光通信用導波型非線形光学デバイス

栖原 敏明

大阪大学大学院 工学研究科電子工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Waveguide Nonlinear-Optic Devices for Optical Communications

Toshiaki SUHARA

Department of Electronics, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-Oka Suita, Osaka 556-0871

(Received September 2, 2002)

Waveguide-type quasi-phase matched (QPM) nonlinear-optic devices offer numerous applications in optoelectronics area. Wavelength converters based on QPM difference frequency generation (DFG) have advantages of wide wavelength coverage, wide bandwidth, high efficiency, high transparency for various data format, low noise and integration compatibility. Various ultrafast optical signal processing such as optical sampling and optical gate switching can also be performed. Recent progress in this subarea is reviewed with emphasis on research work of the author's group using LiNbO₃ QPM waveguides.

Key Words: Nonlinear optics, Wavelength conversion, Optical switching, Integrated optics, Optical waveguides

1. はじめに

強誘電体非線形光学(NLO)結晶材料を用いた導波型波長変換デバイスは、高密度光メモリシステムのための小型短波長コヒーレント光源の実現を主な目的として約10年間にわたり活発に研究されてきた¹⁻³⁾。その過程で開発された擬似位相整合(QPM)のデバイス化技術は広い光波長域で適用可能であるため、光通信・光情報処理・光計測の分野への応用拡大をめざして活発な研究開発がなされており、顕著な進展が見られる⁴⁾。光通信の分野では、高密度波長多重(DWDM)光ネットワークシステムのためのキーデバイスのひとつとして全光学的方式の波長変換デバイスの重要性が認識され、各種方式が活発に研究されている。導波型QPM-NLO波長変換デバイスは、広い波長域や低雑音など他の方式と異なるいくつかの特徴を有し、有力方式のひとつとして研究されている^{5,6)}。また非線形光学現象の超高速性を利用することにより、QPM-NLOデバイスで光スイッチングなどの高速光制御・信号処理を行うことができ、将来の超高速光通信システムへの応用が期待できる。これらの応用には半導体レーザーを励起光源として作動する実用的なデバイスの開発が要求され、多くの可能性と研究課題がある。

本稿では、光通信用QPM-NLOデバイスに関して、著者らの最近の研究を紹介し、可能性と課題を概観したい。

2. QPM-NLOデバイスの特徴と基本特性

第2高調波発生(SHG)、和周波発生(SFG)、差周波発生(DFG)・パラメトリック光増幅(OPA)などの2次NLO作用を高効率に行うデバイスを実現するには、非線形性の顕著な材料内で位相整合をとる必要がある。擬似位相整合(QPM)は、伝搬軸に沿ってNLO係数の符号を周期 Λ で反転した構造を設け、NLO分極と発生しようとする波の波動ベクトル β の違いを周期構造の波数ベクトル $K(|K| = K = 2\pi/\Lambda)$ で補償することで位相整合をとる方法である⁷⁾。NLO相互作用は非線形モード結合方程式で解析できる⁸⁾。QPMでは周期さえ適当に選べば結晶の透過域内で任意の波長組合せに対して位相整合できるので、単一材料で極めて広い波長範囲の波長変換に対応したデバイスを実現できる。またNLOテンソル最大成分を利用できるので高効率化に有利で、導波路に光波を閉じ込めてパワー密度を高めることにより著しい高効率化と小型化が図れる。

周波数 ω の基本波を 2ω の高調波に変換するSHGでは、QPM条件のもとで高調波出力パワー $P^{2\omega}$ は入力基本波パワー P_0 の増大と相互作用長 L の増大に対して単調に増大し、低出力領域では近似的に $P_0^2 L^2$ と結合係数の自乗 κ_2 の積で $P^{2\omega} = P_0^2 \kappa_{\text{SHG}}^2 L^2$ と表される。周波数 ω_1 の信号波と ω_2 の強い励起波を入力して $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ の和調波に変換するSFGでは、QPM条件のもとで、出力パワー P^{ω_3} は相互作用長 L が小さい範囲では入力波パワーの積 $P^{\omega_1} P^{\omega_2}$ と $\kappa_{\text{SFG}}^2 L^2$ に近似的に比例して増大する。しかしSFGに伴って ω_1 の

