総説**REVIEW ARTICLE****在宅治療にむけた小型高効率レーザー波長変換デバイス**

栗村 直

物質・材料研究機構, 早稲田大学

(平成19年 8月6日受理, 平成19年10月18日掲載決定)

Compact and efficient laser-wavelength converters for domiciliary treatment

Sunao Kurimura

National Institute for Materials Science (NIMS), Waseda University

(Received August 6, 2007, Accepted October 18, 2007)

要 旨

レーザーの波長変換デバイスは過去10年の間に劇的な進歩をとげ、小型光源用のシングルパス変換や多波長発生設計が可能になった。分極反転を用いた高効率擬似位相整合波長変換デバイスにより、光源から複雑な共振器構造が省かれて光源の形態が大きく変わろうとしており、在宅治療用具として適した安定なツールに飛翔する可能性がある。中赤外発生用波長変換デバイスの最近の進歩についてここでは報告する。

キーワード: 擬似位相整合 (QPM), 波長変換, 光パラメトリック発振 (OPO), PPLN

Abstract

Laser wavelength converters have made a dramatic progress for last decade, enabling a simple single-pass conversion for a compact light source and multi-wavelength emission at designed wavelengths. A polarization-reversed quasi-phase-matched efficient wavelength converter will drastically change the scheme of a light source by eliminating a cavity structure, which is suitable for a stable operation tool in domiciliary treatment. Recent progress in converters to the midinfrared spectrum will be reviewed in the article.

Key words: Quasi-phase matching (QPM), wavelength converter, optical parametric oscillation (OPO), PPLN

1. はじめに

出生率が1.3を割り込んで世界でもまれにみる速度で高齢化が進む日本において、医工連携による医療技術の加速は必然的な要求である。なかでもレーザー技術の果たす役割は大きくその効果も実証されてきている。歯科におけるカリエス除去、メラニン除去などは中赤外レーザーの有効性を示す典型例であり、眼科においては真空紫外レーザーによる角膜手術が100万人を越えている。中赤外域では切断・止血を同時に行う2波長レーザーメスなども検討されてきている。しかしこれらの装置においては一般に大型の大電力を必要とするレーザーが使用されており、医療場所や予算の点で手術者および患者に負担を強いていた。

近年レーザーの波長変換デバイスは分極反転を用いた擬似位相整合(Quasi-Phase Matching: QPM)という手法が登場し、固定波長のレーザーを望む波長に変換する設計が可能になった^{1,2)}。またこの手法は波長変換に格段の低い値化をもたらし、特に中赤外発生においては励起用レーザーとして必要とされたテーブルサイズの高出力励起光源からハンドヘルドな小型光源への移行を促している。また波長変換の基本となるレーザー光源も半導体レーザー、半導体レーザー励起固体レーザーや半導体レーザー励起ファイバーレーザーの登場で小型高効率化がすすみ、波長変換デバイスとの整合性も検討されてきている。これら90-00年代の大きな進歩をうけて医療用の可搬な低電力光源を議論できる環境になってきた。本論文では主に中赤外波長域における波長変換技術を概観し、在宅医療に適用可能な小型レーザーの可能性を探りたい。

2. 擬似位相整合波長変換

擬似位相整合波長変換デバイスは非線形光学材料の極性を周期的に反転することで効率を向上させるもので、一般的には強誘電体に周期電極で電界を印加することで得られる(Fig.1)。材料内の周期的に配列したブロック間で人為的に位相を合わせこむ方法をとるため(但しブロック内では位相はそろっていない)擬似位相整合と呼ばれる。これらのデバイスでは分極反転周期を変えることで位相整合波長(波長変換する波長)を選ぶことができるので、デバイスの設計性が高い。分極反転周期 Λ と波長変換の例をまとめたのがTable1である。多種多様な組み合わせに応用できる柔軟性を有し、さまざまな応用分野に展開できることがわかる。本解説では、中赤外領域を中心に最近のQPM波長変換技術を概観し、今後の発展方向を議論したい。

