

学位論文題名

半導体光スイッチの偏波無依存化ならびに
スポットサイズ変換機能集積化に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、インターネットの爆発的普及による通信トラフィックの増大が顕著となり、ネットワークの大容量化・高速化が緊急の課題となっている。この要請に応えるため、光ファイバ通信技術とその波長多重技術によって、伝送路のスループットは数十テラビット/秒レベルまで飛躍的に増大した。その一方、ボトルネックとなっている交換(スイッチング)のスループットも大幅に増大させる必要性が高まってきた。そこで、伝送路のみならずスイッチングへも光技術を拡張しようという試みが精力的に行われている。様々な光スイッチング素子の中でも、半導体光スイッチは高速性や集積化による大規模化・機能拡張性に優れているため、スループットの増大化に適している。しかし、半導体光スイッチを適用する上で解決しなければならない大きな課題が二つある。一つ目の課題は、半導体光スイッチの特性が入射光の偏波によって大きく変化してしまう点である。光スイッチは光ファイバ伝送路間に配置されるため、光スイッチに入射する光の偏波状態は不規則に変化し一定ではない。したがって、光スイッチの特性を安定化させ、これを実用化するためには、光スイッチング特性の入射光の偏波状態による依存性を解消することが不可欠である。もう一つの課題は、光半導体スイッチ素子は光ファイバに比べそのスポットサイズが小さいため、これらを接続した時に大きな結合損失が生じてしまう点である。さらに不都合なことには、光スイッチは入出力ポートが多数存在するため、光ファイバを光スイッチに接続する時の光軸調整が困難であり、軸ずれに対する許容度も小さいため、作製歩留まりが極めて低くなることという製造上の大きな課題もある。したがって、半導体光スイッチの作製歩留まりを向上させ、工業的に成功させるためには、半導体光スイッチ素子のスポットサイズを拡大することによって、光ファイバとのスポットサイズ不整合を低減し、結合効率の改善と実装歩留まりの向上を図ることが極めて重要である。

本研究は、上記二つの課題を解決することを目的とした。まず、高速性に優れた電界効果型光スイッチと、波長多重技術に適しかつ規模や機能の拡張性にも優れている半導体増幅器(SOA)ゲート型光スイッチを取り上げ、これらの偏波依存性の低減化を行った。電界効果型光スイッチでは、量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)による屈折率変化(Δn)の偏波無依存化と同時に導波路構造による導波損失の偏波無依存化も考慮する必要がある。まず、QCSEによる Δn や吸収係数変化($\Delta \alpha$)とその偏波依存性は多重量子井戸(MQW)構造に大きく依存しているため、これらのMQW構造の組成や膜厚依存性を詳細に検討した。その結果に基づき、 Δn の増大のみならず、従来議論されなかった $\Delta \alpha$ の抑制も含めた実用的な光スイッチの設計指針を示した。 Δn の偏波無依存化は、従来用いられてきたMQW構造に伸張歪みを導入する方法と異なり、無歪み構造でもディチューニング($\Delta \lambda$)量と量子井戸層厚を

適切に選択することにより実現が可能であることを見出した。この方法によって、歪みによる結晶成長層の臨界膜厚などの制約をうけることなく素子設計が可能となり、素子設計の自由度を拡張することが可能となった。光導波路構造の偏波無依存化には、偏波依存性の小さいハイメサ構造を採用し、かつ光分岐回路に偏波依存性の小さな多モード干渉計（MMI）を採用した。このMQW構造と光導波路構造を用いて、Mach-Zehnder 干渉（MZI）型 2×2 光スイッチを作製し、電界効果型光スイッチとしては初めて駆動電圧の偏波無依存動作とともに導波路損失においても偏波無依存化が実現された。また、 $\Delta\alpha$ も偏波によらず十分に抑制され、実用上の問題点を解決した。さらに、上記偏波無依存MZI型 2×2 光スイッチを用いて、大きな光入力強度耐性を有する光ゲート素子としての応用を提案し、波長多重技術へ有用であることを示した。次に、SOA型ゲートスイッチにおける利得の偏波無依存化は、バルク活性層の断面サイズを方形に制御することによって、光閉じ込め係数の偏波依存性を解消する方法を採用した。この方法は、格子整合系バルク活性層を用いるため結晶成長の制御は容易である代わりに、サブミクロン精度のプロセス加工技術がポイントとなる。本研究では、近年飛躍的進捗を遂げたサブミクロン精度の微細ストライプ形成技術と埋め込み成長技術を駆使し、SOA型光ゲートスイッチの偏波無依存化を実現した。作製技術の精度・歩留まりについても議論し、本スイッチの大規模集積化の可能性を明らかにした。

