

高効率光サンプリングのためのLiNbO₃導波路擬似位相整合和周波発生デバイス

石月 秀貴^{†a)} 藤村 昌寿[†] 栖原 敏明[†] 西原 浩[†]

LiNbO₃ Waveguide Quasi-Phase-Matched Sum-Frequency Generation Device for High-Efficiency Optical Sampling

Hideki ISHIZUKI^{†a)}, Masatoshi FUJIMURA[†], Toshiaki SUHARA[†],
and Hiroshi NISHIHARA[†]

あらまし 高効率な光サンプリングを可能とするLiNbO₃導波路擬似位相整合和周波発生(SFG)デバイスを検討する。デバイスの設計及びサンプリング特性の検討から、ピコ秒光サンプリングが高い変換効率で実現できることを明らかにした。扇形分極反転グレーティングを備えた長さ5mmのデバイスを作製し、光サンプリング実験を行った。半導体レーザをゲインスイッチ駆動して得た幅25psのサンプリングパルス光を用い、波長1.5μm帯信号光の波形を観測できた。規格化SFG変換効率43%/Wでの光サンプリングを実現した。

キーワード 非線形光学, 光サンプリング, 光導波路, 和周波発生, 擬似位相整合

1. ま え が き

導波路擬似位相整合(QPM)第2高調波発生(SHG)デバイスは、小型短波長コヒーレント光源の実現のため、盛んに研究されてきた。このデバイスでは、QPM技術[1]の利用により所望の波長において非線形光学テンソルの最大成分 d_{33} を通じたSHGが可能である。また、導波路の光の閉じ込め効果によって長い相互作用長にわたって高い励起光パワー密度を実現できる。これらの特徴を生かして、これまでに規格化変換効率で100%/Wを超えるような高効率なSHGデバイスが実現されている[2]~[4]。

2次非線形光学効果は高速の現象であるので、波長変換だけでなく光パルスの自己相関波形観測やパルス圧縮、光サンプリングなどの高速光信号処理にも利用できる。光サンプリングは、高速で変化する光波形の観察や時分割多重化光信号の分離に用いることのできる重要な技術である。これまでに、LiIO₃のバルク

結晶による和周波発生(SFG)を用いた光サンプリングが報告されている[5]ほか、KTiOPO₄やAANPのバルク結晶によるTypeII位相整合SFGで、サブピコ秒の時間分解能をもつ光サンプリングも報告されている[6],[7]。しかしバルク結晶を用いたSFGの変換効率はたかだか 4×10^{-2} %/W [7]であった。これまで導波路QPM技術が光サンプリングに適用された報告例は見当たらない。

本論文では、高効率を実現でき、単一の材料で広範囲の波長に対応可能で、小型集積化にも有利なLiNbO₃導波路QPM-SFGデバイスを用いた光サンプリングを提案する。以下では、規格化変換効率、消光比、時間分解能などの光サンプリング特性に関する解析、光サンプリング用デバイスの設計・作製、及び作製デバイスによる光サンプリング実験の結果について述べる。

2. 導波路QPM-SFGデバイスを用いた光サンプリングの提案

図1に光サンプリング用LiNbO₃導波路QPM-SFGデバイスの構成を示す。Z板LiNbO₃上に形成したチャネル導波路アレーと扇形のQPM用分極反転グレーティングとで構成する。各チャネルにおけるグレーティン

[†] 大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻, 吹田市
Dept. Electron., Grad. School Eng., Osaka Univ., 2-1
Yamada-Oka, Suita-shi, 565-0871 Japan
a) E-mail: ishizuki@ele.eng.osaka-u.ac.jp

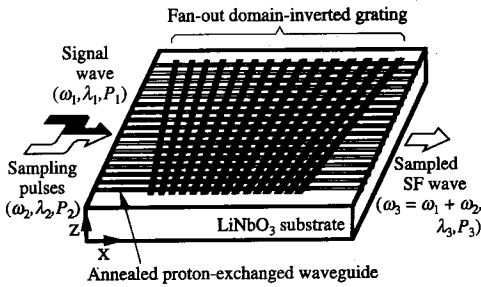


図1 光サンプリング用導波路 QPM-SFG デバイスの構成
Fig.1 Waveguide QPM-SFG device for optical sampling.