非線形光学効果は光子間でエネルギーのやりとりを可能にする現象で、材料内で振動する電子分極 P が入射してくる光の電界 E に対して非線形応答することによって起きている。すなわち $P = \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2$ の2次の非線形項から2光子の和周波数、差周波数をもつ光の成分が得られる。仮に入射光を $E_1 = E_0 \sin(\omega_1 t)$, $E_2 = E_0 \sin(\omega_2 t)$ とすると混合波 $E = E_1 + E_2$ から発生する電子分極成分 P は $E_1 E_2$ の項を含む。すなわち P は $\cos((\omega_1 + \omega_2)t)$ および $\cos((\omega_1 - \omega_2)t)$ の成分

Fig.1 分極反転を用いた擬似位相整合波長変換デバイス

Table1 分極反転擬似位相整合レーザー波長変換

波長変換	反転周期 ($\Lambda \mu\text{m}$)*	応用分野
短波長変換		
1560 $\rightarrow$ 780 nm	17-20	WDM用波長標準器, 光CDMA デコーダ
1550 + 1319 $\rightarrow$ 713 nm	14-16	単一光子検出器
1319 + 1064 $\rightarrow$ 589 nm	9-11	レーザガイドスター
1550 + 780 $\rightarrow$ 520 nm	7-8	光サンプリング
1064 $\rightarrow$ 532 nm	6-9	レーザプロジェクタ, フォトプリンタ, 光メモリ
1030 $\rightarrow$ 515 nm	6-9	蛍光顕微鏡, DNAシーケンサ
976 $\rightarrow$ 488 nm	5-7	蛍光顕微鏡, DNAシーケンサ, 光メモリ
946 $\rightarrow$ 473 nm	5-7	レーザテレビ, フォトプリンタ
1064 + 532 $\rightarrow$ 355 nm	~ 2	光造形, 回路基板トリミング / ドリリング
相互変換		
1.3 $\leftrightarrow$ 1.5 μm	15-18	チャネル変換器
1.5 $\leftrightarrow$ 1.5 μm	14-19	WDM用一括波長変換, 波長ルーティング
長波長変換		
0.78 $\rightarrow$ 1.56 + 1.56 μm	16-18	量子暗号通信
1.06 $\rightarrow$ 1.7 + 2.9 μm	31-32	レーザメス, 歯科治療
1.06 $\rightarrow$ 1.55 + 3.4 μm	28-31	メタンガスモニタリング
1.06 $\rightarrow$ 1.4 + 4.3 μm	27-29	炭酸ガスモニタリング
1.06 $\rightarrow$ 3-4 μm	27-31	レーザ励起質量分析

* LN, LT, KTP の場合

を含みこれらの電子振動が波源となって和周波光, 差周波光が得られる. 変換光を ω_3 と記述すると和周波発生 (Sum frequency Generation: SFG) では $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$, 差周波発生 (Difference frequency Generation: DFG) では $\omega_1 - \omega_2 = \omega_3$ の関係が成り立っている. 光子のエネルギーはその角振動数 ω にプランク定数を乗することで得られるため, これらはエネルギー保存則を示している. 高効率な波長変換のためにはこれに加えて各点で発生する変換光の位相を整合させる必要があり, これは運動量保存則に相当する. 擬似位相整合はこの運動量保存則を人為的に満たす方法である. その結果, エネルギー保存則と運動量保存則を同時に満たした周波数の組み合わせのみ高効率で変換される. また差周波発生と似たケースで励起光 ω_1 のみを入力する場合がある. この場合でも差周波発生の運動量保存則 (位相整合) を満たせば ω_2 , ω_3 の周波数では大きな増幅率が得られるため, 真空中の量子揺らぎを種光として, ω_2 , ω_3 が得られこの現象は光パラメトリック発生 (Optical Parametric Generation) と呼ばれる. この状態で非線形光学材料の外部に光共振器を組んでいずれかの光を共振させた場合は光パラメトリック発振 (Optical Parametric Oscillation) と呼ぶ.

