

## 論文の内容の要旨

論文題目 Study on Monolithically Integrated Mach-Zehnder Interferometer

All-Optical Switches by Selective Area MOVPE

(選択 MOVPE によるモノリシック集積化マッハツェンダー干渉計全光スイッチに関する研究)

氏名 宋 学良

近年の光通信産業の急成長に伴い、光通信デバイスのモノリシック集積化はますます重要な課題になっている。しかし、これまでのモノリシック集積化技術においては、能動デバイスを作製するアクティブ領域と受動デバイスを作製するパッシブ領域の結晶成長が、少なくとも二回別々に行われる必要があり、歩留まりを大きく下げている。一方、誘電体膜で選択的に基板を覆うことで行われる選択 MOVPE 成長法は、バンドギャップの異なる結晶を作り出せることで知られている。我々はこれに注目して、アクティブ領域とパッシブ領域が一回の結晶成長で準備できることを提案してきた。本論文の目的は、この選択領域成長法を用いて、集積回路の一つである全光スイッチを作製し、評価することで、モノリシック集積化技術に選択 MOVPE 法を用いた新しいアプローチを確立することである。

本研究における選択 MOVPE では、従来の  $20\mu\text{m}$  幅の選択成長 (SAG) 領域設計を基礎に、デバイスの小型化の要求に応えるべく、さらに  $40\mu\text{m}$  と  $60\mu\text{m}$  の幅まで拡張し、1つの選択成長領域上により多くのアクティブ素子を作製できるように模索をした。従来の  $20\mu\text{m}$  幅の選択成長領域の設計では、領域の端の部分に大きな圧縮歪が加わり結晶性質が悪くなるため、領域の中心線に沿って  $2\sim 3\mu\text{m}$  の導波路を一本しか作製できなかった。しかし、選択成長領域幅を  $40\mu\text{m}$  まで拡張することで、端に近い両側の  $14\mu\text{m}$  を使わず、中心線対称に  $12\mu\text{m}$  間隔の導波路 2 本を通すことができる。この間隔は 2 本の光導波路の間に干渉が起こらないためには十分な間隔であり、モノリシック集積化の小型化の利点を最大限引き出している。また、 $12\mu\text{m}$  の幅の多モード干渉計 (MMI) カップラーを一本通すことができる設計になり、アクティブ MMI のモノリシック集積に初めて選択 MOVPE 法を適用できるようになった。さらに、選択成長領域を  $60\mu\text{m}$  に拡張することで、2本のアクティブ MMI を一つの選択成長領域に通すことができるようになっただけでなく、さらに多くのアクティブ素子を一つの選択成長領域上で組み合わせることが出来るようになった。これらの異なる選択成長領域幅に基づいた SAG パターンでは、その成長領域幅と両側の誘電体マスク幅との比で領域中心の PL ピークがほぼ決まり、最大ピークシフト値は  $192\text{nm}$  に達した。この PL ピークの差は、選択成長領域をアクティブデバイスに、またプレーナー領域をパッシブデバイスに用いることを十分保証できる値である。

一方、選択 MOVPE のアプリケーションとして選んだ対称マッハツェンダー干渉計型全

光スイッチは、1THz を超える超高速光信号を 100GHz 以下の低速電気回路で制御しなければならない矛盾を打開するための全光制御指向の流れの中で、特に実用に近いことで注目されてきた全光デバイスである。本研究における全光スイッチの設計は、選択 MOVPE の特徴を生かした設計になるよう工夫した。選択成長領域においては成長種が周りの誘電体膜マスクから余分に拡散してくるため、成長速度が平坦領域に比べて速い。我々はこの点に注目して、一括エッチングを採用し、同じエッチング深さであるにもかかわらず、平坦領域においては光モードの閉じ込めが強いハイメサ導波路構造を実現し、選択成長領域においては温度特性を良くするためのリッジ型光導波路構造にすることができた。平坦領域のパッシブデバイスは、直線導波路、曲がり導波路、MMI カップラーなどがあるが、MMI を除く導波路の幅は基本的には  $2\mu\text{m}$  とした。曲がり導波路の曲率半径は  $300\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、そしてスペースの余るところでは曲げ損失を抑えるために  $800\mu\text{m}$  にしたところもあった。 $3\text{dB}$  MMI カップラーの幅は  $12\mu\text{m}$  とし、最適長さは計算および作製のフィードバックにより  $200\mu\text{m}$  となった。アクティブ素子としての SOA (半導体光増幅器) は幅  $2\mu\text{m}$ 、長さ  $1000\mu\text{m}$  或いは  $1250\mu\text{m}$  にした。全光スイッチ全体の長さは、 $20\mu\text{m}$  の選択成長領域幅を採用した設計では  $3.5\text{mm}$  となるが、二つの SOA を同じ選択成長領域を通す  $40\mu\text{m}$  の選択成長領域幅の設計では  $3\text{mm}$  と短くなっている。全光スイッチの幅はテーパファイバーアレーとの入出力を考慮し、 $250\mu\text{m} \times 2$  の  $500\mu\text{m}$  となる。全光スイッチの作製プロセスも選択成長の特徴を考慮したものに改良した。SOA の電極コンタクトの為の穴あけ(頭だし)が最も歩留まりが悪いが、選択成長領域の平坦領域に近い部分が低くなることを考慮し、感光性ポリミド用フォトマスクパターンのその部分にテーパを加えることで、歩留まりを改善した。

