

# 分極反転を用いた光通信用波長変換デバイス

遊 部 雅 生

## Wavelength Converters Using Periodical Poling and Their Applications to Optical Communications

Masaki ASOBE

Recent advance in periodical poling in LiNbO<sub>3</sub> and waveguide fabrication technology enables us to study various wavelength conversion functions for optical communication. Wavelength conversion based on difference frequency generation exhibit distinct advantages such as the simultaneous conversion of wavelength division multiplexed (WDM) channels, a large signal bandwidth over 1 THz, no degradation of signal to noise ratio, and independence of the modulation format. Highly efficient conversion was achieved using direct bonded LiNbO<sub>3</sub> waveguide which exhibit high resistance to photo refractive damage. Using a continuous phase modulation of periodical poling structure, wavelength converter with multiple quasi-phase matching peaks can be fabricated. Using the device variable conversion of WDM signal was demonstrated. Wavelength converter is also applied to construct single photon detector for quantum key distribution. Using sum frequency generation, photon in telecommunication band is converted to visible range, and is detected efficiently with Si avalanche photo diode.

**Key words:** wavelength conversion, quasi-phase matching, optical communication, single photon detector, quantum key distribution

分極反転を利用した擬位相整合 (QPM) 波長変換技術は、非線形光学結晶の透明波長域のほぼ全域において高効率な波長変換が可能のためさまざまな波長域での応用が進められている。光通信の分野においては光信号の電気信号への変換を最小限にとどめ光のまま簡便に処理するフォトニックネットワークの実現が望まれており、そのためのキーデバイスとして波長変換素子に対する期待が高まっている。また最近では、単一光子を用いて物理的な盗聴を防御する量子暗号通信の分野においても、波長変換素子を用いた単一光子、相関光子対の発生や検出が注目を集めている。本稿では、QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路を用いた光通信用波長変換技術の最近の研究について紹介する。

### 1. 光通信用波長変換の概要

本章では、QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路を用いた光通信用波長

変換の概要について述べる。図 1 (a) に素子の基本的な構成を示す。LiNbO<sub>3</sub> の自発分極を周期的に反転した基板の上に光導波路が形成されている。光通信分野の波長変換においても、今日ではさまざまな波長変換過程の利用が試みられている。最も代表的なのは、図 1 に示す差周波発生 (DFG) を利用した波長変換である<sup>1)</sup>。図 1 (b), (c) に、信号光、励起光、変換光の波長軸上の配置と長さ 30 nm の導波路を用いたときの波長変換効率の励起光波長および信号光波長依存性を示してある。この例では、0.78 μm 帯の励起光を入射すると、励起波長の 2 倍波長に相当する周波数を中心にして信号光の周波数とは対称の周波数に変換光が発生する。図 1 (b) に示すように、励起光波長に対する帯域は 0.2 nm 程度と狭いが、信号光波長の変化に対しては図 1 (c) に示すように約 60 nm と非常に広い帯域を有している。このため、例えば 40 Gbit/s 以上の高速信号

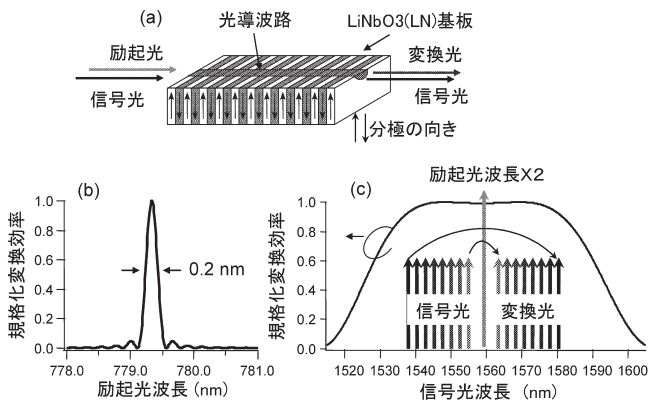


図1 QPM-LN 波長変換素子の構成と動作原理。(a) 素子構成, (b) 励起光帯域, (c) 信号光帯域と波長変換動作。

であっても、変調フォーマット・速度に依存することなく波長多重 (WDM) された信号群の一括変換を行うことができる。0.78  $\mu\text{m}$  帯で光通信应用到した光源がないため、1.56  $\mu\text{m}$  帯の光源を用いる方法もよく利用されている<sup>1)</sup>。この場合は、1.56  $\mu\text{m}$  帯の光を外部励起光として導波路に入射して第二高調波発生 (SHG) により 0.78  $\mu\text{m}$  帯の内部励起光を発生し、その内部励起光を用いて上記と同様な DFG による波長変換を行う。これらの波長変換方法では励起光波長に対する帯域が狭いので、励起光波長は実質的には固定となる。WDM 信号を可変に変換する技術については 3 章で詳しく述べる。