グの周期がわずかずつ異なるため、適切なチャネルの選択により広い波長帯で位相整合を実現でき、また作製誤差による残留位相整合誤差を補償した QPM を達成できる [8].

周期的な観測対象信号光 (角周波数 ω_1 , 波長 λ_1 , パワー P_1) と、サンプリング光パルス (ω_2, λ_2, P_2) とを同一のチャネルに TM モードで励振すると、これらの光の周波数の和の周波数 ($\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$) をもつ和周波 (SF) 光 (λ_3, P_3) が得られる。信号光及びサンプリング光として、ともに波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光を用いると、SF 光波長は約 $0.75\mu\text{m}$ となる。SFG 変換効率がそれほど大きくなく、SFG による 2 入力光パワーの減衰が無視できる場合、SF 光パワー P_3 は、2 入力光パワーの積に比例する ($P_3 \propto P_1 P_2$)。したがってこのデバイスは高速光乗算器として動作する。サンプリング光パルスの繰り返しを信号光の繰り返し周波数に対して Δf だけ低く設定し、SF 光パルス列を適当な時定数をもつ光検出器を用いて積分検出すると、信号光波形を時間軸で拡大して繰り返し周波数 Δf で観察できる。

3. 光サンプリング用導波路 QPM-SFG デバイスの設計

3.1 擬位相整合条件

連続光を入力したときの QPM-SFG デバイスから得られる SF 光パワー P_3 は、SFG による 2 入力光パワーの減衰が無視できるとき、近似的に以下の式で表される。

$$P_3 = \kappa^2 P_1 P_2 L^2 \left[\frac{\sin(\Delta L)}{\Delta L} \right]^2 \quad (1)$$

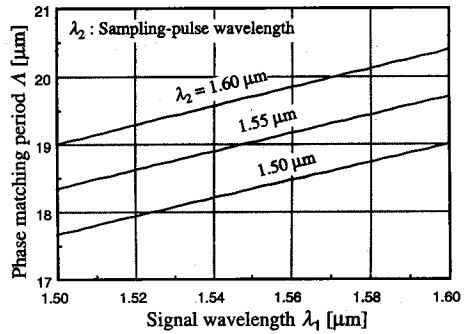


図2 擬位相整合周期の入力光波長依存性
Fig.2 Dependence of domain-inversion period for QPM on input wavelengths.

$$\begin{aligned} 2\Delta &= \beta_3 - \beta_1 - \beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda} \\ &= 2\pi \left(\frac{N_3}{\lambda_3} - \frac{N_1}{\lambda_1} - \frac{N_2}{\lambda_2} - \frac{1}{\Lambda} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

上式は、QPM 第 2 高調波発生 (SHG) の理論式 [1], [9] と同様に導出できる。 κ は SFG 結合係数、 Δ は位相不整合量、 L はデバイス長、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 及び N_1, N_2, N_3 はそれぞれ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ に対する伝搬定数と実効屈折率である。 Λ は分極反転グレーティングの周期である。 QPM 条件は $\Delta = 0$ で与えられる。 図 2 にこの条件を満たす Λ の λ_1, λ_2 依存性を示す。 実効屈折率 N_1, N_2, N_3 の値はバルク LiNbO₃ 結晶 (24.5°C) の異常光屈折率 n_e で近似した。

信号光波長が QPM 条件からずれると SFG 効率が低下する。 SFG 効率の信号光波長依存性曲線の半値全幅 (波長受容幅) のデバイス長 L 依存性を式 (1), (2) より求めた。 結果を図 3 に示す。 λ_2 は $1.543\mu\text{m}$ とした。 デバイス長 $L=5\text{mm}$ での信号光波長受容幅は 4.9nm である。

3.2 規格化変換効率

入力光と SF 光の導波モードプロファイルをガウス関数で近似し、それらのピーク位置が一致していると仮定する。 導波路幅方向に比べて深さ方向の近似精度は劣るが簡単のためガウス近似した。 また、2 入力光のモードプロファイルは等しいとする。 分極反転グレーティングが反転幅:非反転幅=1:1 で、反転深さが導波路深さに比べて十分深いような理想的な構造を有するとすれば、SFG 結合係数 κ は以下のように表される。

