

バルクおよび導波路波長変換デバイスの現状と未来

栗 村 直^{*,**}

Now and Future of Bulk/Waveguide Wavelength Converters

Sunao KURIMURA

Quasi-phase matching has been extending effective nonlinear coefficients and optical functions in nonlinear optical devices, being spread into various application fields. Recent progress in QPM wavelength converters will be reviewed, while discussing criteria for choosing optimum material and device. Bulk and waveguide devices mainly based on LiNbO₃ (LN), and LiTaO₃ (LT), are applied to nonlinear interactions such as optical-parametric oscillation/generation, second-harmonic generation, and difference-frequency generation, exhibiting high efficiency at desired wavelengths. The topical devices are mid-infrared emitters with bulk Mg:SLN and Mg:SLT devices, a telecommunication-channel converter and a twin-photon generator in Mg:CLN waveguides, telecommunication ultrashort-pulse wavelength converters in Mg:CLN and KNbO₃, and a high power green light generator in bulk Mg:SLT. Future directions of these devices are also discussed in the body.

Key words: quasi-phase matching, wavelength conversion, second-harmonic generation, polarization reversal, PPLN

過去 10 年の間に、バルクおよび導波路波長変換デバイスは大きな進歩を遂げ変革期を迎えている。レーザー光の波長変換デバイスは、使用するレーザーや目的とする出射波長に合わせて設計できる柔軟な方式が登場し、近年大きく応用範囲を広げつつある。特性指数も向上し連続発振 (CW) レーザーを用いても高い効率が得られるようになった。入射光と出射光の屈折率分散を補償するために周期的な非線形光学定数の反転構造を導入する方法 (擬位相整合, QPM: quasi-phase matching)^{1,2)} (図 1) では、結晶の透過領域内で位相整合点を自由に設定できるため、高非線形性、高熱伝導性、高耐損傷性、低分散性など要求される特性に適した材料が選択可能である。また、結晶内の一部を局部的に位相整合させることができるため、導波路などの光回路技術とも親和性が高い (図 1 (b))。最近ではその特性に対する理解もすすみ、位相やスペクトラムの加工も提案されるようになってきている。本稿では、周期反転構造を用いた QPM 波長変換デバイスを紹介し、さまざま

な波長域における最近の展開を概観していきたい。

1. 材料の選択

バルクおよび導波路の波長変換では、特性を決定する重要な要素がいくつかある。低強度では実効非線形光学定数 d_{eff} 、高強度では損傷閾値や熱伝導率、超短パルスでは低分散性などが重視される。例えば低強度の第二高調波発生 (SHG: second-harmonic generation) の場合には、変換効率 η はバルク、導波路デバイスに対して式 (1)、(2) のように記述され、 $(d_{\text{eff}})^2 P^\omega$ に比例する。このため入力パワー P^ω が小さい場合には d_{eff} が材料選択の重要な指標である。

$$\eta^{\text{bulk}} = \left(\frac{P^{2\omega}}{P^\omega} \right) = \frac{16\pi^2 h(B, \xi)}{(\lambda^\omega)^3 n^\omega n^{2\omega} \epsilon_0 c} (d_{\text{eff}})^2 P^\omega L \quad (1)$$

$$\eta^{\text{waveguide}} = \frac{8\pi^2 c \mu_0}{(N^\omega)^2 N^{2\omega} (\lambda^\omega)^2 S_{\text{eff}}} (d_{\text{eff}})^2 P^\omega L^2 \quad (2)$$

ただし λ^ω は真空中の基本波波長、 ω は基本波の角振動

* 独立行政法人物質・材料研究機構光材料センター (〒305-0044 つくば市並木 1-1) E-mail: skurimura@nifty.com

** 早稲田大学理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

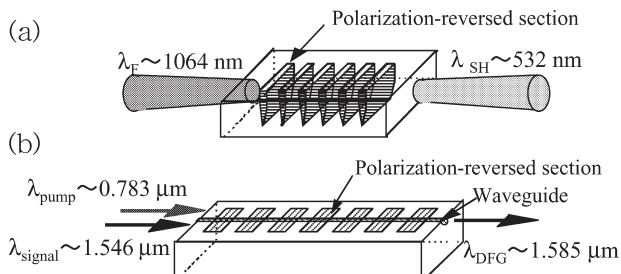


図1 擬位相整合波長変換デバイス。(a) バルク型, (b) 導波路型。

数, n^ω , $n^{2\omega}$ は基本波, 第二高調波の屈折率, N^ω , $N^{2\omega}$ は基本波, 第二高調波の実効屈折率, ϵ_0 は真空中の誘電率, μ_0 は真空中の透磁率, c は真空中の光速, L はデバイス長, S_{eff} は導波路の実効断面積, $h(B, \xi)$ は集光できるパラメータである。バルクデバイスの最適集光の際には $h(B, \xi) = 1.068$ となる。QPM 波長変換では, 従来の複屈折を利用した位相整合 (BPM: birefringent phase matching) と異なり, 非線形光学定数の選択に制限がない。このため LN の対角成分 d_{33} のような大きな非線形定数の利用が可能になり, d_{eff} の値が大きく変わった。QPM が非線形光学を変えたといわれる最大の理由がここにある (QPM では $d_{\text{eff}} = (2/\pi)d_{ij}$ となる)。表1は波長 1064 nm を 532 nm に変換する SHG の場合の特性比較を行ったものである。QPM の d_{eff} は KTP や LBO といった BPM 材料のそれを大きく凌駕している。大きな d_{eff} は CW レーザーや低出力パルスレーザーにおいても高い効率を可能にし, 小型高効率波長変換レーザーが現実のものとなってきた。異なる長さ, 入力パワーのデバイスを比較する際には規格化変換効率 η_{norm} が用いられ, バルク, 導波路それぞれについて式 (3), (4) のように定義されている。

$$\eta_{\text{norm}}^{\text{bulk}} = \frac{\eta}{p^\omega L} [\%/W/cm] \quad (3)$$

$$\eta_{\text{norm}}^{\text{waveguide}} = \frac{\eta}{p^\omega L^2} [\%/W/cm^2] \quad (4)$$

