

# シングルパス波長変換を用いた加工用グリーンレーザーの研究

(独) 物質・材料研究機構 光・電子材料ユニット  
主幹研究員 栗村直

(平成20年度一般研究開発助成 AF-2008209)

キーワード: グリーンレーザー、波長変換、擬似位相整合、レーザー加工、分極反転

## 1. 背景と研究目的

レーザーが民生品、産業機器で市民権を得ると共に、その波長を変換する技術の注目度が増している。レーザーは情報記録、情報伝送、レーザー切断や加工、計測といったあらゆる用途で利用されるようになってきた。しかしながらほとんどのレーザーは使用する材料(発光原子/分子)を決定した瞬間に、エネルギー構造から発振波長がほぼ限定される。つまり一部の特殊なレーザーを除いてはその波長が固定され、レーザーのユーザーはその波長を受け入れるしか選択肢がなかった。ある種のレーザーでは波長を可変にできるものがあったがその範囲は限定され、電気-光変換効率も低いため専ら消費電力を気にしない理科学分野の用途に限られていた。

レーザー加工においても状況は同様であり、従来はレーザー波長の制約から赤外光が使用されてきた。しかし一般にグリーン光は金属の吸収係数が高く、金や銅においてはその吸収係数は赤外光の3倍にも達する。このためレーザーによる塑性加工(レーザーボンディング)や電子回路のボンディング(レーザーボンディング)、スポット溶接などでは、グリーンレーザーを用いることで短時間の効率よい加工ができる。そこで赤外レーザーの波長変換によるグリーンレーザーを研究対象とする。

現在、第二高調波発生(Second Harmonic Generation)による波長変換は、ディスプレイ用グリーンレーザー<sup>1)</sup>の研究でホットなトピックとなっている。直接緑色で発光する半導体レーザーは2010年に発振したばかりであり、出力や寿命の点で産業界で利用できるレベルには到っていない。他方既存のレーザーを非線形光学材料で波長変換するグリーンレーザーは、バルク及び導波路を用いたレーザー波長変換デバイスが新世代に入ったため連続発振(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。新世代の波長変換デバイス(図1)では、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線形光学定数の反転構造を導入する方法(擬似位相整合: Quasi Phase Matching)がとられており、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出来るようになってきている。

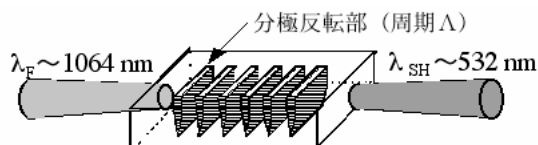


図1 分極反転波長変換デバイス<sup>2)</sup>

QPMの世代にはいりその効率は劇的に改善され、極めてシンプルな波長変換方式でも高い効率が得られるようになってきている。従来波長変換で数十%の効率を得るためには、図2のような特殊な光学系を構築する必

要があった<sup>3)</sup>。主な高効率化の手法は a)バルク結晶と内部共振器型波長変換、b)バルク結晶と外部共振器型波長変換/マルチパス波長変換、c)導波路型シングルパス波長変換、の3種類といえる。a)はレーザー共振器内部に波長変換デバイスを配置する形態で励起光のパワー密度が高いため極めて効率が低い。ただしレーザー共振器自体を大きく変更することが要求される。b)は外部共振器内に波長変換デバイスを配置する形態で、独立にレーザーと波長変換共振器を独立に最適化が可能である。光軸をずらしてマルチパスにする場合もあるがアラインメントに細心の配慮が必要である。c)は導波路内にレーザー光を閉じ込めて励起光のパワー密度を高めて高効率を得る方式である。シングルパスでも極めて高い効率が得られ、バルクの効率の数百倍にも到達するが、導波路のサイズが数μmであるため位置あわせに高い精度が要求され、損傷により10Wを越えるような出力は困難である。

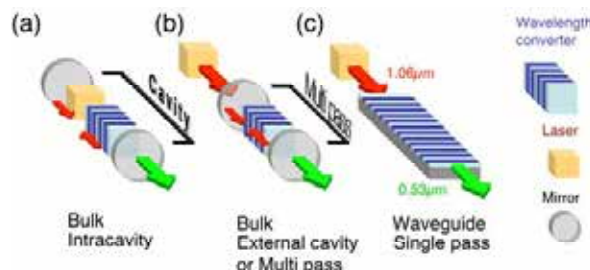


図2 波長変換の高効率化法(光学系は複雑に)

そこで本研究では、現在市場で出回っている赤外レーザーとの整合性を鑑み、図2のような複雑な光学系を用いないシングルパス波長変換(図1)で高い効率と高い出力の両立をめざした。これが可能になれば赤外レーザーの先端に外付けレンズのように波長変換デバイスを配置して緑色レーザーが実現できる。現有レーザーの修正を最小に留め整合性の高いシステムを組むことができる、産業上極めて重要なアプローチといえる。

