

外 94-1

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

有機金属気相成長 (MOCVD) 法による
光デバイスの高性能化と量産化に関する研究

申 請 者

三 橋 豊

Yutaka Mihashi

1994 年 4 月

有機金属気相成長 (Metalorganic Chemical Vapor Deposition; MOCVD) 法は、原理的にAlGaAs系、InGaAsP系、AlGaInP系等の幅広い化合物半導体結晶のエピタキシャル成長が可能であること、10nm以下の超薄層を制御性良く成長できる可能性を有していること、成長層の均一性に優れていることなどの特長を有しており、半導体レーザやGaAs-FET(Field Effect Transistor; 電界効果トランジスタ)等の化合物半導体デバイス用エピタキシャル成長技術として重要である。また、今後の高度情報化社会の進展に向け、AlGaAs系情報処理用半導体レーザやInGaAsP系光通信用半導体レーザの高性能化、量産化、および光・電子集積回路 (Opto-electronic Integrated Circuit; OEIC) 等の新しい多機能デバイスの実用化が不可欠であり、これらを実現する上でMOCVD技術の重要性は益々高まりつつある。

本研究はMOCVD法による光デバイス、特に半導体レーザおよびOEICの高性能化、量産化に関するものである。

本研究においては、上記背景のもとにMOCVD法の半導体レーザを代表とする光デバイスへの適用性、およびデバイス高性能化に対する有効性を明らかにするとともに、最終的に実用化、量産化を目指した研究を行なった。すなわち、良好なデバイス特性、および信頼性を実現するためのAlGaAs, InGaAsP系結晶のMOCVD成長技術 (装置、成長条件等) の改良、最適化を進め、デバイス適用を検討した。特に、半導体レーザの高性能化に必須の量子井戸および歪 (ひずみ) 量子井戸の形成を実現するための成長条件の最適化を進めた。また、デバイス量産技術として必須の基板の大口径化 (2インチ、3インチφ化) ならびに多数枚基板への同時成長にも比重を置き、成長層の均一性、再現性向上のための成長条件の最適化を行なった。その結果、デバイスの高性能化とともに特性の高均一化を実現し、MOCVD法を従来のLPE法に代わる量産性、再現性の高い化合物半導体用エピタキシャル成長技術として実用化することが出来た。

本論文は7章より成り、以下に各章の要点を示す。

第1章「序論」では化合物半導体結晶材料およびデバイスの分野におけるMOCVD法の歴史、研究動向についての概要を述べ、本研究の目的、動機、歴史的背景を明確にするとともに、本研究の概要を示す。

第2章「AlGaAs系MOCVD成長と半導体レーザへの適用」ではMOCVD法によるエピタキシャル成長の半導体レーザへの適用の第一ステップとし、縦型常圧MOCVD装置によるGaAs, AlGaAs系結晶の基本成長条件、ドーピング特性等を検討し、最適化を行なった。その成果を用いて2種類のバルク活性層型半

導体レーザを試作し、MOCVD法の光デバイスへの基本的な適用性を検討した。まず、0.89μm帯TJS型 (Transverse Junction Stripe; 横方ジャンクションストライプ) レーザへ適用し、従来の液相成長 (Liquid Phase Epitaxy; LPE) 法に比べ、均一性の高い素子特性 (発振波長、しきい値電流等) 分布と、同等の良好な素子寿命を確認した。また、光情報処理用半導体レーザへの適用を目的とし、成長層の表面形状が基板の凹凸を反映するMOCVD法の特徴を積極的に利用した独自の0.78μm帯SBA型 (Self-Aligned Bent Active-Layer; 自己整合活性層屈曲型) レーザを考案し、非点隔差のほとんどない良好な光学特性と低しきい値電流 (約25mA)、高効率発振を実現した。また、素子寿命向上のためのデバイス構造パラメーター (活性層~再成長界面距離 1μm以上) を明確にし、これにより実用レベルの寿命 (70℃、出力5mWで25万時間以上) を実現した。

