

## 研究

## 自己疑似位相整合による光第2高調波発生

篠崎 啓助・福永 敏明・高森 毅・渡辺 賢司・上條 健

沖電気工業(株)半導体技術研究所 〒193 八王子市東浅川町 550-5

(1991年7月4日受付, 1991年10月11日受理)

Self-Quasi-Phase-Matching for Optical  
Second-Harmonic GenerationKeisuke SHINOZAKI, Toshiaki FUKUNAGA, Takeshi TAKAMORI,  
Kenji WATANABE and Takeshi KAMIJOHSemiconductor Technology Laboratory, Oki Electric Industry Co., Ltd.,  
550-5, Higashiasakawa, Hachioji 193

(Received July 4, 1991; Accepted October 11, 1991)

A new technique was proposed for quasi-phase-matched (QPM) second-harmonic generation (SHG) in a nonlinear optical waveguide with a domain-inverted grating. Facets of an InP/InGaAsP laser diode (LD) were anti-reflection coated not to lase Fabry-Perot (intra-cavity) modes, but to lase by feedback waves from the QPM SHG waveguide. The Ti-diffused domain-inverted grating in a proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> acted as a distributed Bragg reflector. The InP/InGaAsP LD was lased at a wavelength satisfying the QPM condition and then, self-QPM SHG was simultaneously observed. Using this QPM SHG waveguide and using a Ti: sapphire laser as a fundamental wave, we estimated fundamental wavelengths satisfying the QPM conditions. By this estimation, we confirmed that the LD was lased in extra-cavity modes by the feedback from the waveguide and the QPM condition was automatically satisfied.

## 1. ま え が き

小型でコヒーレントな短波長光源が情報処理の分野などで求められている。光第2高調波発生 (SHG) を利用して赤外半導体レーザー (LD) の発振波長を短波長化する技術がこれに応えるものとして注目されている<sup>1-5)</sup>。実用的短波長光源とするには、数十 mW の LD 出力光を数 mW の第2高調波 (SH 波) に変換することが必要である。短波長光源の求められる理由の一つは、短波長ほど集光性に勝るといことである。したがって出射光の波面収差が小さいことも必要である。最近、LiNbO<sub>3</sub> 基板の+c面に周期的ドメイン反転 (周期的分極反転) 構造を形成し、疑似位相整合 (QPM) による SHG を実現する技術が有望視され、精力的に研究されている<sup>3-12)</sup>。この技術の特長は、LiNbO<sub>3</sub> の非線形光学定数のうち最大の  $d_{33}$  を利用できるため、理論的に高効率変換が期待できることである。さらに、SH 波の伝播モードを基本

モードに制御できる光導波路を作り付けた構造にすることで、発生する SH 波の波面収差を十分小さくできる点である。しかし SHG 変換効率を大きくする上で最も重要な、QPM 条件を厳密に満足させることが非常に難しく、現在まで決定的な技術は確立されていない。今まで具体的に採られてきたのは、基本波の波長を調整して QPM 条件を満足させる方法<sup>3-5,7,9)</sup>、と QPM を満足する周期を持つドメイン反転構造を選び出す方法<sup>10)</sup>であった。しかしこれらの方法では、小型であるという上記目的に合致する実用的光源は作れない。

われわれは、基本波光源 (LD) と周期的ドメイン反転構造 (ドメイン反転格子) を持つ非線形光導波路とを、ハイブリッドに一体化して、自動的に QPM 条件を満足する光を LD に発振させることのできる技術 (自己疑似位相整合法: S-QPM 法) を提案する<sup>12)</sup>。Ti 熱拡散によって形成される周期的ドメイン反転領域は、周期的屈折率分布構造ともなっており、特定の波長の光に対

してブラッグ反射 (DBR) 特性を示す。まず基本波光源としての LD の出射端面を低反射 (AR) コーティングして、発振しき値を十分に高くしておく。このとき、ドメイン反転格子の周期 ( $A$ ) が QPM 条件を満足すると共に、LD の発振光の波長がこのブラッグ条件をも満足するように設定する。ブラッグ反射光がこの LD に帰還することにより、LD が発振する配置をとれば、上記 QPM が実現するはずである。本論文では、AR コーティング処理をした InP/InGaAsP LD を用いて、この S-QPM に基づく SHG を確認した。さらに LD が固有のファブリ・ペローモードでは発振していないことを確かめるため、上記 S-QPM の実験に用いた非線形光導波路に Ti: サファイヤレーザー光を導入し、QPM 条件を満足する波長を調べた。これにより求められた波長は、予想される値と完全に一致し、S-QPM が理論どおり実現されることが確かめられた。