波長 1 μm 帯連続発振レーザーによる緑色発生の場合には, バルクで 1~2%/W/cm, 導波路で 1000~1500%/W/cm² 程度の値が得られる (ただし, レーザー光の品質に強く依存するので注意を要する³⁾。

d_{eff} および材料の入手性に着目すると, 中心となる材料は LN, LT, KTP である。ただしここでは, LN/LT 系材料を一致溶融組成 LN/LT (CLN/CLT: congruent LN/LT), および定比組成 LN/LT (SLN/SLT: stoichiometric LN/LT) として区別する。これらの材料は強誘電体であるため, 周期パターンをもつ電極に高電界を印加して周期分極反転構造を作製する。1990 年代まで一般的であった CLN/CLT は, 長く室温で分極反転できない「凍結した強誘電体」といわれてきたが, 外部からの高い電界 (約 21 kV/mm) によって自発分極を反転させることが 1992 年に報告され注目を集めた^{4,5)}。ただし, この高い電界のため, 長らく素子の厚みは 0.5~1.0 mm が一般的で, レーザーを集光することによる光損傷で出力が制限されていた。波長変換の出力向上には損傷を避けられる大開口デバイスが要求されるため, 10 年以上前から低抗電界 (分極反転に必要とされる電界が低い) 材料の探索がなされてきている。1996 年には Mg:CLN (4.5 kV/mm) が従来の CLN (21 kV/mm) に比べ 5 倍程度抗電界が低いことがわかり⁶⁾, これを契機として 1998 年には SLT で 1.7 kV/mm が報告された⁷⁾。KTP は 1994 年に低抗電界 2 kV/mm が報告されている。なお, 周期分極反転した (periodically poled) LN は PPLN (ピーピーエルエヌまたはピプリン) と呼ばれる場合があるが, QPM LN (quasi-phase-matched LN) を意味している。

2. 中赤外波長帯への波長変換

中赤外領域のコヒーレント光源はガスセンシング, 歯科

表1 代表的な非線形光学材料の特性 (第二高調波発生 1064 nm → 532 nm の場合)

位相整合法	材 料	実効非線形光学定数 (pm/V) ^{†1}	温度許容幅 (C° cm) ^{†1}	熱伝導率 (W/mK) ^{†2}	損傷閾値 (GW/cm ²) ^{†3}	位相整合タイプ ^{†4}
QPM	Mg:LN	16	2.1	4.6 (0%Mg)	0.3	Type 0 d_{33}
QPM	Mg:SLT	10	2.5	8.4 (0.5%Mg)	0.57	Type 0 d_{33}
QPM	KTP	11	4.7	3.3 (c), 2 (a)	0.3~3	Type 0 d_{33}
QPM	α -Quartz	0.19	108	11.7 (c), 6.5 (a)	400	Type 0 d_{11}, d_{12}
BPM	KTP	2.4	25	3.3 (c), 2 (a)	0.3~3	Type II XY d_{32}
BPM	LBO	0.63	~6	3.5	19	Type I XY d_{32}
BPM	LBO	0.83	6.2	3.5	19	Type II XY d_{31}

^{†1} 1064 nm から 532 nm を発生させる第二高調波発生の場合。

^{†2} 熱伝導率の (a), (c) はそれぞれ結晶の a 軸方向, c 軸方向の熱伝導率を示す。

^{†3} 波長 1064 nm, パルス幅 10 ns を仮定。

^{†4} 入射偏光と変換された出射偏光が平行な直線偏光である場合を type 0 と定義。

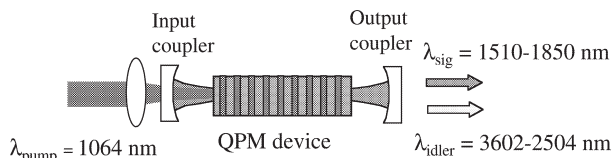


図2 光パラメトリック発振 (OPO) 波長変換。

治療, 分子分光など多くの応用が提案されているものの, 小型高効率な光源がなく高効率波長変換デバイスの登場が待ち望まれていた。最近量子カスケードレーザーの開発も進められているが, 出力や波長可変幅の点では非線形波長変換への期待が高い。中赤外領域は関連する光の振動数が低いため高い効率を得ることが困難であったが, QPM の登場で状況が大きく改善された。周期 20~30 μm 程度の比較的大きな分極反転構造を形成すると, 波長 1 μm 帯の固体レーザーを中赤外域へ波長変換でき波長可変光源を実現できる⁸⁾。通常は共振器構造を用いて光パラメトリック発振 (OPO: optical parametric oscillation) (図2) を行うが, 高い d_{eff} により発振閾値が大きく低下してきており, 低出力レーザーでも発振させることが可能になった。2003 年ごろからフォトリフラクティブ光損傷^{*1}のない Mg:CLN, Mg:SLT を用いて厚手基板による波長変換デバイスが報告されてきている。中赤外発生用デバイスとして厚さ 2~5 mm の基板が用いられているが⁹⁻¹¹⁾, 厚くなるにつれて分域の貫通性制御が困難になり, 実効開口

