

マルチ QPM 素子を用いた多重周波数混合と多値変調信号の 位相感応増幅への応用

遊部 雅生^{†a)} 中村 一貴[†] フン チャンナ[†] 梅木 毅伺^{††}
竹ノ内弘和^{††}

Multiple Frequency Mixing Using Multiple Quasi-Phase Matched Device and Its
Application to Phase Sensitive Amplification of Multi-Level-Modulated Signal

Masaki ASOBE^{†a)}, Kazuki NAKAMURA[†], Hin CHANNA[†], Takeshi UMEKI^{††},
and Hirokazu TAKENOUCI^{††}

あらまし 複数の擬位相整合 (QPM) ピークの得られるマルチ QPM 素子中の多重周波数混合を用いると多値位相変調された信号の通信化を行うことができる。近年の光損傷耐性の高い LiNbO₃ 導波路作製技術の進展により、安定した多重周波数混合過程を利用することが可能になった。本論文ではこれらのマルチ QPM 素子中の多重周波数混合に関わる技術の進展を述べるとともに、周期分極反転 LiNbO₃ 導波路中の非縮退パラメトリック増幅との組合せにより基本的な多値信号である QPSK 信号の位相感応増幅を実現した結果について述べる。

キーワード 位相感応増幅, 擬位相整合, 多重周波数混合, ニオブ酸リチウム

1. ま え が き

近年、光通信の分野において多値変調信号等を用いた大容量信号の伝送技術が進展している。多値信号を用いることで単位周波数帯域あたりの伝送データ量である周波数利用効率を向上することが可能なためである。一方でシャノンの通信理論によれば周波数利用効率の上限は信号の S/N 比に決まることが知られており、高い周波数利用効率の実現には高い S/N 比の実現が必須の条件となる。一方で高い S/N 比を得るために光ファイバへの入射パワーを増大させると、光増幅器の自然放出光による雑音と光ファイバの非線形効果の相互作用により、一定のパワー以上ではむしろ信号の S/N 比が劣化するいわゆる非線形シャノン限界の問題が指摘されている [1]。このような課題を解決し

うる技術の一つとして、我々は周期分極反転 LiNbO₃ (PPLN) 導波路を用いた位相感応増幅器 (PSA) の研究を進めている [2]。縮退パラメトリック増幅を利用した PSA では励起光と同相の成分を増幅し、直交位相の成分を減衰させる。この性質により、PSA では従来のレーザ増幅器に比較して自然放出光の発生が小さく、増幅に伴う強度雑音の増加を防ぐことが可能になる [3]。更に位相に応じた利得を利用することで位相雑音を低減することも可能になる [4]。このように PSA は雑音の低減という観点で好ましい性質を有しているが、多値変調信号の増幅においては幾つかの課題がある。縮退パラメトリック増幅を利用した PSA では上述のように直交位相成分を減衰させる性質があり、直交位相成分を利用する多値変調信号の増幅にはそのままでは適用することができない。この課題については後に述べるように非縮退パラメトリック増幅を利用することで解決できることが知られている [5], [6]。非縮退パラメトリック増幅を利用する構成では直交位相成分の増幅も行われるため、縮退型の構成で得られるような強度雑音の低減は期待できないと考えられる。しかし、一般にパラメトリック利得媒質は信号光の強度に対して瞬時応答を示すため、利得の飽和領域で動作

[†] 東海大学工学部電気電子工学科, 平塚市
Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokai
University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, 259-1292
Japan

^{††} 日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所, 厚木市
NTT Device Technology Laboratories, NTT Corporation, 3-
1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi-shi, 243-0198 Japan

a) E-mail: asobe@tokai-u.jp

させることにより強度雑音の低減を図ることが可能である [6]. 別の課題としては PSA においては信号光の搬送波位相に同期した励起光の生成が必要となるが, 多値変調を施された信号から搬送波の位相情報を抽出することは一般的には困難である.