## 2. 波長変換材料の選択

波長変換では特性を決定する重要な材料指数がいくつかある。実効非線形光学定数  $d_{\text{eff}}$  は効率を決定し、熱伝導率は出力の熱揺らぎに影響し、損傷しきい値は最大出力を制限する。加工をターゲットとする本研究では非線形光学定数がLNに継いで大きい無機材料である定比組成タンタル酸リチウム結晶(Stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>: SLT)を選択した(表1)。これは当物質・材料研究機構で開発された低欠陥密度結晶で、欠陥によるフォノンの散乱が抑制されたため熱伝導率が従来材料より高く損傷閾値も高い。高出力波長変換に適した材料であり<sup>3)</sup>、結晶は当機構よりスピノフしたベンチャー

QPM/BPM	Material	Effective nonlinear coefficient (pm/V)	Temperature bandwidth (C cm)	Thermal conductivity (W/mK)	Damage threshold (GW/cm <sup>2</sup> )	Phase matching type
QPM	Mg:LN	16	2.1	4.6 (0%Mg)	0.3	Type 0 d <sub>33</sub>
QPM	Mg:SLT	10	2.5	8.4(0.5%Mg)	0.57	Type 0 d <sub>33</sub>
QPM	KTP	11	4.7	3.3(c), 2(a)	0.3-3	Type 0 d <sub>33</sub>
QPM	$\alpha$ -Quartz	0.19	108	11.7 (c), 6.5	400	Type 0 d <sub>11</sub> , d <sub>12</sub>
BPM	KTP	2.4	25	3.3(c), 2(a)	0.3-3	Type II XY d <sub>32</sub>
BPM	LBO	0.63	~6	3.5	19	Type I XY d <sub>32</sub>
BPM	LBO	0.83	6.2	3.5	19	Type II XY d <sub>31</sub>

表1 グリーンレーザ用波長変換材料の特性比較

により外販がなされている。このウェハに高品質な周期  $8 \mu\text{m}$  の分極反転構造を作製し、高効率、高出力なグリーンレーザをめざした。

分極反転の世代に入って波長変換材料探索のガイドラインが変わった<sup>4)</sup>。従来の複屈折整合では「入射波と変換波で異なる屈折率」を補償するために適度な大きさの複屈折を有する材料が必須であった。しかし位相整合のため結晶組成を大きく変更した結果、非線形光学定数が低下して波長変換の基本機能が低下してしまったケースもありすべての特性を満たしながら新材料を開拓することは難しい。むしろ分極反転が可能な材料の特性を究め、複屈折不要な超低吸収、高熱伝導の材料を開発するほうが近道であると言える。

### 3. グリーンレーザ光発生

連続発振の波長 1064nm Nd:YAG レーザもしくは波長 1084nm のファイバレーザを用いて、SHGにより 532nm もしくは 542nm へ波長変換を行ってグリーンレーザ光を発生させた (図3、4)。光学系はシングルパス波長変換を用いており、効率を向上させるために単レンズにより最適集光条件で連続発振の赤外レーザ光を入射した<sup>5)</sup>。

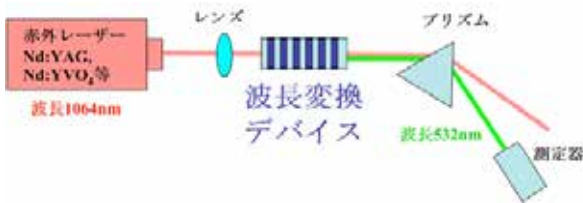


図3 シングルパス波長変換によるグリーンレーザ

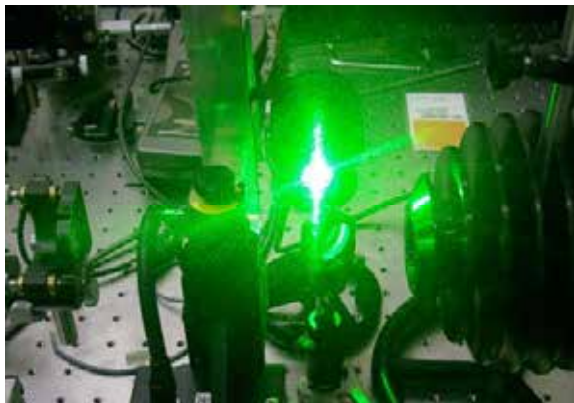


図4 グリーンレーザ光発生の実験系

一般に短波長領域で出力が上昇すると微小とはいえ結晶内で光の吸収が存在するため、温度上昇が生じて位相整合が擾乱をうける。QPM では  $d_{\text{eff}}$  は高いものの温度許容幅が狭いため、数値解析の結果からも温度上昇が効率低下の原因になると指摘されている<sup>6)</sup>。ここに高い出力領域で熱伝導率の高い Mg:SLT を選択する理由がある。出力を低下させないためには発熱に合わせて波長変換デバイスの設定温度を低下させていく必要がある。ここから波長変換デバイス内部の温度上昇を測定することができ<sup>7)</sup>、位相整合下で外部から熱を供給して温度を測定する位相整合カロリメトリ (Phase-Matched Calorimetry: PMC) 法が考案された。

