
第8章 結 論

光ファイバー通信に用いる長波長帯 InP 系半導体レーザの性能と量産性の向上に不可欠な MOVPE 成長結晶の評価と高品質化に関する研究を行った。

本研究において、はじめにレーザ用結晶の母結晶である InP 結晶と、活性層に用いられる InGaAsP 結晶の高品質化について検討した。次に埋込み型レーザにおけるドライエッチング加工後の埋込再成長界面の高品質化について検討した。最後に、高品質化された結晶のポテンシャルを十分に引き出してレーザの性能を向上させるために、最適なレーザの構造設計について検討した。以下に、得られた結果をまとめる。

(1)長波長帯レーザ用 MOVPE 成長結晶の評価と高品質化の意義

長波長帯 InP 系半導体レーザは既に実用化されているが、インターネット等の普及による光ファイバー通信網の拡大に対応するためには更に量産性、コストとともに性能の点を改善する必要がある。したがって、InP 系レーザに用いられる MOVPE 成長結晶を高品質化することが不可欠となる。本研究の目的は、InP 系レーザの性能を支配する MOVPE 成長結晶の品質を評価して、その評価結果に基づき結晶を高品質化することである。また、結晶品質とともにレーザ特性に影響を与える最適なレーザの構造設計についても検討する。

(2)MOVPE 成長 InP の評価と高品質化

光通信用レーザ用 InGaAsP 混晶結晶の母結晶となる MOVPE 成長 InP の高品質化について、非発光再結合中心となり得る深い準位の低減の観点から検討した。MOVPE 成長された InP 結晶中の深い準位を DLTS 法により評価した結果、In 過剰欠陥と残留不純物の複合欠陥に起因すると考えられる深い準位が観測された。MOVPE 結晶成長時の温度 (575℃から 600℃)、リン圧 ($[PH_3]/[TEI]$ が 170 以上) を最適化することにより、この準位は低減された。このように、評価結果に基づき、欠陥が少ない高品質の InP 結晶を成長することができた。

(3) pn ヘテロ接合界面に関する評価と高品質化・制御

InP 系レーザ (LD) 用結晶の活性層における pn ヘテロ接合界面に関する電氣的な評価を行い、その高品質化と制御に関する検討を行った。はじめに、ダブルヘテロ LD における pn ヘテロ接合界面について実験的に得られる $1/C^2$ 特性を、電流連続の式とポアソンの方程式を用いて計算解析した。まず、活性層のドーピング濃度が $10^{16}/\text{cm}^3$ 以下であること、p 型ドーパント Zn の拡散長が 10nm であることを見出した。さらに、n-InP クラッド層と p-InGaAsP 活性層の中間組成を有する n-InGaAsP ガイド層を pn ヘテロ接合界面に挿入することが、pn ヘテロ接合界面の高品質化に有効であることを示した。

次に、CV 測定により得られるキャリア分布から、p 型ドーブ MQW-LD における pn 接合位置を評価する新しい手法を提案した。この手法により n 型基板上 p 型ドーブ MQW-LD について評価した結果、n 型ドーピングガスのメモリー効果による pn 接合のシフトを見出した。さらに、この評価結果に基づき、pn 接合形成時のドーピング条件を最適化することにより、pn 接合位置を制御して LD 特性を向上できることを示した。

このように、InP 系レーザ用結晶の活性層における pn ヘテロ接合界面に関する電氣的評価結果に基づき、MOVPE 結晶成長条件 (混晶組成、ドーピング条件) を最適化して、その界面品質とともに LD 特性を改善できることがわかった。

(4) ドライエッチング加工表面の評価

埋込型 LD 特性の劣化要因となるメサ構造の側壁のドライエッチングダメージ層の電氣的評価法を提案した。この評価法を用いて、炭化水素系 (CH_4/H_2) RIE により作製されたメサ構造の側壁におけるダメージ層について評価した結果、RIE により (100) 面上だけでなくメサ側壁にも n 型のダメージ層が誘起されることを見出した。このメサ側壁におけるダメージ層は (100) 面におけるダメージ層と比べて浅く、無視できない程度の濃度で誘起されるものと考えられる。