波は減衰し、 κL または入力パワーが大きいときは伝搬途中でSFGからDFGに転じ、入力と位相反転した ω_1 の波が生じる。周波数 ω_1 の信号波と ω_3 の強い励起波を入力して $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ の差調波に変換するDFG/OPAでは、差周波(アイドワ波)が発生(DFG)するとともに信号波が増幅(OPA)される。いずれの場合でもQPM条件のもとでの変換効率は近似的に L の自乗と入力光パワーに比例し、波長帯域は L に反比例する。

超短パルス光に対する波長変換では、異波長パルス間のウォークオフが問題となり、変換効率が低下する。変換効率と波長変換出力パルス幅がQPM帯域で制限されると考えることもできる。このような超短光パルスNLO波長変換特性は時間に依存するモード結合方程式の解をビーム伝播法(BPM)で計算することにより、解析できる⁹⁾。効率や波形の劣化を避けて高性能を得るためのデバイス設計指針は、デバイス全長を伝搬したときのウォークオフがパルス幅を超えない範囲でデバイス長 L を大きくとることである。

3. 周期的分極反転構造形成技術

LiNbO₃などの強誘電体結晶ではNLO係数の符号は自発分極の向きに対応するのでQPM構造は自発分極の周期的反転で実現できる。その作製はQPM-NLOデバイスの重要技術であり、多くの方法が検討されてきたが^{1-6,10)}、周期電極を用いてパルス電圧を印加する電界印加法^{11,12)}で作製技術がほぼ確立された。

短周期のQPM構造作製のためには反転領域幅の広がりを抑制して反転・非反転領域幅が1:1の構造を得るため時間幅の短いパルス電圧を印加する必要がある。一方、一般的に使用されているコングレント(一致組成)結晶は、欠陥に起因する内部電界のためFig. 1に示すように標準的な対称ループからずれた強誘電履歴特性を示し、電圧変化が速いと非対称性は大きいので、0 Vまで立下る短パルスの印加では反転した分極が立下がり時に再反転して元に戻ってしまう。しかし内部電界緩和現象のため反転後数秒の時間が経過すれば電圧を0 Vまで戻しても再反転は起らない。したがって適度なベデスタル電圧を加えたパ

Fig. 1 Ferroelectric hysteresis loops of congruent LiNbO₃ crystal. E : 5.9 kV/mm/div, D : 33 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ /div, T_{ms} : period of the applied triangular wave.

ルスを印加することにより分極反転を行う。

短波長光発生デバイス用の短周期(2.0~7.0 μm)のQPM構造作製では、周期電極として金属薄膜からなる梯子型電極や波板電極^{2,11,12)}が多用されてきたが、光通信波長用デバイスでは周期は10 μm 以上と長いので、簡便な液体電極^{13,14)}の利用でも良好な結果が得られる。Fig. 2に作製装置の例を示す。z-cut LiNbO₃基板(厚さ0.5 mm)の+z面にレジスト(厚さ約6 μm)グレーティングを設け、濾紙含浸LiCl水溶液を電極として電圧パルス(～抗電界21 kV/mm×結晶厚さ0.5 mm = 10.5 kV)を印加する。必要電荷量(=自発分極電荷密度70 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \times 2 \times$ 反転面積)が流入したときに印加を停止するようにパルス幅を自動制御する^{2,12)}。Fig. 3(a)に分極反転構造(エッチング後)のSEM写真の例を示す。

最近、電子ビーム直接描画による高アスペクト比の液体電極を用いてサブミクロン周期のQPM構造が作製可能なことを示す知見(Fig. 3(b))が得られた¹⁵⁾。サブミクロン周期反転構造は逆方向結合SHGやミラーレスパラメトリック光発振器(OPO)の実現などへの応用可能性がある。

4. 差周波発生型波長変換デバイス

4.1 理論特性と特徴

基本的な導波型QPM-DFGデバイスの構造をFig. 4に示す。信号光(ω_s, λ_s)と連続励起光(ω_p, λ_p)を入力すると、周波数軸上で $\omega_p/2$ に関して ω_s と対称な点の周波数($\omega_d = \omega_p$

Fig. 2 Setup for pulse voltage application with automatic pulse width control for fabrication of domain-inverted grating using periodic electrode.