QPMでは誘電体材料の最大非線形光学定数であるニオブ酸リチウム (LiNbO_3 : LN) の d_{33} が利用でき, 高効率波長変換を実証してきた. ニオブ酸リチウムやタンタル酸リチウム (LT) は外部からの高い電界 (約21kV/mm) によって極性を反転させ得るが^{3,4)}この反転に必要な高電界のため素子の厚みは0.5~1.0mmに制限されるのが一般的であり, 薄いデバイスに変換するレーザーを集光することによる破壊的損傷が出力を制限していた. このため高出力波長変換には損傷を避けるために大開口が要求され, 90年半ば~00年前半にかけて低抗電界 (分極反転に必要とされる電界が低い) 材料であるMg添加調和溶融ニオブ酸リチウム (Mg-doped congruent LN: Mg:CLN⁵⁾), 定比組成ニオブ酸リチウム (Stichiometric LN: SLN) や定比組成タンタル酸リチウム (Stichiometric LT: SLT) のデバイス応用が盛んになってきた. Mg:CLN⁶⁾やSLT⁷⁾を用いた厚い結晶における分極反転の試みも行われており, 高効率を実現する高い分極反転品質をめざして鋭意努力が続けられている.

QPM技術を用いると分極反転周期で位相整合波長を決められるため, 半導体電子デバイスのプロセス技術を用いて波長変換特性を人為的に設計可能である. この時波長変換領域を制限するのは波長変換結晶の吸収であり, 広い透過領域をもつ材料が望まれる. LN/LT系では中赤外波長4.5 μm 程度までは十分透明であるため, 高い非線形光学定数を生かして高効率な波長変換が実現できる. LN/LT系材料ではいわゆる光損傷 (フォトリラクティブ効果) が問題となってきたが, CLN^{8,9)}同様SLN/SLTにおいてもMg添加で抑制できている¹⁰⁾. なおQPM LN (Quasi-Phase-Matched LN) は周期分極反転した (Periodically Poled) LNという意味でPPLN (ピーピーエルエヌまたはピブリン) と呼ばれる場合がある.

3. 共振器による中赤外への波長変換

一般に生体に重要な水の吸収波長域である中赤外3 μm 帯は, 効率の高いレーザーが不在でEr:YAGなどの大型レーザーが主流である. これを小型の励起レーザーと高効率波長変換デバイスで代替する試みが90年代半ばから行われてきている. そこではレーザーとしての完成度が高い波長1 μm のNd:YAGレーザーなどを励起光源として, 光パラメトリック発振/発生を用いた長波長変換により中赤外光が得られている.

OPO/OPGは非線形光学効果の一種で入射したレーザー光の光子を低いエネルギーをもつ複数の光子に分割する現象である. 例えば1.06 μm の波長をもつ光から, より低いエネルギーをもつ赤外光1.6 μm と中赤外光3.1 μm を発生させる. 分極反転周期 Λ やデバイス温度 T をかえることで, 出射するふたつの波長の組合せを自由に变化させることができる. 通常波長変換の効率は関係する波長の周波数の積に比例するため, 中赤外の低周波光を含む波長変換は高効率を得ることが難しい. このためレーザーと同様に波長変換デバイスを光共振器内に挿入し, 実質的に相互作用長を延長することで効率化がはかられてきた. Fig.2は最もシンプルな直線型共振器の例を示しており, 入力鏡から励起光を入射し変換された光 (通常短波長光をシグナル光, 長波長光をアイドラ光と呼ぶ) を共振させて効率向上をはかる. 励起光の1光子分のエネルギーが変換光2光子 (シグナル光とアイドラ光) のエネルギー和と等しいため, 励起光1光子を変換光2光子に分割する光子カッターと例えられることもある. 線幅やビーム品質にあまり敏感でない医療応用では, 調整が容易で効率の得やすい直線共振器が多くの場合適している. Q-SW Nd:YAGレーザーを励起光として, シグナル光のみ共振の直線共振器を構成し中赤外への波長変換を行ったのがFig.3 (a)である¹¹⁾. 励起光は波長1064 nm, パルス幅14 ns, 繰返し周波数10 kHzであり, 共振器内の最小ビームサイズが直径230 μm になるように入力鏡および出力鏡の曲率を設計してある. 入力鏡は励起光に対してAR

Fig.2 直線共振器による波長変換の効率化

Fig.3 中赤外光への波長変換例

コーティング, シグナル, アイドラに対してはHRコーティングを施している。出力鏡はポンプ光に対してHRコーティング, シグナルに対して96%反射のコーティングを施している。波長変換デバイスとしては周期分極反転したMg添加SLTが用いられており, その周期, デバイス長は $31.8\text{ }\mu\text{m}$ および 35 mm である。この波長変換系では発振閾値が 0.31 W であり, スロープ効率は69%に達している(スロープ効率 η は入力パワー P_{in} , 出力パワー P_{out} , 発振しきい値 P_{th} として, $P_{out} = \eta (P_{in} - P_{th})$ と定義)。比較的高い出力・効率が直線共振器で得られることがわかる。なおデバイス自体にはARコーティングは施していない。