これらの課題に対して, 我々は多重擬位相整合 (マルチ QPM) 素子を用いた多重周波数混合による搬送波位相抽出と非縮退パラメトリック増幅構成を用いることにより, 基本的な多値変調信号である 4 値位相変調 (QPSK) 信号に対応する PSA を構成する試みを行っている [6]. 複数の周波数混合過程を組み合わせる (多重周波数混合) ことにより位相変調信号の通倍化が可能になり, 非縮退パラメトリック増幅に必要な入力信号の複素共役信号の発生と搬送波位相抽出が可能になる. このような多重周波数混合を効率的に行うためには, マルチ QPM 素子中において高パワーの第二高調 (SH) 波を発生する必要がある. しかしながら LiNbO_3 に高パワーの短波光を照射すると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とが知られており, 高パワーの SH 波を発生した際の屈折率変化による位相整合条件の変化が懸念される.

本論文ではマルチ QPM 素子の構成, 多重周波数混合の原理, マルチ QPM 素子の位相整合特性の安定性等のマルチ QPM 素子を利用するうえでの基礎的事項について述べるとともに, 多重周波数混合を適用した QPSK 信号に対応する PSA について述べる.

2. マルチ QPM 素子について

本研究で用いるマルチ QPM 素子の構造について簡単に述べる. 例えば非線形結晶を用いた第二高調波発生 (SHG) の過程において, 基本波の波長変換による強度の減衰が無視できるという小信号近似を用いると, SH 波の強度は次式で与えられる [7].

$$E_2 = i \frac{2\pi}{n_2 \lambda_2} |E_1|^2 \int_0^L d(z) \exp(-i\Delta\beta z) dz \quad (1)$$

ここで λ_2 は SH 光の波長, n_2 は SH 波長における屈折率, E_1 は基本波の電界, $d(z)$ は伝搬方向の位置 z における二次非線形定数, $\Delta\beta$ は基本波と SH 波長における伝搬定数の差である. 式 (1) をみると変換光の電界は非線形定数の空間的な分布関数を $\Delta\beta$ を変数としてフーリエ変換した量に比例することが分る. 図 1 (a) に示すように非線形定数の符号が一定周期 Λ_0 で反転するように分極反転された一般的な構造の PPLN に

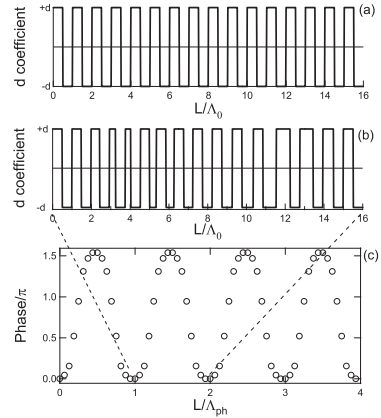


図 1 (a), (b) 非線形定数の分布と (c) 位相変調関数
Fig. 1 (a), (b) Spatial distribution of nonlinear coefficient and (c) phase modulation function.

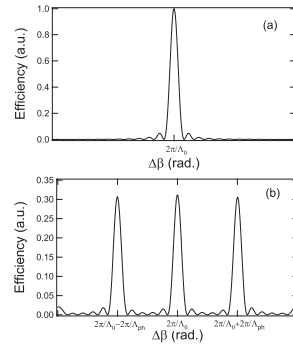


図 2 (a) 均一周期構造, (b) 位相変調構造における位相整合曲線
Fig. 2 Phase matching curves of (a) uniform periodic structure and (b) phase modulated structure.

おいては, 式 (1) の積分を実行して SH 光の強度 P_2 を求めると, 次式が得られる.

$$P_2(\Delta\beta) = \eta P_1^2 L^2 \frac{\text{sinc}^2[(\Delta\beta - 2\pi/\Lambda_0)L/2]}{[(\Delta\beta - 2\pi/\Lambda_0)L/2]^2} \quad (2)$$

ここで η は導波路の断面積等で決まる単位長さあたりの変換効率, P_1 は基本波の強度, L は PPLN 導波路の長さである.