さらに、このダメージ層が [i] 表面酸化層、[ii] In メタリック層、[iii] In 過剰欠陥あるいは n 型不純物による n 型高濃度層、[iv] 水素パッシベーションによる p 型低濃度層からなることがわかった。ここで、ダメージ層 [iv] には RIE により誘起された欠陥が残留しており、I-V 特性におけるドリフト現象 (順方向バイアス印加によるショットキー障壁高さの増加) を引き起こすことを見出した。また、ダメージ層 [iv] は再成長条件でのアニールによって回復できることもわかった。以上の

結果より、再成長前にダメージ層 [i] - [iii] を除去すれば、高品質の再成長界面が得られることを示した。

(5)埋込再成長界面の高品質化

CH₄/H₂-RIE プロセスを用いて作製される InP 系埋込型 (BH) レーザにおける、埋込み再成長界面の高品質化について検討した。はじめに新しい再成長前処理法 ACE (Ammonium sulfide Combined Etching) を提案した。ACE は NH₄S_x 処理と引き続き施される硫酸エッチングからなる処理法である。ACE によりメサ加工形状の変形を最低限に抑え、かつ、RIE プロセス後の再成長界面に混入する不純物を低減（とくに酸素や C は ACE により 1 桁以上低減）できることがわかった。これは NH₄S_x 処理による表面酸化状態の変化に起因するものと考えられる。

さらに、ACE を CH₄/H₂-RIE プロセスを用いた埋込型光デバイス作製プロセスに適用した結果、埋込型レーザ (Bi-BH-LD) および狭 (サブミクロン) ストライプ幅埋込型レーザの特性を改善できることがわかった。この結果は、ACE が狭ストライプ幅を有する偏波無依存埋込型光半導体増幅器の特性の向上に有効であることを示した。

(6)長波長帯レーザの最適構造設計

高品質化された結晶のポテンシャルを十分に引き出して半導体レーザの性能を向上させるために、計算解析により最適なレーザ構造の設計指針を検討した。はじめに、1.55 μm 帯 GRIN-SCH-SQW LD の低いしきい値化に関する検討を行った結果、(1) 井戸層厚は 6-10nm、(2)GRIN 層 InGaAsP 混晶組成は 2 次関数的に変化する InP から組成波長 1.1μm、(3)GRIN 層厚は片側で 300nm 以上、という設計指針が得られた。この設計指針に基づき実際に 1.55μm 帯 GRIN-SCH-SQW LD を作製した結果、98 A/cm² という低いしきい値電流密度 J_{th} が得られた。

次に、1.3μm 帯 LD の高温動作化について光出力の温度変動 ΔP_{out} の低減に着目して検討した結果、(1)材料に InGaAsP に代えて AlGaInAs 結晶を用いることによる特性温度 (T₀) の増加と光損失の温度依存性 (係数 γ) の低減、(2)素子構造に埋込型 (BH) 構造を適用することによるしきい値電流 (I_{th}) の低減という設計指針が得られた。この設計指針に基づき実際に 1.3μm 帯 AlGaInAs-BH-LD を作製した結果、実験的に 1.9dB という低い ΔP_{out} を得ることができた。この結果は、AlGaInAs 系埋込型 LD が高温動作化に有望であることを示した。

このように、本研究で用いた LD 構造の最適設計が、長波長帯レーザの特性向上のために有効であることがわかった。

以上のように、MOVPE 法により成長された InP 系レーザ用結晶の品質を評価、高品質化することにより、長波長帯 InP 系レーザの特性を向上させることができた。また、この結晶品質を十分に活かせるように最適なレーザ構造の設計指針を得ることもできた。