以上に紹介したのは DFG を基本とした通信波長帯内の波長変換の応用であるが、特に量子暗号通信関係の応用においては、これらとは異なる方法で波長変換の利用が検討されている。例えば、QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路に 0.78  $\mu\text{m}$  の励起光を入射することにより、パラメトリック下方変換を利用して 1.56  $\mu\text{m}$  帯の相関光子対を発生することができる<sup>2)</sup>。さらに、相関光子対を波長や偏波を利用して分離し、一方の光子を検出して他方の光子をゲーティングすることにより単一光子源を得ることも可能になる<sup>3)</sup>。もうひとつの応用は光子検出器への適用である。例えば、通信波長である 1.55  $\mu\text{m}$  帯の光子を励起光とともに QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路に入射し、和周波発生 (SFG) を用いて短波長の光子へ変換する。この波長変換により、通信波長帯の光子を短波長用の高性能な Si-APD を用いて検出することが可能になる<sup>4)</sup>。

QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路の作製技術に関しては、さまざまな方法が提案され、試みられてきた。周期的分極反転構造の形成には、周期電極を用いて基板に直接電界を印加する方法が確立され<sup>5)</sup>、3 インチ等の基板全面にわたって均一な周期分極反転構造が形成できる。近年は、光損傷耐性が

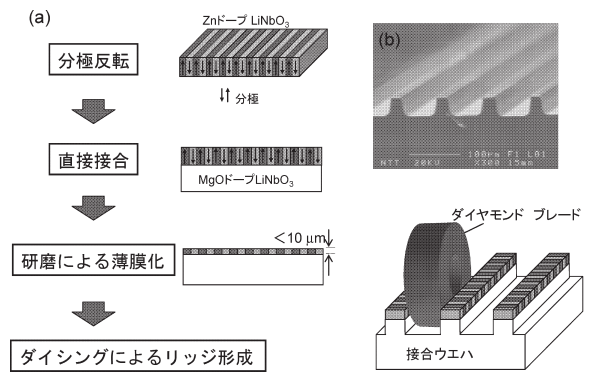


図2 ウェハー直接接合による導波路形成。

高いことが知られている Mg や Zn などのドーパ系 LiNbO<sub>3</sub> 基板に対しても、均一な周期分極反転構造の形成が可能になっている。導波路形成に関しては、プロセスの容易さから、初期の検討では熱処理プロトン交換 (APE: annealed proton exchange) 法が多く用いられてきた<sup>1)</sup>。フォトリソプロセスにより SiO<sub>2</sub> などのマスクパターンを LiNbO<sub>3</sub> 基板上に形成したのち、高温で安息香酸などのプロトン源に浸漬することにより、Li<sup>+</sup> イオンと H<sup>+</sup> イオンが交換されることによって基板表面に高屈折率層が形成される。さらに、過剰なプロトン交換による非線形定数の劣化を回復するために、高温で熱処理することによりプロトンを拡散させて導波路を形成する。最近では、基板表面を逆プロトン交換することにより、さらに高効率な素子が作製できることが報告されている<sup>6)</sup>。しかしながら、プロトン交換で作製された導波路は高温で長時間使用することでプロトンが徐々に拡散して、位相整合特性が変化する懸念がある。さらに、プロトン交換を行うことで結晶に新たな欠陥を生じさせ、光損傷耐性を劣化させてしまう可能性がある。これらの問題を解決する技術として、筆者らはウェハー直接接合技術を用いた光導波路の作製を試みている<sup>7)</sup>。図2に作製プロセスの概略を示す。コア層となるウェハーにはノンドーパ、あるいは Zn がドーパされた Z カット LiNbO<sub>3</sub> を用い、クラッドとなるウェハーには Mg をドーパした Z カット LiNbO<sub>3</sub> あるいは Z カット LiTaO<sub>3</sub> を用いている。まず、周期分極反転構造をコア層のウェハーに電界印加法により形成し、クラッド用のウェハーに清浄雰囲気下で接合させ、熱処理により拡散接合を行う。次に、コア層の厚みが導波路に必要な数  $\mu\text{m}$  となるように研磨する。図2中に示すようなリッジ型の導波路を、ダイシングによる溝加工により形成する。この方法で作製された導波路は、すぐれた光損傷耐性を有している。