波長変換時は結晶内に赤外光、緑色光が共存し吸収波長の特定が困難である (両光の共存時は共存時のみ発生する非線形吸収も可能性がある)。特に LN、LT では結晶内残留吸収が数%以下であるため透過光量で直接吸収を測定することは難しい。そこで PMC ではレーザー光の微小吸収により熱を供給し波長変換の最適温度の変化を測定する。赤外光、緑色光のパワー増加に伴いデバイス温度が上昇するため、最適波長変換を維持するためにはデバイスの設定温度 (Thermo Electric Cooler temperature) を低下させる必要があるためここから温度上昇が定量化できる。

図5は微小吸収評価のために特別に試作したデバイスを示している。分極反転領域が上面から下面までテーパ形状に造り込まれている。このため結晶内のビーム位置を変えることで同一結晶で排熱の境界条件を固定したまま効率を変えることができ、赤外光と緑色光の組み合わせを変えて温度上昇を評価できる。図6 (a)では横軸に入射基本波 (赤外光) パワー、縦軸に温度コントローラーの設定温度を示している。赤外光の入力に対して最適温度は低下するが、規格化効率の異なる複数の位置に対して最適温度は一意的に決まらない。他方図6 (b)では横軸が射出第二高調波 (緑色光) パワーであり、この場合には規格化変換効率が異なってもほぼ一意的に最適温度が決まる。すなわち、温度上昇は緑色光の吸収でほぼ決定されている。同様の結果は周期の異なる高温位相整合のデバイスでも確認されており、Mg:SLT の温度に関係なく緑色吸収が出力を制限していることがわかった。今後の高出力化の鍵は緑色吸収の低減にあり、現在も吸収低減の努力が続けられている。