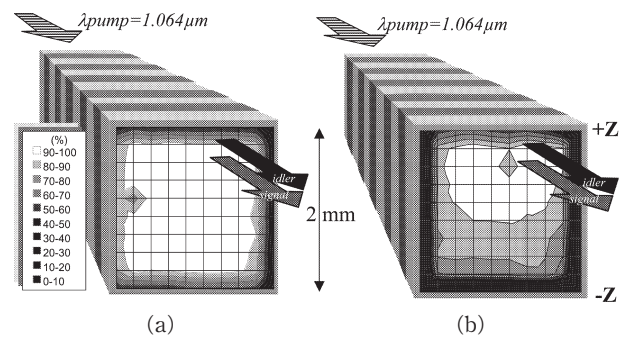


図3 QPM OPO 波長変換デバイスの実効開口。(a) マルチパルス電界によるデバイス, (b) シングルパルス電界によるデバイス。

(波長変換特性で最大値の 90% を維持できる領域と定義) は 1~1.4 mm 程度となっている。Mg:SLT デバイスの入射面内で低強度のポンプ光を走査し効率の分布を測定した結果が図3である。開口内の分極反転の均一性が電界印加の条件によることがわかる。マルチパルスの電界印加により作製したデバイス (図3 (a)) は, シングルパルスで作製したデバイス (図3 (b)) よりも高い均一性を示す。効率分布はポンプ光強度の上昇とともに改善されるため, ビーム品質を重視する場合にはポンプ光強度を高く設定するほうが有利である (図4)¹²⁾。波長可変性の例として Mg:SLT の光パラメトリック発振による波長可変特性を示す。メタンや二酸化窒素の吸収線¹³⁾を含む 1.510~1.85

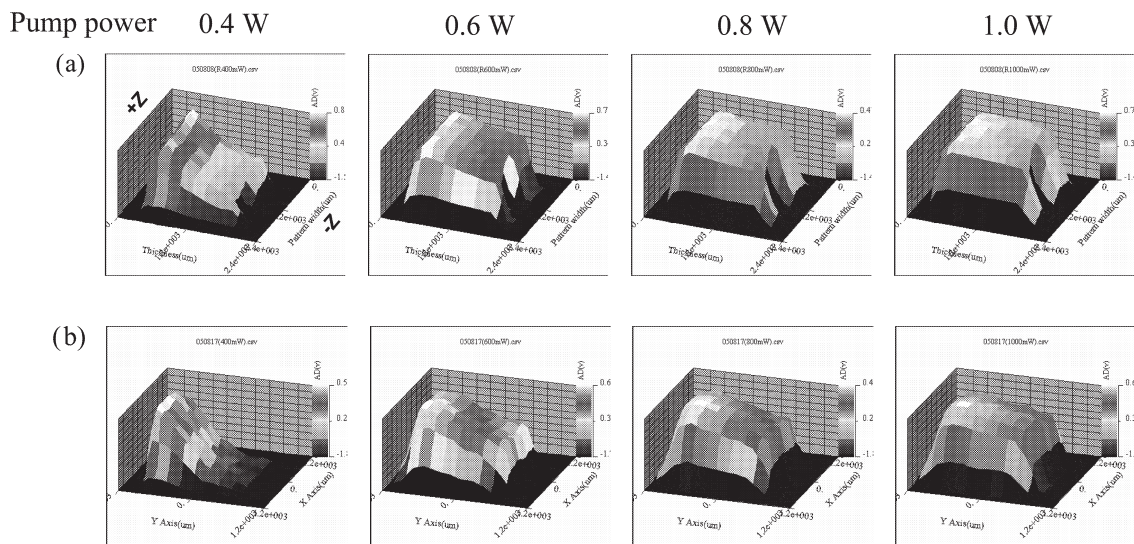


図4 実効開口の励起パワー依存性。(a) マルチパルス電界によるデバイス, (b) シングルパルス電界によるデバイス。(巻頭カラー口絵参照)

*1 フォトリフラクティブ効果により屈折率が変化する変換効率を低下させる現象。従来光損傷と呼ばれてきたが, 実は可逆の現象である。Mg:CLN や Mg:SLT では Mg 添加によりすでに抑圧されている。誘電破壊による不可逆な損傷とは異なる。なお誘電破壊による損傷閾値は LN で 0.3 GW/cm² とされている (1064 nm, 10 ns パルス)。

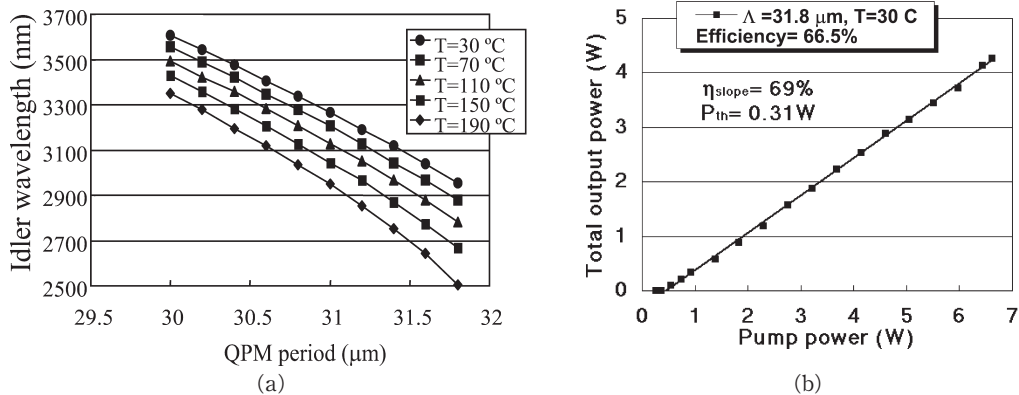


図5 Mg:SLTを用いたQPM OPO 波長変換デバイスの波長変換特性。(a) 3 μm 帯の波長可変特性、(b) 室温での入出力特性。

μm および 2.504~3.62 μm 領域が高効率で発生できている (図5)^{14,15)}。Mg:SLT はパルス幅 100 fs 領域では波長 1 μm 励起 OPO¹⁶⁾/OPG (optical-parametric generation)¹⁷⁾ で高出力が実現されており、高い熱伝導率が有利に働いている。最近では、Mg:CLN の OPO と差周波発生 (difference frequency generation) を組み合わせることで波長 6 μm の発生も確認されている¹⁸⁾。