共振器内でデバイスを2次元走査して効率の変化を評価したのがFig.3(b)である。高さおよび幅 $2\times 2\text{ mm}^2$ のデバイスの入射面内での効率を等高線で示してある。最大効率の90%以上が得られる領域を実効開口と呼ぶが, このデバイスでは実効開口は $1.4\times 1.4\text{ mm}^2$ が得られている。また効率分布は励起光強度の上昇と共に改善される^[12]ため, ビーム品質を重視する場合には励起光強度を高く設定する方が有利といえるが, 本稿でターゲットとして

Fig.4 中赤外光領域での波長可変例

いる小型可搬なものには適していないので, 上記データは低強度励起で測定されている。低強度励起の場合にはデバイスの開口面内均一性は分極反転構造の深さ方向均一性に依存し, デバイス作製の際には注意深く作製パラメータを選ぶ必要がある。Mg:SLTを基板とするこれらのデバイスは最近販売されているが, 購入する場合には実効開口も含めたメーカーの技術力を見極めることも重要といえる。なお大開口による高出力化を指向して厚さ $3\text{--}5\text{ mm}$ のデバイスにおいても実効開口拡大の努力が続けられている^[13,14,15]。SLTの損傷閾値から考えると吸収のない波長域では 100 W クラスの中赤外光源が期待できる。

擬似位相整合波長変換デバイスの最大の特徴は, その発生波長を人為的に設定できることにある。Fig.4は発生するアイドラ波長の分極反転周期に対する依存性を測定したものである。短周期では長波長のアイドラ光が得られ, 分極反転周期 $30.0\text{--}31.8\text{ }\mu\text{m}$ の異なるデバイスに対して, アイドラ波長 $2.5\text{--}3.6\text{ }\mu\text{m}$ が得られている。また発生波長はデバイスの温度を変えることでも可変であり, 発生波長の粗調は周期で, 微調は温度で行われる^[16,17]。医療用赤外光源^[18]や, 分子イオン化用光源^[19]として応用範囲の広がりが見られており今後の進展が期待できる。また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 mm の発生も確認されている^[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 $7\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$ への波長変換が実現されている^[23,24]。またGaAsのQPMは, 共振器内波長変換によるTHz波発生にも用いられており平均出力 1 mW が得られるなど進展が著しい^[25]。

4. 無共振器による中赤外への波長変換

分極反転による擬似位相整合では入射光と変換光が直線的にデバイス内を伝搬するため長尺化で効率が大きく改善する。Mg:SLNを材料とする中赤外波長変換デバイ

Fig.5 中赤外光発生のための長尺デバイス

スではデバイス長70mmが報告されている²⁶⁾。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、70mm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には効率化につながらないが、長波長領域では長尺度で大きな効果が得られる。Fig.5(a)は分極反転構造の

Fig.6 シングルパス波長変換での中赤外光発生

Fig.7 小型パルスレーザーによるシングルパス中赤外発生

写真であり、デバイスの上面(+Z面)および下面(-Z面)で良好な周期構造が得られている。Fig.5(b)は分極反転領域における周期に対する反転比をグラフにしたもので、デバイスの長さ方向での反転比の分布を示している。最も高い効率が得られる反転比0.5に対して、上面は0.64、下面は0.44となっておりバルクデバイスの内部で理想的な0.5が得られていることが推察される。上面および下面の分極反転からバルク内の分極反転比を線形近似したのがFig.5(c)である。これらから理想的な分極反転の場合のゲインファクターを1とすると、分極反転の最適値からのずれによる劣化は高々8%程度でしかない。70mmのデバイス長においてもほぼ理想に近い分極反転構造が実現できている。

このデバイスで共振器内OPOを行い閾値の低減を確認して無共振器のシングルパス中赤外発生を行った。Fig.6は出射したシグナルパワーの励起パワー密度依存性を示している。動作温度の異なる2種類のデバイスにおいて

