することができる. 本研究で開発した, 良質な V 溝基板を作製するためのリソグラフィ技術, 湿式/乾式エッチング技術, MOVPE リアクター内での熱処理技術, V 溝基板上再成長技術について詳述している. 本研究の結果, 室温で光励起発光する量子細線を再現性良く得ることが可能となった.

第3章は"Experimental analysis of mass-transported InAsP QWRs"と題し, 作製したマス輸送 InAsP 量子細線の性質を各種の実験的分析手法で測定・解析した結果について述べている. まず走査型電子顕微鏡(SEM)により V 溝形状, 軸方向再成長断面, リッジ導波路ストライプ断面のマクロな観察評価を行った後, 透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて量子細線断面形状のミクロな観察を行った. TEM と同時にエネルギー分散 X 線分光により量子細線中の組成分布を調べ, また TEM 格子像をフーリエ変換マッピングすることにより局所的格子定数の変化を観察している. その結果, 典型的な量子細線は, 高さが 8-10nm, 幅が 16-20nm, As 組成が 80%超で均一, かつ急峻な界面を有することが分かり, キャリアの 2 次元量子閉じ込めを得るに十分なサイズのものであることが確認された. さらに, 室温フォトルミネッセンス(PL)による評価では, 0.4~0.5 という大きな偏光異方性が得られ, このことから十分な横方向キャリア閉じ込めの存在が確かめられた. また, 正の偏光異方性を有したことから, 本量子細線の発光が電子と重い正孔の間の光学遷移で

あることが示された。PL ピーク波長はマストランスポート継続時間と線形の関係があり、発光スペクトルは障壁材料の InP に対する格子不整合量や V 溝埋め込み材料の成長速度に敏感であること等も実験的に明らかになった。

第 4 章は"Theoretical analysis of mass-transported InAsP QWRs"と題し、作製された量子細線の理論的解析手法および解析結果・考察に関し述べている。ここでは、3 章で観測された量子細線の特性を理論的に説明し、より良い特性を得るための指針を得ることが目的である。マストランスポート InAsP 量子細線構造における歪みの分布は、等方性弾性近似の下で境界要素法で計算している。平面応力問題に対する計算結果は TEM 分析の結果とよく一致した。ひずみ分布の計算結果に基づいてバンド端エネルギーと有効質量の分布の計算を行い、包絡線近似の下で直交周期関数展開法により量子エネルギー準位と波動関数の計算を行っている。通常 InAsP/InGaAsP 界面は伝導帯不連続量が大きいですが、マストランスポート InAsP 量子細線構造では、細線内の InAsP の非常に強い体積縮小の効果のために、伝導帯不連続量が小さくなっていることや、重い正孔バンドでは応力集中のためにポテンシャルが極めて深くなる領域の存在することが計算により示された。さらに波動関数の計算により、量子細線中には電子の量子準位は 1 つだけしか存在しないこと、重い正孔バンドでは応力集中による深いポテンシャルのために量子準位と波動関数は複雑になる場合があること、また軽い正孔では材料の組み合わせによっては量子閉じ込め効果がないことが示された。これらの結果は、量子細線からの発光の実験結果をよく説明している。波動関数の計算から見積もられる 2 次元量子閉じ込めの縦横比は 0.7~0.8 であり、PL スペクトルの偏光異方性から見積もられる値とよく一致する。

第 5 章は"Discussion and strategy toward laser oscillation"と題し、2~4 章で得られた結果を総合的に考察して、量子細線利得結合 DFB レーザ実現へ向けた戦略を示している。まず応力分布解析の妥当性を TEM 格子像のフーリエ解析との比較において考察した後、実際に形成される量子細線のバンドラインナップ、有効質量、量子化準位、波動関数、偏波依存性、量子細線組成、細線断面積のマストランスポート時間依存性、計算方法の改善策について検討している。最後にこれらの知見を元に、量子細線利得結合 DFB レーザ実現のための戦略を、V 溝下地材料の選択、量子細線埋め込み材料の選択、共振器長の最適化、その他の観点から論じている。

第 6 章は結論であって、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように本論文は、分布帰還型半導体レーザの利得回折格子への応用を目指して、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯の InAsP 圧縮歪み量子細線を、有機金属気相エピタキシーにおけるマストランスポート法で InP V 溝基板上に作製する技術を確立するとともに、同量子細線における歪み分布を理論的に解析しバンド構造を正しく評価することを通じて量子細線の特性格改善を行って、室温での再現性の高い発光を可能にし、量子細線利得結合分布帰還型半導体レーザ実現への要件を明らかにしたもので、電子工学分野に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。