本論文で提案する S-QPM は、従来から用いられている方法に比べ、きわめて容易に QPM 条件を満足させることができるものであり、SHG を用いる短波長光源の開発に有効な技術となる。

## 2. 自己疑似位相整合法

### 2.1 理 論

QPM による SHG 理論によれば、QPM 条件は次のように書かれる<sup>13,14)</sup>。

$$\mathbf{k}_2 - 2\mathbf{k}_1 - \mathbf{K} = 0, \quad (1)$$

ここに  $\mathbf{K}$  はドメイン反転格子の波数ベクトルで、絶対値は  $2\pi(2m-1)/A$  である。また  $\mathbf{k}_1$ ,  $\mathbf{k}_2$  はそれぞれ基本波および SH 波の波数ベクトル、 $A$  はドメイン反転格子の周期で、 $m$  は正の整数である。すなわち、式(1)で与えられる QPM 条件を満足するドメイン反転格子の周期  $A$  は

$$A = 2(2m-1)l_c, \quad (2)$$

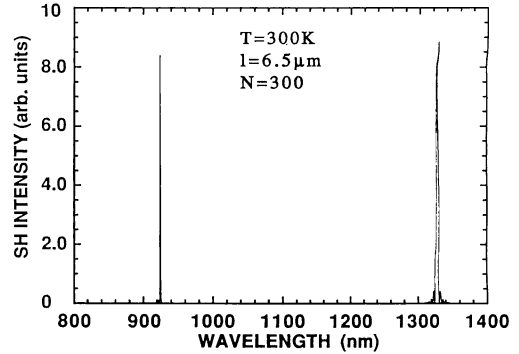
となる。ここに、 $l_c$  はコヒーレンス長で、 $n(\lambda)$  を波長  $\lambda$  の光に対する屈折率とすれば、

$$l_c = \lambda / [4 \{n(\lambda/2) - n(\lambda)\}], \quad (3)$$

と表される。以後、 $m=1$  および  $m=2$  に対する QPM を 1 次および 3 次の QPM とよぶ。また、ドメイン反転格子  $N/2$  周期を伝播したときに発生する SH 波の強度  $I(\lambda)$  は次式(4)で与えられる<sup>15)</sup>。

$$I(\lambda) = C \sin^2(\Delta k l / 2) \frac{\sin^2\{N(\pi - \Delta k l) / 2\}}{\sin^2\{(\pi - \Delta k l) / 2\}} \quad (4)$$

ここに、 $C$  は基本波の波長と非線形光学定数などで決まる定数、 $\Delta k$  は位相不整合ベクトルの大きさ、 $l (= A/2)$

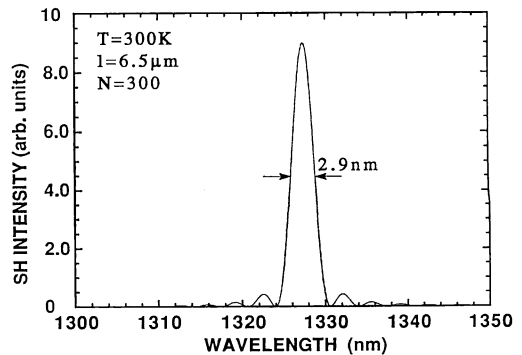


**Fig. 1** SH intensity as a function of fundamental wavelength. The intensity  $I(\lambda)$  was calculated by using Eq. (4) for  $T=300$  K,  $l=6.5$   $\mu\text{m}$  and  $N=300$ . The QPM conditions were satisfied as fundamental wavelengths of 924 nm and 1.327  $\mu\text{m}$ .

はドメイン反転格子の半周期である。**Fig. 1** は LiNbO<sub>3</sub> における温度  $T=300$  K,  $l=6.5$   $\mu\text{m}$  である場合の SH 波の強度  $I(\lambda)$  を基本波の波長に対して表したものである。ここでの計算には、波長  $\lambda$  の光に対する LiNbO<sub>3</sub> の屈折率として次式の  $n(\lambda)$  が用いられた<sup>16)</sup>。

$$\begin{aligned} n^2(\lambda) - 1 = & 3.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 \\ & + (0.970 \times 10^5 + 2.70 \times 10^{-2} T^2) \\ & \cdot \{\lambda^2 - (2.01 \times 10^2 + 5.4 \times 10^{-5} T^2)\}^{-1} \\ & - 2.24 \times 10^{-8} \lambda^2, \end{aligned} \quad (5)$$

QPM 条件を満足するのは基本波の波長が 924 nm (3 次の QPM 条件)、1.327  $\mu\text{m}$  (1 次の QPM 条件) のときであることがわかる。Fig. 1 において、基本波の波長が 924 nm のときは 3 次の QPM 条件、1.327  $\mu\text{m}$  のときは 1 次の QPM 条件が満たされている。QPM 条件の許容範囲を示すために、**Fig. 2** に基本波の波長が



**Fig. 2** SH intensity around phase-matched fundamental wavelength of 1.327  $\mu\text{m}$ . The full width at half maximum of the peak was 2.9 nm.