QPM が空間的ウォークオフを生じないことを利用して、長さ 70 mm の Mg:SLN 中赤外波長変換デバイスが報告されている (図6)¹⁹⁾。単位長さあたりの許容幅が狭い短波長への波長変換では、70 mm の相互作用長は波長許容幅や温度許容幅を極端に狭くするため効率化にはつながらないが、長波長領域では長尺化で大きな効果が得られる。ナノ秒パルス小型レーザー励起でシングルパス波長変換が低閾値 (I_{th} : 12 MW/cm²) で実現されている²⁰⁾。

より長波長の赤外光実現には、極性反転した GaAs 結晶が用いられる。GaAs 基板上に Ge をパターンニングして MBE (molecular beam epitaxy) 成長することにより周期的な極性反転構造を作製することができる^{21,22)}。このデバイスを用いて、差周波発生により波長 7~9 μm への波長変換が実現されている^{23,24)}。

3. 光通信波長帯での波長変換

光通信の領域では一般に連続発振の低出力レーザーが用いられるため、大きな d_{eff} 材料に導波路構造をとることが望ましい。導波路化にはチタン拡散²⁵⁾、プロトン交換²⁶⁾、接着/接合²⁷⁾などの手法が用いられるが、近年接着リッジ導波路 (ARW: adhered ridge waveguide) の効率向上がめざましい (図7 (a))。ARW ではデバイス作製に高度な技術を要するものの、モードプロファイルの良好な閉じ込めの強い導波路が実現できるため (図7 (b))、高い規格化

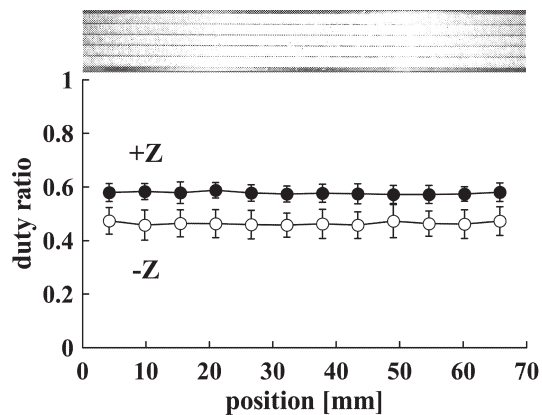


図6 Mg:SLNを用いたQPM 波長変換デバイスの分極反転比分布。写真は 70 mm 長デバイスの +Z 面写真。

変換効率を得られる²⁸⁾。高温真空下の分極反転により接着ウェハーに周期 17 μm の分極反転を行うと、プロトン交換導波路デバイスの約 3 倍となる規格化 SHG 変換効率 450%/W/cm² が実現できる²⁹⁾。絶縁層をはさんだ接着ウェハーは分極反転が困難であるが、閉じ込めが強く低損失 (0.4 dB/cm) の導波路が可能である。長さ 30 mm のデバイスでは SHG 効率は 10 mW 入力換算で 46% (4600%/W) に達している (図8 (a))。CバンドとLバンドのチャネル変換実験では、36 mW の励起光に対して 70% (-1.6 dB) の変換効率を得られている (図8 (b))。

通信帯の高効率デバイスは、新しい領域へも進出を開始している。量子暗号通信の世界では、盗聴を検知するために単一光子源が通信手段に利用される。この光源を実現するために直交偏光をもつ光子対の発生が重要であるが、ARW の高効率を生かして d_{24} による光パラメトリック発生でタイプII光子対発生が報告されている³⁰⁾。

他方バルクデバイスでは、LN の d_{32} ³¹⁾ や KN の d_{31} ³²⁾ を用いて光通信波長帯で群速度整合を実現するデバイスが登

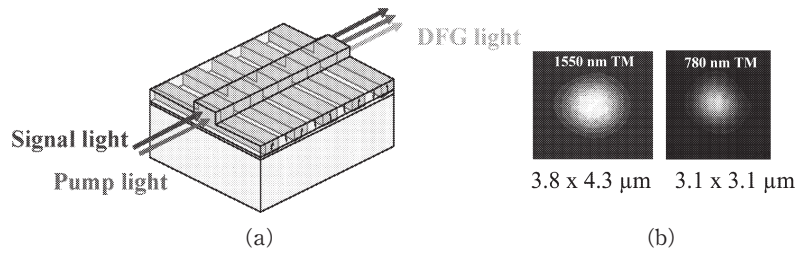


図7 Mg:CLN を用いた接着リッジQPM 波長変換デバイス. (a) デバイス形態, (b) 導波光のモードプロファイル. (巻頭カラー口絵参照)

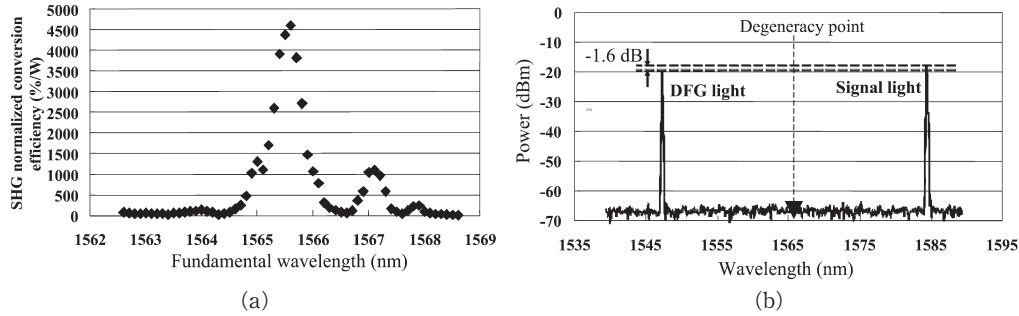


図8 ARW QPM-DFG 波長変換デバイスの波長変換特性. (a) SHG 特性, (b) DFG 特性 (L band → C band チャネル変換).