以上に述べたように、LiNbO<sub>3</sub> の分極反転と導波路形成

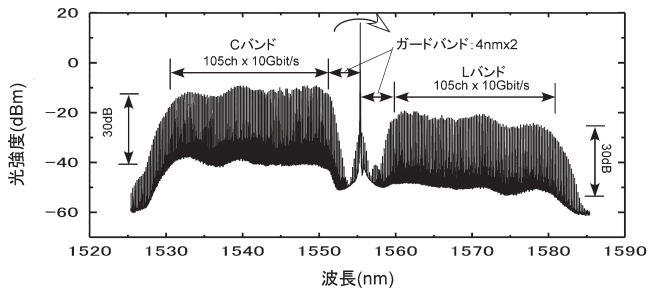


図3 広帯域信号の波長変換スペクトル。

技術の進展により、今日ではさまざまな方法で光通信分野への波長変換の応用が試みられるようになっている。以下では、筆者らの研究を中心におもな応用について紹介する。

## 2. 均一周期分極反転素子を用いた WDM 信号群の一括変換

APE法により作製されたプロトタイプ素子を用いて、さまざまな応用実験が行われている。筆者らは、安定な WDM 信号群の波長変換を実現するため導波路に出入力用のファイバーを接続し、温調機能を内蔵した波長変換モジュールを作製した<sup>8)</sup>。モジュール全体の挿入損失は-4 dB程度が得られている。図3は、広帯域な信号光の一括波長変換を行った場合の光スペクトルである<sup>9)</sup>。ここでは、スーパーコンティニューム光源を変調することによって、1.03 Tbit/s (103 × 10 Gbit/s)、25 GHz 間隔 DWDM 信号を発生し、波長変換を行った。図3に示されるように、信号光に対する広帯域性のために1 Tbit/sを超えるような広帯域信号が一括して波長変換されていることがわかる。励起光の帯域内に信号光が存在する場合、信号光間のクロストークの原因となりうるが、1章で述べたように励起光に対する帯域が狭いために、励起光と信号光波長の間のガードバンドを8 nmと比較的狭くすることが可能になっている。高速信号の波長変換特性を確認するため、40 Gbit/s ベースの WDM 信号の波長変換についても実験を行っている<sup>8)</sup>。図4は、6チャンネルの40 Gbit/s 信号の波長変換前後での誤り率特性とアイパターンを示している。この図からもわかるように、波長変換前後における波形の劣化はみられない。QPM-LiNbO<sub>3</sub> 素子そのものは自然放光をほとんど発生しないので、波長変換前後で光信号の雑音が増加しないという特徴がある。波長変換前後におけるパワーペナルティーは±0.2 dB以内とほとんど測定限界内であり、波長変換による雑音の増加が無視できることが確認できる。