1.327  $\mu\text{m}$  の近傍の様子を拡大して示す. 半値幅は 2.9 nm と小さく, QPM 条件がいかに厳しいかがわかる. QPM 条件を満足する波長の光を発振する LD を選択することは非常に難しいといえる. そこで基本波光源としての LD の発振波長が QPM 条件を満足するように自動的に制御できる技術が必要になる.

周期的ドメイン反転格子は DBR としても機能しうる. この周期  $A$  が QPM 条件を満足し, かつ基本波の波長に対して高反射条件を満足するようになっていれば, SHG 光導波路からの帰還光により QPM 条件を満足する波長で LD が発振することになる. すなわち S-QPM が実現する. ここで用いる LD は, 端面が AR コーティングされており, それ自身では通常の注入電流値では発振せず, あるバイアス電流を流した状態でドメイン反転構造素子からの帰還光を得て初めて発振するようにしておく. すなわち, 次式(6)を満足するように  $A$  が形成されていれば, S-QPM が実現する.

$$A = 2(2m-1)l_c = p\lambda/2n(\lambda), \quad (6)$$

ここに  $p$  は正の整数である.

## 2.2 S-QPM に基づく SHG の検証

端面に AR コーティングを施した基本波光源としての LD の発振がファブリ・ペロー条件を満足して起こったものでなく, ドメイン反転格子 (SHG 素子) からの帰還光によるものであることを確かめる必要がある. 周期  $A$  と発振波長  $\lambda$  との間に, 式(6)で与えられる関係が認められれば, S-QPM に基づく SHG が実現できる可能性を示したことになるが, これだけでは十分でない. ドメイン反転格子の周期  $A$  は, 素子全体にわたって一定ではなく僅かにばらつきがあるものと考えられるからである. そこでわれわれは, 発振波長を連続的に変えられる Ti: サファイヤレーザーを基本波光源として用い, LD の S-QPM 実験に用いた SHG 素子の変換効率が極大となる基本波波長を調べた.

Ti: サファイヤレーザーは 1.327  $\mu\text{m}$  近傍では発振しないので, 924 nm 近傍で SHG 変換効率が極大となる波長を調べた. Fig. 1 で示したように, 1.327  $\mu\text{m}$  で SHG 変換効率が極大となる SHG 素子においては, 924 nm においても極大の SHG 変換効率が得られるはずである. したがって, Ti: サファイヤレーザーを用いた実験で 924 nm での SH 変換効率が極大となることが確認されれば, すなわちコヒーレンス長  $l_c$  の 3 倍がドメイン反転周期の半周期に等しいという 3 次 S-QPM 条件が確認されれば, S-QPM に基づく SHG が実現したことが間接的に検証されたことになる. Fig. 3 にコ

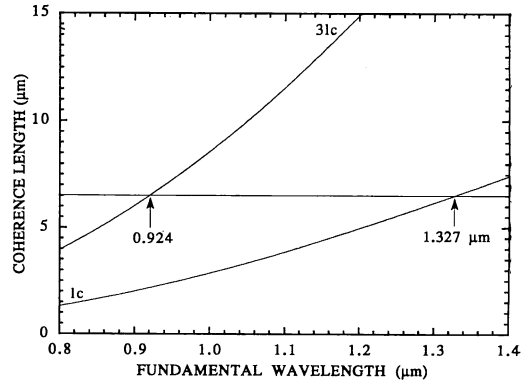


Fig. 3 Coherence lengths  $l_c$  and  $3l_c$  as a function of fundamental wavelength. In the case of  $A/2=6.5 \mu\text{m}$ , fundamental wavelengths 924 nm and 1.327  $\mu\text{m}$  satisfy the third order and the first order QPM condition, respectively.

ヒーレンス長  $l_c$  と  $3l_c$  とを基本波の波長  $\lambda$  に対して示す. ドメイン反転格子の半周期  $A/2$  が 6.5  $\mu\text{m}$  である場合, 3次および1次の QPM 条件は, それぞれ 924 nm, 1.327  $\mu\text{m}$  において満足されることがわかる.