Fig. 3 SEM photographs of the surface of domain inverted gratings (etched for visualization).

Fig. 4 Fundamental structure of waveguide QPM-DFG wavelength conversion device.

$-\omega_s$)をもつ差周波(波長 λ_d)が得られることを利用して、信号光の波長変換を行なう^{5,16-18)}。LiNbO₃導波路で波長1.5 μm 帯の信号を同波長帯の別波長に変換するには0.78 μm 近傍の励起光と周期約18 μm のQPM構造を必要とする。信号波と励起波のモードサイズを $8 \times 6 \mu\text{m}^2$ 、 $3 \times 4 \mu\text{m}^2$ とし、両モード中心が一致すると仮定してガウス関数近似で結合係数⁸⁾を計算すると $\kappa_{\text{DFG}} = 1.5 \text{ W}^{-1/2}\text{cm}^{-1}$ が得られる。この値を用いた理論予測では、デバイス長 $L = 20 \text{ mm}$ で1000 %/W以上の規格化効率、100 mW程度の励起光パワーで効率0 dBの波長変換が期待できる。励起光波長を一定としたときの信号波長帯域は、 λ_s と λ_d が互いに逆に増減するので分散が相殺されることから、数10 nm以上の広い帯域が得られる。したがって単一デバイスで現在の光通信帯全域をカバーでき、Tb/s級の高速信号の波長変換が可能である。多波長一括波長変換も可能である。また極めて低雑音な波長変換が可能である¹⁹⁾。

4.2 基本型デバイス

アニールプロトン交換(APE)導波路を用いた1.5 μm 帯用QPM-DFGデバイスを作製・評価し、改善を続けている⁶⁾。高効率と広帯域をバランス良く実現する設計として相互作用長を $L = 30 \text{ mm}$ とした。チャンネル導波路はAl薄膜マスク(開口幅4~5 μm)を用いたプロトン交換(200 °C安息香酸中1.5 hr)とアニーリング(350 °C、4~6 hr)で形成した。SHG実験で評価した規格化変換効率324 %/Wが得られ

ており、実測信号/励起光モードサイズと両モードピーク間隔を用いて計算した予測値~430 %/Wに近づいている。波長帯域も理論値に近い値が得られている。DFG波長変換の実験結果をFig. 5に示す。励起パワー50 mWで約-17 dBの変換効率が得られた。DFG効率が、SHG規格化効率を使っ

4.3 高屈折率層装荷による高効率化

基本形デバイスの高効率化上の問題点は信号/励起光モードのサイズとピーク位置が異なるため重なりを大きく出来ないことである。逆プロトン交換によりAPE導波路を埋め込み導波路とすることによる改善が報告されている²⁰⁾。著者らはAPE導波路に高屈折率のAs₂S₃層を装荷した導波路の利用を検討した。装荷層膜厚を最適化すればFig. 6(a)のように信号波TM₀₀モードと励起波TM₀₁モードの重なりを大きくでき、2次元モデルの計算では規格化効率を約9倍に増大できる。厚さ0.3 μm のAs₂S₃層を装荷したデバイス($L = 30 \text{ mm}$)を作製し、Fig. 6(b)に示すように790 %/Wの規格化効率を得た²¹⁾。

4.4 偏波無依存化

QPM-DFGデバイスは最大NLOテンソル成分 d_{33} を利用す

Fig. 5 Spectrum of the output waves of QPM-DFG device.

Fig. 6 Improvement of conversion efficiency by high-index cladding. (a) Comparison of mode profiles and the overlap between uncladded and cladded APE waveguides. (b) Measured dependence of efficiency upon pump power.