Fig.8 高効率デバイスが実現する無共振器波長変換

ほぼ同様の特性が得られており、nsパルス小型レーザー励起でシングルパス波長変換が低しきい値 (I_{th} : 12 MW/cm²) で実現されている²⁷⁾。従来の値に比べて約4割の低しきい値化がはかられており、小型低出力レーザーによる波長変換の可能性を示している。そこで我々は出力300mW程度の小型固体レーザーを70mm長高効率デバイスと組み合わせて、無共振器中赤外発生を試みた。その際の入出力特性がFig.7である。平均入力140mWが発生閾値であり十分低い励起パワーで中赤外発生が実現出来た。また最大出力240mWの時に中赤外3.1μm光で23mWが得られ、効率は10%に達している。励起用固体レーザーの電気-光変換効率を10%と見積もると23mW出力を得るために必要な電力は2.4Wとなり、ノートパソコンに利用されているCPUの消費電力よりも低い。すなわちバッテリーで駆動できる無共振器中赤外光源は、既に技術的には実現可能なレベルまで進歩してきている、といえる。

また無共振器で波長変換が実現できたことで、専門技術者の高精度な調整を必要とし振動に弱い共振器構造が、今後の光源では不要になる (Fig.8)。このことは調整コストの低減および長期安定性の確保につながり、将来の在宅治療用レーザーに道を開くものである。

5. まとめ

分極反転型擬似位相整合波長変換デバイスについて、その波長変換特性と最近の進展を概観した。その特性向上はめざましく均一な分極反転構造の長尺化を行うことにより、波長変換デバイスで最長となる70mm長デバイスが実現された。このデバイスは小型レーザーによる無共振器中赤外発生を実現し、モバイル中赤外レーザーへの第一歩となりうる。

6. 謝辞

本解説を執筆するにあたり、LNのデバイス研究に関してアドバイスをいただいた早稲田大学中島啓幾教授、デバイス作製・波長変換にあたり御協力をいただいた早

稲田大学丸山真幸博士、物質・材料研究機構NanEi Yu博士に感謝いたします。結晶の物性に関して御議論をいただいた物質・材料研究機構北村健二博士、OPO評価に御協力いただいたサイバーレーザー(株)住吉哲実博士、佐久間純氏、大谷佳央氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. S. Pershan: Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric, *Phys. Rev.*, 127: 1918-1939, 1962.
- 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, ISBN4-902312-11-5, 2005.
- 3) 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-, 1992年秋応用物理学学会予稿, 18a-X-2, 1992.
- 4) 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: 435, 1993.
- 5) A. Kuroda, S. Kurimura, and Y. Uesu: Domain inversion in ferroelectric MgO: LiNbO₃ by applying electric fields, *Appl. Phys. Lett.*, 69: 1565, 1996.
- 6) H. Ishizuki, T. Taira, S. Kurimura, J. H. Ro, et al.: Periodic Pooling in 3-mm-Thick MgO:LiNbO₃ Crystals, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42: L108, 2003.
- 7) T. Hatanaka, K. Nakamura, T. Taniuchi, H. Ito, et al.: Quasi-phase-matched optical parametric oscillation with periodically poled stoichiometric LiTaO₃, *Opt. Lett.*, 25: 651, 2000.
- 8) D. A. Bryan, R. Gerson, and H. E. Tomaschke: Increased optical damage resistance in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.*, 44: 847, 1984.
- 9) H. Wang, J. K. Wen, J. Li, H. F. Wang, et al.: Photoinduced hole carriers and enhanced resistance to photorefractive in Mg-doped LN crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 57: 344-346, 1990.
- 10) Y. Furukawa, K. Kitamura, S. Takekawa, K. Niwa, et al.: Stoichiometric Mg:LiNbO₃ as an effective material for nonlinear optics, *Opt. Lett.*, 23: 1892-1894, 1998.
- 11) 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: 181-184, 2004.