式 (2) は図 2 (a) に示すように $\Delta\beta = 2\pi/\Lambda_0$ の所謂擬位相整合 (QPM) 条件を満たすときに最大値を示す sinc^2 関数の形となっている. 一定周期 Λ_0 で分極反転された PPLN において, 基本波波長を掃引して SH 光強度を測定すると, 狭い波長範囲では $\Delta\beta$ は基本波波長に対してほぼ線形に変化するために図 2 (a) のような sinc^2 関数型の位相整合曲線が得られる. こ

れに対して我々は PPLN の周期分極反転構造に分極反転周期よりも長い周期 Λ_{ph} で空間的な位相変調を施したマルチ QPM 素子を作製している [8]. 図 1 (b) に非線形定数の空間的な分布, 図 1 (c) に位相変調の関数の例を示す. このような素子では分極反転構造の波数 $2\pi/\Lambda_0$ が位相変調の波数 $2\pi/\Lambda_{ph}$ で変調されると捉えることができる. このような構造において式 (1) の積分を実行すると, 例えば図 1 (e) に示されるような複数の QPM ピークが次式を満足する波長で現れる位相整合曲線が得られる.

$$\Delta\beta = 2\pi \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{n}{\Lambda_{ph}} \right) \quad (3)$$

ここで n は任意の整数である.

実用上有効な QPM ピークがいくつ得られるかは, 用いる位相変調の波形や深さによって決定される [8]. 実際の素子の作製の際は最適化された位相変調関数を元に非線形定数の分布を計算し, そのデータに基づいて電界印加のための電極を形成するフォトマスクを作成する. そのデータを元にフォトリソグラフィにより電極を形成し, 電界印加法により LiNbO_3 の分極を反転し所望の構造を作製する. 実際に分極反転時のドメインの広がりやを考慮してマスクデータには若干の修正が施す必要があるが, 分極の境界位置に若干のランダムな変動があっても素子の効率が劣化するだけで, 位相整合曲線の形状は保たれることが分かっている [8].

3. 多重周波数混合について

2. で紹介したマルチ QPM 素子を用いると, 複数の周波数混合過程を同時に利用した多重周波数混合を行うことが可能になる [6]. 以下に多重周波数混合を用いた多値信号の位相情報の取扱いについて述べる. 図 3

に示すように QPSK 変調を施した信号光の波長をマルチ QPM 素子の QPM ピークの一つに一致させ, マルチ QPM 素子の位相整合ピークの周波数間隔だけ離調した無変調の局発光 (LO1) とともに, マルチ QPM 素子に入射することを考える. 信号光の波長は位相整合波長に一致しているために, SHG 過程により SH 光に変換される. この SH 光と LO1 の差周波発生 (DFG) により第 1 のアイドラ光 (idler1) が発生する. idler1 と信号光の周波数差は信号光と LO1 の周波数差に一致するため, idler1 の周波数は第 2 の QPM ピークに一致する. idler1 は SHG 過程による再び SH 光に変換される. この SH 光と信号光の DFG により idler2 が発生する. このように SHG 過程と DFG 過程が順次繰り返すことにより複数のアイドラ光を発生することができる. このとき, SHG 過程において光周波数だけでなく位相情報も通倍化されることを考慮すると, 各アイドラ光の位相は次式で与えられる.

$$\phi_{i1} = 2\phi_s - \phi_{L1} \quad (4)$$

$$\phi_{i2} = 3\phi_s - 2\phi_{L1} \quad (5)$$

$$\phi_{i3} = 4\phi_s - 3\phi_{L1} \quad (6)$$

ここで $\phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}$ は第 1, 2, 3 のアイドラ光の位相, ϕ_s は信号光の位相, ϕ_{L1} は LO1 の位相である. 式 (6) を見ると idler3 では信号光位相が 4 通倍されており, 位相が $\pi/2$ ごとに変化する QPSK 信号に対しては位相変調が相殺することが分る. また式 (5) を見ると idler2 では信号光位相が 3 通倍されており, QPSK 信号の四つの位相状態 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) がそれぞれ ($0, -\pi/2, -\pi, -3\pi/2$) へと変換され, QPSK 信号に対しては位相共役の関係にある信号光を得られることが分る. これらの性質を利用して後に述べるように, QPSK 信号からの搬送波抽出と非縮退パラメトリック増幅を用いた QPSK の位相感応増幅に利用することが可能である.