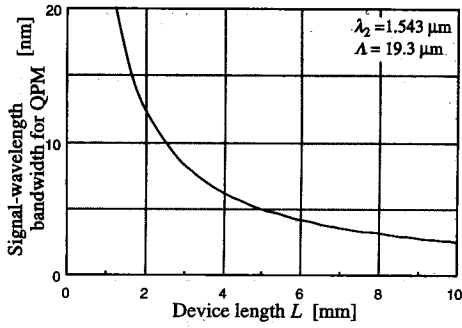


図3 信号光波長受容幅のデバイス長依存性
Fig. 3 Dependence of signal-wavelength bandwidth for QPM on device length.

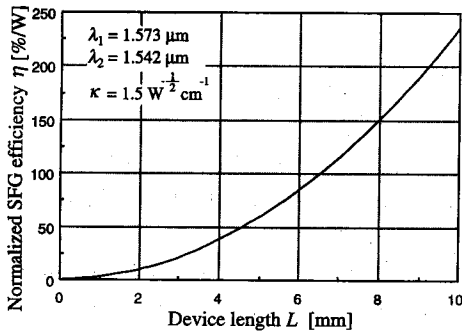


図4 規格化SFG変換効率のデバイス長依存性
Fig. 4 Dependence of normalized SFG efficiency on device length.

$$\kappa^2 = \frac{(16\omega_3)^2}{\pi^3} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{d_{33}^2}{N_1 N_2 N_3} \times \frac{W_{y3} W_{z3}}{W_{y1}^2 + 2W_{y3}^2} \frac{W_{z3}}{W_{z1}^2 + 2W_{z3}^2} \quad (3)$$

W_{y1}, W_{z1} は2入力光モード分布の導波路幅方向、深さ方向の強度 $1/e^2$ 全幅、 W_{y3}, W_{z3} はSF光の $1/e^2$ 全幅である。 $d_{33} = 4.2 \times 10^{-22} \text{ F/V}$ 、2入力光のFWHMモードサイズは $7.2 \times 6.3 \mu\text{m}^2$ 、SF光のFWHMモードサイズは $2.4 \times 1.8 \mu\text{m}^2$ とすれば、 κ は $1.5 \text{ W}^{-\frac{1}{2}} \text{ cm}^{-1}$ となる。QPM条件が満たされたときの規格化SFG変換効率 $\eta = P_3/(P_1 P_2) = \kappa^2 L^2$ のデバイス長 L 依存性を図4に示す。 L が5mm以上では、60%/W以上の高い変換効率が期待できる。

3.3 消光比

図1に示したQPM-SFGデバイスでは、SFGだけでなく、信号光とサンプリング光のそれぞれに対して弱い位相不整合SHGが起こる。

信号光とサンプリング光が入射したときのそれぞ

れの第2高調波(SH)光のパワーを P_{11}, P_{22} とすると、 P_{11} は近似的に次式で表される[9]。

$$P_{11} = \kappa_{\text{SH1}}^2 P_1^2 L^2 \left[\frac{\sin(\Delta_{\text{SH1}} L)}{\Delta_{\text{SH1}} L} \right]^2 \quad (4)$$

κ_{SH1} はSHG結合係数、 Δ_{SH1} はSHG位相不整合量である。 $\lambda_1 \approx \lambda_2$ のとき、 $\kappa \approx 2\kappa_{\text{SH1}}$ である。

P_{11} は $\Delta_{\text{SH1}} L$ に依存して振動する関数であり、その包絡線は、

$$P'_{11} = \frac{\kappa_{\text{SH1}}^2 P_1^2}{\Delta_{\text{SH1}}^2} \quad (|\Delta_{\text{SH1}} L| > \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

で表される。 P_{22} についても同様である。

これらのSH光は光サンプリングには不要の背景光として検出されてしまう。ここで、光サンプリングにおける消光比を $(P'_{11} + P'_{22})/P_3$ により定義する。この消光比は P_1, P_2 に依存するため、規格化消光比 R を、

$$R \equiv \frac{P'_{11} + P'_{22}}{P_3} \frac{2P_1 P_2}{P_1^2 + P_2^2} \quad (6)$$

