

学 位 論 文 題 名

フォトリフラクティブ結晶における
回折格子の制御と光スイッチへの応用

学位論文内容の要旨

最近、フォトリフラクティブ効果についての研究が盛んに行われている。フォトリフラクティブ効果は、空間的に一様でない光の照射により媒質内部の電荷分布が変化し、これにより生じた空間電界によって屈折率が変化する現象である。屈折率変調の深さは入射光の強度に依存せず、光強度分布のコントラストのみに依存するため、 BaTiO_3 や KNbO_3 などの一部のフォトリフラクティブ結晶では数 W/cm^2 程度の光でも大きな屈折率変調が得られ、効率の良い回折格子となりうる。このフォトリフラクティブ結晶中の回折格子の空間分布及び深さを、入射する光の位相または偏光を変化させることにより制御することができれば、光を光で制御する、つまり光・光制御のための能動素子として利用することができる。一方フォトリフラクティブ媒質中に誘起された回折格子は揮発性であり、一度回折格子が形成された後に新たな光波が入射された場合、その回折格子が消去されてしまうという問題がある。この問題を解決する手法として、電界定着、熱定着、2光子書き込みなどの定着技術についての研究が盛んに行われているが、これらの定着技術を用いた場合、回折格子の書き換えが困難になってしまうという新たな問題が発生する。したがって、書き換えが必要な光スイッチなどのデバイスへの応用を考えた場合、定着技術を用いずに回折格子を維持する機能の実現が望まれる。

そこで本論文では光による光制御という観点から、フォトリフラクティブ結晶における回折格子の空間分布や深さを純光学的に制御する方法と、その光スイッチへの応用について検討を行った。まず、入射光の位相を変化させることによりフォトリフラクティブ結晶中の回折格子の空間分布を制御する方法について詳細に検討を行った。この方法を実現するために、直交する偏光を用いた2組の2波混合を互いの回折格子を共有するように多重化させた光学系を新たに提案し、回折格子の形成に大きく寄与する2光波の位相差を変化させることにより、もう一方の2光波間のエネルギー移動を任意に制御できることを明らかにした。次に、入射光の偏光を回転させることにより回折格子の深さを制御する方法について詳細に検討を行った。特に強い偏光依存性を示す相互励起型位相共役鏡に着目し、入射光の偏光を回転させることにより相互励起型位相共役鏡における位相共役光発生を制御できることを明らかにした。さらに、共振器構造を用いて、回折光の一部を再度結晶に入射させ、回折格子を維持する手法を新たに提案した。理論解析及び実験結果より、本手法を適用することにより格段に回折格子の維持時間が延長されることを明らかにした。最後にこれらの制御方法を用いた、

1×2の偏向光スイッチ, 2×2の Bypass-Exchange スイッチ及び接続の自己保持可能な光インターコネクションを提案した. これらの応用に適した光波の入射強度, 結合強度及び共振器におけるフィードバック率などの諸条件について理論解析による詳細な検討及び実験による検証を行った.

以下に本論文の概要を示す.

第1章では, 本論文の背景, 目的及び構成について述べた.

第2章では, フォトリフラクティブ結晶に光が照射された際, 屈折率が変化する過程を, バンド輸送モデルを用いて説明した.

第3章では, 多重2波混合において, 入射する光波の位相を変調させることにより, 結晶中の回折格子の空間分布を変化させ, 2光波間のエネルギー移動を制御する方法について検討を行った. まず偏光が直交した2組の2波混合が1つの回折格子を共有しうる各光波の入射角度条件を求めた. 次に, 多重2波混合において, 位相変化量に対する各光波の出力強度を計算した. その結果より, 2光波のエネルギー移動をもっとも効率よく制御するための結合強度及び入射強度条件を明らかにした. また, 多重2波混合の実験を行い, 光波の位相を変化させた場合の各光波の出力強度を測定し, 理論解析の妥当性を示した. 最後に本手法による光制御の応用例として, 2つの出力ポートのうちどちらか一方または任意の強度比で分岐して出力することができる1×2の偏向型光スイッチを提案した.

第4章では, 入射光の偏光角に対するフォトリフラクティブ結晶の感受率の依存性に着目し, 偏光を回転させることにより相互励起型位相共役鏡における位相共役光発生を制御する方法について検討を行った. まず, 相互励起型位相共役鏡について, 結合強度及び入射光の強度比に対する位相共役変換効率を解析した. さらに, 2つの入射光のうち, どちらか一方の偏光を回転させた場合について, その偏光回転角に対する位相共役変換効率を解析し, 位相共役光発生の制御に必要な偏光回転角閾値を明らかにした. さらに, 本手法を適用した2×2の Bypass-Exchange スイッチを提案し, その動作実験を行った. ここで, 入射光の偏光を理論解析で求めた偏光回転角閾値まで回転させることにより, 接続を切り替えることができることを示した.