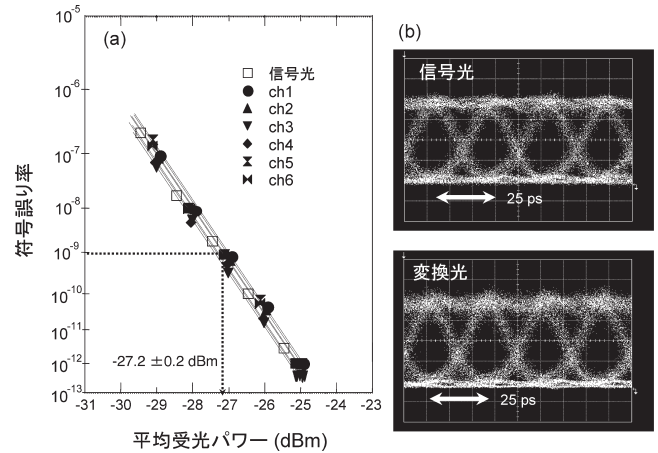


図4 波長多重された40 Gbit/s 信号の波長変換前後での (a) 誤り率特性、(b) アイパターン。

LiNbO<sub>3</sub>を用いた素子の課題のひとつとして、光損傷の問題がある。二次非線形結晶に高強度の光を入射すると、結晶内に存在する欠陥からキャリアが励起され、フォトリフレクティブ効果による屈折率変化を生じる。この屈折率変化によりQPM波長が変化する。DFGによる波長変換においては、図1に示したように励起波長の帯域が比較的狭いので、QPM波長の変化は変換効率の低下を招く。一方、直接接合導波路では、導波路作製プロセスによって結晶に不要な欠陥を生じないため高い光損傷耐性が期待できる。十分な強度の励起光が入射された場合、変換光は信号光と同等のレベルに達することが可能であり、さらに励起光強度を大きくすることで信号光と変換光のパラメトリック増幅も可能になる。図5は、直接接合リッジ導波路を用いて波長変換を行った場合の光スペクトルと、励起光強度に対する信号光、変換光の出力強度の変化を示している<sup>10)</sup>。図5(a)の例では、1.55 μm帯の励起光をEDFAで150 mWまで増幅し、Zn:LiNbO<sub>3</sub>のコアを用いた導波路素子に入射している。出力における信号光と変換光のレベル差はわずか-1.3 dBが得られている。図5(b)にみられるように、変換光の出力は励起強度の2乗に比例して増大し、信号光に対しては1 dB程度のパラメトリック利得が得られていることが確認された。直接接合リッジ導波路のすぐれた光損傷耐性により、この例のように高強度の励起光を入射した場合でもQPM波長のシフトによる効率の飽和が起これないため、高効率の波長変換が可能である。将来的には、導波路構造の最適化により、さらに高効率な波長変換が可能になると考えている。

## 3. マルチ QPM 素子を用いた可変波長変換

QPM素子のひとつの課題として、波長可変性の問題が

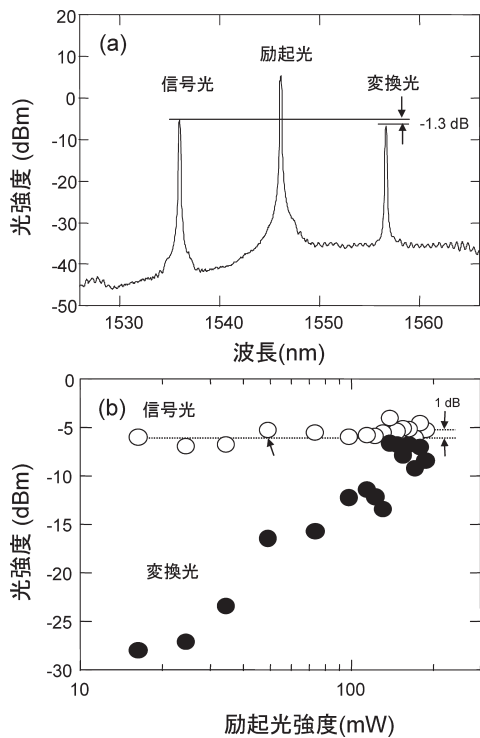


図5 直接接合リッジ導波路を用いた波長変換。(a) 光スペクトル, (b) 励起光強度に対する信号光, 変換光の出力強度。

ある。図1に示したように励起波長に対する帯域が0.2 nm程度と狭いため、一般的な構造では励起波長は実質的に固定であり、変換波長を変えることができないという問題がある。本章では、可変波長変換を実現する方法として、

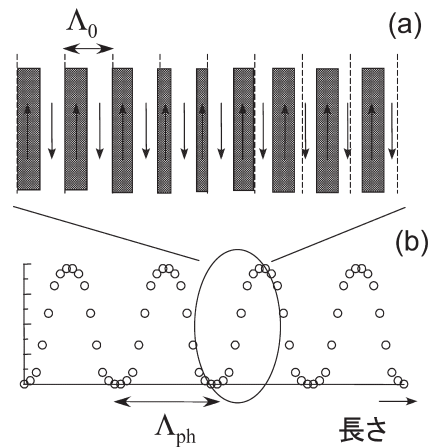


図6 (a) M-QPM素子の分極構造と (b) 位相変調関数の例。

近年筆者らが行っている多重擬位相整合 (multiple-QPM, 以下 M-QPM) 素子について述べる。

M-QPM素子を実現する方法として、筆者らは周期分極反転構造に連続的な位相変調を施した素子構造を考案した<sup>11)</sup>。図6に素子の基本的な構造を示す。基本周期  $\Lambda_0$  ごとの分極反転構造の位相がほぼ連続的に変調されており、さらにその位相変調が別の周期  $\Lambda_{ph}$  で繰り返している。例えば、位相変調の関数として図7(a)に示すような周期的な二次関数を用いると、位相整合曲線は図7(b)のような不揃いの効率をもつ複数の位相整合ピークを示す。筆者らは、この二次関数を初期値として、所望のピークのみが最大の効率となるように位相変調関数の形状を最適化し