4. マルチ QPM の位相整合特性評価

これまでに説明したようにマルチ QPM 素子中の多重周波数混合を用いることで, 周波数間隔が一定の複数のアイドラ光を発生することが可能になる. しかし多重周波数混合を高効率に行うためには, マルチ QPM 素子の位相整合ピークが一定周波数間隔で維持されていることが前提となる. 多重周波数混合を利用する際は複数の波長変換過程を経るため高パワーの SH 光を発生する必要がある. LiNbO_3 導波路中で高

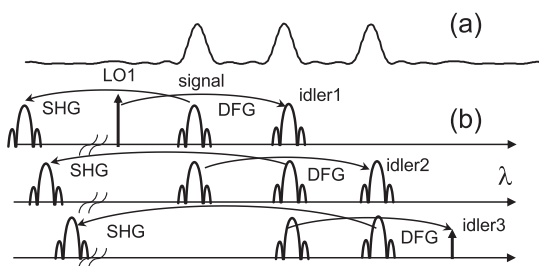


図 3 周波数混合における (a) 位相整合曲線と (b) 各成分の配置
Fig. 3 (a) Phase matching curve and (b) allocation of each components.

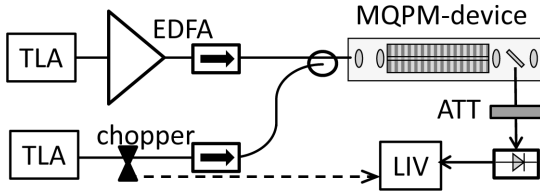


図 4 位相整合特性評価の実験系

Fig. 4 Experimental setup for measurement of phase matching curve.

パワーの SH 光が発生すると、フォトリフラクティブ効果による屈折率変化を生じる懸念がある。屈折率変化によって、導波路の伝搬方向に伝搬定数の差 $\Delta\beta$ の分布が生じると、位相整合曲線が変化することが懸念される。フォトリフラクティブ効果に対する耐性は導波路の作製方法の違いによる結晶内の欠陥密度に大きく依存する。Ti 拡散法よりもプロトン交換法の方が耐性が高く、更に結晶への不純物の拡散を伴わないウエハ直接接合や接着剤による接合導波路では更に高い耐性が得られることが知られている [9]。また SH 光波長における微弱な吸収により導波路の温度が変化し、屈折率変化を生じて位相整合特性が変化することも考えられる。多重周波数混合では素子自身が SH 光を発生しており、基本波の波長を変化させると SH 光の強度も位相整合曲線に沿って大きく変化してしまうため、実際の高パワー SH 光が発生している状態における位相整合特性を評価することは困難である。そこで我々は以下に述べるような方法により、高パワー SH 光が発生している状態における、直接接合法で作製されたマルチ QPM 素子の位相整合特性の評価を試みた [10]。作製した素子は三つの QPM ピークをもち、それぞれのピークにおける SHG 変換効率は約 700%/W、素子長 50mm の導波路の損失は 1.5dB であった。図 4 に実験系の概略を示す。2 台の波長可変レーザー (TLA) を使い、一方は EDFA で増幅を行い、他方は光チョップで変調を施し、両者を光アイソレータを介して光カプラで合波し、ファイバ入力可能なモジュールとして実装したマルチ QPM 素子に入力する。モジュール内のファイバと素子の結合損失は片端あたり 1.8dB 程度と見積もられる。まず、EDFA で増幅される波長可変レーザーの波長を掃引してマルチ QPM 素子から発生した SH 光を検出して位相整合曲線を測定した。図 5 に EDFA の出力が 23dBm の場合に測定された位相整合曲線の例を示す。この素子では 100GHz の周波数間隔で三つの QPM ピークが得られている。

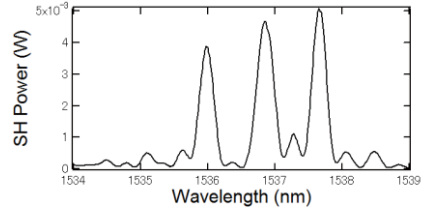


図 5 増幅光を用いた位相整合曲線の測定結果

Fig. 5 Phase matching curve measured using amplified signal.

