

論文の内容の要旨

論文題目 選択 MOVPE 成長を用いた光能動・受動素子の集積化に関する研究

氏名 二口 尚樹

(本文) ここ 1・2 年の内にブロードバンド化が急速に進んだ。これを牽引したのが、接続料金が世界最低水準で提供されている ADSL によるものである。このことは、インターネットユーザは常に高速通信への欲求を有し、その接続料金さえ安くなれば、容易に移行し得るということを如実に表したものと見える。今後も高速通信への欲求が続くならば、ADSL よりも高速な通信媒体、すなわち「光ファイバ」による通信へ移行していくだろうと思われるが、そこで問題になるのはやはりデバイスのコストに関してである。このように、デバイス作製の低コスト化技術というのは、それが広く普及するうえで重要な要素となる。高度な機能を持つ光集積デバイスについても同様である。低コストで作製する技術が今後重要度を増してくる。

集積化手法としては、集積デバイスを構成する個々のデバイスを別々の工程で作製し、最後に一体化する「ハイブリッド集積化」と、はじめから単一の基板上に集積デバイスを作製する「モノリシック集積化」がある。前者は、最後の集積化工程で精度良いアライメント技術を要するために、高コストなものになってしまう。一方、後者のうち成長工程が 1 回ですむ選択成長技術を用いたものは、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、光集積デバイスの低コスト作製技術として非常に有望である。

選択成長法とは、絶縁膜などで基板上を部分的に覆うことにより、その部分だけ成長を行わないようにすることで、その近傍の成長可能な領域の膜厚や組成を変化させて成長を行う技術である。この技術により、レーザや半導体光増幅器など、バンドギャップの小さい層を必要とする能動素子と、導波路やカプラなど、バンドギャップの大きな層を必要とする受動素子とを 1 回のステップで同時に成長することが可能になる。

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。ただ、半導体レーザと電界吸収型変調器との集積化といった例のように、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。これは、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がり導波路で結ばなければならないなど、規模に応じて急激に作製が難しくなるからである。そこで本研究は、有機金属気相エピタキシャル成長 (MOVPE) を用いた選択成長法を用いることにより、大規模な光集積デバイスにも応用可能な、より簡単な作製技術を確立することを目的とする。

選択成長においては、絶縁膜（ここでは SiO_2 膜）の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。光集積デバイスの設計では、この膜厚や組成を把握することは非常に重要である。これらを簡単な方法で見積もるために、選択成長層の膜厚を測定することで、成長速度だけでなく組成も見積もる方法を検討した。ここで、組成を見積もる際には、V族原料は、III族原料に対して十分多く MOVPE の反応炉に供給されるために、V族組成はマスク幅の影響を受けず一定であり、III族組成のみ変化するという仮定の下で行った。まず、InP 基板に格子整合するいくつかの組成 (InP, Q1.25[波長が $1.25\mu\text{m}$ となる InGaAsP], Q1.55[波長が $1.55\mu\text{m}$ となる InGaAsP], InGaAs) の層を選択成長し、その成長速度とマスク幅の関係を調べてみると、本研究で用いた成長条件ではほぼ直線と近似してもよいことが分かった。平坦面に成長したときの成長速度に対する選択成長時の成長速度を成長速度増大量と呼ぶことにすると、In の組成が多いほど、つまり InGaAs よりも InP のほうが成長速度増大量は大きくなる。このことは Ga よりも In のほうが、選択成長による拡散の効果を強く受けることを示している。

次に、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うまく表すように、モデルに関係する各係数の値を求めた。その係数を用いることにより、InP から InGaAs まで実験結果と測定結果とを非常に良く一致させることができた。

成長速度とマスク幅の関係は、その In 成分と Ga 成分を分離することができるので、III族組成も見積もることが可能と考え、組成を見積もる簡単な計算モデルを立てた。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、井戸層を Q1.55、障壁層を InP とする多重量子井戸 (MQW) 構造のバンドギャップを予測し、フォトルミネッセンス (PL) 測定結果と比較した。これにより、波長として 10nm 以下のずれで予測できることが確認できた。ただ、実際のデバイスに用いられる、光分離閉じ込め (SCH) 構造の圧縮歪み系 MQW 構造の場合は、この単純なモデルではうまく予想できなかった。これについては、今後の検討課題である。

