

前回はフォトニックネットワークの波長変換機能の必要性についてご紹介しました。フォトニックネットワークにおける従来の波長変換では、到着する光信号を一度電気信号に変換し、所望の波長で送信する光・電気・光変換による方法がとられています。しかしこの方法では、ビットレート・光変復調方式の変更に伴い、回路構成の変更が必要となります。そこで、ビットレート・変復調方式に無依存に波長変換が可能で、複数波長の一括波長変換も可能な光パラメトリック波長変換が注目されています。

光パラメトリック波長変換にはいくつかの方法がありますが、今回は擬位相整合ニオブ酸リチウム(QPM-LN: quasi-phase-matched lithium niobate)光導波路¹⁻³⁾を用いた波長変換についてご紹介し

1. QPM-LN を用いた波長変換の原理

QPM-LN を用いた波長変換は、二次非線形光学効果(第二次高調波発生(SHG), 和周波発生(SFG), 差周波発生(DFG))をもとに行われます。図1にその動作例を示します。導波路に信号光(光周波数 f_s)と励起光(光周波数 f_p)を合波し入射させます。QPM光周波数 f_0 と f_p を一致させると、SHGにより $2f_0$ に励起光が変換され、この変換された励起光と信号光とのDFGにより、 $f'_s = 2f_0 - f_s$ に所望の変換光が発生します。

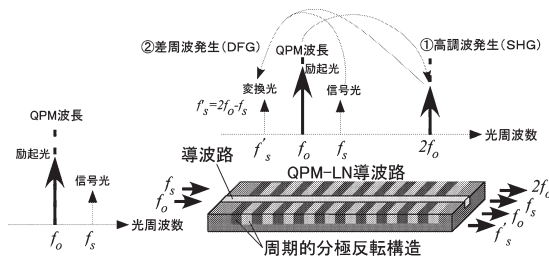


図1 SHG-DFGによる波長変換。

2. パラメトリック波長変換のフォトニックネットワークへの応用

図1の原理を用いて、WDM 伝送信号の複数波長を一括で異なる伝送帯域に変換することが可能になります。多波長一括波長変換機能は、例えば図2のように最適な伝送帯域(例えばC帯: 1530~1565 nm, L帯: 1565~1625 nm)を切り替える際に有効になります。図3にQPM-LNでの一括波長変換の様子を示します。一括波長変換を行う上で、帯域利用効率を向上するために、ガードバンド(励起光に最近傍の信号光と励起光間の周波数差)の狭窄化と信号間のクロストーク低減が課題となります。SHG-DFG変換過程では厳密な位相整合が要求されるため、 $\chi^{(3)}$ 媒質である光ファイバーの四光波混合による一括波長変換と比較して隣接チャンネル間のクロストークが発生しにくく、ガードバンドの狭窄化を実現することができます。これまでに一括波長変換においては、QPM-LNによる波長変換器1台で多重数100chを超えるWDM光の一括波長変換

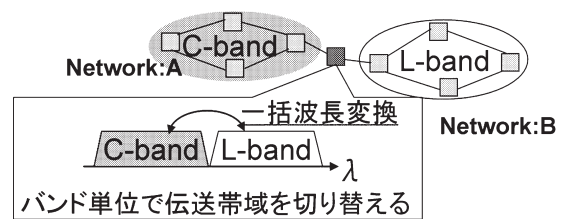


図2 バンド間一括波長変換。

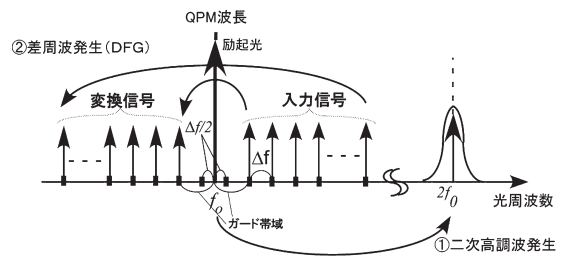


図3 QPM-LN 導波路での一括波長変換。

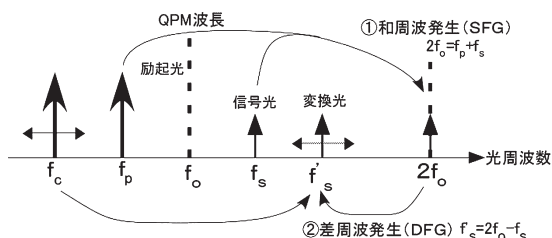


図4 任意波長変換の原理.