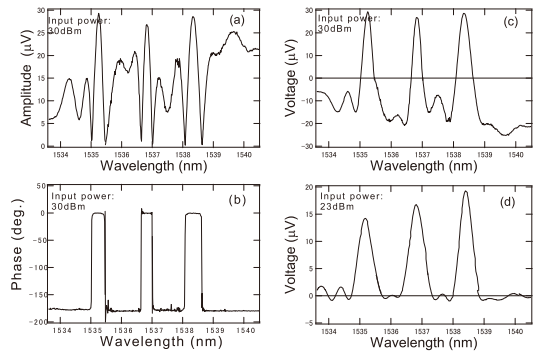


図 6 変調光を用いた位相整合曲線の測定結果

(a) 信号振幅, (b) 位相, (c), (d) 信号電圧

Fig. 6 (a) signal amplitude, (b) phase, and (c), (d) signal voltage in measurement of phase matching curve using modulated signal.

次に、レーザーの波長を中心となる QPM ピークに同調させ、高パワーの SH 光を発生する。更に光チョップで変調を施された 2 台目の波長可変レーザーの波長を掃引して、発生する SH 光及び高パワーの入射光と微弱な変調光の和周波 (SF) 光をフォトダイオードとロックインボルタメータを用いて検出し、位相整合曲線を測定した。この測定法では信号の位相の検出によって、SF 光の発生と SH 光の減衰を区別することが可能になる。図 6 (a), (b) に EDFA からの入力パワーが 30dBm の場合の、入射光の波長に対する測定信号の振幅と位相をそれぞれ示す。この条件下では 20dBm の SH 光が導波路から出力されている。図 6 (a) で主に観測される SH 光の振幅ピークの波長範囲においては図 6 (b) 中の信号の位相はほぼ 0° (同相) である。位相が 0° の状態は和集波発生 (SFG) 過程に相当する。一方、位相整合ピークから離調した場合、位相が -180° (逆相) となる領域が存在する。これは高パワーの SH 光と微弱な変調光の差周波発生 (DFG) によって、SH 光から長波長の光への逆変換が生じ、SH 光の

減衰が生じていることに相当する。図 6(a), (b) の信号強度と位相を用いて、SH 光の信号電圧を求めた結果を図 6(c) に示す。信号電圧が正負はそれぞれ SFG, DFG 過程に相当する。この結果をみると主要な位相整合ピークの間に見られるピークは、SH 光の減衰によるものであることが分かる。図 6(d) に EDFA 出力が 23dBm の場合の測定結果を示す。図 6(c), (d) を比較すると、入力パワーを変化させても SFG と DFG の割合が変化するだけで依然として位相整合曲線の形状は維持されていることが明らかとなった。また図 5 と図 6(c), (d) を比較すると、図 6(c), (d) では位相整合ピークが 200GHz 間隔で得られていることが分かる。これは SFG 過程で位相整合曲線を評価した場合、一方の入射光の波長を固定しているために、同様の位相整合条件を満足するために他方の入射光の波長が SHG 過程に比較して 2 倍変化する必要があるためである。このことを考慮すると SH 光が 20dBm 程度出力されている状態であっても位相整合曲線の形状が維持されていることが分かる。

5. QPSK 信号に対応する PSA

これまでに示してきたように直接接合型の LiNbO₃ 導波路を用いることにより、比較的高パワーの SH 光が発生している条件においても、マルチ QPM 素子の位相整合特性を保ちつつ、多重周波数混合を利用できることが確認できた。以下にマルチ QPM 素子を用いた QPSK 信号に対応する PSA の構成を検討した結果について述べる。図 7 に構成の概略を示す [6]。QPSK 変調された信号は、第 1 の局発光 (LO1) と合波され EDFA で増幅されたのちにマルチ QPM 素子 (PPLN1) に入射される。マルチ QPM 中では 3. で説明した多重周波数混合が生じ、複数のアイドラ光が発生する。マルチ QPM 素子の出力は LCOS 型の光フィルタに入力され、入力光と idler2、及び idler3 をそれぞれ分離して出力する。idler3 では信号位相が 4 通倍されているため、搬送波の位相情報を含んでお