るため、基本構成では単一の偏光しか波長変換できない。光ファイバ通信応用では多くの場合、偏波無依存化が要求される。外部偏光ビームスプリッタと波長板を組合せた偏波無依存化が提案されている^{22,23)}。著者が提案している集積化偏波無依存 QPM-DFGデバイスをFig. 7に示す^{5,6)}。TE/TM両モードを導波するチャンネル導波路とQPM用周期的分極反転構造を形成し、中間点に溝を設けて薄膜型波長板を45°光学軸で挿入する。信号光波長(1.5 μm 帯)用1/2波長板は波長変換前および後の信号波をTE $\leftrightarrow$ TM変換するが、波長が約1/2倍の励起光に対しては偏波変換しない。信号光TM成分は前半で波長変換された後にTEに変換され、TE成分はTMに変換された後に後半で波長変換されるので、偏波無依存波長変換を実現できる。

このデバイスはTE/TM両モードを導波する導波路を必要とするが、APE導波路は異常光のみしか導波しないので利用できず、Ti拡散導波路は光損傷の懸念がある。そこで両モードを導波し、光損傷耐性が高いと期待されるZn拡散導波路の利用を検討している。ZnOスパッタ膜またはZn/Ni蒸着膜を低圧雰囲気中(10 Torr)で拡散(890 °C)することで良好な両モード導波路作製条件を見出した^{24,25)}。分極反転構造を作製しQPM波長変換の予備的実験結果(1.5 μm 帯SHGおよびDFG, $L = 10 \text{ mm}$ で規格化効率 $\sim 15 \text{ \%}/\text{W}$)が得られた²⁶⁾。

5. 超高速光制御デバイス

5.1 SFG光サンプリングデバイス

QPM-SFGデバイスに異波長の信号光とパルス光を入力するSFGでは、出力SF光パワーは近似的に入力光パワーの積に比例するためデバイスは光乗算器として働く。繰返し変調された信号波と同期した超短サンプリングパルスを入力してSF光を積分検出し、パルス位相を掃引すれば信号波形を低速観測できる²⁷⁾。光通信超高速TDM信号の復調にも応用可能である。Fig. 8に実験系を示す。相互作用長 $L = 5 \text{ mm}$ 、周期 $\Lambda = 16.0 - 17.8 \mu\text{m}$ のQPM-SFGデバイスを作製し、高速変調した外部共振器型可変波長半導体レーザーからの信号と利得スイッチング駆動DFBレーザーからの幅25 psのサンプリングパルスを入力した。得られた波形観測結果の例を同図右下に示す。従来のバルク結晶を利用した光サンプリングより約3桁高い43 $\text{\%/W}$ の効率

Fig. 7 Polarization independent QPM-DFG wavelength converter with integrated wavelength-selective polarization mode converter.

Fig. 8 Experimental setup for optical sampling using waveguide QPM-SFG device.

が得られた。理論分解能は約1 psである。デバイス長を短くすれば効率は低下するがフェムト秒サンプリングも可能である。

5.2 SHG/DFG光スイッチングデバイス

周波数 ω_c の光に対してQPM-SHG条件を満たすQPMデバイスに ω_c の光と ω_s ($\omega_s \neq \omega_c$, $\omega_s \approx \omega_c$)の光を入力すると、 $2\omega_c$ のSH光が発生すると同時にSH光と ω_s の光とのDFGにより $\omega_d = 2\omega_c - \omega_s$ の差周波光も発生する。したがってFig. 9のように ω_s の入力信号光を ω_c の制御光でスイッチングして $\omega_d = 2\omega_c - \omega_s$ の出力信号光を得る波長変換型光スイッチを実現できる²⁸⁾。DFGに対しては厳密にはQPM条件は成立しないが、効率低減はほとんど無視できる。入力信号光と制御光のパワーを P_s , P_c とすれば、パルス幅が広いとき、出力信号パワー P_d は近似的に $P_d = P_s P_c^2 \kappa_{\text{SHG}}^2 \kappa_{\text{DFG}}^2 L^4 / 4$ で与えられ、BPM解析から $\kappa_{\text{SHG}} = \kappa_{\text{DFG}} = 1.5 \text{ W}^{-1/2} \text{ cm}^{-1}$, $L = 3.3 \text{ mm}$ のとき、パルス幅1 ps、ピークパワー3 Wの制御光で効率 $P_d/P_s \sim 10 \text{ \%}$ のスイッチングが可能になったことがわかった。QPM周期 $\Lambda \sim 17 \mu\text{m}$, $L = 10 \text{ mm}$ のデバイスを作製した。CW光に対して規格化効率40 $\text{\%/W}$ のSHG特性が得られた。外部共振器型可変波長半導体レーザーからの信号光(CW)と利得スイッチング駆動(1 GHz)DFBレーザー光を圧縮した幅10 psの制御パルス光を入力して実験を行い、平均パワー約20 mW (ピークパワー $\sim 2 \text{ W}$)の制御パルスでスイッチングが確認できた。