と定義する。 $\Delta \approx 0$ のとき、

$$R \approx \frac{1}{2(\Delta_{\text{SH1}} L)^2} \quad (|\Delta_{\text{SH1}} L| > \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

である。図5に、計算した R のデバイス長 L 依存性を示す。 $\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|$ である。例えば、 $L = 5 \text{ mm}$ 、 $\Delta\lambda = 34 \text{ nm}$ での背景光パワーは、 $P_1/P_2 = 1, 0.1, 0.01$ のときにそれぞれ、SF光パワーの0.12%、0.62%、6.2%以下となる。ここでは λ_1, λ_2 ともに $1.5 \mu\text{m}$ 帯としたが、例えば $\lambda_1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ に対して $\lambda_2 \sim 1.3 \mu\text{m}$ として、 $\Delta\lambda$ を大きくすれば容易に消光比を改善 (R を小さく) できる。

3.4 時間分解能

光サンプリングにおける時間分解能は主にサンプリング光パルス幅で制限されるので、高い分解能を得るためには幅の短いサンプリング光パルスを用いる必要がある。SHGでは短いパルスを用いた動作での効率はCWの場合の理論式で与える値より低下することがよく知られている[10]。同様にQPM-SFGでもパルス幅を短くすると、以下のような三つの原因によりSFG効率が低下するおそれがある。

- 導波路伝搬に伴うパルス幅の広がり
- サンプリング光パルスとSF光パルス間の時間的ウォークオフ

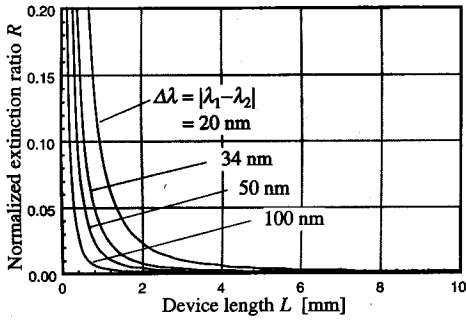


図5 規格化消光比のデバイス長依存性
Fig. 5 Dependence of normalized extinction ratio on device length.

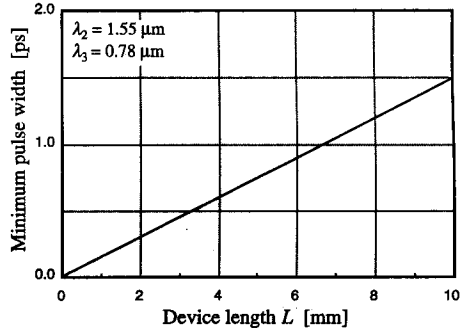


図6 許容最小パルス幅のデバイス長依存性
Fig. 6 Dependence of minimum pulse width on device length.

● パルス光スペクトル幅の QPM-SFG 受容幅超過これらに起因する効率低下が問題とならない許容パルス幅を計算した。パルス光はフーリエ限界パルスを仮定し、実効屈折率分散は LiNbO₃ の異常光屈折率のそれで近似して計算した。

半幅全幅 τ のガウスパルスが L だけ伝搬した後のパルス幅 τ' は以下で表される [11]。

$$\tau' = \tau \left[1 + 16(\ln 2)^2 \frac{\beta^2}{\tau^4} L^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \beta = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \quad (8)$$

$L \leq 10\text{mm}$, $\tau \geq 1\text{ps}$ では $(\tau' - \tau)/\tau \ll 1$ であり、パルス広がりの影響は無視できるとわかった。

サンプリング光パルス (群速度 v_{g2}) と SF 光パルス (v_{g3}) の群速度差により生じるウォークオフがサンプリングパルス幅 τ 程度以下になる条件は、

$$\left| \frac{L}{v_{g3}} - \frac{L}{v_{g2}} \right| = L \left| \frac{\partial \beta_3}{\partial \omega_3} - \frac{\partial \beta_2}{\partial \omega_2} \right| < \tau \quad (9)$$

で与えられる。

一方、幅 τ のパルス光には $\Delta f = 0.441/\tau$ の周波数広がりがある。中心周波数成分に対して QPM 条件が満たされても、それ以外の周波数成分ではずれが生じて SFG 効率が低下する。信号光周波数広がりがあるサンプリング光パルスのそれに比べて十分小さいとすると、サンプリング光パルスの $\omega_2 + \delta\omega_2$ 成分における位相不整合は式 (2) から以下のように表される。

$$2\Delta \sim \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial \omega_3} - \frac{\partial \beta_2}{\partial \omega_2} \right) \delta\omega_2 \quad (10)$$

