

学 位 論 文 題 名

石英系光導波路を用いた熱光学スイッチに関する研究

学位論文内容の要旨

近年のデータ通信やインターネットの急速な拡大により通信トラヒックの飛躍的な増加が予想されている。そのため通信回線の光化および大容量化が求められており、大容量伝送が可能な光波長多重 (WDM) 伝送システムの導入が進められている。現在 point to point 伝送の WDM システムが導入されているが、その次のフェーズとして光の切り替え機能を持つ光クロスコネクトシステムや光アド・ドロップ多重システムの開発が本格化している。そのため「空間分割型光スイッチ」の実用化が強く望まれており、更に波長多重数の拡大に伴い光スイッチの大規模化も重要な課題となっている。導波路型光スイッチは大規模化及び量産化が可能であり様々な導波路材料を用いて実現する試みがなされているが、シリコン (Si) 基板上に火炎加水分解堆積 (FHD) 法と LSI 加工技術とを組み合わせた石英系平面光波回路 (PLC) 技術によって作製された光スイッチは、低損失、光ファイバとの接続性が良い、耐候性や長期安定性に優れる、大規模化が可能という優れた特徴を有している。

本研究は上述の背景のもとに、石英系光導波路を用いて高機能な光スイッチや大規模で高性能な光スイッチを実現することを目的に行ったものであり、偏波ビームスプリッタ (PBS)・スイッチと 8x8 マトリックススイッチに関する一連の成果をまとめたものである。論文の内容を各章ごとに説明する。

第 2 章では、本研究で扱う光回路において最も基本となる 2x2 スwitch について、その作製方法、動作原理そして基本特性について述べている。本研究で用いる 2x2 スwitch は 2 個の 3dB 方向性結合器 (DC) とそれらを結ぶ 2 本の導波路アームからなるマッハツェンダ干渉計 (MZ) 構成を有しており、導波路アーム上には熱光学 (TO) 移相器として動作する薄膜ヒータが装荷されている。スイッチ機能は薄膜ヒータを駆動しその TO 効果によって導波路の実効的な光路長を変化させることで実現している。

第 3 章では、対称 MZ 回路において導波路アーム上の応力付与膜と TO 移相器を組み合わせることで光の切り替え機能に加え偏波の分離機能を併せ持った PBS スwitch が実現出来ることを実証した。この偏波の分離機能は、導波路に強い引っ張り応力を与えるアモルファスシリコン膜を導波路アーム上に装荷し、その長さをレーザートリミングによって調整することで実現した。作製した PBS スwitch の特性は、偏波消光比 18dB 以上、挿入損失 0.5dB、二つの偏波状態を切り替えるのに要したスイッチング時間は 1ms であり、高機能なスイッチが実現できることを示した。

第 4 章では、石英系 PLC 技術を用いて作製した初めての大規模スイッチである 8x8 マトリックススイッチについて、その設計方法と得られた特性について明らかにし

た。作製したマトリックススイッチは64個のスイッチ素子と損失バラツキを抑えるための48個のダミー素子から成り、ノンブロッキング構成を有している。スイッチ素子是对称MZ構成を有し、その形状や素子間の間隔は熱解析や実験結果によって最適化した。回路は直径3インチのSi基板上にチタンドープ石英導波路($\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$)で作製した。作製したスイッチの挿入損失は8dB~16.5dB(平均:11dB)、消光比は10.3dB~26.3dB(平均:17dB)、スイッチング時間は1.3msであった。消光比を劣化させた要因はDCの結合率や導波路アーム間の光路長差の作製誤差のためであった。本スイッチを搭載したモジュールを光マルチメディア切り替えシステム実験に使用しシステムを構築することが可能であることを確認したが、更に使用用途を広げるためには、損失、消光比の改善が必要であることも明らかにした。

第5章では、低損失化を中心とした8x8マトリックススイッチに対する各種改善策とその効果について明らかにした。主な改善策は低損失化を実現するために導波路材料の $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ からゲルマニウムドープ石英ガラス($\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$)への変更と導波路パラメータの最適化、そして消光比の改善のために全てのスイッチ素子にバイアス電力を常時印加出来るようにしたことである。作製した回路の挿入損失は3.2dB~4.4dB(平均:3.8dB)と劇的に改善し、低損失化の対策が極めて有効であったことが確認できた。平均スイッチング電力は約0.5Wであった。スイッチ素子の消光比は15.2dB~27.7dB(平均:22dB)と改善したが、一部の素子において消光比20dB以上を達成することが出来なかった。また、スイッチ素子の導波路アーム間に生じた光路長差の要因を考察した結果、主にフォトマスクのパターン幅のゆらぎ(変動)に起因していた可能性が高いことが判った。このスイッチチップを搭載したスイッチモジュールと、更にこのスイッチモジュールと駆動回路を搭載したスイッチボードを開発し、光インターモジュールコネクタ(IMC)実験と光マルチメディア切り替えシステム実験へ適用した。その結果、本スイッチが実用システムに十分耐えうる特性を有していることが確認できた。