- 12) Y. Liu., S. Kurimura, M. Nakamura, S. Takekawa, et al.: Effective Aperture in Periodically Poled Mg-Doped Stoichiometric LiTaO₃ for Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45: 4064-4067, 2006.
- 13) S. Kurimura, N. E. Yu, Y. Nomura, M. Nakamura, et al.: QPM wavelength converters based on stoichiometric lithium tantalate, *OSA TOPS Advanced Solid-State Photonics (ASSP)*, 98: 92-96, 2005.
- 14) H. Ishizuki, T. Taira, S. Kurimura, J. H. Ro, et al.: Periodic Pooling in 3-mm-Thick MgO:LiNbO₃ Crystals, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42: L108-L110, 2003.
- 15) H. Ishizuki, and T. Taira: High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a periodically poled MgO:LiNbO₃ device with a 5mm×5mm aperture, *Opt. Lett.*, 30: 2918-2920, 2005.
- 16) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, et al.: Periodically poled near-stoichiometric lithium tantalate for optical parametric oscillation, *Appl. Phys. Lett.*, 84: 1662-1664, 2004.
- 17) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, et al.: Efficient optical parametric oscillation based on periodically poled 1.0 mol% MgO-doped LiTaO₃, *Appl. Phys. Lett.*, 85: 5134-5136, 2004.
- 18) 松本哲子, 大谷佳央, 住吉哲実, 白鳥明, ほか: 全固体 2,3 ミクロン OPO の開発 I : MOPA 型基本波を用いた高エネルギーパルスの発生, 2003 年秋応用物理学学会予稿 31p-X-4, 2003.
- 19) 高田泰利, 大谷佳央, 松本哲子, 住吉哲実, ほか: MALDI 用中赤外波長可変光源の開発, 2003 年秋応用物理学学会予稿 30p-S-1, 2003.
- 20) J. Yi, H. Ishizuki, I. Shoji, T. Taira, et al.: Generation of 6 μm Radiation by Optical Parametric Oscillator and Difference Frequency Generation in Periodically Poled LiNbO₃, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45: 111-115, 2006.
- 21) S. Koh, T. Kondo, M. Ebihara, T. Ishiwada, et al.: GaAs/Ge/GaAs Sublattice Reversal Epitaxy on GaAs (100) and (111) Substrates for Nonlinear Optical Devices, *Jpn. J. Appl. Phys. Part2*, 38: L508-L511, 1999.
- 22) L. A. Eyres, P. J. Tourreau, T. J. Pinguet, C. B. Ebert, et al.: All-epitaxial fabrication of thick, orientation-patterned GaAs films for nonlinear optical frequency conversion, *Appl. Phys. Lett.*, 79: 904-906, 2001.
- 23) O. Levi, T. J. Pinguet, T. Skauli, L. A. Eyres, et al.: Difference frequency generation of 8-um radiation in orientation-patterned GaAs, *Opt. Lett.*, 27: 2091-2093, 2002.
- 24) S. E. Bisson, T. J. Kulp, O. Levi, J. S. Harris, Jr., et al.: Long-wave IR chemical sensing based on difference frequency generation in orientation-patterned GaAs, *Appl. Phys. B*, 85: 199-206, 2006.
- 25) J. E. Schaar, K. L. Vodopyanov, and M. M. Fejer: Intracavity terahertz-wave generation in a synchronously pumped optical parametric oscillator using quasi-phase-matched GaAs, *Opt. Lett.*, 32: 1284-1286, 2007.
- 26) M. Maruyama, H. Nakajima, S. Kurimura, N. E. Yu, et al.: 70-mm-long periodically poled Mg-doped stoichiometric LiNbO₃ devices for nanosecond optical parametric generation, *Appl. Phys. Lett.*, 89: 011101, 2006.
- 27) 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, Long Beach Convention Center, California, USA. CMB1*, 2006.

著者紹介

栗村 直 (Sunao Kurimura)

早稲田大学博士(工学)。1988年早稲田大学理工学部物理学科卒。1990年早稲田大学理工学研究科修了。富士通研究所研究員, 日本学術振興会特別研究員(DC), 早稲田大学助手, 日本学術振興会特別研究員(PD), スタンフォード大学客員研究員, 分子科学研究所助手, 文部科学省科学技術政策研究所研究員(兼任)を経て, 現在物質・材料研究機構主任研究員。早稲田大学准教授, 九州大学准教授を兼務。波長変換デバイスベンチャー SWING のコファウンダ。非線形光学の研究に従事している。1996年 レーザー顕微鏡研究会優秀賞受賞。