

審査の結果の要旨

論文提出者 宋 学良

本論文は, "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)"と題し, 有機金属気相エピタキシー(MOVPE)選択成長に基づく全光スイッチ集積回路の設計, 試作および特性評価を行った結果について英文で纏めたもので, 6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. 近年の光通信の普及に伴って, 光通信デバイスのモノリシック集積回路化は益々重要な課題になっている. 本論文の目的は, 有機金属気相エピタキシー(MOVPE)における選択成長技術に依拠して, 全光スイッチ集積回路を実際に作製し, その動作特性を評価することを通じて, モノリシック光集積回路作製の新しいアプローチを確立することにある.

第2章は"Selective area MOVPE for monolithic integration"と題し, 光集積回路作製の基盤となる選択MOVPE技術自体について論じている. 本研究では従来の $20\mu\text{m}$ 幅の選択成長(SAG)領域設計を基礎に, チップサイズ小型化の要求に応えるべく, $40\mu\text{m}$ 幅, $60\mu\text{m}$ 幅まで選択成長領域を拡張し, 1つの領域上により多くの能動素子を作製できるように工夫している. 選択成長領域幅を $40\mu\text{m}$ まで拡張することで, 中心線対称に $12\mu\text{m}$ 間隔の導波路2本を通すことが可能となった. また, $12\mu\text{m}$ 幅の多モード干渉(MMI)カプラーの作製も可能で, 選択成長による能動MMIのモノリシック集積に道を拓いた. さらに選択成長領域を $60\mu\text{m}$ に拡張することで, より多くの能動素子を集積化できるようになるのみならず, 2本の能動MMIを一つの選択成長領域に並行に設けることも可能となった. これらのSAGパターンでは, 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発光波長がほぼ決まり, 最大波長シフト量は $1.55\mu\text{m}$ 帯で 192nm に達した. この値は, 選択成長領域を能動デバイスに, プレーナ成長領域を受動デバイスに用いることを十分可能とする値である.

第3章は"Design and fabrication of all-optical switch"と題し, 前章の選択成長技術を適用して作製する対称マッハツェンダー干渉計型全光スイッチ集積回路に関し, その設計と作製プロセスについて述べている. 本研究では選択MOVPEの特徴を生かした設計になるよう工夫されている. 導波路形成は一括エッチングで行うが, 同じエッチング深さであるにもかかわらずプレーナ領域では光モードの閉じ込めが強いハイメサ導波路構造とし, 一方選択成長領域においては非発光再結合のないリッジ導波路構造とすることに成功している. プレーナ領域の受動デバイスには, 直線導波路, 曲がり導波路, MMIカプラーなどがあり, 曲がり導波路の曲率半径は $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$ から選ばれている. 3dB MMIカプラーの幅は $12\mu\text{m}$, 最適長さは計算から $200\mu\text{m}$ と決めている. 選択成長領域に形成される能動素子は半導体光アンプ(SOA)であり, その幅は $2\mu\text{m}$, 長さは $1000\mu\text{m}$ または $1250\mu\text{m}$ としている. 全光スイッチの作製プロセス自体も, 選択成長の特徴を考慮したものに改良している. SOAの電極コンタクトホール形成が最も歩留りの悪いプロセスであるが, 選択成長領域のプレーナ領域に近い部分で導波路の高さが低くなることを勘案し, 感光性ポリイミド用フォトマスクパターンにテーパを設ける等の工夫で, 歩留りを改善した.

第4章は"Passive and active components characterization"と題し, 作製された対称マッハツェンダー型全光スイッチ回路の基本特性に関し述べている. 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両偏光で確認した. TEモードにおいて, 片側SOAへ 80mA を注入した際, 動作波長 1540nm で 16π もの位相シフトが観測された. 電流スイッチングの消光比は最大 25dB となり, MMIカプラーの良好な合分波特性が実証された. 続いて全光制御実験が行われ, まず片側SOAのパルス応答測定によってSOAのキャリア回復時間が見積もられた. 制御光パルス波長 1538nm ,

CW(連続)信号光波長1535nmで、位相シフト π を生じた際のキャリア回復時間は250~300psとなった。この値は他所に比べ遜色なく、選択MOVPE法による能動デバイスの高い質を示していると言える。一方、制御光をニオブ酸リチウム変調器によって擬似乱数データ列信号に変調する全光波長変換実験においては、制御光のデータ列がCW被制御光に転写され、クリアなアイパターンが観測された。この際の動作速度上限は2.5Gbpsで、上記の250~300psというキャリア回復時間と矛盾しない結果である。

第5章は"Switching performance"と題し、マッハツェンダー干渉計型全光スイッチ回路を差動モードで動作させることによる高速スイッチングに関し論じている。これによれば、キャリア回復時間に制限されない高速動作が可能となる。モードロックファイバーレーザから出射する10Gppsの光パルスを二分割し、両制御ポートに僅かな時間差で入射させる実験においては、両パルスの時間差を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プッシュプル動作特有の現象が確認できた。次に1対のパルスのプッシュプル動作をパターンニング効果の影響のない状態で調べるため、繰り返し周波数を660MHzまで落とし、パルス間隔を28psにした実験を行った結果、スイッチング窓がちょうど28psとなり、プッシュプル動作の超高速応答性が本研究で試作した光スイッチにおいてはじめて確認された。光パルス間隔を28ps以下に設定してもプッシュプル動作は可能であり、100Gbpsを超える全光信号処理へ向けて展望が開けた。

第6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、素子集積密度を向上する新たな手法を提案・実証するとともに、同技術を適用して対称マッハツェンダー干渉計型全光スイッチ集積回路を設計・試作し、電流制御および全光制御スイッチングの詳細な評価とプッシュプル駆動高速全光スイッチング動作の実証を行ったもので、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。