

分極反転ニオブ酸リチウムデバイスを用いた光信号処理

Optical signal processing using periodically poled lithium niobate devices

東京理科大¹, デンマーク工科大² °福地 裕^{1,2}Tokyo Univ. of Science¹, Technical Univ. of Denmark², °Yutaka Fukuchi^{1,2}

E-mail: fukuchi@ee.kagu.tus.ac.jp

はじめに 近年、周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)デバイスにおける高効率の二次非線形光学($\chi^{(2)}$)効果が注目されている。PPLN デバイスは、 $\chi^{(2)}$ グレーティングの周期 Λ_{QPM} により擬位相整合(QPM)波長 λ_{QPM} を自在に制御できる。また、パラメトリック素子であり過剰な雑音を発生しない。さらに、カスケード $\chi^{(2)}$ 効果による三次または原理的には四次以上の実効的非線形性も大きい。通常数 mm~数十 mm 長で十分な効率を引き出せ、他の非線形光学デバイスと比較してコンパクトであり、集積度や安定性、応答速度の面でも有利である。高パワー用途のバルク型および低パワー用途の導波路型の両方が実現され、モジュール化も進んでおり、応用の自由度も格段に高い。本稿では、非線形光学分野に大きな技術革新をもたらしている PPLN デバイスの光信号処理への応用と今後の展望を概観したい。

動作原理 所望の非線形光学効果は、第二高調波発生(SHG)や和周波発生(SFG)、縮退/非縮退差周波発生(DFG)、およびこれらの組合せにより実現され、 λ_{QPM} を制御することにより柔軟な光波長(周波数)配置が可能である。通常の PPLN は一定の λ_{QPM} を持つが、 Λ_{QPM} を長さ方向に離散的連続的に変化させると λ_{QPM} を分布定数的に制御でき、多段・高次のカスケード $\chi^{(2)}$ 効果を利用でき、より高機能でスマートな光信号処理も期待できる。PPLN デバイスは様々な光信号処理に柔軟に対応でき、時間軸上での光波制御、波長(周波数)軸上での制御、および位相を用いたものに分類できる。

時間軸上での光波制御 光時分割多重(OTDM)通信システムでは、用いる光パルスの幅はピコ秒からサブピコ秒の領域に達し、電子技術に依らない全光学的超高速信号処理デバイスの開発が必須である。これまでに、SHG-DFG カスケードを用いた OTDM 信号の 100Gbit/s 時間多重[1]や 160Gbit/s・320Gbit/s 時間多重分離[2]、アドドロップマルチプレクサ、全光 2R 再生(Retiming)[3,4]、全光 3R 再生(Retiming+Reshaping)[5,6]、SFG を用いた 640GHz クロック再生[7]、160Gbit/s ピコ秒光パルスサンプリング[8]等が報告されている。通常、LN の最大二次非線形係数 d_{33} (~25.9pm/V)を用いるが、基本波と高調波間の大きな群速度不整合(GVM~350ps/m)によりパルス間ウォークオフが生じ、超高速化に限界がある。一方 d_{31} (~4.2pm/V)を用いれば、GVM(~34ps/m)も小さく、1Tbit/s を超える超高速動作も期待[9]できる。

波長(周波数)軸上での光波制御 高密度波長分割多重(DWDM)通信システムへの応用では、超広帯域性や広レンジ波長選択・可変性等が要求される。これまでに、SHG-DFG カスケードを用いた位相共役光生成による光ファイバ伝送路の分散補償[10,11]や、C バンドから L バンドへの一括波長変換[12]、SFG-DFG カスケード 2 波長ポンプ構成による 40Gbit/s-DWDM システム用任意波長変換[13]等が実現されている。光周波数コム信号のスペクトルの端に λ_{QPM} を合わせれば、SHG-DFG カスケードで外部ポンプ光フリーのコヒーレントな一括波長変換も実現できる。これを発展させ、前半と後半で異なる反転周期 Λ_{QPM1} と Λ_{QPM2} ($\lambda_{\text{QPM1}} < \lambda_{\text{QPM2}}$) を持つ 2 段型 PPLN デバイスに、 λ_{QPM1} から λ_{QPM2} までの適切な帯域幅の光コムやスーパーコンティニューム光を入力すれば、スペクトル幅は前半で 2 倍、後半でさらに 2 倍となり、約 $4(\lambda_{\text{QPM2}} - \lambda_{\text{QPM1}})$ のコヒーレント光スペクトルも生成できる。N 段型 PPLN デバイスの開発と応用も期待したい。

位相感応型光波制御 コヒーレント光通信システムへの応用では、光波の位相を自在に制御することが重要である。これまでに、SHG と DFG を別々の PPLN デバイスを用いて実現した低雑音位相感応増幅[14]や位相雑音抑圧[15]、SHG-DFG カスケードを用いた単一 PPLN 位相感応増幅[16]等が報告されている。量子暗号通信等に应用される光量子状態制御(スクイズド光生成)[17,18]の研究も報告されている。PPLN デバイスは、原理的に大きな非線形性を持つが、実用デバイスの非線形効率は理論性能に至っていない[18]。作製技術の進歩により、実際の非線形効率も大きく改善され、上述のインコヒーレント光信号処理用途においては遜色ないと言ってよい。一方コヒーレント用途においても、実用レベルの段階に近づきつつあり、今後の進展を期待したい。また QPSK-BPSK 変換等の変調フォーマット変換や、多段・高次の非線形効果を用いたより高度で深いレベルのコヒーレント光信号処理も順次実現されると考えられる。

むすび これまでに提案されている PPLN ベースの主な光信号処理デバイスについて報告した。PPLN の特徴が最大限発揮されれば、将来は時間、波長(周波数)、位相軸上で光のまま自在な処理・多元接続が可能になると期待される。

参考文献 [1] S. Kawanishi *et al.*, *EL*, vol. 36, pp. 1568-1569, 2000. [2] K. Kikuchi *et al.*, *ECOC'02*, 8.4.2. [3] T. Hasegawa *et al.*, *OL*, vol. 29, pp. 2776-2778, 2004. [4] Y. Fukuchi *et al.*, *OAA'06*, JWB39. [5] 福地 裕 他, IEICE'04 ソサイエティ大会, C-4-42. [6] Y. Fukuchi *et al.*, *LEOS'04*, ThBB3. [7] L. K. Oxenløwe *et al.*, *EL*, vol. 44, pp. 370-371, 2008. [8] S. Kawanishi *et al.*, *EL*, vol. 37, pp. 842-844, 2001. [9] Y. Fukuchi *et al.*, *JQE*, vol. 41, pp. 729-734, 2005. [10] D. Kunitatsu *et al.*, *PTL*, vol. 12, pp. 1621-1623, 2000. [11] M. H. Chou *et al.*, *PTL*, vol. 12, pp. 82-84, 2000. [12] J. Yamawaku *et al.*, *CLEO'03*, CThPB2. [13] 福地 裕 他, IEICE'04 総合大会, C-4-35. [14] M. Asobe *et al.*, *OPEX*, vol. 20, pp. 13164-13172, 2012. [15] T. Umeki *et al.*, *OPEX*, vol. 21, pp. 12077-12084, 2013. [16] K. J. Lee *et al.*, *OPEX*, vol. 17, pp. 20393-20400, 2009. [17] G. Masada *et al.*, *OPEX*, vol. 18, pp. 13114-13121, 2010. [18] J. Maeda *et al.*, *JOSA B*, vol. 17, pp. 942-951, 2000.