第3章「AlGaAs系量子井戸の多数枚MOCVD成長と半導体レーザへの適用」ではMOCVD法によるAlGaAs系情報処理用0.78μm帯高出力レーザの量産化を目的とし、パレル型大容量MOCVD装置により量子井戸構造実現のためのガス流量、ガス切り換え方法等の結晶成長条件最適化を行なうとともに、デバイス適用を検討した。AlGaAs系結晶の多数枚、高均一成成長技術と超薄層成長技術を確立し、2インチウエハ、12枚の多数枚同時成長において、1nmオーダーの精密層厚制御を可能にした。この技術を多重量子井戸 (Multiple Quantum Well; MQW) のエピタキシャル成長へ適用し、0.78μm帯高出力レーザ (光出力50 mW) の活性層に採用した結果、良好なレーザ特性 (しきい値電流48mA、最高出力170mW) および均一な特性分布と良好な素子寿命 (60℃、50mWで1000時間以上の安定動作) を実現した。これにより、世界でも最大規模のAlGaAs系量子井戸レーザのエピタキシャルウエハ量産技術を確立した。

第4章「結晶混入酸素のAlGaAs系量子井戸レーザの特性に与える影響」では、第3章で検討したAlGaAs系MQWレーザのエピタキシャル成長層の高品質化、品質の安定化、歩留まり向上を目的に、結晶中への酸素混入がレーザ特性に与える影響について検討した。良好なレーザ特性を安定して得るためには、AlGaAsクラッド層中の酸素濃度を $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下に低減することが不可欠であることを、初めて定量的に示した。また結晶中への酸素汚染を簡便かつ確実に検知する方法として、時間分解フォトルミネッセンス法によるキャリア寿命測定が有効であることを明らかにした。

第5章「InGaAsP系MOCVD成長と半導体レーザへの適用」では横型減圧式MOCVD装置を用い、InGaAsP系結晶の成長条件の最適化、および量子井戸成長を目的とした超薄層成長を検討し、 $1.3\mu\text{m}$ 帯通信用半導体レーザへの適用を行なった。サセプタ回転機構を付加した横型反応炉の採用、急峻なガス切り替えを可能にするためのガス配管系の改良等により、大口径基板（3インチ ϕ ）上にInGaAsP系結晶の超薄層（10nm以下）を均一に成長できるMOCVD技術を確立した。この技術を用いてInGaAsP系歪（ひずみ）量子井戸の成長を検討し、高品質な歪量子井戸を実現するための歪量、層厚等の構造パラメータの許容範囲を明確にした。さらに、この技術により活性層に圧縮歪を導入した $1.3\mu\text{m}$ 帯歪量子井戸レーザを作製し、従来のバルク活性層型半導体レーザ（しきい値電流約7mA）に比べ大幅な低しきい値化（同3.4mA）を達成するとともに、良好な実用レベルの素子寿命（50℃、10mWで1700時間以上）を確認した。これらの成果から、高性能 $1.3\mu\text{m}$ 帯歪量子井戸レーザの量産化の見通しが得られた。

第6章「GaAs基板上InP系結晶のヘテロエピタキシャル成長による光・電子集積回路(OEIC)の検討」では、第5章で確立したInGaAsP系結晶成長技術を用いてGaAs基板上のInP系結晶のヘテロエピタキシャル成長（格子定数の異なる基板上へのエピタキシャル成長）を検討した。低温成長層、熱サイクルアニール、InGaAs/InP歪み超格子バッファ層の採用により、従来の3分の1の低転位化（転位密度 $3\times 10^7\text{cm}^{-2}$ ）と非発光センターの低減を実現できることを確認した。この技術を用いてGaAs基板上にInP系PD（Photo-diode; フォトダイオード）とGaAs系FETを集積した受信OEICを試作し、この結晶の組み合わせによるOEICとしては世界で初めて、加入者系光通信システムに適用可能な実用レベルの受信感度（-28.1 dBm）を実現した。また、OEIC中のPDの初期的な信頼性試験を実施し、従来のInP基板上のPDと同等の良好な素子寿命を確認した。この結果、GaAs基板上InP系結晶のヘテロエピタキシャル成長による受信OEICの実用化への基本的な見通しが得られた。

第7章「結論」では、以上の各章で得られた結果の要約を行なう。本研究において、MOCVD法によりAlGaAs系情報処理用半導体レーザ、InGaAsP系通信用半導体レーザの高性能化、特性の高均一化を実現するとともに、MOCVD法を従来のLPE法に代わる量産性の高い光デバイス用エピタキシャル技術として実用化することが出来た。さらに、OEICに代表される将来必須の多機能デバイスの実用化に対し、MOCVD法によるヘテロエピタキシャル成長が有効であることを明らかにした。