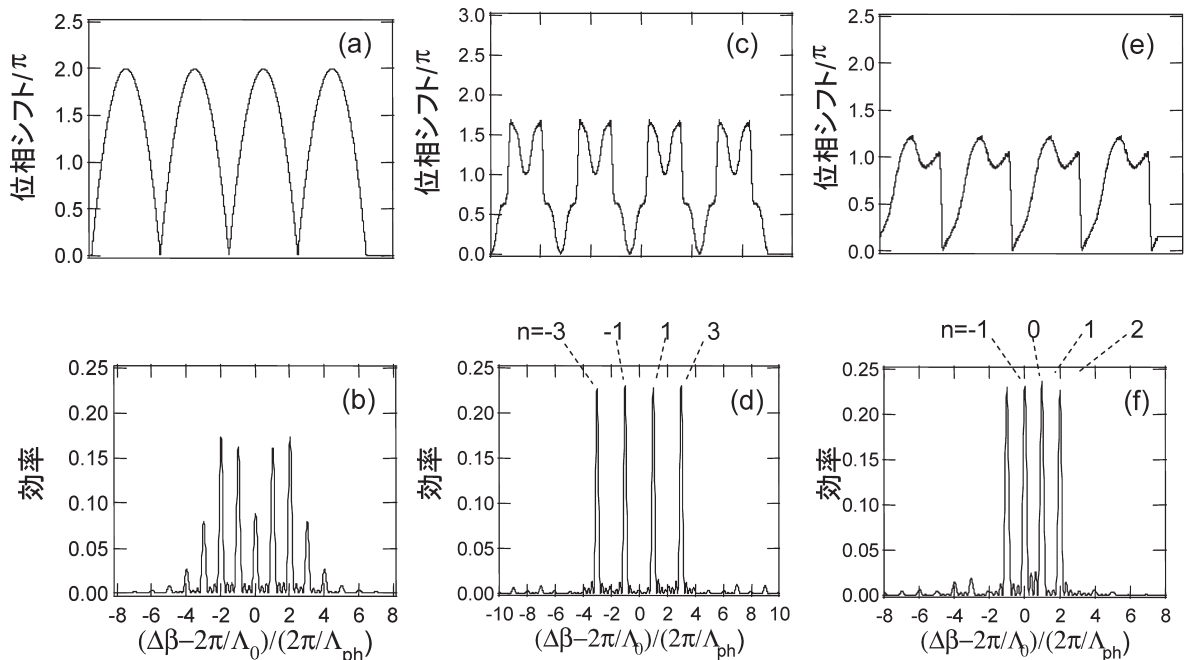


図7 位相変調関数と位相整合曲線。(a) (b) 最適化する前の初期状態, (c) (d) 4 ch 素子 (対称に最適化), (e) (f) 4 ch 素子 (非対称に最適化)。



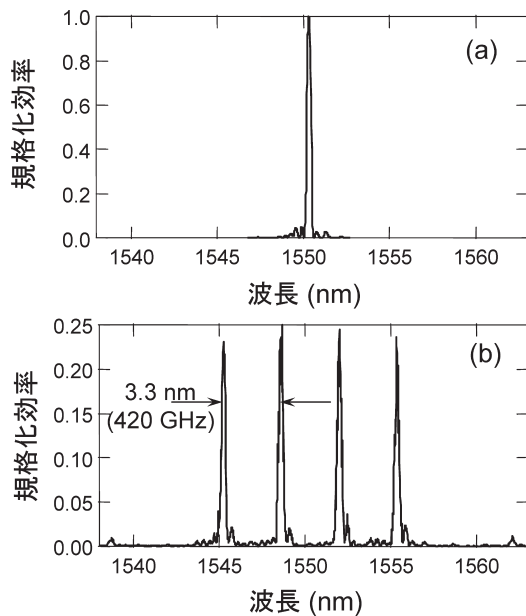


図8 (a) 均一な周期分極反転構造, (b) 位相変調構造をもつ素子の SHG 位相整合曲線.

