

論文の内容の要旨

論文題目 InGaAlP と GaAs によるヘテロ接合を用いた
短波長半導体レーザの高性能化に関する研究
氏名 板 谷 和 彦

光ディスクシステムを中心とする半導体レーザの光情報処理応用に関して、さらに高性能化を目指す半導体レーザの研究開発のターゲットとして波長の短波長化が重要である。半導体レーザの発振波長の短波長化は、回折限界を制限する波長自身を短くすることになり、光記録密度の向上につながる。回折限界スポット径は波長に比例し、記録密度は面積として波長の2乗に逆比例するため、短波長化は光記録密度向上に大きな役割を果たす。また可視光として肉眼で見えることを生かした応用面での観点からも半導体レーザとして可視光が実現できることは重要である。

コンパクトディスク (CD) に代わる次世代の光ディスクシステムの実用的な光源として、また広く用いられている He-Ne レーザ (632.8 nm) の代替光源として赤色領域の半導体レーザの実現が期待されていた。赤色半導体レーザを実現する材料として GaAs 基板上 InGaAlP 混晶が選択され、半導体レーザの開発が進められたが、实用レベルへの発振波長の短波長化と高出力化に大きな課題があった。

本研究はこのような背景で行った。大きなバンドギャップ差を有する、InGaAlP と GaAs とのヘテロ接合に注目し、p-p アイソタイプ接合によって電流狭窄を行った新構造レーザの提案を行った。また、不純物である Zn の選択拡散制御を発見と、大きな障壁を有する DH 接合レーザの提案も行った。これらの結果を InGaAlP 系赤色レーザと 0.8 μm 帯 GaAs 系レーザに適用し、短波長帯レーザの高性能化を行った。その結果、プロセスの簡略化を実現

するとともに、短波長化、高出力化など赤色レーザの高性能化、半導体レーザとしての未踏の高温動作などを実現した。また、ヘテロ接合の電流-電圧特性に関する新たな知見や、半導体レーザの温度特性に関する新たな知見を得たものである。本論文の概要は以下の通りである。

第1章では、短波長半導体レーザの歴史を概説しながら、本研究の位置付けを明確にした。まず半導体レーザの全体を振り返り、短波長レーザの位置付けを概説するとともに、InGaAlP材料の特徴の概説と、本研究が行われた以前までのInGaAlPレーザの開発状況と課題および、GaAlAs系レーザを含め、半導体レーザとしての開発当時における動作温度の限界を紹介した。

第2章では、まず本論文の中心となる、InGaAlPとGaAsによるヘテロ接合の特徴とMOCVDによる結晶成長に関する紹介を界面の急峻性の検討も含め行った。また、p-InGaAlPとp-GaAsによるヘテロ接合の電流-電圧(I-V)特性に関して、1次元シミュレーションによる解析と実験により系統的な検討を行い、p-InGaAlP/p-GaAsヘテロ接合においては、InGaAlPのAl組成に依存して大きな電圧降下が生じること、p-InGaP層を挿入することで飛躍的に電圧降下を低減できることを見出した。これらの実験結果はシミュレーションによる解析結果と定量的に一致し、InGaAlPとGaAsにおいて価電子帯側に大きなバンド不連続を有することに基づく、本質的なものであることを確認した。

第3章では、第2章の結果に基づき設計したInGaAlP/GaAsヘテロバリア狭索(HBB)構造による赤色半導体レーザを試作し、特性評価を行った。p-pアイソタイプヘテロ接合における電圧降下差を電流狭索機構に利用する初めての内部電流狭索構造を試作し、プロセス簡略化の実証と、低しきい値動作、高信頼特性などから半導体レーザの狭索構造としての妥当性を検証した。

また本構造の簡略なプロセスを活用して、630 nm帯でのInGaAlP赤色レーザを設計、試作し、室温連続発振を実現した。設計は注入キャリアの活性層からのオーバーフローを低減する観点から行ったものである。1990年当時、達成された636 nmは半導体レーザにおける最短波長での室温連続発振であった。

第4章では、第3章で機能検証された HBB 構造による、赤色レーザの高出力化を高信頼性の取組みも含め、検討を行った。活性層への光密度低減を観点に設計した、HBB 構造レーザによって、横モード制御されたビームとしてキंकフリーで 43 mW の連続動作を実現した。HBB 構造で示した連続動作での 40 mW 以上の光出力は赤色レーザとして当時の最高出力であり、赤色レーザにおける書き込み用光源としての可能性を検証することができた。

また、この材料系において、酸化による端面部の劣化モードの存在、光密度に依存した劣化要因があるのも初めて明らかにした。この結果を踏まえて、10-20 mW における数 1000 時間レベルの高信頼性も早期に達成した。

第5章では、第4章で得られた光出力をさらに越えるレベルを実現するために、InGaAlP 系赤色レーザにおける窓構造の検討を行った。n-GaAs キャップ層を Zn ドープの p-InGaAlP 上にパターン状に設けることで Zn の選択拡散現象を誘起することができることを示し、InGaP 活性層に形成された自然超格子の無秩序化を組み合わせることで自己選択拡散型の窓構造レーザの試作ができることを示した。

窓構造としては、簡単なプロセスで試作が可能なことと、特性結果についても詳述した。InGaAlP 材料系における窓構造の検証を連続動作で行ったのは初めてであり、連続動作 80 mW の光出力は狭ストライプ構造の赤色レーザでは当時の最高の出力であった。

第6章では、InGaAlP を GaAs 活性層レーザのクラッド層に適用するダブルヘテロ接合を初めて試作した。第3章と同様に、キャリアのオーバーフロー低減による温度特性改善の観点から、1次元シミュレータにより、GaAlAs クラッド層では実現できない大きなヘテロ障壁を形成することで活性層からのキャリアのオーバーフローを大幅に低減できることを示した。

試作した DH 構造により、量子井戸活性層を除く半導体レーザとしては、最高温度での連続発振を実現した。記録した連続発振温度は 200 °C を越える。また本 DH 構造により、GaAs レーザの高温、高注入領域での温度特に関しても詳細な解析を行うことができた。高温領域においてもオージェ再結合による非発光過程は顕在化することはなかった。p-クラッド層のキャリア濃度を高濃度化することによってさらに特性改善の余地があることを計算により示した。

第7章では、第2章から第6章までの計算結果、試作したレーザの実験による特性結果および解析結果をまとめ、これら InGaAlP/GaAs ヘテロ接合による 0.6~0.8 μm 帯短波長レーザの高性能化を中心とした本論文の結果を総括し、今後の展望を述べる本論文を総括するとともに、本研究の波及効果と今後の展望についてまとめた。