第5章では, ビームスプリッタとフォトリフラクティブ結晶により構成される光共振器を用いて回折格子を維持する手法と, その手法を適用した接続の自己保持可能な光インターコネクションを提案した. 共振器内のフィードバック率を決定するビームスプリッタの反射率に対する出力特性を解析することにより, 回折格子の維持に必要な結合強度, ビームスプリッタの反射率などの条件を明らかにした. また本手法を適用した3×3の光インターコネクションの実験を行い, 共振構造を用いない場合と比べ, 格段に維持時間が延長されることを明らかにした. 最後に, さらなる光学系の簡易化及び小型化を目的とし, ビームスプリッタの代わりに結晶端面を用いる光学系を提案し, 実験によりビームスプリッタを用いた場合と同等の効果が得られることを示した.

第6章では, 本研究で得られた成果の総括を行った.

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	山本	強
副査	助教授	岡本	淳

学位論文題名

フォトリフラクティブ結晶における 回折格子の制御と光スイッチへの応用

近年、LSIの高集積・高性能化に伴い、装置間や装置内の信号配線の高速化が性能向上のボトルネックとなっている。この配線ボトルネックを改善する技術として、光による配線、光インターコネクション技術の進歩が期待されている。その構成として、送信されてきた光信号を一旦電気信号に戻して処理し、再び光信号に変換し次段に送り出す中継方法と、光信号を光のまま中継する方法がある。前者の方法では、光-電気変換に伴う伝送遅延や発熱が問題となるため、光のまま中継する後者の方法が有利である。これまでに電磁石による機械的稼働部を利用した光スイッチや液晶などの変調素子を用いた光スイッチ、および、導波路型光スイッチなどが実用化されている。一方で、光非線形効果を用いた光により制御可能な光スイッチについても様々な検討が行われており、全光ネットワークの実現が期待されている。

現在、光非線形効果の一つであるフォトリフラクティブ効果に関する研究が盛んに行われている。フォトリフラクティブ効果とは、光の照射により媒質内部の電荷分布が変化し、これにより生じた空間電界によって局所的に屈折率が変化する現象である。比較的低強度の光の照射により高い屈折率変調が得られるため、低電力で動作する光制御による光デバイスへの応用が期待される。ここで、フォトリフラクティブ媒質を光・光制御のための能動素子として用いるためには、結晶中に誘起される回折格子を適切に制御する手法の確立が重要である。また、フォトリフラクティブ媒質中に誘起された回折格子は揮発性であり、一度回折格子が形成された後に新たな光波が入射された場合、その回折格子が消去されてしまうという問題についても検討する必要がある。これまでに電界定着や熱定着などの定着技術についての研究が行われているが、これらの定着技術を用いた場合、回折格子の書き換えが困難になるという新たな問題が発生する。したがって、書き換えが必要な光スイッチなどの応用を考えた場合、定着技術を用いずに回折格子を維持する機能の実現が望まれている。

そのような状況下で、本論文では、フォトリフラクティブ結晶における回折格子の空間分布や深さを純光学的に制御する方法と、その光スイッチへの応用を提案し、これらの応用に適した光波の入射強度及び結合強度などの諸条件について理論解析及び実験による詳細な検討を行った結果をまとめている。

以下に本論文の概要を示す。

第1章では研究の背景、目的及び構成について述べている。

第2章では、フォトリフラクティブ結晶に光が照射された際、屈折率が変化する過程を、バンド輸送モデルを用いて説明している。

第3章では、直交する偏光を用いた2組の2波混合を互いの回折格子を共有するように多重化させた光学系を新たに提案し、回折格子の形成に大きく寄与する2光波の位相差を変化させることにより、もう一方の2光波間のエネルギー移動を制御する方法について詳細に検討を行っている。ここでは、最も効率よく制御するための結合強度及び入射強度条件を求め、また実験により理論解析の妥当性を示している。最後に、2つの出力ポートのうちどちらか一方または任意の強度比で分岐して出力する1×2の偏向型光スイッチを提案している。

第4章では、入射光の偏光を回転させることにより回折格子の深さを制御する方法について詳細に検討を行っている。特に強い偏光依存性を示す相互励起型位相共役鏡に着目し、入射光の偏光を回転させることにより位相共役光発生を制御できることを明らかにしている。更に本手法を適用した2×2のBypass-Exchangeスイッチを提案し、その動作実験を行っている。

第5章では、ビームスプリッタや結晶端面を利用した共振器構造を用いて、回折光の一部を再度結晶に入射させ、回折格子を維持する手法を新たに提案している。まず共振器内のフィードバック率を決定するビームスプリッタの反射率に対する出力特性を解析し、回折格子の維持に必要な結合強度、ビームスプリッタの反射率などの条件を明らかにしている。更に光インターコネクションへの応用を提案し、3×3のインターコネクションの実験を行っている。その結果より、共振構造を用いない場合と比べ、格段に接続の維持時間が延長されることを明らかにしている。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、筆者は、光による光制御という観点から、フォトリフラクティブ結晶における回折格子の空間分布や深さを純光学的に制御する方法を提案し、その光スイッチへの応用に関する有益な知見を得ており、光情報通信工学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、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。