た. この方法を用いると, 任意の励起波長数に対応するように位相整合曲線を設計できる. 図7 (c) (d) は, 4つの励起波長に対応させた場合の位相変調関数と位相整合曲線である. 変換効率は, 位相変調がない場合の効率に対して規格化して示してある. 4つのピークにおける効率の総和は92%であり, 効率の低下が小さく抑えられていることがわかる. この例では, 偶数のピークが対称に並ぶ位相整合曲線とするために,  $-3, -1, 1, 3$  次のピークが最大となるように位相変調関数を最適化した. この方法は比較的広いピーク間隔が必要な場合は有効であるが, ピーク間隔は位相変調周期に反比例するので, 狭いピーク間隔を得るには長い変調周期が必要となり不向きである. この欠点を解消するために, 0次のピークに対して非対称に並ぶ $-1, 0, 1, 2$  次のピークが最大となるように位相変調関数を最適化した例を図7 (e) (f) に示す. 非対称な位相変調関数を用いることにより, 図7 (c) と同様の変調周期で図7 (d) の半分のピーク間隔が得られることがわかる. このようにして, 本技術では, 位相変調関数を変化させることで変換効率の低下を抑えながら, 任意の励起波長数に対応が可能な M-QPM 素子を得ることができる.

上記の設計に基づき, APE 法によりプロトタイプ素子を作製し, 実験的な検証を行っている. 図8 (a) は, 長さ36 mm の均一な周期分極反転構造の位相整合曲線であり, ピーク変換効率は680%/Wである. 図8 (b) は, 同じ長さの位相変調を施した素子の位相整合曲線である. それぞれのピークの変換効率は160%/Wであり, 位相整合曲線

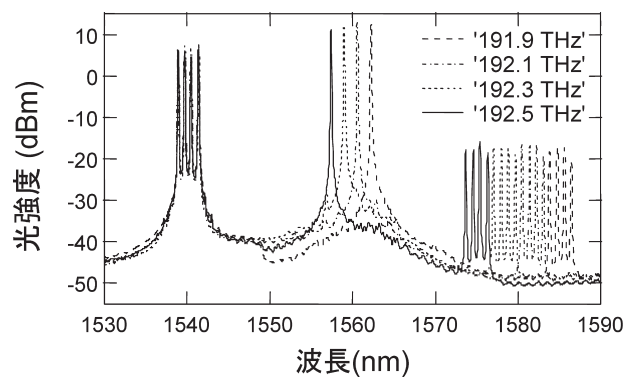


図9 4つの異なる周波数で励起した場合の波長変換スペクトル.

の形状・効率とも図7 (d) の計算例とよい一致が得られている. それぞれの位相整合ピークの間隔は3.3 nmで, これは周波数間隔にして420 GHzに相当する. 実際の WDM 通信システムでは, ITU-T で勧告されている100 GHz ごとなどの周波数グリッドに合った波長の信号が用いられており, 波長変換素子においてもこれらのグリッド周波数間の変換を実現する必要がある. WDM の波長は100 GHz などの一定周波数間隔で決められているため, M-QPM の励起光周波数が周波数グリッドに合っていれば, 周波数グリッド間の波長変換を行うことができる. 分極反転の基本周期, 位相変調関数を精密に制御することにより, 周波数グリッド間の波長変換が可能かどうかを実験的に検証した. 4つの位相整合ピークのでられる非対称な位相変調を用い, 各ピーク周波数間隔が200 GHzとなるように調整した APE 導波路素子を作製し, 実験に用いている. 図9に, 波長の異なる CW の励起光を入射したときの M-QPM 素子からの出射スペクトルを示す. 励起光波長を200 GHz ごとに切り替えることに対応して, 100 GHz 間隔4チャンネルの波長多重信号が400 GHz ごとに一括して変換されることが確認できる. 図10は, 波長切り替え時の変換光の時間波形である. 4チャンネルの信号光がそれぞれに合った波長へ正しく変換されるとともに, 40 Gbit/s の高速 WDM 信号の波長が高速に切り替えられることが確認できた. 波長切り替え時の最初の数ビットの波形が変形しているのは励起 LD の緩和振動によるもので, この時間を考慮すると, スwitching 時間は100 ps ときわめて高速であり, これは40 Gbit/s の信号のわずか4ビットしかスitching によって影響を受けないことに相当する. このような高速な波長スitching 特性は, 将来のバースト/パケットスitching を実現するうえで有効な機能となると期待される.