場している。これは屈折率分散から決定される群速度整合波長に、周期分極反転による位相速度整合波長をあわせこんだデバイスであり、100 fs 領域の超短パルスの波長変換が実現されている。デバイス長 10 mm においても広帯域な波長許容幅 (LN の d_{32} では 52 nm, KN の d_{31} では 38 nm) を有し、カスケード効果による超短パルスの圧縮にも有効であることが実証されている³³⁾。

4. 可視波長帯への波長変換

Mg:CLN や Mg:SLT を用いた波長変換デバイスが、特に半導体レーザーで得られない緑色、および純青色領域で実現されている。ここへきてレーザーリアプロテレビなどの潜在的需要が喚起されてきて、テレビやプロジェクターに搭載できる小型な高出力緑色レーザーに期待が集まってきた。1 μm 帯に品質のよいレーザーが市販されていることもあり、SHG による緑色発生が多く報告されホットな研究領域となっている。Mg:CLN では 2006 年に周期 6.8 μm のデバイスから 3 W 出力 (CW 動作) が報告されている³⁴⁾。Mg:SLT は 2004 年に周期 8 μm の緑色発生デバイスが実現され³⁵⁾、平均 4.4 W 出力 (パルス動作) が報告されている (図 9 (a))³⁶⁾。無添加 SLT では、2004 年に周期 8 μm のデバイスにおいて、平均 5 W 出力 (パルス動作) の 1000 時間安定動作が確認されている³⁷⁾。2007 年には Mg:SLT で CW の 7 W 出力が報告され (図 10

(a))³⁸⁾、高熱伝導材料である Mg:SLT の安定性に注目が集まっている。パルスおよび CW ではデバイスの設計思想や集光パラメーターが大きく異なるため、それぞれで最適化を行う必要がある。例えばピークパワーの高いパルス動作では、効率は容易に 70% 程度の飽和値が得られる (図 9 (b))。しかし高い出力を得るためには、光損傷・非線形吸収を避けるため、ビーム径を大きくし強度を低下させる必要がある。このため、高出力には実効開口の大きなデバイスが要求される (図 9 (a))。他方、CW 動作では高効率を得ること自体が困難であるため、より高い規格化変換効率を与える高品質デバイスおよび高品質レーザーが求められる。一般に QPM デバイスでは可視光発生で位相整合の波長許容幅、温度許容幅が狭く、これはデバイス長に反比例して狭くなる。長いデバイスが必要な CW レーザーの場合にはデバイスの許容幅が狭いため、レーザー光源の線幅増大とともに規格化変換効率は低下する (図 10 (b))。また可視領域では材料の二光子吸収が存在し、出力上昇に伴う熱位相不整合の問題が顕著になる。シミュレーションによって熱伝導率の高い SLT が安定した高出力発生に有利であることが示されている³⁹⁾。またパルス SHG において緑色光強度 ~22 MW/cm² でも室温で安定に動作していることから (図 9 (b))、Mg:SLT では緑色光励起の OPO⁴⁰⁾/OPCPA⁴¹⁾ も試みられている。面発光型半導体レーザーと組み合わせて内部共振により小型高効率