第6章では新しい構造のスイッチ素子を提案し、従来のマトリックススイッチでは得ることが出来なかった高い消光比が実現出来ることを実証した。新しいスイッチ素子は半波長の光路長差のある非対称MZスイッチ部と導波路交差部から構成されている。これはDCの結合率が作製誤差によって変動しても消光比に影響が出ない構成である。1.31 μm で動作する8x8マトリックススイッチを作製し、消光比26dB~37dB(平均31dB)と従来では得られなかった高い消光比を実現した。平均挿入損失7.5dB、スイッチング時間は2msであった。また、挿入損失の波長依存性や基板温度依存性が従来型のマトリックススイッチよりも極めて小さいことも明らかにした。新しいスイッチチップと駆動回路を一体集積したスイッチモジュールを開発し、体積にして従来の10分の1以下と劇的な小型化を達成した。作製したモジュールは光IMC実験に使用し、このスイッチの優秀性を実証した。更にスイッチの適用範囲を広げることを目的として1.55 μm で動作する8x8マトリックススイッチを試作し、1.55 μm 動作においても低損失、高消光比が得られることを示した。

第7章において上記の成果をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 島 瑛 人

副 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 田 中 讓

学 位 論 文 題 名

石英系光導波路を用いた熱光学スイッチに関する研究

近年のデータ通信やインターネットの急速な拡大により通信トラヒックの飛躍的な増加が予想されている。そのため通信回線の光化および大容量化が求められており、現在、大容量伝送が可能な point to point 伝送の光波長多重システムが導入されている。一方、光路の切り替え機能や光アド・ドロップ機能を付加するため、空間分割型光スイッチおよびその大規模化が重要な開発課題となっている。

シリコン基板上に火炎加水分解堆積法と LSI 加工技術とを組み合わせた石英系平面光波回路技術によって作製された空間分割型光スイッチは、低損失、光ファイバとの接続性が良い、耐候性や長期安定性に優れる、量産化・大規模化が可能という優れた特徴を有している。

本研究は上述の背景のもとに、石英系平面光波回路を用いて高機能な熱光学光スイッチや大規模で高性能な熱光学光マトリックススイッチを実現することを目的に行ったものであり、偏波ビームスプリッタ (PBS)・スイッチと空間分割型光スイッチの一種である 8x8 マトリックススイッチに関する一連の成果をまとめたものである。

第 2 章では、本研究で扱う光回路において最も基本となる 2x2 スwitch について、その作製方法、動作原理そして基本特性について述べている。

第 3 章では、対称マッハツェンダ干渉計 (MZ) 回路において導波路アーム上の応力付与膜と熱光学移相器を組み合わせることで、光の切り替え機能と偏波の分離機能を併せ持った PBS スwitch が実現出来ることを実証している。この偏波の分離機能は、導波路に強い引っ張り応力を与えるアモルファスシリコン膜を導波路アーム上に装荷し、その長さをレーザートリミングによって調整することで実現している。

第 4 章では、石英系平面光波回路技術を用いて作製した初めての大規模スイッチである 8x8 マトリックススイッチについて、その設計方法と得られた特性について明らかにしている。作製したマトリックススイッチは 64 個のスイッチ素子と損失バラツキを抑えるための 48 個のダミー素子から成り、ノンブロッキング構成を有している。スイッチ回路は直径 3 インチの Si 基板上にチタンドープ石英導波路 ($\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$) で作製している。作製した回路

の挿入損失は 8dB~16.5dB (平均: 11dB), 消光比は 10.3dB~26.3dB (平均: 17dB), スイッチング時間は 1.3ms であった。消光比を劣化させた要因は方向性結合器の結合率や導波路アーム間の光路長差の作製誤差のためであることを明らかにしている。

第5章では, 各種改善策とその効果について明らかにしている。ドープ材を TiO_2 から GeO_2 へと変更し, 導波路パラメータを最適化することにより, 回路の挿入損失 3.2dB~4.4dB (平均: 3.8dB) と劇的な低損失化に成功している。また全ての熱光学移相器にバイアス電力を常時印加することにより, 消光比は 15.2dB~27.7dB (平均: 22dB) と改善した。平均スイッチング電力は約 0.5W であった。このスイッチチップを搭載したスイッチモジュール, 更にこのスイッチモジュールと駆動回路を搭載したスイッチボードを開発している。

第6章では, 半波長の光路長差のある非対称 MZ スwitch部と導波路交差部から構成される新しい構造のスイッチ素子を提案している。これは方向性結合器の結合率が作製誤差によって変動しても消光比に影響が出ない構成である。1.31 μm で動作する 8x8 マトリックススイッチを作製し, 消光比 26dB~37dB (平均 31dB) と従来では得られなかった高い消光比を実現している。平均挿入損失 7.5dB, スwitching時間 2ms であった。また, 挿入損失の波長依存性や基板温度依存性が従来型のマトリックススイッチよりも極めて小さいことも明らかにしている。新しいスイッチチップと駆動回路を一体集積したスイッチモジュールを開発し, 体積にして従来の 10 分の 1 以下の小型化を達成している。作製したモジュールは光インターモジュールコネクタ実験に使用し, このスイッチの優秀性を実証している。更にスイッチの適用範囲を広げることを目的として 1.55 μm で動作する 8x8 マトリックススイッチを試作し, 低損失, 高消光比が得られることを示している。

第7章において上記の成果をまとめている。

これを要するに, 著者は石英系光導波路を用いた熱光学マトリックススイッチを実現し, その実用性を初めて実証し, 電子情報工学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。