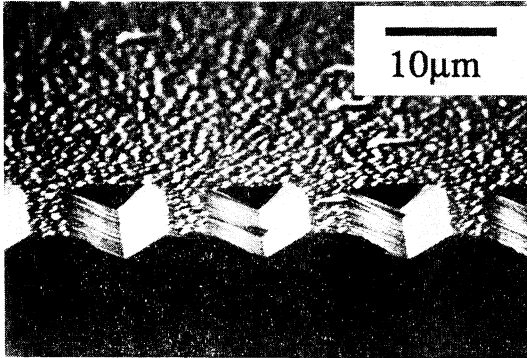
実験では, 同一の SHG 素子において, 3次と1次の QPM 条件を満足する SHG をそれぞれ Ti: サファイヤレーザーと LD という異なる基本波光源を用いて確認することによって, S-QPM に基づく SHG を検証した.

## 3. 実験

周期的ドメイン反転格子を Ti 熱拡散法<sup>6,7,9-11)</sup>で LiNbO<sub>3</sub> 基板の+c面に形成し, 非線形光導波路を安息香酸を用いてプロトン交換 (Li<sup>+</sup>-H<sup>+</sup> 交換) 法<sup>11,17)</sup>により作製した. S-QPM に基づく SHG 実験で基本波光源として用いた LD は, InP/InGaAsP 内部電流狭搾型で, SiO 薄膜を両端面にコーティングしてファブリ・ペローモードでの発振を抑圧してある<sup>18)</sup>. この節では, 以下に SHG 素子の形成手順, InP/InGaAsP LD を基本光源とする S-QPM 実験の概要および Ti: サファイヤレーザーを基本波光源とする QPM 実験の概要を説明する.

### 3.1 SHG 素子の作製手順

ドメイン反転構造の形成は以下の手順によって行った. LiNbO<sub>3</sub> の+c面に厚さ 5 nm, 幅 4  $\mu\text{m}$ , 周期 13  $\mu\text{m}$  の Ti 膜を短冊状の格子パターンに真空蒸着した後, 次のように熱処理した. 2時間かけて一定の割合で 1,050°C まで昇温させ, 1時間保持した後, 室温に戻した. 周期  $A=13 \mu\text{m}$  は, InP/InGaAsP LD の利得の



**Fig. 4** The electron micrograph of the etched domain-inverted region on +c-face of a LiNbO<sub>3</sub> wafer. To etch the domain structure, we used a mixture of HF : HNO<sub>3</sub> = (1 : 2) at room temperature for about 20 hours. The triangularly etched parts indicate the domain-inverted region.

ピークがほぼ  $1.3 \mu\text{m}$  近傍にあるので、 $1.3 \mu\text{m}$  の基本波長に対するコヒーレンス長のほぼ 2 倍になるように設計したものである。Fig. 4 に作成したドメイン反転格子の電子顕微鏡写真を示す。LiNbO<sub>3</sub> 基板の +c 面に形成されたドメイン反転格子を HF : HNO<sub>3</sub> = (2 : 1) の混合液によって、室温で 20 時間エッチングしたものである。ドメイン反転領域が三角形にエッチングされている。

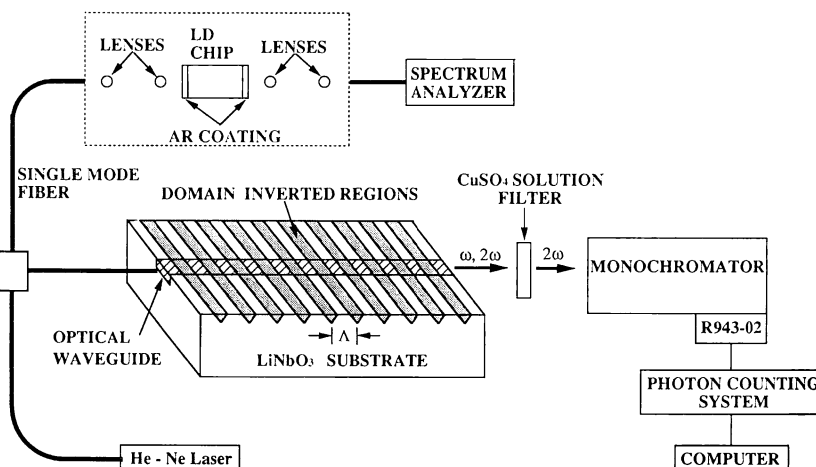
作製したドメイン反転格子に直交するように、光導波部 (チャンネル寸法は  $6 \mu\text{m}$  幅、2mm 長) を安息香酸によるプロトン交換法で形成した。用いたマスク材料は、