式 (1) より SFG 効率の半値全幅は $|\Delta L| = 1.39$ で表されるので、著しい効率低下を招かないサンプリング光

パルス幅 τ に対する条件は近似的に

$$L \left| \frac{\partial \beta_3}{\partial \omega_3} - \frac{\partial \beta_2}{\partial \omega_2} \right| < 2.01\tau \quad (11)$$

で表される。式 (11) は式 (9) と同形である。これはこれら 2 要因による制限が本質的に同じものであることを意味している。図 6 に、 $\lambda_2 = 1.55\mu\text{m}$, $\lambda_3 = 0.78\mu\text{m}$ において式 (11) で与えられる許容最小パルス幅 τ のデバイス長 L 依存性を示す。 $L = 5\text{mm}$ での許容最小パルス幅は 0.8ps 程度となることがわかった。

4. デバイスの作製

作製したデバイスの仕様を表 1 に示す。 $\lambda_1 \sim 1.57\mu\text{m}$, $\lambda_2 \sim 1.54\mu\text{m}$ (波長差 $\Delta\lambda \sim 30\text{nm}$) とした。扇形分極反転グレーティングの最大周期 A_{max} , 最小周期 A_{min} は、図 2 に示した λ_1, λ_2 に対する擬位相整合条件と、その実効屈折率の不確定さから決定した。分極反転グレーティングの周期 A に関する SFG 位相整合受容幅 δA は式 (2) より 66nm であり、チャンネル数 m は $(A_{\text{max}} - A_{\text{min}})/\delta A < m$ を満たすように 80 本とした [8]。

分極反転グレーティングは電圧印加法 [2], [3] により作製した。Z 板 LiNbO₃ (厚さ 0.15mm) の +Z 面に絶縁層とそれを覆う Al 膜からなる波板電極を、-Z 面には Au の一様電極を設けた。両電極間に約 4kV のパルス電圧を印加して、-Z 面まで至る周期的反転領域を形成した。図 7 にエッチングした結晶表面の SEM 写真を示す。反転部幅 : 非反転部幅 = 1 : 1 で均一な分極反転構造が得られていることがわかる。チャンネル導波路の形成には、プロトン交換・アニール法を用いた。+Z 面にチャンネル状の開口をもつ Al 膜を形成し、この Al

表1 作製したデバイスの仕様
Table 1 Specifications of the QPM-SFG device.

分極反転グレーティング		
周期	16.0~18.7 μm	
相互作用長	5mm	
面積	5 \times 2mm ²	
チャンネル導波路アレー		
Alマスク開口幅	3.5 μm	
隣接チャンネル間隔	25 μm	
チャンネル数	80	

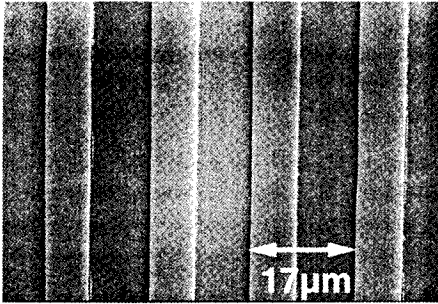


図7 分極反転グレーティング構造 (エッチング後)
Fig.7 Domain-inverted grating structure (after etching).

膜をマスクとして、200°Cの溶融安息香酸中で1.5時間の選択プロトン交換処理を行った。更に酸素雰囲気中で350°C、4時間のアニール処理を施してチャンネル導波路を形成した。最後に導波路両端面を光学研磨してデバイスとした。

5. SFG特性の測定

作製したデバイスに連続光を入射してSFG特性を測定した。 $\lambda_1 = 1.573\mu\text{m}$ と $\lambda_2 = 1.542\mu\text{m}$ の二つの半導体レーザー光を入力光とした。このとき周期16.47 μm の分極反転グレーティングをもつチャンネル導波路において、 $\lambda_3 = 0.779\mu\text{m}$ のSF光が得られた。 λ_1 と λ_2 及び λ_3 の導波モードのFWHMモードサイズ(導波路幅方向 \times 深さ方向)はそれぞれ、 $7.2 \times 6.3\mu\text{m}^2$ 、 $2.4 \times 1.8\mu\text{m}^2$ であった。