り、サーキュレータを介して半導体レーザに注入同期を行うことにより、第 2 の局発光 (LO2) を発生することができる。LO1 と LO2 は合波され、EDFA で増幅されたのちに PPLN 導波路 2 に入射され、SFG によりパラメトリック増幅のための励起光に変換される。LCOS 型光フィルタから出力された入力光と idler2 及び励起光は PPLN 導波路 3 に入射され、非縮退パラメトリック増幅が行われる。各構成部品を接続する光ファイバの伸び縮みによる位相変化は EO 位相変調器と PZT 素子を用いた位相同期ループ (PLL) により安定化している。このとき励起光の位相 ϕ_p は次式で与えられる。

$$\phi_p = \phi_{L1} + \phi_{L2} = 4\phi_c - 2\phi_{L1} \quad (7)$$

ここで ϕ_{L2} , ϕ_c はそれぞれ LO2, 信号搬送波の位相である。一方、信号光, idler2 の位相の和は次式で与えられる。

$$\phi_s + \phi_{i2} = 4\phi_s - 2\phi_{L1} \quad (8)$$

これらの式から分かるように信号位相が $\pi/2$ の整数倍のとき、すなわち QPSK 変調の場合、両者の間では位相が一致し、非縮退パラメトリック増幅による利得が得られる。上記のような QPSK 信号とその 3 通倍信号の非縮退パラメトリック増幅による位相感応増幅の特性は以下のような解析によって理解することができる。PPLN 導波路 3 における信号光の電界は次式で与えられる [6], [11]。

$$\begin{aligned} \bar{E}_{out} \exp(i\phi_{out}(t)) = & \bar{E}_s \exp(i\phi_s(t)) \cosh(gL) \\ & + \bar{E}_{I2} \exp(-i3\phi_s(t)) \sinh(gL) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで \bar{E}_{out} , \bar{E}_s , \bar{E}_{I2} はそれぞれ出力信号, 入力信号, idler2 の電界の包絡線の大きさであり、 g は単位当たりのパラメトリック利得係数、 L は PPLN 導波路の長さである。式 (9) の第 1 項は増幅された信号成分を表しており、第 2 項は励起光とアイドラ 2 の差周波発生によって信号に可干渉的に付加される成分を表している。図 8 に式 (9) を用いて計算した入力光の位相 ϕ_s に対する信号利得と出力信号の位相を示す。素子長全体でのパラメトリック利得係数 gL は 1.3, idler2 と入力信号の強度の比率 $|E_{i2}|^2/|E_s|^2$ は 0.2, 0.4 の値を仮定している。図 8(a) に見られるように利得のピークは $\pi/2$ の整数倍ごとに得られ、図 8(b) に見られるように出力信号の位相は $\pi/2$ ごとの階段状の値に収束す

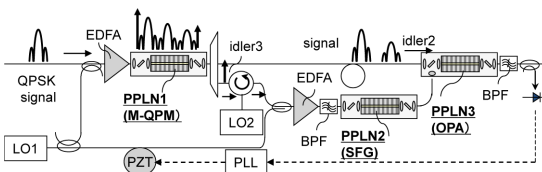


図 7 QPSK 信号に対応する PSA の構成
Fig. 7 Configuration of PSA for QPSK signal.