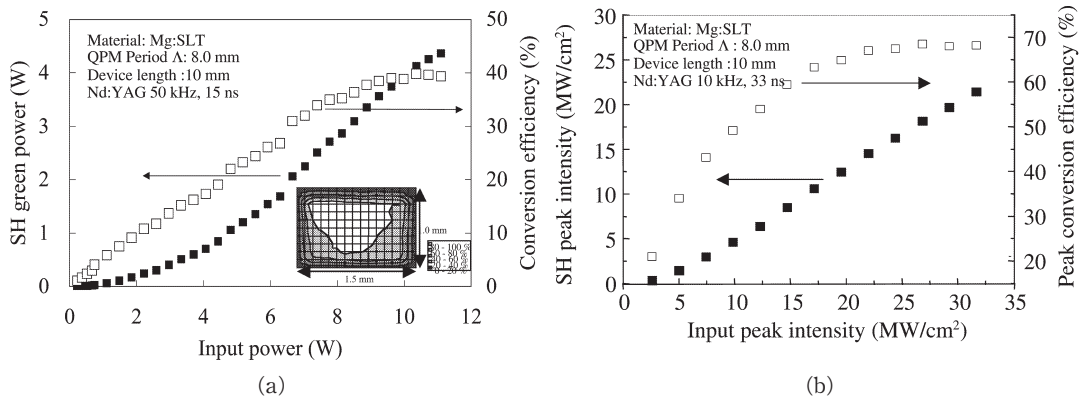


図9 Mg:SLTを用いたSHGデバイスのパルスレーザー波長変換特性。(a) 高平均出力セットアップ, (b) 高効率セットアップ。

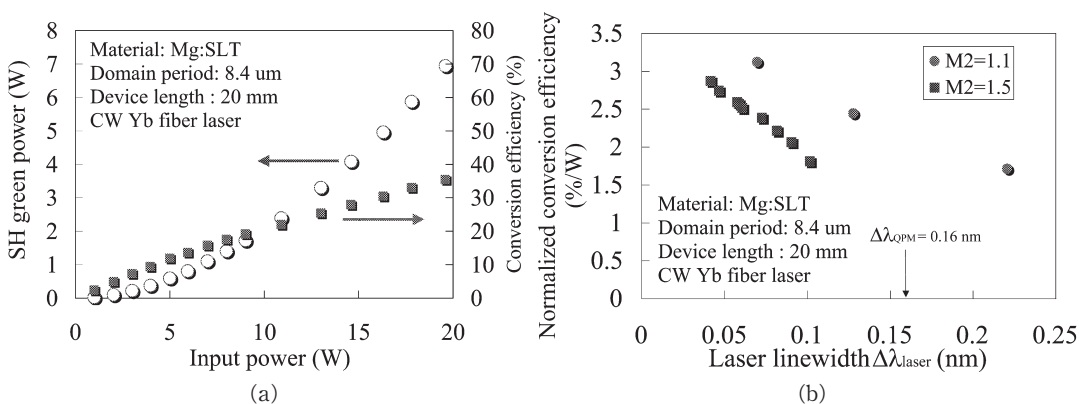


図10 Mg:SLTを用いたSHGデバイスのCW波長変換特性。(a) 入出力特性, (b) 規格化変換効率のレーザー線幅依存性。

レーザーをめざす動きもあり⁴²⁾, 今後の動向を注視したい。

5. 紫外波長帯への波長変換

強誘電体QPM材料の吸収端が265~350 nmであることから, 紫外350 nm以下におけるQPMデバイスによる安定的な波長変換は困難といわれている。1997年にCLTにより紫外325 nm発生が行われているが, 光損傷が発生し動作温度は高温域に限られた⁴³⁾。2002年にはCLTにより紫外355 nm発生が行われており⁴⁴⁾, 2003年にはMg:CLNを用いた周期1.4 μmのデバイスから波長340 nmが得られている⁴⁵⁾。フォトリフラクティブ光損傷によるビーム品質劣化の有無および出力安定性の確認が今後必要といえる。また, さらなる短波長領域となる深紫外領域では, 水晶を基板とした波長変換デバイスが提案され^{46,47)} (吸収端150 nm), 紫外300 nm以下におけるQPMデバイスとして期待がもたれている⁴⁸⁾。200 nm台の紫外領域はリソグラフィーや眼科治療などのさまざまな応用分野があるにもかかわらず⁴⁹⁾, QPM波長変換技術が適用できな

い領域であった。水晶が強誘電体ではないために, ここでは強誘電体の電界の代わりに応力を外力として印加し, ツイン(双晶)を誘起することで周期反転構造を得ている。詳細は本特集号の原田氏の解説に譲る。

6. デバイスの未来

QPM波長変換デバイスは, その反転構造に変調をかけることで, 位相整合曲線の波長特性^{50,51)}や出射パルスの時間波形⁵²⁾を加工することができる。分極反転周期の空間周波数ベクトルは一次元である場合が多いが, 一次元自由度を加えた二次元分極反転構造は非線形フォトニック結晶と呼ばれ⁵³⁾, 高い波長分散性など新しい機能を実現している⁵⁴⁾。フォトニック結晶では屈折率分散や光閉じ込めが制御できるのに対し, 非線形フォトニック結晶では波長変換や電気光学変調などの機能が実現でき, $\chi^{(1)}$ と $\chi^{(2)}$ の変調構造を共存させることで飛躍的な特性改善が期待できる。分極反転型高速変調器⁵⁵⁾との集積化^{56,57)}や分極反転型偏向器との集積化も試みられており, 拡張性の高さは特筆に

値する。BPM 結晶と異なり，異なる QPM 条件の位相整合領域を空間的に配置できることは，多機能光集積回路などへの発展を予感させる。

擬位相整合波長変換デバイスの基本的な特性を紹介し，材料・デバイス選択のガイドラインおよび最新のトピックスを概観した。対象となる波長域は中赤外から深紫外まで広がってきており，非線形光学を活性化しつつある。QPM に適した新しい材料の研究開発も行われ，従来の特性が格段に改善されるだけでなく，BPM で不可能であったデバイス形態も実現されている。今後，特性改善に加えて，新規な応用分野の開拓も期待される。

本論文の内容は以下の方々のご協力をいただいております。早稲田大学中島啓幾教授，物質・材料研究機構北村健二博士，竹川俊二博士，中村優博士，Yu Nan Ei 博士，Liu Youwen 博士，Sergey Tovstonog 博士，東京大学黒田和男教授，志村努教授，東京農工大学芦原聡博士，プサン国立大 Cha Myoungsik 助教授，ニデック社山田毅氏，足立宗之博士，林健一氏，ニコン社原田昌樹氏，村松健一氏，早稲田大学丸山真幸君，加藤祐嗣君，薄井佑介君，日本大学井上修一郎助教授，本谷将之君，住友大阪セメント市川潤一郎氏に深く感謝いたします。また本研究の一部は情報通信研究機構の委託研究で行われており感謝いたします。