図8にSF光パワー P_3 の2入力光のパワー P_1 及び P_2 に対する依存性を示す。 P_1, P_2, P_3 は導波路出口で測定したパワーを用いた。SF光パワー P_3 は P_1 と P_2 の積に比例しており、作製したQPM-SFGデバイスが光乗算器として機能することが確認できた。デバイスの規格化SFG効率 η は、43%/Wであった。図4で示したグラフは上記のモードサイズ測定値を用いて計

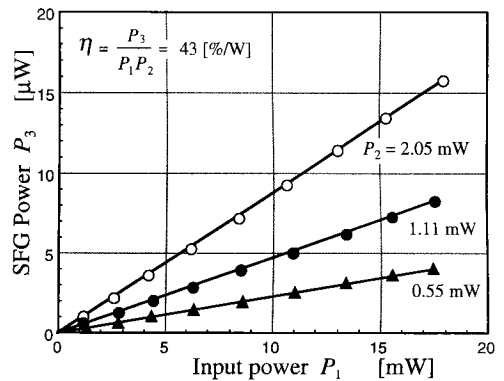


図8 和周波光パワーの入射光パワー依存性
Fig.8 Measured dependence of SFG power on input powers.

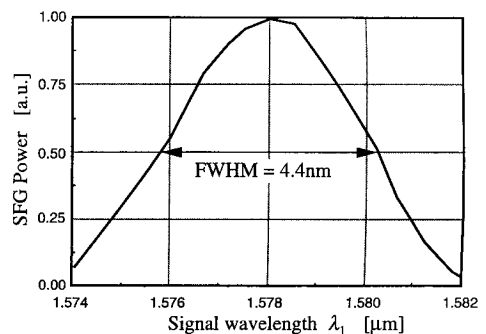


図9 和周波光パワーの入射光波長依存性
Fig.9 Measured dependence of SFG power on input wavelength.

算した規格化SFG効率の理論値である。 $L=5\text{mm}$ における理論効率は59%/Wであり、実験値はこれに近い値であった。バルク結晶を用いた光サンプリング実験[6], [7]における変換効率に比較して3けた以上の効率改善が達成できた。

図9に、SF光パワー P_3 の波長 λ_1 依存性を示す。 λ_2 は $1.543\mu\text{m}$ に固定して測定した。 λ_1 波長受容幅は4.4nmであり、理論値4.9nmにほぼ一致した。

6. 光サンプリングの実験

図10に光サンプリング実験の光学系を示す。外部共振器型半導体レーザー($\lambda_1 = 1.577\mu\text{m}$)を1GHzの正弦波で直接変調した光(平均パワー:5mW)を観測対象の信号光とした。DFB LD($\lambda_2 = 1.543\mu\text{m}$)を約1GHzの繰り返しでゲインスイッチ駆動して得られるパルス光をEDFAで増幅してサンプリング光バル

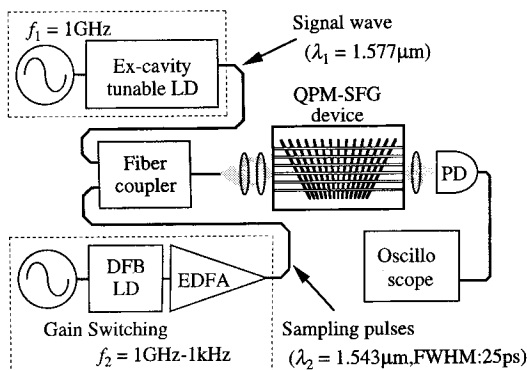


図10 光サンプリング実験光学系
Fig. 10 Experimental setup for optical sampling.