次に、光スイッチの光結合特性改善および光ファイバ実装を簡易化するために、光スイッチ素子にスポットサイズ変換機能を集積化する方法について検討を行った。まず、半導体光導波路に「仮想ファイバ」の概念を導入した。すなわち、コアとクラッド層の屈折率差（ ΔN ）が光ファイバとほぼ同様となる半導体層を選択することによって、スポットサイズを光ファイバ程度に拡大させるものである。InP/InAlAs の多層膜を用いて ΔN を制御した半導体拡大スポットサイズ光導波路を製作し、光ファイバとの結合効率が従来に比べ大幅に改善されることを示した。次に、半導体素子のスポットサイズを拡大するため、この半導体拡大スポットサイズ光導波路とテーパ構造を集積することによって、半導体素子のスポットサイズを変換する機能を有する光導波路（SSC）を作製した。これによって、半導体素子の小さなスポットサイズを光ファイバと同程度に拡大させ、光ファイバとの結合特性を改善できることを明らかにした。次に、光スイッチへの集積に適したスポットサイズ変換構造の検討を行い、「リッジ装荷型」と「埋め込みバットジョイント（BJ）型」を提案し、それぞれの特徴について議論した。素子構造および作製プロセスとの親和性を考慮して、電界効果型光スイッチにはリッジ装荷型SSC、SOAゲート型光スイッチには埋め込みBJ型SSCを集積し、結合特性の改善を確認した。またこれによって、光ファイバとの光軸調整が容易となり、作製歩留まりの向上が期待できるようになった。さらに、光学レンズを用いず、半導体素子と光ファイバを直接接続する簡便な光ファイバ実装構造を採用することが可能となり、大幅な工程短縮およびコスト削減の効果が期待できることを示した。最後に、上述した偏波無依存化技術およびスポットサイズ変換技術を用いたSSC集積SOAゲート型光スイッチを作製した。SOA部の利得とSSC部の結合損失との偏波依存性のバランスをとることにより、偏波無依存化に対する作製寸法誤差許容量の緩和を実現し、多チャンネル化・大規模集積化の可能性を示した。また、本素子と石英系光導波路（PLC）とのハイブリッド集積によって、光波ネットワーク用の高機能光波回路や大規模空間光スイッチへの展開が可能であることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 武 笠 幸 一

副 査 教 授 三 島 瑛 人

副 査 教 授 大 宮 学

学 位 論 文 題 名

半導体光スイッチの偏波無依存化ならびに スポットサイズ変換機能集積化に関する研究

近年、インターネットの爆発的普及による通信トラヒックの増大が顕著となり、ネットワークの大容量化・高速化が緊急の課題となっている。この要請に応えるため、光ファイバ通信技術とその波長多重技術によって、伝送路のスループットは数十テラビット／秒レベルまで飛躍的に増大した。その一方、ボトルネックとなっている交換（スイッチング）のスループットも大幅に増大させる必要性が高まってきた。そこで、伝送路のみならずスイッチングへも光技術を拡張しようという試みが精力的に行われている。様々な光スイッチング素子の中でも、半導体光スイッチは高速性や集積化による大規模化・機能拡張性に優れているため、スループットの増大化に適している。しかし、半導体光スイッチを適用する上で解決しなければならない大きな課題が二つある。一つ目の課題は、半導体光スイッチの特性が入射光の偏波によって大きく変化してしまう点である。光スイッチは光ファイバ伝送路間に配置されるため、光スイッチに入射する光の偏波状態は不規則に変化し一定ではない。したがって、光スイッチの特性を安定化させ、これを実用化するためには、光スイッチング特性の入射光の偏波状態による依存性を解消することが不可欠である。もう一つの課題は、光半導体スイッチ素子は光ファイバに比べそのスポットサイズが小さいため、これらを接続した時に大きな結合損失が生じてしまう点である。さらに不都合なことには、光スイッチは入出力ポートが多数存在するため、光ファイバを光スイッチに接続する時の光軸調整が困難であり、軸ずれに対する許容度も小さいため、作製歩留まりが極めて低くなるという製造上の大きな課題もある。したがって、半導体光スイッチの作製歩留まりを向上させ、工業的に成功させるためには、半導体光スイッチ素子のスポットサイズを拡大することによって、光ファイバとのスポットサイズ不整合を低減し、結合効率の改善と実装歩留まりの向上を図ることが極めて重要である。