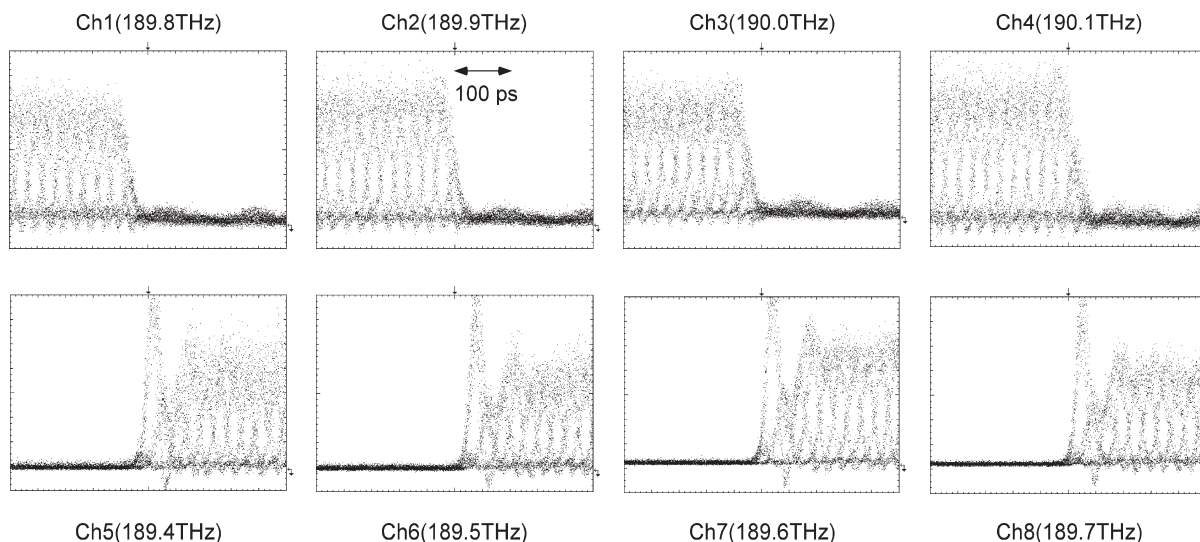


図10 波長スイッチング時の変換光の時間波形.

#### 4. 量子暗号への応用

量子暗号鍵の配送において、一番のキーデバイスは光子検出器である。光子検出器には通常アバランシフォトダイオード (APD) を用いるが、光通信波長で動作する InGaAs-APD は量子効率が 10% 程度とあまり高くなく、暗計数・アフターパルスを抑えるため、光子到来時刻だけに高バイアスをかけるゲートモードで使用する必要がある<sup>12)</sup>。この問題を解決するため、通信波長帯の光子を波長変換して高性能な Si-APD で検出する試みがなされている。図 11 は、波長変換素子として逆プロトン交換法で作製された QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路を用い、1.3 μm の励起光との SFG により 1.55 μm の信号光を 0.81 μm へ変換し Si-APD で検出した場合の量子効率および暗計数の励起光強度依存性を示したものである<sup>4)</sup>。100 mW 程度の励起光強度で 46% もの量子効率が得られている。Si-APD はアフターパルス率が小さく連続動作が可能のため、受信速度を速くして秘密鍵の生成レートを高くすることができる。最近筆者らは、励起光として高出力の半導体レーザーの入手が容易な 0.98 μm を励起光として用いて、波長変換が可能な QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路をウェハー接合法で作製し、同様な光子検出器の検討を行っている<sup>13)</sup>。問題としては、通信波長帯と励起波長が比較的離れているために、両者を効率よく導波路に入射することが難しい点が挙げられる。SFG を用いた場合の光子検出の課題のひとつは、励起光強度の増大に伴って図 11 に示されるように暗計数が増大してゆくことである。この暗計数は励起光強度の 2 乗に比例して増大するため、励起光によって信号光と同じ波長域に発生するパラメトリック蛍光あるいはラマンストークス

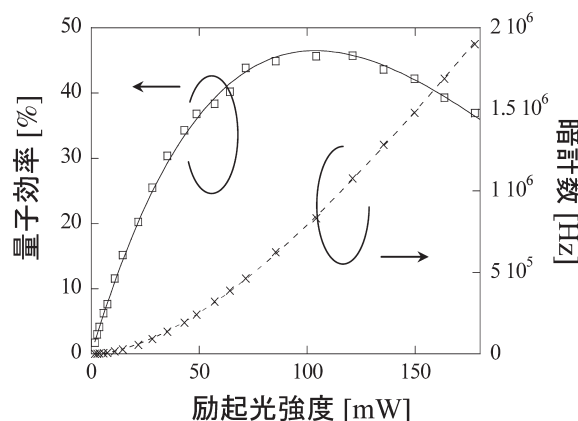


図11 量子効率および暗計数の励起光強度依存性.

