

審査の結果の要旨

論文提出者 二口 尚樹

本論文は、モノリシック光集積回路プロセス技術としての有機金属気相エピタキシー(MOVPE)選択成長と、その全光スイッチ回路応用について論じたものであり、7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。光集積回路の低コスト化、高機能化には、全体を単一の材料系統で作製するモノリシック集積化のアプローチが有効である。特に成長工程が1回で済む選択成長技術を用いた手法は、構成デバイス間のアライメントをとる必要が無く、プロセスも簡単化できるために極めて有望である。

第2章は「選択成長法とその応用」と題し、選択成長技術の概要、課題をまとめている。これまでも選択成長を用いた集積デバイスの研究は行われてきたが、ごく小規模なもので直線導波路しか必要としないものが中心であった。より多くのデバイスを集積化しようとする、個々のデバイス間を曲線導波路で結ばなければならないなど、規模の拡大とともに急激に作製が難しくなる。本論文では、MOVPE選択成長法において、大規模な光集積デバイスにも応用可能でかつ簡便な作製技術を確立することを目的に研究を行った。

第3章は「膜厚測定データからの組成の推定」と題し、InP基板上のInGaAsP選択成長領域の組成の推定問題を論じている。選択成長では絶縁膜マスクの幅によって、その近傍に成長される層の膜厚や組成が変化する。光集積デバイスの作製にあたって、この膜厚や組成を掌握することが非常に重要である。本論文では、選択成長層の膜厚を測定することで、成長速度のみならず組成をも見積る方法を考案している。マスク幅に比例して局所的な原料分圧が増大し、その部分の成長速度はその局所原料分圧に比例するという簡単な選択成長モデルを立て、測定により求めたマスク幅と成長速度との関係を再現するよう各係数の値を定めたところ、InPからInGaAsまで実験結果と計算結果とを良く一致させることが可能となった。成長速度とマスク幅の関係は、In成分とGa成分に分離することができるので、III族組成も見積ることが可能である。このモデルから計算される組成と、成長速度モデルから計算される膜厚を利用して、多重量子井戸(MQW)構造のバンドギャップ波長を予測し、フォトルミネッセンス測定結果と比較した。その結果、10nm以下の誤差で予測できることが確認された。

第4章は「選択成長量子井戸構造の最適化」と題し、能動領域や導波路コアとして働く量子井戸の実験的最適化について述べている。前章で、選択成長における成長速度と組成について予測ができるようになったが、その構造の光学利得がマスク幅によりどのように変化するかを予測するのは困難であった。そこで選択成長による能動領域の特性を実験的に最適化するため、分離閉じ込め(SCH)MQW構造を多数成長し、井戸層に用いる材料やその膜厚、および井戸層と障壁層の歪量を検討した。その結果、井戸層としてInGaAsPを用い、井戸層の膜厚はマスク幅50 μ mの領域において12nmとなるように、また歪量は同じマスク幅の領域において井戸層が+0.4%、障壁層が+0.1%となるようにする場合に、最も良好な特性の得られることがわかった。

第5章は「全光スイッチの作製と評価」と題し、能動素子と受動素子を集積化したデバイスの一例として、制御光のオン・オフにより信号光の進路を切り換える「全光スイッチ」を、前章までの成果を用いて作製することを試みている。ここでの能動素子は半導体光アンプ(SOA)であり、受動素子はマッハツェンダー干渉計である。能動領域のみを50 μ mまたは40 μ mの並行した一对のSiO₂マスクパターン間に選択成長で形成し、受動領域は平坦面に成長され、成長後にパターンニングプロセスで直線や曲線導波路が形成される。層構造は、4章の能動素子特性を重視したSCH-MQW構造が用いられた。選択成長後、サンプルのフォトルミネッセンス測定を行った結果、マスク幅が50 μ mの領域と平坦領域との間で、146nmの発光ピーク波長シフトが得られた。この値は、能動素子と受動素子とを集積化する上で十分な値と言える。発光半値全幅も、30meVから

40meVと良好な値が得られた。この成長基板を用いて、ウェットエッチングを用いるリッジストライプ型光スイッチ回路と、ドライエッチングを用いるハイメサ型光スイッチ回路の2通りの構造を作製した。チップのサイズは、リッジストライプ型が5.5mm×1.0mm、ハイメサ型が3.5mm×1.0mmと、ハイブリッド集積デバイスと比較して、大幅に小型化された。

作製したデバイスの構成要素である導波路、多モード干渉カップラおよびSOAの基本的な特性の測定評価を行った後、全光スイッチとしての動作試験を行った。SOAを吸収媒質として用いた実験では、制御光の強度を変化させることで π 位相シフトに相当する全光スイッチングが確認された。SOAを本来の利得媒質として働かせた場合の全光スイッチング静特性では、制御光のオン・オフにより消光比14dB以上の出力光切り替えが達成された。

第6章は「拡散方程式による成長速度・組成のシミュレーション」と題し、様々なマスクパターンに応用可能な、より一般的成長速度・組成の推定方法について論じている。まず拡散方程式に基づく成長速度・組成の推定モデルを構築し、次に選択成長ストライプに垂直な方向の膜厚プロファイルから、拡散方程式モデルに含まれるパラメータを抽出した。これを用いて3章の結果を計算により再現したところ、定性的には良い一致が得られた。次に同モデルを用いて隣接マスクの干渉効果を調べたところ、実験結果を良く説明する結論が得られた。この干渉効果を逆に利用して全光スイッチの小型化が可能な新たなマスクパターンを設計している。

第7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、モノリシック光集積回路のシンプルな製造技術としてMOVPE選択成長技術を取りあげ、成長膜厚や組成の事前予測を可能とするモデルを構築し、また能動領域量子井戸の性能を最大化する条件を実験的に求めるとともに、同技術を適用して半導体光アンプとマッハツェンダー干渉計をモノリシック集積化した光スイッチ集積回路を作製し全光スイッチングに成功したもので、光集積回路標準プロセスへの道を拓いた点で電子工学分野に貢献するところが少なくない。

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。