厚さ  $50 \text{ nm}$  の Cr 膜である。プロトン交換温度は  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、所要時間は 30 分である。プロトン交換した後、硝酸第 2 セリウムアンモニウム水溶液で Cr マスクを剥がして、水蒸気と AR ガスの混合雰囲気中  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、1 時間アニール処理してチャンネル光導波路とした。

### 3.2 S-QPM 実験

実験方法の概略を Fig. 5 に示す。周期的ドメイン反転構造を作り付けたチャンネル光導波路と AR コーティング処理をした LD とをシングルモードファイバー (SMF) で結合する。チャンネル光導波路と結合されている側の SMF はファイバーコネクタにより接合されている。この接合部はエチレングリコールにより液浸されており、この部分での導波光の反射損失はほとんど無視できるほど小さい。SMF とチャンネル光導波路との光結合をとるための調整には、He-Ne レーザーを用いた。上記ファイバーコネクタ部から He-Ne レーザー光を導入して調節を行い、この後 LD からの SMF をこのファイバーコネクタ部で接続し直して、LD 光をチャンネル光導波路に導いた。チャンネル光導波路の長さは  $2 \text{ mm}$  である。

LD の活性層の幅と厚さはそれぞれ  $1.0 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$  である。AR コーティング処理前の LD の固有の発振波長は  $1.34 \mu\text{m}$  であった。この実験における基本波光源としての LD の発振波長は、スペクトラムアナライザ (MS 9001 A 1, アンリツ) で測定した。また SH 波の強度はフォトンカウンター (R 943-02 光電子増倍



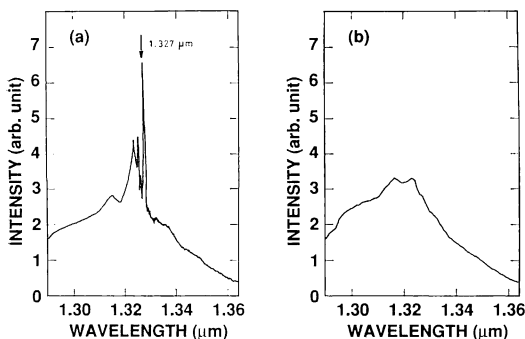
**Fig. 5** Experimental arrangement of the self-QPM SHG. The LD with an anti-reflection coated facet was optically connected to the SHG waveguide by SMF. The output spectra of the LD were measured by an optical spectrum analyzer and the SH intensity was measured by a photon counting system after a monochromator.

管, 浜松フォトニクス) で測定した. SH 波が S-QPM に基づいて得られたものであることを確かめるため, Ti: サファイヤレーザーを用いて QPM 条件を満足する基本波の波長を調べる実験も合わせて行った. ドメイン反転格子の周期が  $13 \mu\text{m}$  である SHG 光導波路では, 基本波の波長が  $924 \text{ nm}$  である場合に SHG 変換効率が極大となるはずで, この波長の光は Ti: サファイヤレーザーから得られる.

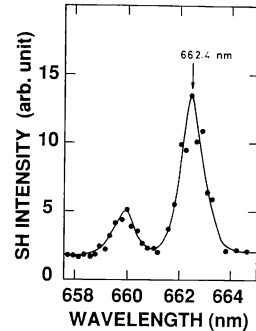
#### 4. 実験結果

**Fig. 6** にスペクトラムアナライザーで観測された LD からの出射光スペクトルを示す. 注入電流値は  $160 \text{ mA}$  である. LD と SHG 光導波路が SMF を通して光学的に結合されている場合には (a) に示すスペクトルが観測された. LD の出力は  $60 \mu\text{W}$  で, 発振波長は  $1.327 \mu\text{m}$  であった. 一方, この光学的結合を解くと LD の発振は停止し, (b) に示すスペクトルに変わった. LD は外部共振器 (SHG 光導波路中のドメイン反転格子) により発振し, このとき SH 波も同時に観測された. **Fig. 7** にこの SH 波のスペクトルを示す.