文 献

- 1) 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.
- 2) 宮澤信太郎，栗村 直監修：分極反転デバイスの基礎と応用（オプトロニクス社，2005）。
- 3) S. Tovstonog, S. Kurimura and K. Kitamura: "Continuous-wave 2 W green light generation in periodically poled Mg-doped stoichiometric lithium tantalate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) L907-L909.
- 4) 佐脇一平，三浦道雄，栗村 直：“LiTaO₃ への深い周期的分極反転の作製（II）—電界印加法—”，秋季応用物理学学会学術講演会（1992）18a-X-2.
- 5) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh and K. Watanabe: "First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide poled by applying an external field for efficient blue SHG," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 435-436.
- 6) A. Kuroda, S. Kurimura and Y. Uesu: "Domain inversion in ferroelectric MgO:LiNbO₃ by applying electric fields," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 1565-1567.
- 7) K. Kitamura, Y. Furukawa, K. Niwa, V. Gopalan and T. E. Mitchell: "Crystal growth and low coercive field 180° domain switching characteristics of stoichiometric LiTaO₃," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 3073-3075.
- 8) 栗村 直，北村健二：“定比組成 LiNbO₃/LiTaO₃ における分極反転とデバイス応用”，レーザー研究，**32** (2004) 181-184.
- 9) S. Kurimura, N. E. Yu, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura and T. Sumiyoshi: "QPM wavelength converters based on stoichiometric lithium tantalate," *OSA TOPS Adv. Sol. State Photonics*, **98** (2005) 92-96.
- 10) H. Ishizuki, T. Taira, S. Kurimura, J. H. Ro and M. Cha: "Periodic pooling in 3-mm-thick MgO:LiNbO₃ Crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) L108-L110.
- 11) H. Ishizuki and T. Taira: "High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a periodically poled MgO:LiNbO₃ device with a 5 mm×5 mm aperture," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 2918-2920.
- 12) Y. Liu, S. Kurimura, M. Nakamura, S. Takekawa and K. Kitamura: "Effective aperture in periodically poled Mg-doped stoichiometric LiTaO₃ for quasi-phase-matched optical parametric oscillation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 4064-4067.
- 13) W. Chen, G. Mouret, D. Boucher and F.K. Tittel: "Mid-infrared trace gas detection using continuous-wave difference frequency generation in periodically poled RbTiOAsO₄," *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, **72** (2001) 873-876.
- 14) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura, J. Sakuma, Y. Otani and A. Shiratori: "Periodically poled near-stoichiometric lithium tantalate for optical parametric oscillation," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1662-1664.
- 15) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura, Y. Takada, J. Sakuma and T. Sumiyoshi: "Efficient optical parametric oscillation based on periodically poled 1.0 mol% MgO-doped LiTaO₃," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 5134-5136.
- 16) T. Sudmeyer, E. Innerhofer, F. Brunner, R. Paschotta, T. Usami, H. Ito, S. Kurimura, K. Kitamura, D. C. Hanna and U. Keller: "High-power femtosecond fiber-feedback optical parametric oscillator based on periodically poled stoichiometric LiTaO₃," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1111-1113.
- 17) F. Brunner, E. Innerhofer, S. V. Marchese, T. Sudmeyer, R. Paschotta, T. Usami, H. Ito, S. Kurimura, K. Kitamura, G. Arisholm and U. Keller: "Powerful red-green-blue laser source pumped with a mode-locked thin disk laser," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1921-1923.
- 18) J. Yi, H. Ishizuki, I. Shoji, T. Taira and S. Kurimura: "Generation of 6 μm radiation by optical parametric oscillator and difference frequency generation in periodically poled LiNbO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 111-115.
- 19) M. Maruyama, H. Nakajima, S. Kurimura, N. E. Yu and K. Kitamura: "70-mm-long periodically poled Mg-doped stoichiometric LiNbO₃ devices for nanosecond optical parametric generation," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 011101.
- 20) M. Maruyama, H. Nakajima, S. Kurimura and K. Kitamura: "Optical damage resistant 70-mm-long periodically poled Mg doped stoichiometric LiNbO₃ for low-threshold optical parametric generation," *Conf. on Lasers and Electro-Optics*, CMB1 (2006).
- 21) S. Koh, T. Kondo, M. Ebihara, T. Ishiwada, H. Sawada, H. Ichinose, I. Shoji and R. Ito: "GaAs/Ge/GaAs sublattice reversal epitaxy on GaAs (100) and (111) substrates for nonlinear optical devices," *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, **38** (1999) L508-L511.
- 22) L. A. Eyres, P. J. Tourreau, T. J. Pinguet, C. B. Ebert, J. S. Harris, M. M. Fejer, L. Becouarn, B. Gerard and E. Lallier: "All-epitaxial fabrication of thick, orientation-patterned GaAs films for nonlinear optical frequency conversion," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 904-906.
- 23) O. Levi, T. J. Pinguet, T. Skauli, L. A. Eyres, K. R. Parameeswaran, J. S. Harris, Jr., M. M. Fejer, T. J. Kulp, S. E.