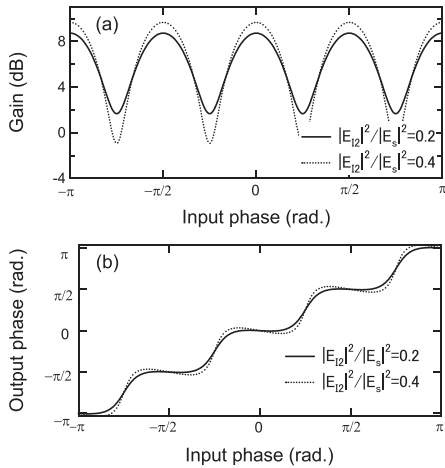


図 8 信号位相と利得, 出力位相の関係

Fig. 8 Gain and output phase as a function of input phase.

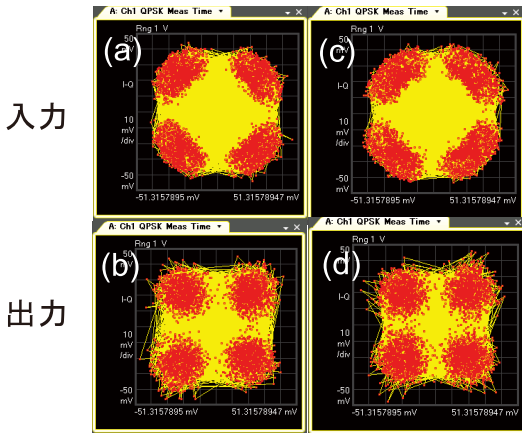


図 9 増幅前後の信号のコンスタレーション

Fig. 9 Constellation of (a), (c) inputs and (b), (d) outputs.

ることが分る。

以上のようにマルチ QPM 素子を用いた多重周波数混合による位相の通倍化と非縮退パラメトリック増幅を利用することにより QPSK 信号に対応する位相感応増幅が可能となる。図 8 に示した位相再生効果を実験的に確認するために、20 Gbaud QPSK 信号に人工的な位相雑音を付与した信号を図 7 の構成の PSA で増幅し、位相再生増幅の可能性を検証した。このときの信号光とアイドラ光の強度比 $|E_{i2}|^2/|E_s|^2$ は 0.31, PSA の内部信号利得は 10dB であった。図 9 に異なる量の位相雑音の含む信号を用いたときの、増幅前後における信号のコンスタレーションマップを示す。増幅

前の位相雑音の分布は (a) 45.2° , (c) 57.6° に対して、増幅後では (c) 40.6° , (d) 48.7° であり、PSA の位相再生効果により、位相雑音の低減が得られていることが確認できる。増幅前後で強度雑音の増加がみられるが、これはマルチ QPM 素子中でのアイドラ光の発生過程における損失が主な原因であり、多重周波数混合過程の更なる効率向上が望まれる。現在の直接接合導波路の効率はクラッドとして利用している LiTaO_3 と LiNbO_3 の屈折率差によって制限されている [9]。今後の更なる高効率化の実現に向けては、より大きな屈折率差の得られる基板材料への変更など導波路プロセスの更なる改良が望まれる。なお、パラメトリック増幅媒質はレーザ増幅媒質とは異なり、入力の強度変動に対して利得が瞬時応答を示すため、利得飽和の得られるような強い入力パワーで動作させることにより、強度雑音を低減することが可能であることが確認されている [6]。

6. むすび

PPLN 導波路の周期分極反転構造に空間的な位相変調を施すことにより、複数の位相整合ピークを有するマルチ QPM 素子が得られた。また近年のウエハ直接接合技術を用いた LiNbO_3 導波路作製技術の進展により、入力パワーが大きな条件においても、位相整合曲線が維持されることが明らかとなり、複数の波長変換過程を同時に行う多重周波数混合過程を利用することが可能となった。更にマルチ QPM 素子中での多重周波数混合を利用することにより位相変調信号の通倍化を行い、PPLN 導波路中の非縮退パラメトリック増幅を利用することにより、QPSK 信号の位相感応増幅が可能であることを示した。今後 QAM 等の更に高度な変調フォーマットに対して PSA を適用するためには、伝送信号からの搬送波情報の抽出が最大の課題であると考えられ、その実現のためには更なる工夫が必要であると考えられる。

文 献

- [1] A. Bononi, P. Serena, and N. Rossi, "Nonlinear signal-noise interactions in dispersion-managed links with various modulation formats," *Optical Fiber Technology*, vol.16, pp.73–85, 2010.
- [2] 遊部雅生, "周期分極反転 LiNbO_3 (PPLN) 導波路を用いた低雑音位相感応増幅器," *信学誌*, vol.96 no.9, pp.731–736, Sept. 2013.
- [3] M. Asobe, T. Umeki, and O. Tadanaga, "Phase sensitive amplification with noise figure below the 3 dB quantum limit using CW pumped PPLN waveguide,"

Opt. Express, vol.10, pp.13164–13172, 2012.