このように、成長速度と条件によっては組成についても予測ができるようになったが、その構造の利得（あるいは損失）の大きさがマスク幅によりどのように変化するのかを予測するのは、今のところできていない。そこで、光集積デバイスに適した構造とはどのようなものか、選択成長条件を変えて検討してみた。光集積デバイス全体の特性は、能動素子の特性によるところが大きいと考えられるので、その観点から、能動素子（つまり選択成長を行う）領域の利得が大きくなるような条件で成長するべきである。SCH-MQW 構造を選択成長し、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み量を検討した結果、井戸層として InGaAsP を用い、井戸層の膜厚は、マスク幅 $50\mu\text{m}$ の領域において 12nm になるように、歪み量は井戸層が $+0.4\%$ 、障壁層が $+0.1\%$ （いずれもマスク幅 $50\mu\text{m}$ の領域において）に設定する場合に、より好ましい特性が得られることが分かった。

以上の結果を用いて、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 ON/OFF により信号光の進路を切り換える「全光スイッチ」を、選択成長をはじめとする簡単なプロセスで作製することを試みた。能動素子としては、半導体光アンプ (SOA) を用いた。この部分のみ選択成長で作製するため、 $50\mu\text{m}$ あるいは $40\mu\text{m}$ の対向した SiO_2 マスクパターンを形成し、選択成長を行った。SOA 以外の部分は平坦面に成長することになり、成長後にパターニングプロセス等を行うことで導波路を形成する。層構造は、上述の能動素子の特性を重視した SCH-MQW 構造を用いた。選択成長後のサンプルの、選択成長領域のストライプ方向の PL 測定を行った結果、マスク幅が $50\mu\text{m}$ の領域から平坦面の領域に至るまで、ピーク波長シフトが 146nm 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である。半値全幅 (FWHM) は、 30meV から 40meV と良好な値が得られた。また、ストライプと垂直方向のピーク波長については、中央付近 $3\mu\text{m}$ は均一で、導波路の形成には問題ないことが分かった。

この成長サンプルを用いて、ウェットエッチングプロセスを用いるリッジストライプ型光スイッチと、ドライエッチングプロセスを用いるハイメサ型光スイッチの 2 通り構造を作製した。ウェットエッチングを用いる方法は、従来とほぼ同様のプロセスで作製できるのに対し、ドライエッチングを用いる方法は、エッチングマスクに Ti 膜を用いるなど、多少複雑になっている。作製したデバイスのサイズは、リッジストライプ型が $5.5\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 、ハイメサ型が $3.5\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ と、ハイブリッド集積デバイスと比較して、大幅に小型化されている。

こうして作製したデバイスの、構成要素である導波路、MMI カプラおよび SOA の基本的な測定を行った後、全光スイッチとしての静特性および動特性の測定を行った。SOA を本来の利得媒質としてではなく、電流を注入せずに吸収媒質として用いた静特性では、制御光の強度を増加させることにより、Cross ポートからの出力光が弱まり、逆に Bar ポートからの出力光が増加する様子が観測できた。この変化は、制御光の強度を変化させることで位相として π シフトに相当していることも確認した。次に、SOA に電流注入することで本来の利得媒質として働かせることによってスイッチングさせたときの静特性の測定を行った。制御光を ON/OFF することにより、ひとつのポートからの出力光の消光比が 14dB 以上得られることが確認できた。

最後に、全光スイッチの動特性の測定を行った。制御光には、矩形波に変調された光を用いた。 250Mbps までの変調では出力光も追従して ON/OFF 動作をしていることが確認できたが、それより高速のスイッチングでは、出力光の波形はかなり崩れてしまった。これは、制御光パワー密度が足りないなど、測定系側の問題もあるため、今後さらなる検討を行い、選択成長により作製された全光スイッチの実力がどれくらいのものか、より詳細に検討する必要がある。

以上のように、選択成長をはじめとする簡単なプロセスで、全光スイッチという高度な処理を行う光集積デバイスを実現することができた。このことは、光集積デバイスを低コ

ストで作製する上で、選択成長法は有望な方法であることを良く表している。さらに、本研究で取り上げた構造の全光スイッチばかりではなく、光源を含めた集積デバイスや AWG などとの集積化も本研究の方法で容易に行うことができ、これらの成果が今後の光集積デバイスの作製に大いに役立つことを期待している。