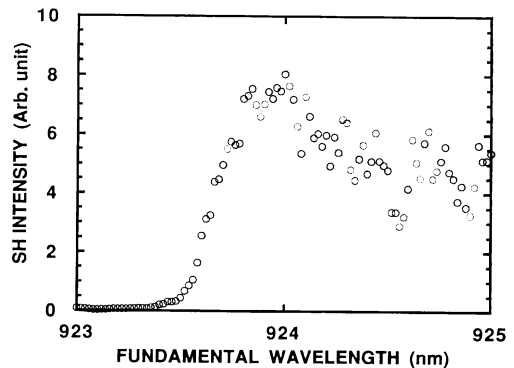
SH 波の波長は  $662.4 \text{ nm}$  であり, これは基本波の波長  $1.327 \mu\text{m}$  の半分の値になっている. また SH 波の強度は最大  $6.52 \times 10^{-1} \text{ pW}$  であり, SHG 光導波路の長さ等を考慮して, モノクロメータで SH 波が 10 分の 1 に減衰すると仮定し, SMF と SHG 光導波路とのカップリング効率を経験的に  $15 \sim 30\%$  と仮定して SHG 変換効率を計算すると  $4.1 \sim 16.4\% / \text{W} \cdot \text{cm}^2$  となった. SMF と SHG 光導波路とのカップリング効率を正確に見積もれないので, SH 変換効率もこのように幅をもってしか評価できないが, いずれにしても他の研究機関か



**Fig. 6** Output spectra from the InP/InGaAsP LD: (a) The LD was lased at a fundamental wavelength of  $1.327 \mu\text{m}$ , when it was optically connected to the waveguide by SMF. (b) The LD was not lased, when it was not connected.



**Fig. 7** SHG spectrum from the waveguide. The fundamental wave was generated by the InP/InGaAsP LD with AR coated facets, and the output power was  $60 \mu\text{W}$ . The SH wavelength and power were  $662.4 \text{ nm}$  and  $6.52 \times 10^{-1} \text{ pW}$ , respectively.



**Fig. 8** SH spectrum in the case of using a Ti: sapphire laser as a fundamental wave. The cutoff wavelength was  $924 \text{ nm}$ , which corresponded to the fundamental wavelength satisfying the third order QPM condition.

ら発表された値<sup>4,5,7,9,10</sup>と同程度の大きな値である.

一方, Ti: サファイヤレーザーを基本波光源として, 上記実験で用いた SH 光導波路の QPM 条件を満足する波長を調べた. **Fig. 8** に光子カウンティング法で観測された SH スペクトルを基本波の波長 (Ti: サファイヤレーザーの発振波長) に対して示す.  $924 \text{ nm}$  以上の波長の基本光に対して SH 波が観測されている. カットオフ波長 ( $924 \text{ nm}$ ) が 3 次の QPM 条件を満足している値であり, 予想されていた値と一致している.  $924 \text{ nm}$  よりも長波長側に現れている SH 波は非導波モード (基板モード) で出射したものである. この点に関しては次節で詳しく検討する.

#### 5. 考察

S-QPM による実験で観測された SH 波の波長は,

Fig. 7 に示すように 662.4 nm であり, このときの LD (基本波光源) の発振波長は Fig. 6 に示すように 1.327  $\mu\text{m}$  であった. SH 波と基本波の波長は実験の精度内で良い対応をしており, 基本波の波長が式(6)を満足していれば, S-QPM による SHG が実現したことになる. プロトン交換された部分の  $\text{LiNbO}_3$  の正確な屈折率が不明であるので, He-Ne レーザー ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) によるデータから次式(7)のような仮定の下に以下の議論を進める<sup>19,20</sup>.

$$n(\lambda) = n'(\lambda) + 0.05 \quad (7)$$

ここに,  $n'(\lambda)$  はプロトン交換前の  $\text{LiNbO}_3$  の屈折率で式(5)で与えられる. Fig. 9 に式(6)で与えられる関係を図示する. 40~45 次の DBR 条件を満足する曲線群  $L_w (=A/2 = p\lambda/4n(\lambda))$  と, ドメイン反転格子の半周期を与える曲線  $L_c (=A/2 = l_c)$  とを基本波の波長に対して示している. 曲線群  $L_w$  と曲線  $L_c$  とが交わる点が S-QPM 条件を満足する値を与える. ドメイン反転格子の半周期の寸法が 6.5  $\mu\text{m}$ , 基本波の波長が 1.327  $\mu\text{m}$  である点が交点となっている. S-QPM の実験では LD の発振波長が 1.327  $\mu\text{m}$  であり, ドメイン反転格子の半周期は 6.5  $\mu\text{m}$  になるように設計されていた. この実験で用いた LD は AR コーティング前の発振波長は, 1.34  $\mu\text{m}$  となるものであるから, この結果は S-QPM に基づく SHG が実現したことを示唆している.

