

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### 擬似位相整合ニオブ酸リチウム光導波路の縦続二次非線形光学効果 を用いた全光超高速ゲートスイッチの研究

氏名 福地 裕

現在、本格的な IT 時代の到来により、そのバックボーンを形成する光ネットワークに数 Tbit/s の超大容量性が要求されている。このような超大容量伝送システムを実現する手段として、光領域での時間分割多重(OTDM)技術、および波長分割多重(WDM)技術がある。特に OTDM 技術を駆使した光ネットワークは、単一の搬送波を用いるため、システム構成が WDM に比べて簡易であり、現在活発に研究が進められている。

このようなテラビット級の超高速 OTDM 伝送システムでは、信号処理を電気的に行なうのは極めて困難であり、電気を介さない全光学的信号処理技術の開発が重要である。必要となる主な全光信号処理機能は、送信端での時間多重(MUX)、および受信端での時間多重分離(DEMUX)である。これらの機能の中で、MUX は比較的容易に実現できる。しかし、DEMUX は、ゲートスイッチに用いられる光ファイバや半導体光増幅器等の三次非線形光学材料の開発が未熟なため、現在、高速化および高効率化が制限されている。

近年これらの困難を克服するものとして、擬似位相整合(QPM)ニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)デバイスの縦続二次非線形光学効果が注目されている。QPM デバイスは、二次非線形光学係数の符号を周期的に反転させることで位相整合をとる素子であり、位相整合波長を任意に制御できるという利点を持つ。さらに、他のデバイスと比較して、実効的三次非線形性も大変大きく、超高速かつ高効率のスイッチング動作が期待される。

本研究では、QPM-LiNbO<sub>3</sub> デバイスにおける第二高調波発生(SHG)と差周波混合(DFM)の縦続二次非線形光学効果を用いた全光超高速ゲートスイッチを提案し、超高速かつ高効率動作を実現した。以下に概要を示す。

QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub> デバイスを全光超高速ゲートスイッチとして用いる場合、入力ゲートパルスの中心波長に QPM 波長を合わせる。これによって、まず入力ゲートパルスの第二高調波(SH)が発生し、SH ゲートパルスと入力信号パルス間の DFM により、波長変換

された信号パルスがスイッチされ、ゲートスイッチングが達成される。例えば、QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>スイッチを DEMUX に用いる場合には、伝送されたデータ信号から再生されたクロックパルスがゲートパルスとして用いられる。本研究では、まず理論および実験により、QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>スイッチの詳細なスイッチング特性を解明した。それによると、本スイッチで扱えるビットレートは、スイッチのクロストークによって制限される。このクロストークは、ゲートパルスとその SH 間の大きな群速度不整合(GVM)により、SH ゲートパルスに遅れが生じ、隣接する後方ビットの信号パルスをスイッチすることによって生じる。ビット間隔を狭めると、クロストーク量もそれに応じて増加するので、本スイッチで扱えるビットレートはクロストークによって制限される。本研究では、数値解析および実験により、この現象を確認した。特に、実験によりスイッチのクロストークの観測に初めて成功したことは重要である。また、入力ゲートパルスをスイッチする信号パルスの前方へ時間的にシフトさせることで、このウォークオフを補償すれば、扱えるビットレートを大幅に改善できることも予見した。実際に、20mm 長導波路型 QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>スイッチに対して、提案したウォークオフ補償法を適用した。この結果、6.25ps 間隔のツイン信号パルスの一つを、クロストーク無しでスイッチすることに初めて成功した。これは、本スイッチが、160Gbps 超高速 OTDM 信号をクロストーク無しでスイッチできることを意味している。

一方、QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>デバイスを OTDM 伝送システム等における全光超高速ゲートスイッチとして用いる時、クロストークが問題となるのは、スイッチされた信号にパワーペナルティが生じるからである。そこで次に、クロストークとこれによって生じるパワーペナルティの関係を理論と実験の両方から明らかにした。それによると、クロストークを-17dB 以下に抑えることで、これによって生じるパワーペナルティを 1dB 以下に抑えることができる。この結果は、QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>デバイスが、OTDM 伝送システム等における全光超高速ゲートスイッチに十分適用可能であることを示唆している。また、本スイッチの性能を最大限引き出すためには、最適化を行う必要がある。そこで、解明した詳細なスイッチング特性およびクロストークとこれによって生じるパワーペナルティの関係を下に、本スイッチの最適化法を新たに提案した。この最適化法は、初期条件として、システムで扱うビットレートと、スイッチされた信号のパワーペナルティの許容値を定め、この条件下でデバイス長つまり効率を最大化するものである。数値解析では、パワーペナルティの許容値を 1dB とすると、最適化により扱うビットレートとデバイス長の積を約 4Gbps-m まで高められ得ることが示され、QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>全光ゲートスイッチの超高速かつ高効率動作の可能性が示された。さらに、実際に 30mm 長導波路型 QPM-SHG/DFM-LiNbO<sub>3</sub>スイッチの最適動作を実現し、160Gbps の超高速 OTDM 信号から、10Gbps のタイムスロットをエラーフリーで時間多重分離することに成功した。

以上が本研究の成果であり、QPM-LiNbO<sub>3</sub>光導波路における SHG と DFM の縦続二次非線形光学効果を用いた全光超高速ゲートスイッチの実用化に貢献した。