

審査の結果の要旨

論文提出者 清水 均

本論文は、石英光ファイバ通信用長波長帯レーザの低閾値化、高特性温度化、高速性改善に向けて、固体ソース分子線エピタキシャル成長法(MBE)およびガスソースMBE法に依拠した半導体量子ヘテロ構造材料の研究を行い、それらを実素子に適用した結果について論じたものであり、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。長波長帯レーザとして一般的なGaInAsP/InP系レーザは、閾値電流密度は低いが、温度特性が良くない(特性温度 T_0 で50~60K)という欠点がある。温度特性および高速性改善のためには、量子井戸からの電子の熱放出を抑制することが重要である。本研究では、長波長帯半導体レーザにおいて、新規半導体材料のヘテロ接合によって伝導帯の量子井戸深さ(ΔE_b)を拡大し、もって温度特性を改善することに主眼をおいている。

第2章は「1.55 μ m帯AlGaInAs/InP系MQWレーザ」と題し、まず伝導帯のバンドオフセットが大きいと期待される、1.5 μ m帯のAlGaInAs/InP系材料を固体ソースMBE法で成長し、成長条件が結晶性に与える効果、臨界膜厚の成長温度依存性、レーザを作製した場合の温度特性および高速性に関して論じている。この材料系のMBE成長によるレーザとしては、世界一低い閾値電流密度($J_{th}=0.8\text{kA/cm}^2$)を得た。高速性に関しては、微分利得の評価を行い、実効的な微分利得として $9.3 \times 10^{-16}\text{cm}^2$ というGaInAsP系よりも2~3倍大きな値を確認した。キャリア輸送過程を考慮すると $1.6 \sim 3.3 \times 10^{-15}\text{cm}^2$ となり、歪量子井戸レーザで理論的に予測される値と良く一致した。温度特性改善に関しては、この材料系で多重量子障壁(MQB)の実験的検討を行った。特性温度、スロープ効率の温度特性共に改善が見られ、長波長帯レーザにおけるMQBの有効性を初めて実証した。このレーザは1井戸当たりの J_{th} は 200A/cm^2 と、GaInAsP系と比べて高く、特性温度も60~70K程度とGaInAsP系と同程度であった。この原因は、固体ソースMBE法ではInPが成長できないこと、量子井戸にAlを含むにも関わらず成長温度はInの脱離で制限されるため、530°Cまでしか上げられないこと、伝導帯バンドオフセット量が不十分($\Delta E_b \doteq 180\text{meV}$)であったこと、などが考えられる。

第3章は「1.3 μ m帯InAsP系変調ドープレータ」と題し、燐を扱えるガスソースMBEに取り組んでいる。伝導帯バンドオフセットが大きいと期待される1.3 μ m帯InAsP/GaInAsP/InP系材料を用いて、歪量子井戸レーザの更なる特性改善を目的に、変調ドープレータ特性に及ぼす影響を研究した。InAsP系は高歪系であり、また、変調ドープレータは急峻なドーピングプロファイルが望ましいことから、MBE法が適しているといえる。n型変調ドープレータでは 0.25kA/cm^2 という低閾値電流密度が得られ、また、BHレーザを作製しサブミリアンペア動作(閾値0.9mA)を達成した。MBE成長による長波長帯レーザとしては、世界で最も低い閾値である。n型変調ドープレータでは低閾値、高効率、短発振遅延時間、高出力動作に有利なことを実験的に示した。また、p型変調ドープレータでは、微分利得の増加と発振遅延時間の減少が確認され、高速変調動作に有利であることが実験的に示された。また、特性温度もアンドープレータに比較してp型変調ドープレータでは10K程度増加した。歪補償による井戸数の増加も検討したが、InAsP/GaInAsP/InP系では、特性温度は最高でも75Kと、通常のGaInAsP系と比べて温度特性の大幅な向上は得られなかった。InAsP/InP系ではGaInAsP/InP系と比べて ΔE_c が大きくなっていないためと考えられる($\Delta E_b \doteq 110\text{meV}$)。更にInAsP系においてバリア層のバンドギャップを大きくしたInAsP/InP/AlGaInAs系量子井戸レーザ($\Delta E_b \doteq 260\text{meV}$)を試作し、 $J_{th}=0.6\text{kA/cm}^2$ 、 $I_{th}=10\text{mA}$ 、 $T_0=90 \sim 100\text{K}$ を達成した。

第4章は「 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯GaInNAs系レーザ」と題し、更に深い量子井戸 ($\Delta E_b \geq 350\text{meV}$)を形成するために、GaAs基板上の $1.2\sim 1.3\ \mu\text{m}$ 帯高歪GaInNAs系材料とそれに基づくレーザに関し論じている。この材料は準安定混晶であり、最も熱平衡状態から遠い成長が可能なMBE法はこの材料の成長に向いている。RFセルによるNラジカル源およびAl, Ga, In, As, P, Sb源を備えるガスソースMBEを開発し、Sbを微量含んだ長波長帯GaInNAs系SQWレーザと高歪GaInAs系SQWレーザを同MBE法により成長した。Sbにより、成長モードが2次元成長から3次元成長に変化する臨界膜厚を大きくすることができた。その結果、GaInNAsSbレーザで、波長 $1.257\ \mu\text{m}$ での室温CW動作を達成した($J_m=0.7\text{kA/cm}^2$)。GaInNAs系活性層を用いたレーザでは過去の報告例中最低の閾値電流と同程度であり(25°C で 12.4mA)、なおかつ、 157K という高特性温度($25\sim 85^\circ\text{C}$)で、 100°C 以上の高温までCW発振した。 $1.25\sim 1.3\ \mu\text{m}$ 帯で、世界で初めて、低閾値電流かつ高特性温度($T_0 \geq 150\text{K}$)の端面出射型レーザを実現した。

第5章は「各材料系のまとめと長波長帯レーザの究極の材料系に関する考察」と題し、本研究で検討した材料や、他研究機関の報告に関して特性温度 T_0 と ΔE_b の関係や利得係数 G_0 と ΔE_b の関係、 G_0 と微分利得 g_0 の関係を理論と比較してまとめている。電子の熱放出モデルによれば、 85°C での熱放出確率を 25°C とほぼ同一とするためには、 $\Delta E_b \geq 350\text{meV}$ となる材料が必要である。また、一般にバリア層および光閉じ込め層のバンドギャップを大きくすると屈折率が下がり、光閉じ込め係数が小さくなるために J_m は増加する。現状では光閉じ込め係数を保持したまま $\Delta E_b \geq 350\text{meV}$ が期待できるのは、GaInNAsSb/GaAs系のみであり、GaInNAsSb系レーザは、熱電素子不要の光加入者用光源や面発光レーザ(VCSEL)材料として非常に有望である。また、熱平衡から離れた状態で成長できるMBE法は、GaInNAsSb系の成長に適していると言える。

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、光ファイバ通信用長波長半導体レーザの温度特性向上を目指して、伝導帯オフセットを従来材料より大きく取れる可能性のあるInP上のAlGaInAs, InAsP, およびGaAs上のGaInNAsSb量子井戸構造を分子線エピタキシー法の特徴を活かして成長し、実際にレーザ素子を作製して各材料の利害得失を系統的に明らかにするとともに、この過程を通じて世界最高レベルの特性温度や閾値電流を達成したものであって、電子工学分野へ貢献するところ少なくない。

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。