

## 論文の内容の要旨

論文題目 分子線エピタキシー法による低しきい値、高特性温度長波長帯多重量子井戸レーザーに関する研究

氏名 清水 均

光通信用信号光源及び光増幅用の長波長帯半導体レーザーは、これまで主として MOCVD 成長により、GaInAsP/InP 系レーザーで生産されている。しかしながら、今後、デバイス特性を更に向上させるためには、非熱平衡状態で成長可能であり、界面急峻性及び膜厚制御性に優れる分子線エピタキシー (MBE) 法の特徴を生かした半導体レーザーの研究を行う必要がある。本研究では、固体ソース MBE 法及びガスソース MBE 法により、長波長帯レーザーの低しきい値化、高特性温度化、高速性改善の為の材料検討に取り組んだ。従来の MOCVD 法による GaInAsP 系は、しきい値は低い (1 井戸当たり  $J_{th}=100\text{A}/\text{cm}^2$ ) が、温度特性が良くない ( $T_0=50\sim 60\text{K}$ ) という欠点がある。

温度特性及び高速性改善の為には、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ーにおいて、材料変更による量子井戸の深さ ( $\Delta E_b$ ) と特性温度の関係に主として着眼点を置いた。ここで、量子井戸の深さとは、量子井戸の伝導体の第一量子準位からバリア層までのポテンシャルエネルギーを指す。従来の  $1.3\ \mu\text{m}$  帯 GaInAsP/InP 系は、 $\Delta E_b=107\text{meV}$  であった。

まず、伝導体のバンドオフセットが大きいと期待される、 $1.5\ \mu\text{m}$  帯の AlGaInAs/InP 系を固体ソース 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、レーザーの温度特性及び高速性に関して検討した。V 族に砒素のみを用いる、この材料の MBE 成長によるレーザーとしては、世界一低いしきい値電流密度 ( $J_{th}=0.8\text{kA}/\text{cm}^2$ ) 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、歪量子井戸レーザーの理論計算と良く一致した。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。界面急峻性や膜厚制御性の点で MQB は MBE

成長が適していると考えられる。特性温度、スロープ効率の温度特性共に改善が見られ、MQBによる長波長帯のレーザ特性の改善効果を初めて示した。しかし、実験的に得られた効果は小さく、理論の再検討と結晶性向上が共に必要であることがわかった。このレーザは1井戸当たりの  $J_{th}$  は  $200\text{A}/\text{cm}^2$  と、GaInAsP系と比べて高く、特性温度も  $60\sim 70\text{K}$  程度とGaInAsP系と同程度であった。 $J_{th}$ が高い原因の一つに固体ソース MBE法ではInPが成長できないことや、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、 $530^\circ\text{C}$ までしか上げられないという問題があった。特性温度があまりGaInAsP系と変わらないのは、伝導体バンドオフセット量が不十分であった為と考えられる ( $\Delta E_b \approx 180\text{meV}$ )。

長波長帯のレーザを検討するため、AlGaInAsP系を扱えるガスソース MBEに取り組んだ。伝導体バンドオフセットが大きいと期待されていた  $1.3\mu\text{m}$  帯 InAsP/GaInAsP/InP系を用いて、歪量子井戸レーザの更なる特性改善を目的に、変調ドープのレーザ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法が向いていると考えられる。n型変調ドープでは  $0.25\text{kA}/\text{cm}^2$  という低しきい値電流密度が得られ、また、BHレーザを作製し、しきい値  $0.9\text{mA}$  というサブミリアンペア動作を確認した。MBE成長による長波長帯レーザとしては、世界で最も低いしきい値である。n型変調ドープでは低しきい値、高効率、低発振遅延時間、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を実験的に示した。また、特性温度もアノードプレーザに比較してp型変調ドープでは  $10\text{K}$  程度増加した。歪補償により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  $75\text{K}$  と、通常のGaInAsP系と比べて温度特性の大きな向上は出来なかった。InAsP/InP系ではGaInAsP/InP系と比べて  $\Delta E_c$  は大きくなっていない為と考えられる ( $\Delta E_b \approx 110\text{meV}$ )。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 ( $\Delta E_b \approx 260\text{meV}$ ) を検討し  $J_{th}=0.6\text{kA}/\text{cm}^2$ 、 $I_{th}=10\text{mA}$ 、 $T_0=90\sim 100\text{K}$  を得た。

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  $1.2\sim 1.3\mu\text{m}$  帯レーザである、高歪GaInAs系やGaInNAs系が注目されている。この材料は準安定混晶であり、最も非熱平衡状態に近い形で成長可能なMBE法はこの材料の成長に向いている。RFセルによるNラジカル源を搭載し、AlGaInAsPNSb系を扱えるガスソース MBEに改造した。本研究では、Sbを微量含んだ長波長帯GaInNAs系SQWレーザと高歪GaInAs系SQWレーザをガス

ソース 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。GaInNAs 系レーザで、波長  $1.257\mu\text{m}$  での室温 CW 動作を達成した ( $J_{\text{th}}=0.7\text{kA}/\text{cm}^2$ )。GaInNAs 系を用いたレーザでは過去の報告例中、最も低いしきい値電流と同等であり ( $12.4\text{mA}@25^\circ\text{C}$ )、なお且つ、高特性温度 ( $T_0=157\text{K}@25\sim 85^\circ\text{C}$ ) で、 $100^\circ\text{C}$  以上の高温まで CW 発振した。 $1.25\sim 1.3\mu\text{m}$  帯のレーザで、世界で初めて、低しきい値電流且つ高特性温度 ( $T_0\geq 150\text{K}$ ) を有する端面出射型レーザを報告した。

最後に、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  $\Delta E_b$  の関係や利得係数  $G_0$  と  $\Delta E_b$  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る。電子の熱放出モデルから、 $85^\circ\text{C}$  での熱放出確率を  $25^\circ\text{C}$  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、一般にバリア層及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為に  $J_{\text{th}}$  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、GaInNAs(Sb)/GaAs 系のみであり、GaInNAs(Sb)系レーザは、ペルチエフリーの光加入者用光源や VCSEL 材料として非常に有望である。また、非熱平衡に近い形で成長できる MBE 成長は、GaInNAs 系の成長に適していると言える。