

最近の技術から

周期ドメイン反転光導波路による第二高調波発生

伊藤 弘 昌

東北大学電気通信研究所 〒980 仙台市青葉区片平 2-1-1

1. ま え が き

第二高調波発生 (second harmonic generation : 以下 SHG と略す) などの非線形相互作用を効率よく行うには, 1) 非線形係数の大きな物質の利用, 2) 光波の閉込めによる光エネルギー密度の増大, 3) 長い相互作用長の実現, 4) 相互作用する電磁界の重畳が大なること等が不可欠である. とくに近年半導体レーザーの高出力化・高性能化により, 半導体レーザー波長自体の SHG による短波長化の期待とともに, 半導体レーザー励起固体レーザーの波長変換も重要になってきており, 1W 以下程度の低出力光源に対する高効率な波長変換のための研究が進められている. 本文で紹介する周期ドメイン反転光導波路構造の利用も, この条件を満足するものとして期待されるものである.

2. 準位相整合 (quasi phase matching) とは

一般に, 異なる波長間での非線形相互作用においては, エネルギー保存のもとでの位相整合が重要である.

この条件が満足されない状態では, 相互作用により発生する非線形分極波と光波との間で干渉を生じ, 大きな変換効率が得られない. SHG の場合についてこの様子を図示すると, 高調波 (SH) 出力は図 1 (c) に示されるように, 伝播に伴って次式で与えられる干渉距離 (コヒーレンス長) l_c ごとに極大極小を繰り返すことになる.

$$l_c = \lambda_F / 4 (|n_F - n_{SH}|) \quad (1)$$

ここで添字 F, SH はそれぞれ基本波および SH 波成分を, λ, n は波長および屈折率を示す.

したがって, l_c ごとに何らかの方法で発生する分極波の符号を交互に反転できれば, SH 出力に打消しがなくなり, 逆に加算が起こる (図 1 (a, b)). このようにできれば光学的に等方であったり, 分散特性のためにバルク材料としては位相整合のとれないテンソル成分の大きな物質を用いて, ドメイン周期を調整することにより, 見かけ上の位相整合をとることができる. この方法

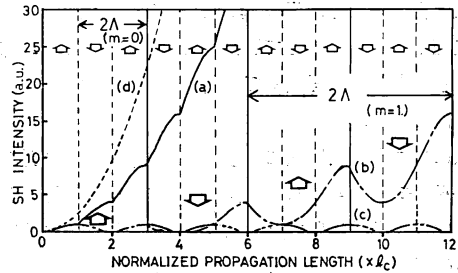


図 1 QPM (準位相整合) による SHG の出力変化の様子. 横軸はコヒーレンス長で目盛っている. (a) は $m=0$, (b) は $m=1$ の QPM 出力を示す. (c) は位相整合がとれていない場合であり, (d) は同一の非線形係数での完全な位相整合状態がとれたとした場合の出力を示す.

は準位相整合 (quasi-phase matching : QPM) と呼ばれ, 1962 年に提案されている¹⁾. ドメインの半周期 Λ は図からも明らかのように, l_c の奇数倍であればよいことから,

$$\Lambda = (2m+1)l_c = \frac{2m+1}{4} \frac{\lambda_F}{|n_F - n_{SH}|} \quad (2)$$

で与えられる. m は周期ドメインの次数であり, 図 1 (a), (b) に $m=0$ および $m=1$ の様子を示す. $\Delta n = |n_F - n_{SH}| = 0.025$ とすると, $m=0$ の場合の QPM のピッチは基本波波長の 10 倍, $\Delta n = 0.1$ では 2.5 倍となる. また $m=1$ では $m=0$ の場合の 3 倍の周期となる. なお, 図 1 (d) は, 同一の非線形光学係数のもとで完全な位相整合条件が満足されたとした場合 ($l_c = \infty$: 実現はできない) の光出力を比較のために示している.

3. 周期ドメイン反転光導波路の製作と動作

分極波の符号を周期的に反転させるには非線形係数の符号を反転させればよく, 強誘電体ではドメインの反転特性を利用できる. LiNbO₃ 結晶では強誘電性のドメイン構造が c 軸方位に 180° 反転分域をもち, とくに $+c$ 面では不純物や歪応力, 熱や電界等のさまざまな外部要因によって反転を生じやすい. また 2 次非線形テンソル

成分の値は $d_{33}=40$ pm/V であり, 通常利用される d_{31} の8倍にもなる. この値は, 400 nm 程度まで透明な非線形光学材料としては, 有機材料も含めて現在最も大きい.

LiNbO₃ の +c 面上への周期ドメイン反転構造の作製は, まず Ti の周期パターンを作り, キュリー温度よりわずかに低い温度 (1035°C 程度) で約1時間熱処理後, 急冷することにより形成される. 反転層の深さは約2μm程度と見積られる. 図2は, 周期10μm のドメイン反転構造をエッチングして観察した写真である. この方法により, 幅1μm 程度までの周期ドメイン反転構造は製作可能である.