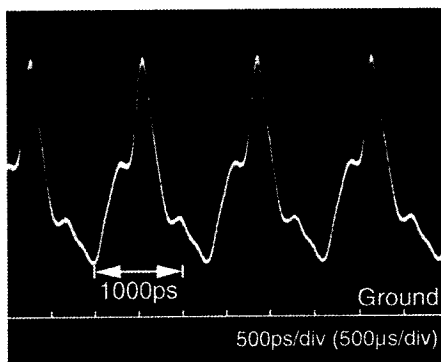
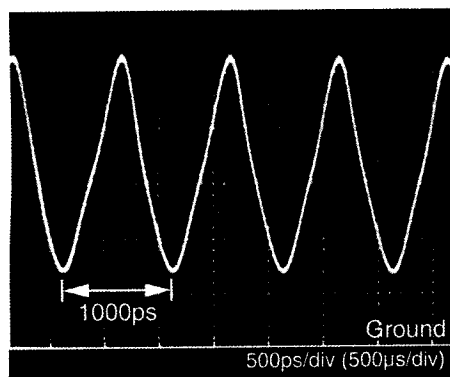
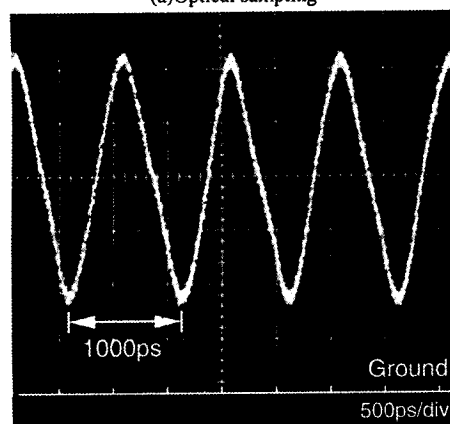


図12 光サンプリングにより得られた信号光波形
Fig. 12 Sampled signal waveform obtained by optical sampling.



(a)Optical sampling



(b)High-speed InGaAs PIN PD + sampling oscilloscope

図11 観測された信号光波形
Fig. 11 Obtained signal waveform.

スとした。このDFB LD 出力パルス光の自己相関波形をSHG オートコリレータを用いて測定したところ、その半値全幅は38psであった。したがってサンプリング光パルス幅は25psであった。信号光とサンプリング光パルスファイバケーブルで結合して、SFG位相整合条件を満たすチャネル導波路に入力した(信号光平均パワー:0.8mW, サンプリング光平均パワー:20mW)。発生するSF光をSi PIN フォトダイオード(PD)とオシロスコープを用いて検出すると、図11(a)に示すような信号光波形を観測することができた。これより本方式による光サンプリング動作が確認できた。サンプリング波形の繰返し周波数は、信号光とサンプリング光パルスの周波数差に等しい1kHzであった。図11(b)は、同じ信号光波形を高速InGaAs PIN PD(帯域10GHz)とサンプリングオシロスコープ(帯域3.5GHz)を用いて観察した結果である。

信号光あるいはサンプリング光だけを単独で入力したときに発生するSH光パワーを測定し、消光比を測定した。SH光パワーは、SF光平均パワーの5%以下であった。

図12は、信号光源である外部共振器型半導体レーザの駆動条件を変えたときに発生した信号波形を観察した結果である。100ps程度の変化も鮮明に観察できていることがわかる。これより100ps以下の時間分解能をもつことがわかった。実際の時間分解能はサンプリング光パルス幅と同程度の約25psと考えている。

7. むすび

LiNbO₃ 導波路擬位相整合和周波発生デバイスを利用した光サンプリングを提案した。作製したデバイ

スを用いた実験によって、高効率な光サンプリング動作を確認した。導波路擬似位相整合技術の利用は、光サンプリングを高効率化するだけでなく、光サンプリング用デバイスの小型集積化や任意波長への対応も可能とする。これらの特徴を生かして、将来は広範囲の波長に対応可能な集積光サンプリングヘッドの実現も期待できる。