5.3 SFG干渉計型光スイッチングデバイス

Fig. 10にQPM-SFG区間と π 位相シフタを両アームに集積化した導波型干渉計からなる光スイッチを示す²⁹⁾。周波数 ω_1 の信号光と ω_2 ($\omega_2 \neq \omega_1$, $\omega_2 \approx \omega_1$)の制御パルスを入力する。制御パルスがオフのときには、両アームを伝搬した信号光は合流部で干渉相殺するので出力は現れない。制御パルスがオンになるとSFG部では和周波($\omega_3 = \omega_1$

Fig. 9 Optical gate switching by cascaded SFG and DFG in QPM waveguide.

Fig. 10 Integrated QPM-SFG interferometer device for optical switching.

$+\omega_2$) 発生のため信号光は減衰し、合流部での相殺は不完全となり信号が出力される。入出力信号光は同一波長である。 $L=5\text{ mm}$ の予測規格化SFG効率 $\kappa_{\text{SFG}}^2 L^2 = 63\text{ \%}/\text{W}$ を用いて計算したスイッチングパワー P_c は $P_c = 16\text{ W}$ である。

QPM周期 $\Lambda = 17\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=5\text{ mm}$ のSFG部と熱光学効果位相シフタ(薄膜ヒータ)をもつ干渉計全長11 mmのデバイスを作製した。ヒータ駆動電圧で位相シフトを π に調整することで29 dBの消光比が得られた。可変波長半導体レーザーからの信号光(CW)と利得スイッチング(1 GHz)駆動DFBレーザー光を圧縮した幅10 psの制御パルス光を入力して実験を行い、理論予測に近いスイッチング特性を得た。

6. むすび

光通信への応用をめざした導波型非線形光学デバイスに関して著者らの研究を紹介し、可能性と課題を概観した。波長変換および超高速全光信号処理の多くの可能性が示されたが、波長変換効率やスイッチングパワーなど、改善すべき問題点も多く残されている。波長域拡大、光ファイバ高効率結合を含むデバイス実装、励起用半導体レーザーの開発と集積化、光通信システムでの利用法の開拓などの課題がある。実用的なデバイスの実現および新たな応用と可能性の開拓をめざして研究を続けたい。

謝 辞

引用文献に挙げた著者関連発表論文の共著者各氏の貢献に感謝する。本研究は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究の補助を受けた。