本研究は、上記二つの課題を解決することを目的とした。まず、高速性に優れた電界効果型光スイッチと、波長多重技術に適しかつ規模や機能の拡張性にも優れている半導体増幅器（SOA）ゲート型光スイッチを取り上げ、これらの偏波依存性の低減化を行った。電界効果型光スイッチでは、量子閉じ込めシュタルク効果（QCSE）による屈折率変化（ Δn ）の偏波無依存化と同時に導波路構造による導波損失の偏波無依存化も考慮する必要がある。まず、QCSEによる Δ

n や吸収係数変化($\Delta\alpha$)とその偏波依存性は多重量子井戸(MQW)構造に大きく依存しているため、これらのMQW構造の組成や膜厚依存性を詳細に検討した。その結果に基づき、 Δn の増大のみならず、従来議論されなかった $\Delta\alpha$ の抑制をも含めた実用的な光スイッチの設計指針を示した。 Δn の偏波無依存化は、従来用いられてきたMQW構造に伸張歪みを導入する方法と異なり、無歪み構造でもディチューニング($\Delta\lambda$)量と量子井戸層厚を適切に選択することにより実現が可能であることを見出した。この方法によって、歪みによる結晶成長層の臨界膜厚などの制約をうけることなく素子設計が可能となり、素子設計の自由度を拡張することが可能となった。光導波路構造の偏波無依存化には、偏波依存性の小さいハイメサ構造を採用し、かつ光分岐回路に偏波依存性の小さな多モード干渉計(MMI)を採用した。このMQW構造と光導波路構造を用いて、Mach-Zehnder干渉(MZI)型 2×2 光スイッチを作製し、電界効果型光スイッチとしては初めて駆動電圧の偏波無依存動作とともに導波路損失においても偏波無依存化が実現された。また、 $\Delta\alpha$ も偏波によらず十分に抑制され、実用上の問題点を解決した。さらに、上記偏波無依存MZI型 2×2 光スイッチを用いて、大きな光入力強度耐性を有する光ゲート素子としての応用を提案し、波長多重技術へ有用であることを示した。次に、SOA型ゲートスイッチにおける利得の偏波無依存化は、バルク活性層の断面サイズを方形に制御することによって、光閉じ込め係数の偏波依存性を解消する方法を採用した。この方法は、格子整合系バルク活性層を用いるため結晶成長の制御は容易である代わりに、サブミクロン精度のプロセス加工技術がポイントとなる。本研究では、近年飛躍的進歩を遂げたサブミクロン精度の微細ストライプ形成技術と埋め込み成長技術を駆使し、SOA型光ゲートスイッチの偏波無依存化を実現した。作製技術の精度・歩留まりについても議論し、本スイッチの大規模集積化の可能性を明らかにした。

次に、光スイッチの光結合特性改善および光ファイバ実装を簡易化するために、光スイッチ素子にスポットサイズ変換機能を集積化する方法について検討を行った。まず、半導体光導波路に「仮想ファイバ」の概念を導入した。すなわち、コアとクラッド層の屈折率差(ΔN)が光ファイバとほぼ同様となる半導体層を選択することによって、スポットサイズを光ファイバ程度に拡大させるものである。InP/InAlAsの多層膜を用いて ΔN を制御した半導体拡大スポットサイズ光導波路を製作し、光ファイバとの結合効率が従来に比べ大幅に改善されることを示した。次に、半導体素子のスポットサイズを拡大するため、この半導体拡大スポットサイズ光導波路とテーパ構造を集積することによって、半導体素子のスポットサイズを変換する機能を有する光導波路(SSC)を作製した。これによって、半導体素子の小さなスポットサイズを光ファイバと同程度に拡大させ、光ファイバとの結合特性を改善できることを明らかにした。次に、光スイッチへの集積に適したスポットサイズ変換構造の検討を行い、「リッジ装荷型」と「埋め込みバットジョイント(BJ)型」を提案し、それぞれの特徴について議論した。素子構造および作製プロセスとの親和性を考慮して、電界効果型光スイッチにはリッジ装荷型SSC、SOAゲート型光スイッチには埋め込みBJ型SSCを集積し、結合特性の改善を確認した。またこれによって、光ファイバとの光軸調整が容易となり、作製歩留まりの向上が期待できるようになった。さらに、光学レンズを用いず、半導体素子と光ファイバを直接接続する簡便な光ファイバ実装構造を採用することが可能となり、大幅な工程短縮およびコスト削減の効果が期待できることを示した。最後に、上述した偏波無依存化技術およびスポットサイズ変換技術を用いたSSC集積SOAゲート型光スイッチを作製した。SOA部の利得とSSC部の結合損失との偏波依存性のバランスをとることにより、偏波無依存化に対する作製寸法誤差許容量の緩和を実現し、多チャンネル化・大規模集積化の可能性を示した。また、本素子と石英系光導波路(PLC)とのハイブリッド集積によって、光波ネットワーク用の高機能光波回路や大規模空間光スイッチへの展開が可能であること

を示した。

これを要するに、著者は光ファイバー通信とその波長多重化に重要な半導体光スイッチの基幹的な課題を解決し、情報通信の高速化における基盤技術を築くなど、光エレクトロニクス分野に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。