- [4] M. Asobe, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, and H. Takenouchi, “Phase squeezing and dispersion tolerance of phase sensitive amplifier using PPLN waveguide,” J. Opt. Soc. Am. B, vol.31, pp.3164–3169, 2014.
- [5] J. Kakande, A. Bogris, R. Slavik, F. Parmigiani, D. Syvridis, P. Petropoulos, and D.J. Richardson, “First demonstration of all-optical QPSK signal regeneration in a novel multi-format phase sensitive amplifier,” Proc. 36th European Conference on Optical Communications (ECOC 2010) PD 3.3, 2010.
- [6] M. Asobe, T. Umeki, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto, “In-line phase-sensitive amplification of QPSK signal using multiple quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide,” Optics Express, vol.22, pp.26642–26650, 2014.
- [7] M.M. Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, and R.L. Byer, “Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances,” IEEE J. Quantum Electron., vol.28, pp.2631–2654, 1992.
- [8] 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., vol.41, pp.1540–1547, 2005.
- [9] M. Asobe, O. Tadanaga, T. Yanagawa, T. Umeki, Y. Nishida, and H. Suzuki, “High-power mid-infrared wavelength generation using difference frequency generation in damage-resistant Zn:LiNbO₃ waveguide,” Electron. Lett., vol.44, p.288, 2008.
- [10] H. Channa, 中村一貴, 遊部雅生, 梅木毅伺, 竹ノ内弘和, “マルチ QPM 素子の位相整合特性におけるフォトリフラクティブ効果の評価,” レーザ学会学術講演会第 36 回年次大会, 09p VII-2, 2016.
- [11] J. Kakande, R. Slavík, F. Parmigiani, A. Bogris, D. Syvridis, L. Grüner-Nielsen, R. Phelan, P. Petropoulos, and D.J. Richardson, “Multilevel quantization of optical phase in a novel coherent parametric mixer architecture,” Nat. Photon., vol.5, pp.748–752, 2011.

(平成 28 年 5 月 24 日受付, 9 月 26 日再受付,
29 年 2 月 7 日公開)



遊部 雅生 (正員)

1987 慶応義塾大学・理工卒。1989 同大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、非線形光学効果を用いた光スイッチ、波長変換素子、及び超高速光伝送方式の研究に従事。2013 年より、東海大学工学部電気電子工学科教授。博士(工学)。2014 年フジサンケイアイ先端技術大賞産経新聞社賞受賞。2016 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ賞受賞。The Optical Society, 応用物理学会, レーザ学会各会員。



中村 一貴

2015 東海大学・工学卒。同年同大学院修士課程在学中。現在、光通信技術の研究に従事。応用物理学会会員。



フン チャンナ

2009 Preh kossomak polytechnic Institute 卒。2014 東海大学大学院修士課程在学中。現在、光通信技術の研究に従事。



梅木 毅伺 (正員)

2002 学習院大学理学部卒。2004 東京大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、非線形光学デバイスを用いた光信号処理技術の研究に従事。2014 フジサンケイアイ先端技術大賞産経新聞社賞受賞。博士(学術)。



竹ノ内弘和 (正員：シニア会員)

1992 東京大学教養学部卒。1994 東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、半導体レーザ、光電子融合信号処理技術等の研究に従事。2014 フジサンケイアイ先端技術大賞産経新聞社賞受賞。博士(工学)。現在、NTT 先端集積デバイス研究所主幹研究員グループリーダー。応用物理学会, IEEE 各会員。