作製された対称マッシュエンダー型全光スイッチに対して、まず片側 SOA への電流注入によるスイッチング動作を TE、TM 両モードにおいて確認した。TE モードにおいては、片側の SOA に  $80\text{mA}$  を注入したところで、動作波長  $1540\text{nm}$  で  $16\pi$  の位相シフトが見られたが、TM モードにおいてはその半分の  $8\pi$  に止まった。これは動作波長の  $1540\text{nm}$  が TE モードの ASE ピークの近くにあるため、電流注入によりゲイン変化を大きく受け、またクロニヒ・クラマーズ関係で屈折率の変化に大きな値をもたらした為である。動作波長を ASE ピークから遠ざかる長波の方に設定した場合、同じ理由で位相シフト効率 は下がる。これらの場合において、TE モードの電流スイッチングの消光比は最大  $25\text{dB}$  となり、MMI カップラーの良好な分波・合波特性が示されることとなった。

続いての全光制御の実験では、まず片側 SOA のパルス応答実験によって、SOA のキャリア回復時間を調べた。制御光パルス源となる MLFL (モードロックファイバーレーザー) を自作し、EDFA と LN 変調器を主とするループを組み合わせ、 $15\text{ps}$  以下の幅のパルスを出すことに成功した。全光スイッチの制御ポートに注入する前は光パルス列を別の EDFA で増幅するが、位相シフト  $\pi$  を引き起こすパルスエネルギーには最適値が存在し、キャリア回復時間はその時の値をとって調べた。制御光パルス波長が  $1538\text{nm}$ 、信号光が CW (連続)

光の 1535nm で、位相シフト $\pi$ が起こったときのキャリア回復時間は 250~300ps となった。この値は、他の研究グループから発表されたデータに遜色はなく、選択 MOVPE 法によるアクティブデバイスの高い質を示唆するものである。一方、信号光をそのまま CW 光に、制御光を LN 変調器において PRBS (擬似乱数列) 信号に変調した全光波長変換実験においては、制御光のデータ列が CW 光に乗せられ、その出力光がサンプリングオシロスコープにおいてクリアなアイ・パターンを示した。この場合の動作速度は 2.5Gbps で、パルス応答実験から得られた 250~300ps から考えると、片側 SOA のみを用いた全光制御では妥当な上限速度となっている。

対称マッハツェンダー干渉計型全光スイッチの優れた高速動作性については、本研究では両方の SOA に僅かな時間差 $\tau$ を設けてそれぞれに光パルスを注入することで確認した。先頭のパルスは片側の SOA において位相差 $\pi$ を引き起こし、そのキャリア回復時間は前述のとおり数百 ps となるが、他方の SOA に数 ps 或いは数十 ps の時間差 $\tau$ において光パルスを入射させると、キャリア回復過程が同じ関数を取るため、位相差はキャンセルされ 0 のままになり、キャリア回復時間に制限されない高速動作につながる。本研究では、商用の MLFL から出る 10GHz の光パルスを二分割し、両方の制御ポートに入射させ、信号入力ポートには CW 光を入射させて実験を行った。この実験においては、SOA において引き起こされた位相差は $\pi$ に達しなかったものの、両パルスの間隔を 50ps から 0ps に縮めることで、出力パルスの幅が相応的に狭くなる高速 Push-Pull 動作特有の現象が確認できた。次の位相差 $\pi$ が確認できた実験では、1セットパルスの Push-Pull 動作をパターンニング効果を引き起こさずに調べる為、繰り返し周波数を 660MHz まで落とし、パルス間隔は 28ps にした。その結果、出力パルスはデジタルサンプリングオシロスコープで観測した限り非常に鋭く、電子回路の立ち上がり、立ち下り時間を考慮に入れば、スイッチング窓がちょうど 28ps になり、Push-Pull 動作の超高速応答が本研究の光スイッチで確認されることになった。このパルス間隔は、10Gbps 以上の全光信号処理を可能にするものであり、全光波長変換、全光時分割逆多重、さらには全光 3R 再生が選択 MOVPE 法により作製された全光スイッチにおける動作可能性を示唆することになった。光パルス間隔を 28ps 以下に設定しても十分 Push-Pull 動作が可能であり、全光信号処理が数 ps の Push-Pull 動作で 100Gbps を超える見通しがついた。

以上のように、本論文では選択 MOVPE 法を光回路のモノリシック集積化への適用可能性を実証する為、対称マッハツェンダー干渉計型全光スイッチを設計し、選択 MOVPE 法で成長した基板を用いて素子を作製し、さらに光スイッチの電流スイッチング静特性及び全光高速動作特性を調べ、光スイッチとして 10Gbps 以上の動作が可能であることを実証した。この結果は、選択 MOVPE が将来の光通信における大規模なモノリシック集積化技術の一つのキーテクノロジーに成長することを示唆するものといえる。