光が、SFG 過程によって変換光と同じ波長域に変換されているのではないかと指摘されている<sup>4,13)</sup>。今後、結合効率の向上による量子効率の向上と、素子の最適化による暗計数の低減が必要と考えられる。

QPM-LiNbO<sub>3</sub> 導波路を用いた光通信用波長変換デバイスについて、波長変換動作の概要、素子の作製技術、広帯域一括波長変換、M-QPM 素子による可変波長変換、量子暗号通信への応用などの最近の研究状況について報告した。本技術は高効率、広帯域、高 SNR、トランスペアレンシーなどのすぐれた特性を有しており、将来のフォトニックネットワークや量子暗号通信の実現に有効な技術となることを期待している。

共同研究者である NTT 未来ねっと研究所の高田篤氏、NTT 物性科学基礎研究所の鎌田英彦氏、武居弘樹氏、な

らびに研究をともにしてきた忠永修氏, 西田好毅氏, 宮澤弘氏, 鈴木博之氏, 他 NTT フォトニクス研究所の各位に感謝いたします。

## 文 献

- 1) M. H. Chou, K. R. Parameswaran, M. M. Fejer and I. Brener: "Optical signal processing and switching with second-order nonlinearities in waveguides," *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 869-874.
- 2) H. Takesue, K. Inoue, O. Tadanaga, Y. Nishida and M. Asobe: "Generation of pulsed polarization-entangled photon pairs in a 1.55- $\mu\text{m}$  band with a periodically poled lithium niobate waveguide and an orthogonal polarization delay circuit," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 293-295.
- 3) M. Motoya, S. Kurimura, S. Inoue, Y. Usui and H. Nakajima: "Type II quasi-phase matching in waveguide parametric down converter for quantum information technologies," *Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest*, paper CMB5 (Optical Society of America, 2006).
- 4) C. Langrock, E. Diamanti, R. V. Roussev, Y. Yamamoto, M. M. Fejer and H. Takesue: "Highly efficient single-photon detection at communication wavelengths by use of up-conversion in reverse-proton-exchanged periodically poled LiNbO<sub>3</sub> waveguides," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1725-1727.
- 5) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh and K. Watanabe: "First-order quasi-phase matched LiNbO<sub>3</sub> waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 435-436.
- 6) K. R. Parameswaran, R. K. Route, J. R. Kurz, R. V. Roussev, M. M. Fejer and M. Fujimura: "Highly efficient second-harmonic generation in buried waveguides formed by annealed and reverse proton exchange in periodically poled lithium niobate," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 179-181.
- 7) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga and H. Suzuki: "A direct-bonded QPM-LN ridge waveguide with high damage resistance at room temperature," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 609-610.
- 8) M. Asobe, H. Miyazawa, O. Tadanaga, Y. Nishida and H. Suzuki: "40 Gbit/s  $\times$  6 channel wavelength conversion using a quasi-phase matched LiNbO<sub>3</sub> waveguide module," *OECC 2002*, no. PD2-8 (Yokohama, July, 2002).
- 9) J. Yamawaku, H. Takara, T. Ohara, K. Sato, A. Takada, T. Morioka, O. Tadanaga, H. Miyazawa and M. Asobe: "Simultaneous 25 GHz-spaced DWDM wavelength conversion of 1.03 Tbit/s (103  $\times$  10 Gbit/s) signals in PPLN waveguide," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1144-1145.
- 10) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga and H. Suzuki: "0-dB wavelength conversion using direct-bonded QPM-Zn:LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17** (2005) 1049-1051.
- 11) M. Asobe, O. Tadanaga, H. Miyazawa, Y. Nishida and H. Suzuki: "Multiple quasi-phase-matched device using continuous phase modulation of  $\chi^{(2)}$  grating and its application to variable wavelength conversion," *IEEE J. Quantum Electron.*, **41** (2005) 1540-1547.
- 12) 井上 恭: "量子暗号通信の最近の動向", *応用物理*, **75** (2006) 1317-1323.
- 13) 鎌田英彦, 武居弘樹, 本庄利守, 西田好毅, 遊部雅生: "通信波長帯 PPLN 周波数上方変換検出器の非ゲートモード動作特性", 第 67 回応用物理学学会学術講演会, 29p-ZB-3 (2006).

(2006 年 12 月 30 日受理)