- Bisson, B. Gerard, E. Lallier and L. Becouarn: "Difference frequency generation of 8- μ m radiation in orientation-patterned GaAs," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 2091-2093.
- 24) S. E. Bisson, T. J. Kulp, O. Levi, J. S. Harris, Jr., M. M. Fejer: "Long-wave IR chemical sensing based on difference frequency generation in orientation-patterned GaAs," *Appl. Phys. B*, **85** (2006) 199-206.
- 25) Y. Lee, H. Suche, Y. H. Min, J. H. Lee, W. Grundkotter, V. Quiring and W. Sohler: "Wavelength- and time-selective all-optical channel dropping in periodically poled Ti:LiNbO₃ channel waveguides," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **15** (2003) 978-980.
- 26) K. R. Parameswaran, R. K. Route, J. R. Kurz, R. V. Roussev and M. M. Fejer: "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.
- 27) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga and H. Suzuki: "0-dB wavelength conversion using direct-bonded QPM-Zn:LiNbO₃ ridge waveguide," *IEEE Photonic. Tech. Lett.*, **17** (2005) 1049-1051.
- 28) S. Kurimura, Y. Kato, M. Maruyama, Y. Usui and H. Nakajima: "Quasi-phase-matched adhered ridge waveguide in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 191123.
- 29) Y. Usui, T. Okubo, H. Nakajima, M. Motoya, S. Kurimura, F. Yamamoto and J. Ichikawa: "Highly efficient wavelength converter for photonic network," *Conf. on Lasers and Electro-Optics*, CTuB4 (2006).
- 30) 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," *Conf. on Lasers and Electro-Optics*, CMB5 (2006).
- 31) N. E. Yu, S. Kurimura and K. Kitamura: "Efficient frequency doubling of a femtosecond pulse with simultaneous group-velocity matching and quasi phase matching in periodically poled, MgO-doped lithium niobate," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 3388-3390.
- 32) N. E. Yu, S. Kurimura, K. Kitamura, O.-Y. Jeon, M. Cha, S. Ashihara, T. Ohta, T. Shimura, K. Kuroda and J. Hirohashi: "Efficient second-harmonic generation of ultrafast pulses in periodically poled KNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 5839-5841.
- 33) S. Ashihara, T. Shimura, K. Kuroda, N. E. Yu, S. Kurimura, K. Kitamura, M. Cha and T. Taira: "Optical pulse compression using cascaded quadratic nonlinearities in periodically poled lithium niobate," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1055-1057.
- 34) H. Furuya, A. Morikawa, K. Mizuuchi and K. Yamamoto: "High-beam-quality continuous wave 3 W green-light generation in bulk periodically poled MgO:LiNbO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 6704-6707.
- 35) S. Kurimura, N. E. Yu, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura and T. Sumiyoshi: "QPM wavelength converters based on stoichiometric lithium tantalate," *OSA TOPS Adv. Sol. State Photonics*, **98** (2005) 92-96.
- 36) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura and K. Kitamura: "Stable high-power green light generation with thermally conductive periodically poled stoichiometric lithium tantalate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L1265-L1267.
- 37) M. Katz, R. K. Route, D. S. Hum, K. R. Parameswaran, G. D. Miller and M. M. Fejer: "Vapor-transport equilibrated near-stoichiometric lithium tantalate for frequency-conversion applications," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1775-1777.
- 38) S. V. Tovstonog, S. Kurimura and K. Kitamura: "High power continuous-wave green light generation by quasi phase matching in Mg stoichiometric lithium tantalate," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 051115.
- 39) O. Louchev, N. E. Yu, S. Kurimura and K. Kitamura: "Thermal inhibition of high-power second-harmonic generation in periodically poled LiNbO₃ and LiTaO₃ crystals," *Appl. Phys. Lett.*, **87** (2005) 131101.
- 40) S.-Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao, S. N. Zhu, S. Kurimura and K. Kitamura: "Green-pumped high-power optical parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped stoichiometric LiTaO₃," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 3632-3634.
- 41) F. Rotermund, C. J. Yoon, K. Kim, S. Kurimura and K. Kitamura: "Optical parametric chirped pulse amplification of Cr:forsterite laser pulses in periodically poled stoichiometric LiTaO₃ at 1 kHz," *Appl. Phys. B*, **85** (2006) 17-20.
- 42) A. Mooradian, S. Antikichev, B. Cantos, G. Carey, M. Jansen, S. Hallstein, W. Hitchens, D. Lee, J.-M. Pelaprat, R. Nabiev, G. Niven, A. Shchegrov, A. Umbrasas and J. Watson: "High power extended vertical cavity surface emitting diode lasers and arrays and their applications," *Micro-Optics Conference*, M1 (2005).
- 43) J.-P. Meyn and M. Fejer: "Tunable ultraviolet radiation by second-harmonic generation in periodically poled lithium tantalate," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1214-1216.
- 44) Z.-W. Liu, Y. Du, J. Liao, S.-N. Zhu, Y.-Y. Zhu, Y.-Q. Qin, H.-T. Wang, J.-L. He, C. Zhang and N.-B. Ming: "Engineering of a dual-periodic optical superlattice used in a coupled optical parametric interaction," *J. Opt. Soc. Am. B*, **19** (2002) 1676-1684.
- 45) K. Mizuuchi, A. Morikawa, T. Sugita and K. Yamamoto: "Efficient second-harmonic generation of 340-nm light in a 1.4- μ m periodically poled bulk MgO:LiNbO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) L90-L91.
- 46) 栗村 直, M. M. Fejer, 平等拓範, 上江洲由晃, 中島啓幾: "紫外波長変換をめざした擬位相整合水晶", *応用物理*, **69** (2000) 548-552.
- 47) 栗村 直: "微細周期ツインを有する高出力レーザー用水晶波長変換デバイス", *工業材料*, **53** (2005) 64-67.
- 48) 山田 毅, 栗村 直, 足立宗之, 林 健一, 北村健二: "擬位相整合水晶波長変換デバイスによる 266 nm 光の発生", 秋季応用物理学学会学術講演会 (2006) 30p-ZX-20.
- 49) 栗村 直, 山田 毅, 原田昌樹: "全固体真空紫外レーザをめざす水晶波長変換デバイス", *光アライアンス*, **17** (2006) 27-31.
- 50) M. L. Bortz, M. Fujimura and M. M. Fejer: "Increased acceptance bandwidth for quasi-phaseshifted second harmonic generation in LiNbO₃ waveguides," *Elect. Lett.*, **30** (1994) 34-35.
- 51) 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. Quant. Elect.*, **41** (2005) 1540-1547.
- 52) G. Imeshev, A. Galvanauskas, D. Harter, M. A. Arbore, M. Proctor and M. M. Fejer: "Engineerable femtosecond pulse shaping by second harmonic generation with Fourier synthetic quasi-phase-matching gratings," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 864-866.
- 53) V. Berger: "Nonlinear photonic crystals," *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998) 4136-4139.
- 54) N. G. R. Broderick, G. W. Ross, H. L. Offerhaus, D. J. Richardson and D. C. Hanna: "Hexagonally poled lithium niobate: A two-dimensional nonlinear photonic crystal,"

- Phys. Rev. Lett., **84** (2000) 4345-4348.
- 55) S. Oikawa, F. Yamamoto, J. Ichikawa, S. Kurimura and K. Kitamura: "Zero-chirp broadband Z-cut Ti : LiNbO₃ optical modulator using polarization reversal and branch electrode," J. Lightwave Technol., **23** (2005) 2756-2760.
- 56) S. Kurimura and Y. Uesu: "Proposal of a modulator-integrated structure in quasi-phase-matched second harmonic generation," Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 5457-5459.
- 57) Y. Oki, H. Onda, T. Okaguchi, K. Ohnishi and T. Okada: "Development of a quasi-phase-matched, second-harmonic generation periodically poled lithium niobate waveguide with an integrated electro-optical modulator," Opt. Lett., **31** (2006) 1492-1494.

(2007年3月7日受理)