参考文献

- 1) 栖原 敏明, 西原 浩: レーザー研究 **21** (1993) 1097.
- 2) K. Kintaka, M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara: J. Lightwave Tech. **14** (1996) 462.
- 3) T. Sugita, K. Mizuuchi, Y. Kitagawa, and K. Yamamoto: Opt. Lett. **24** (1999) 1590.
- 4) 藤村 昌寿, 栖原 敏明: 応用物理 **69** (2000) 539.
- 5) 栖原 敏明: 信学論(C) **J84-C** (2001) 909.
- 6) T. Suhara: IEEE/LEOS Annual Meeting, TuCC3, 364 (2001).
- 7) J. A. Armstrong, N. Bloembergen, N. J. Ducuing, and P. S. Pershan: Phys. Rev. **127** (1962) 1918.
- 8) T. Suhara and H. Nishihara: IEEE J. Quantum Electron. **QE-26** (1990) 1265.
- 9) 石月 秀貴, 栖原 敏明, 西原 浩: 信学論(C) **J84-C** (2001) 462.
- 10) 栖原 敏明, 西原 浩: 応用物理 **62** (1993) 927.
- 11) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, and K. Watanabe: Appl. Phys. Lett. **62** (1993) 435.
- 12) 金高 健二, 藤村 昌寿, 栖原 敏明, 西原 浩: 信学論(C) **J78-C** (1995) 238.
- 13) J. Webjörn, V. Pruneri, P. J. Russel, J. M. R. Barr, and D. C. Hanna: Electron. Lett. **30** (1994) 894.
- 14) L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg, and J. W. Pierce: J. Opt. Soc. Am. B **12** (1995) 2102.
- 15) 塩 和也, 石月 秀貴, 藤村 昌寿, 栖原 敏明, 西原 浩: 第48回応用物理学関係連合講演会, 30p-H-6, (2001).
- 16) C. Q. Xu, H. Okayama, and M. Kawahara: Appl. Phys. Lett. **63** (1993) 3559.
- 17) M. Fujimura, A. Shiratsuki, T. Suhara, and H. Nishihara: Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L659.
- 18) M. H. Chou, K. R. Parameswaran, and M. M. Fejer: Opt. Lett. **24** (1999) 1157.
- 19) 栖原 敏明, 西原 浩: 信学論(C) **J82-C-I** (1999) 326.
- 20) R. Parameswaran, R. K. Route, R. Kurz, R. V. Roussev, M. M. Fejer, M. Fujimura: Opt. Lett. **27** (2002) 179.
- 21) 森田 崇, 佐藤 大介, 栖原 敏明, 藤村 昌寿: 第49回応用物理学関係連合講演会, 27p-ZS-5 (2002); D. Sato, T. Morita, T. Suhara, and M. Fujimura: IEEE Photon. Tech. Lett. submitted, **15**, No.4, to be published (2003).
- 22) C. Q. Xu, H. Okayama, and T. Kamijoh: Opt. Rev. **4** (1997) 546.
- 23) I. Brener, M. H. Chou, E. Chaban, K. R. Parameswaran, M. M. Fejer, S. Kosinski, and D. L. Pruitt: Electron. Lett. **36** (2000) 66.
- 24) T. Suhara, T. Fujieda, M. Fujimura, and H. Nishihara: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L864.
- 25) Y. Shigematsu, M. Fujimura, and T. Suhara: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 4825.
- 26) M. Fujimura, H. Ishizuki, T. Suhara, and H. Nishihara: Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics (CLEO/PR'01), ME1-5 (2001).
- 27) T. Suhara, H. Ishizuki, M. Fujimura, and H. Nishihara: IEEE Photon. Tech. Lett. **11** (1999) 1027.
- 28) H. Ishizuki, T. Suhara, M. Fujimura, and H. Nishihara: Opt. Quantum Electron. **33** (2001) 953.
- 29) T. Suhara and H. Ishizuki: IEEE Photon. Tech. Lett. **13** (2001) 1203.

レーザーワード

擬位相整合導波路(QPM waveguide)

非線形光学波長変換において有効な相互作用を得るのに必要な異波長光波間の位相整合のため、非線形媒質内に周期構造を形成して異波長光波の伝搬ベクトル差を周期構造の波数ベクトルで補償して整合する方法を擬位相整合(Quasi-Phase Matching: QPM)と呼ぶ。このような周期構造を有する光導波路。周期さえ適当に設計すれば、透明波長域内の任意の波長変換に対応でき、単一材料で極めて広い波長域をカバーできる。また非線形テンソル中の最大要素を利用できるので、導波路内光波閉込

めと併用することで高効率変換が達成できる。この利点のため位相整合法的主流となっている。光高調波発生、和周波発生、差周波発生、パラメトリック光増幅・発振、超高速光-光スイッチングなどの多くのデバイス応用がある。LiNbO₃などの強誘電体結晶に、パルス強電界を印加して、自発分極の極性を周期的に反転することによりQPM構造を形成し、プロトン交換や不純物拡散により導波路を形成することにより作製される。

(栖原 敏明)