次にプロトン交換法により, 光導波路を低温で作製する. 導波モード間の QPM 条件は, モードの伝播定数を媒質中での伝播定数で除した実効屈折率を用いれば (2) 式の関係式より求めることができる.

LiNbO₃ のプロトン交換光導波路による基本モード間の QPM では, 基本波波長が 0.83 μm の場合導波路の条件にもよるが, ドメイン周期の次数である $m=0$ の場合で $2\Lambda=2\sim6$ μm となり, 現在実験的検証が進められている²⁻⁴⁾. 異なった条件の実験結果を比較するに当たり, 次式の構造に依存しない規格化した変換効率を用いる.

$$\eta_{\text{norm}} = \eta A / P_F L^2 \quad [\% \mu\text{m}^2 / \text{W cm}^2] \quad (3)$$

ここで P_F , P_{SH} は基本波および高調波出力 [単位は W], $\eta = (P_{SH}/P_F) \times 100$ [%], L は相互作用長 [cm], A は断面積 [μm^2] である.

われわれは $2\Lambda=7.8$ μm の周期ドメイン反転平面 LiNbO₃ 導波路により, 基本波波長 1.064 μm において高調波が TM₁ モードでの QSM 動作を, 相互作用長 4.65 mm, 入力 70 mW の条件で得ている²⁾. $\eta_{\text{norm}}=33$ % $\mu\text{m}^2 / \text{W cm}^2$ であり, この動作は完全な QPM から少しずれた状態であり, QPM 条件を完全にとることによりさらに1桁以上の効率改善が期待できる.

また TM₀ モードを用いた $m=1$ の QPM ($2\Lambda=6.5$

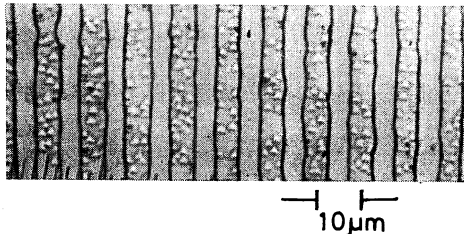


図2 Ti 拡散により作製された LiNbO₃ の周期ドメイン反転構造. 周期 10 μm の反転構造をエッチングにより表面観察したものである.

μm) による SHG (波長 0.82 μm)³⁾ では $\eta_{\text{norm}}=424$ % $\mu\text{m}^2 / \text{W cm}^2$ の高い効率の動作が報告されている³⁾. 導波路モード間での SHG で従来最も大きな変換効率が得られている, Ti 拡散 LiNbO₃ 導波路の異方性を用いた SHG⁵⁾ について上記の規格化変換効率で表すと 30 % $\mu\text{m}^2 / \text{W cm}^2$ と見積られ, TM₁ モードを用いた不完全な QPM 動作の効率とほぼ等しい. このことから, 周期ドメイン反転光導波路を用いる非線形効果の高効率特性がわかる. 基本導波モード間での $m=0$ の QPM は最も効率がよく, その実現が最適動作設計も含めて今後の課題である.

チェレンコフ放射 SHG では, 位相整合のために SH 波の出射方向が基本波と 10° 以上も異なり, そのパターンも特異な三日月状となることから, 出射角, および形状の改善が望まれる. そこで QPM の考えを SH 波が放射モードの場合にあてはめることにより, チェレンコフ放射 SHG の特長をいかしつつ, 特性の改善ができる. またチェレンコフ角が浅くなると相互作用において重要な電界分布の重畳が大きくなり, 効率も高くできる. 実験では, 14.32° にあるチェレンコフ放射 SHG 成分を 1° 以内に変換しており, 同時に効率の改善も確認している²⁾. 計算によれば 3~20 倍の改善が期待できる.

4. ま と め

小型で高効率な光源を用いた高機能光システムの構築には, 極限性能を追究した種々の非線形光デバイスを必要としている. 従来非線形デバイスは強度の比較的大きな領域で利用されることが多かったが, 小電力領域での高効率動作により, 光エレクトロニクスでの新たな発展が開けるものと期待される.

文 献

- 1) J. A. Armstrong, N. Bleombergen, J. Ducuing and P. S. Pershen: "Interaction between light waves in a nonlinear dielectric," Phys. Rev., **127** (1962) 1918.
- 2) 伊藤弘昌, 稲場文男, はか: "周期ドメイン反転構造を持つ非線形光導波路による第2高調波発生", 応物学会講演会, 7a-ZD-9 (1988); 応物関連講演会, 1p-X-2 (1989); 応物学会講演会, 29a-ZL-3 (1989).
- 3) E. J. Lim, M. M. Fejer and R. L. Byer: "Blue light generation by frequency doubling in periodically poled lithium niobate channel waveguide," Electron. Lett., **25** (1989) 731.
- 4) J. Webjorn, F. Laurell and G. Arvidsson: "Blue light generated by frequency doubling of laser diode light in a lithium niobate channel waveguide," IEEE Photon. Tech. Lett., **1** (1989) 316.
- 5) N. Uesugi: "Nonlinear optical phenomenon in a three-dimensional LiNbO₃ optical waveguide," Radio Sci., **17** (1982) 197.

(1990年2月19日受理)