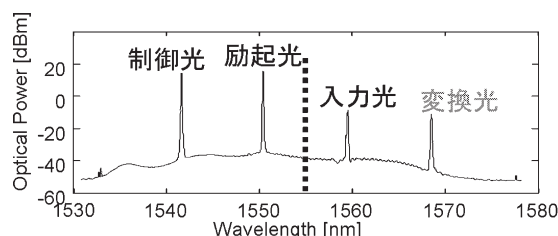


図5 任意波長変換のスペクトル.

が可能であることが確認されています⁴⁾。

フォトニックネットワークでの波長変換機能として、変換先の波長を任意に変えることが求められます。これは、2つの励起光を用い、うち1つの励起光周波数を変えることで所望変換光の光周波数を任意に変えることができます。図4にその様子を示します。まず、 f_p と f_s のSFGにより、信号成分を $2f_o$ へ変換します。そしてもうひとつの励起光（制御光：光周波数 f_c ）と $2f_o$ の信号とのDFGにより所望の変換光 $f_o = f_p + f_s - f_c$ を得ます。制御光 f_c を変えることにより位相整合条件を満足させ、信号光周波数を任意の光周波数へ変換することができます。理論計算より、片側35 nm（両側：70 nm）の範囲で信号波長を任意に変換することが可能であることが示されています⁵⁾。4個のQPM波長を有するQPM-LN導波路⁶⁾を用い、同時に4波長のWDM光の一括任意波長変換についても原理確認がなされています⁷⁾。

フォトニックネットワークで求められる波長変換機能（複数波長一括波長変換、任意波長変換）について紹介しました。実際のシステムへの導入に向け、ネットワーク実証実験⁸⁾や、用いる光非線形媒質の変換効率の向上⁹⁾、偏波無依存化¹⁰⁾等について検討されており、今後の進展が期待されます。

(NTT 未来ねっと研究所 山浦 純)

文 献

- 1) M. H. Chou, *et al.*, "1.5 μm Band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1999) 653-655.
- 2) 梶原敏明ほか：“周期状分極反転を用いた波長変換デバイスと光通信応用”，*レーザー研究*, **32** (2004) 154-159.
- 3) 西田好毅ほか：“擬似位相整合 LiNbO₃ 素子による波長変換”，*レーザー研究*, **32** (2004) 512-517.
- 4) J. Yamawaku, *et al.*: "Simultaneous 25 GHz-spaced DWDM wavelength conversion of 1.03 Tbit/s (103×10 Gbit/s) signals in PPLN waveguide," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1144-1145.
- 5) 山浦 純ほか：“擬似位相整合 LiNbO₃ 導波路を用いた2波長励起による任意波長変換実験”，2003年電子情報通信学会総大会 (2003) B-10-54.
- 6) M. Asobe, *et al.*: "Multiple quasi-phase-matched LiNbO₃ wavelength converter with a continuously phase-modulated domain structure," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 558-560.
- 7) E. Yamazaki, *et al.*: "Widely tunable multichannel wavelength conversion using multiple wavelength quasi-phase-matched LiNbO₃ waveguide," *Electron. Lett.*, **40** (2004) 492-494.
- 8) J. Yamawaku: "Field demonstration of virtual grouped-wavelength-path switching with transparent waveband conversion in QPM-LN and PLC matrix switch in the test bed of JGN II," *ECOC2004, Post-deadline paper* (2004) Th4.5.3.
- 9) Y. Kato, *et al.*: "Fabrication of periodically-poled Zn-doped LiNbO₃ for adhered ridge waveguide," *CLEO2004* (2004) CThKK7.
- 10) I. Brener, *et al.*: "Polarization-insensitive wavelength converter based on cascaded nonlinearities in LiNbO₃ waveguides," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 66-67.