次に S-QPM に基づく SHG が実現したこと検証を別の手段で行った. 前記 S-QPM の実験で用いた SHG 光導波路に Ti: サファイヤレーザーの光を導いて, QPM 条件を満足する基本波の波長を検証する. 結果は Fig. 8 に示すように, SH 光は 924 nm をカットオフ波長として, これよりも長波長側に観測され, この

カットオフ波長が Fig. 1 や Fig. 4 からわかるように, 3 次の QPM 条件を満足する波長であった. ここで, SH 波が 924 nm のみでなくこれよりも長波長側にも観測された理由を検討する.

924 nm の基本波長  $\lambda_l$  に対しては, (1)式の QPM 条件すなわち

$$\lambda_l : k_2(\text{導波モード}) - K - 2k_1(\text{導波モード}) = 0 \quad (8)$$

が成立しているという条件下で,  $\lambda_l$  より長い波長  $\lambda_l'$  の基本波に対して, チェレンコフ放射位相整合条件

$$\lambda_l' : k_2'(\text{基板モード}) \cos \alpha - K - 2k_1'(\text{導波モード}) = 0 \quad (9)$$

が成立する. ここで  $\alpha$  はチェレンコフ放射角である. すなわち(8), (9)式共通の  $K$  に対して次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} K &= k_2(\text{導波モード}) - 2k_1(\text{導波モード}) \\ &= k_2'(\text{基板モード}) \cos \alpha - 2k_1'(\text{導波モード}) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで

$$\begin{aligned} k_1 &= 4\pi n(\lambda_l)/\lambda_l, & k_2 &= 4\pi n(\lambda_l/2)/\lambda_l \\ k_1' &= 4\pi n(\lambda_l')/\lambda_l', & k_2' &= 4\pi n(\lambda_l'/2)/\lambda_l' \end{aligned}$$

である. また  $\alpha$  が十分に小さいので

$$k_2'(\text{導波モード}) = k_2'(\text{基板モード})$$

と近似できる.

関数  $F(\lambda) = k_2 - 2k_1$  は  $\lambda$  に関して単調減少関数であり, また  $0 < \alpha < 90^\circ$  であるから, (10)式を満足する波長  $\lambda_l'$  は  $\lambda_l (=924\text{ nm}) < \lambda_l'$  でなければならないことになる.

このことからチェレンコフモードで射出する SH 波は 924 nm よりも長波長側に観測されることになる.

## 6. 結 論

ドメイン反転格子構造を作り付けたチャンネル光導波路を用いた S-QPM に基づく LD の SHG 素子を提案した. AR コーティング処理した InP/InGaAsP LD が自動的に QPM 条件を満足する基本波波長で発振し, 同時にその SHG が観測できた. SHG 変換効率は 4.1 ~ 16.4%/W $\cdot\text{cm}^2$  と十分に大きな値であった. Ti: サファイヤレーザーを用いて, この光導波路の QPM 条件を調べ, LD の S-QPM に基づく SHG が達成されていることを確認した. 本論文で提案した S-QPM 法は, 従来法と異なり, 自動的に QPM に基づく SHG を得る技術であり, 今後の小型 SHG 光源の開発にとってきわめて有用な技術である.

InP/InGaAsP LD を提供して下さった, 大柴小枝

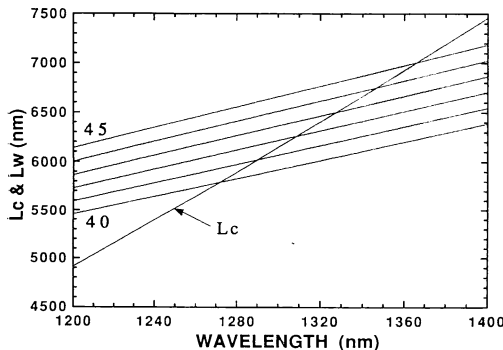


Fig. 9 Lengths  $l_c$  of the domain-inverted region in the first order QPM and  $L_w$  of the half period of the 43rd order DBR as a function of fundamental wavelength.