文 献

- [1] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. S. Pershan, "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric," *Phys. Rev.*, vol.127, pp. 1918-1939, 1962.
 - [2] M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, and K. Watanabe, "First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.*, vol.62, no.5, pp.435-436, 1993.
 - [3] K. Kintaka, M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara, "High-efficiency LiNbO₃ waveguide second-harmonic generation devices with ferroelectric-domain-inverted gratings fabricated by applying voltage," *IEEE J. Light-wave Technol.*, vol.14, no.3, pp.462-468, 1996.
 - [4] K. Mizuuchi, H. Ohta, K. Yamamoto, and M. Kato, "Second-harmonic generation with a high-index-clad waveguide," *Opt. Lett.*, vol.22, no.16, pp.1217-1219, 1997.
 - [5] T. Kanada and D. L. Franzen, "Optical waveform measurement by optical sampling with a mode-locked laser diode," *Opt. Lett.*, vol.11, no.1, pp.4-6, 1986.
 - [6] H. Takara, S. Kawanishi, T. Morioka, K. Mori, and M. Saruwatari, "100Gbit/s optical waveform measurement with 0.6ps resolution optical sampling using subpicosecond supercontinuum pulses," *Electron. Lett.*, vol.30, no.14, pp.1152-1153, 1994.
 - [7] H. Takara, S. Kawanishi, A. Yokoo, S. Tomaru, T. Kitoh, and M. Saruwatari, "100Gbit/s optical signal eye-diagram measurement with optical sampling using organic nonlinear optical crystal," *Electron. Lett.*, vol.32, no.24, pp.2256-2258, 1996.
 - [8] Y. Ishigame, T. Suhara, and H. Nishihara, "LiNbO₃ waveguide second-harmonic-generation device phase matched with fan-out domain-inverted grating," *Opt. Lett.*, vol.16, no.6, pp.375-377, 1991.
 - [9] T. Suhara and H. Nishihara, "Theoretical analysis of waveguide second-harmonic generation phase matched with uniform and chirped gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.26, pp.1265-1276, 1990.
 - [10] S. A. Akhmanov, A. I. Kovrygin, and A. P. Sukhrov, "Optical harmonic generation and optical frequency multipliers," in *Quantum Electronics*, eds. H. Rabin and C. L. Tang, pp. 547-565, Academic Press, Inc., London, 1975.
 - [11] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, pp.182-192, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- (平成11年5月12日受付, 8月4日再受付)



石月 秀貴 (学生員)

平5阪大・工・電子卒。平7同大大学院博士前期課程了。同年沖電気工業(株)入社。平10退社。同年阪大大学院博士後期課程入学。現在に至る。導波型非線形光学素子に関する研究に従事。



藤村 昌寿 (正員)

昭63阪大・工・電子卒。平5同大大学院博士課程了。工博。現在、同大学院電子工学専攻助手。その間、導波型波長変換デバイス、信号処理用光集積回路に関する研究に従事。平4~5年度日本学術振興会特別研究員。平5年度米国スタンフォード大客員研究員。平6年度論文賞、平9年度電気関係学会関西支部連合大会奨励賞、平9年度応用物理学会講演奨励賞など受賞。



栖原 敏明 (正員)

昭48阪大・工・電子卒。昭53同大大学院博士課程了。工博。現在、同大学院電子工学専攻助教授。光集積回路、ホログラフィ、光メモリ、導波型非線形光学素子、集積半導体レーザ、量子光学などの研究に従事。昭55Technical Research Centre of Finland 客員研究員、昭61-62 Glasgow University 客員研究員、平9 Chalmers University of Technology 客員教授。本会昭52, 61, 平6年度論文賞, 昭54年度学術奨励賞, 平1年度レーザー学会論文賞, 平6年度日本IBM科学賞, MOC Paper Awardなど受賞。著書「光集積回路(増補改訂版)」, 「Optical Integrated Circuits」, 「量子電子工学」, 「半導体レーザの基礎」, 「光波光学」など。米国IEEE Senior Member。



西原 浩 (正員)

昭35阪大・工・通信卒。昭40同大大学院博士課程了。工博。現在、同大学院電子工学専攻教授。レーザ応用デバイス、光集積回路、光メモリ、光ファイバ計測などの研究に従事。昭46-48カナダ国立研究所客員研究員。本会昭52, 57, 61, 平6年度論文賞, 昭55年度著述賞, 昭63年度光協会桜井健次郎賞, 平1年度レーザー学会論文賞, 平6年度Microoptics Awardなど受賞。著書「光波電子工学」, 「光集積回路(増補改訂版)」, 「Optical Integrated Circuits」, 「電磁理論演習」, 「光エレクトロニクス入門」など。米国IEEE Fellow。