子博士, 有用な討論をしてくださった長井清氏, 岡山秀彰氏に感謝します。

### 文 献

- 1) T. Taniuchi and K. Yamamoto: "Second-harmonic generation with GaAs laser diode in proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides," 12th European Conference on Optical Communication Tech. Dig. ECOC '86, paper TuC 5, Barcelona, Spain, 22-25 September (1986) pp. 171-174.
- 2) T. Taniuchi and K. Yamamoto: "Miniaturized light source of coherent blue radiation," Conference on Lasers and Electro-Optics Annual Meeting Tech. Dig. CLEO '87, paper WP6, Baltimore, MD, 26 April-1 May (1987) pp. 198-199.
- 3) J. Webjörn, F. Laurell and G. Arvidsson: "Blue light generated by frequency doubling of laser diode light in a lithium niobate channel waveguide," IEEE Photonics Technol. Lett., **1** (1989) 316-318.
- 4) K. Mizuuchi, K. Yamamoto and T. Taniuchi: "Blue-light generation by quasi-phase-matched second-harmonic generation in LiTaO<sub>3</sub>," Conference on Lasers and Electro-Optics Annual Meeting Tech. Dig. CLEO '91, paper CTUV 3, Baltimore, MD, 12-17 May (1991) pp. 164-165.
- 5) K. Yamamoto, K. Mizuuchi and T. Taniuchi: "High power 12 mW blue light generation in periodically domain-inverted LiTaO<sub>3</sub> waveguide," Conference on Lasers and Electro-Optics Annual Meeting Tech. Dig. CLEO '91, Postdeadline paper CPDP 23, Baltimore, MD, 12-17 May (1991) pp. 616-617.
- 6) E. J. Lim, M. M. Fejer and R. L. Byer: "Second-harmonic generation of green light in periodically poled planar lithium niobate waveguide," Electron. Lett., **25** (1989) 174-175.
- 7) M. M. Fejer, G. A. Magel and E. J. Lim: "Quasi-phase-matched interactions in lithium niobate," Proceedings of SPIE Nonlinear Optical Properties of Materials, **1184** (1989) 213-224.
- 8) J. Webjörn, F. Laurell and G. Arvidsson: "Fabrication of periodically domain-inverted channel waveguides in lithium niobate for second harmonic generation," J. Lightwave Technol., **7** (1989) 1597-1600.
- 9) E. J. Lim, M. M. Fejer, R. L. Byer and W. J. Kozlovsky: "Blue light generation by frequency doubling in periodically poled lithium niobate channel waveguide," Electron. Lett., **25** (1989) 731-732.
- 10) Y. Ishigame, T. Suhara and H. Nishihara: "LiNbO<sub>3</sub> waveguide second-harmonic-generation device phase matched with a fan-out domain-inverted grating," Opt. Lett., **16** (1991) 375-377.
- 11) K. Shinozaki, Y. Miyamoto, H. Okayama, T. Kamijoh and T. Nonaka: "Second-harmonic generation device with integrated periodically domain-inverted regions and distributed Bragg reflector in a LiNbO<sub>3</sub> channel waveguide," Appl. Phys. Lett., **58** (1991) 1934-1936.
- 12) K. Shinozaki, T. Fukunaga, K. Watanabe and T. Kamijoh: "Self-quasi-phase-matched second-harmonic generation in the proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide with periodically domain inverted regions," Appl. Phys. Lett., **59** (1991) 510-512.
- 13) たとえば J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing and P. S. Pershan: "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric," Phys. Rev., **127** (1962) 1918-1939.
- 14) G. A. Magel, M. M. Fejer and R. L. Byer: "Quasi-phase-matched second-harmonic generation of blue light in periodically poled LiNbO<sub>3</sub>," Appl. Phys. Lett., **56** (1990) 108-110.
- 15) K. C. Rustagi, S. C. Mehendale and S. Meenakshi: "Optical frequency conversion in quasi-phase-matched stacks of nonlinear crystals," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1029-1041.
- 16) R. J. Ressley: *Handbook of Lasers with Selected Data on Optical Technology* (The Chemical Rubber Co., 1971) p. 514.
- 17) P. G. Suchoski, T. K. Findakly and F. J. Leonberger: "Stable low-loss proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguide devices with no electro-optic degradation," Opt. Lett., **13** (1988) 1050-1052.
- 18) K. Nagai, A. Watanabe, M. Kawahara and T. Ishida: "Optimization of the device length for the high gain TWA with VIPS structure," Third Optoelectronics Conference Tech. Dig. OEC '90, paper 13B3-5, Makuhari Messe, Japan, July 11-13 (1990) pp. 221-223.
- 19) M. De Micheli, J. Botineau, S. Neveu, P. Sibillot, D. B. Ostrowsky and M. Papuchou: "Independent control of index and profiles in proton-exchanged lithium niobate guides," Opt. Lett., **8** (1983) 114-115.
- 20) R. G. Wilson, S. W. Novak, J. M. Zavada, A. Loni and R. M. De La Rue: "Secondary ion mass spectrometry depth profiling of proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides," J. Appl. Phys., **66** (1989) 6055-6058.