緑色光吸収の低減された Mg:SLT において、高い熱伝導をもつ改良型高排熱波長変換モジュール (図7) を製作してシングルパス波長変換を行った。これは波長変換

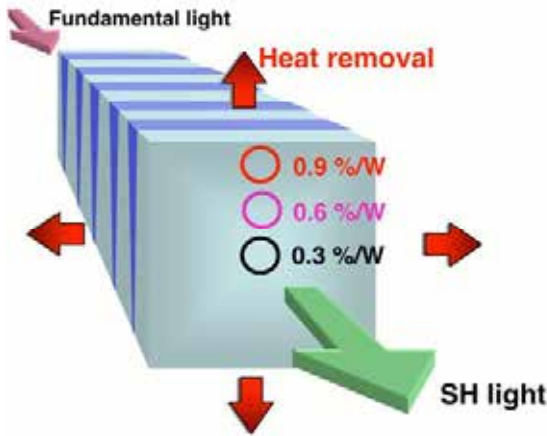


図5 PMC用テーパードメインデバイス

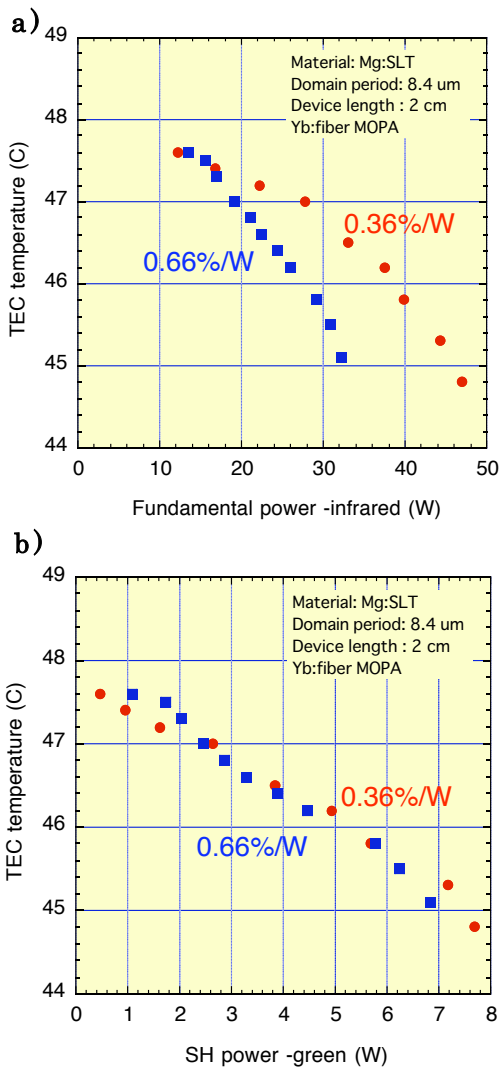


図6 PMCによる発熱原因の同定

デバイスの4面からの排熱を金属モジュールにより改善し温度上昇を極力低減したモジュールである。Nd:YAG レーザによる緑色発生の結果を図8に示す。通常波長変換が困難と言われるCW シングルパスにおいて最大緑色光出力19.1 W<sup>8)</sup>(光-光変換効率25%)が長さ1cm の分極反転 Mg:SLT デバイスから得られている。

2011年時点でCW シングルパス波長変換の世界最高記録となっている。同様の結果が Stanford 大学でも長さ4cm のSLT デバイスから得られており<sup>9)</sup>(CW18.8W 出力)、短尺な物質・材料研究機構のデバイスの卓越した特性がわかる。また変換効率は理論通り赤外光の入力パワーに対してほぼ直線的に上昇しており、極端な飽和傾向を見せていない。これは波長変換デバイスからの排熱が有効に行われていることを示しており、優れた熱的なコンタクトがモジュール内で実現されていることがわかる。

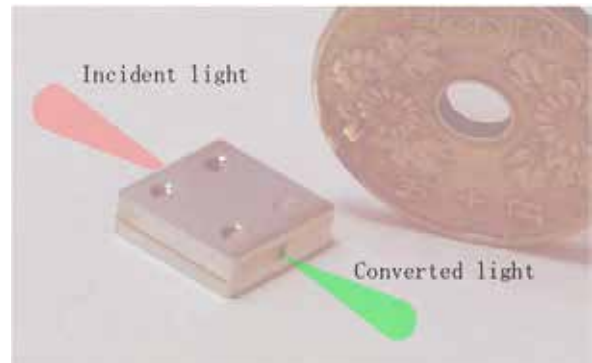


図7 改良型高排熱波長変換モジュール

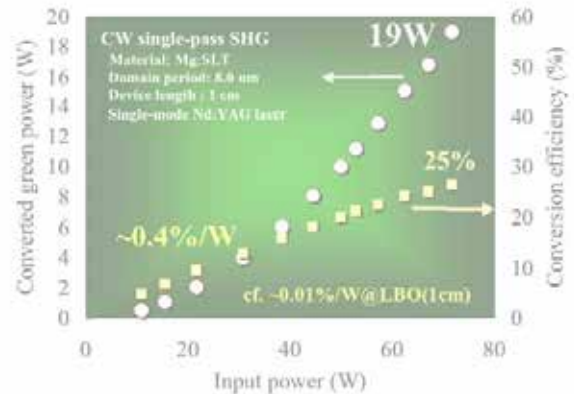


図8 連続発振光におけるシングルパスグリーン波長変換の世界最高出力

#### 4. まとめおよび今後の課題

加工用赤外レーザとの整合性が高いシングルパス波長変換方式において、グリーンレーザ出力19.1W、効率25%が実現された。2011年時点における世界最高記録である。モジュール作製精度の向上、およびデバイス狭幅化による排熱の改善により、より高い効率が期待できる。また波長変換材料自身の吸収低減も継続的な挑戦が続けられる。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団からの研究助成は大きな寄与をなしており、ここに謹んで御礼申し上げます。

本研究に御協力頂いた物質・材料研究機構 Hwan Hong Lim 博士、Sergey Tovstonog 博士、藤井一史氏、東京大学三尾典克准教授、大前宣昭博士、中央大学庄司一郎教授、片貝年男氏に感謝致します。

### 参考文献

- [1] 黒田 和男, 山本 和久, 栗村 直 編, 「基礎から応用まで- 解説 レーザーディスプレイ」, オプトロニクス社, pp.68-83, (2010).
- [2] 宮澤信太郎, 栗村直編, 「分極デバイスの基礎と応用 光・電子デバイスの新基軸を開く材料テクノロジー」, オプトロニクス社(2005).
- [3] 栗村直, 「高出力波長変換デバイス・材料の開発」, 機能材料 2011年3月号, 31(3), pp.5-10, (2011).
- [4] 栗村直, 「波長変換機能材料」, セラミックス機能化ハンドブック, (株)エヌ・ティ・エス, pp.101-107, (2011).
- [5] 栗村直, 「地球に優しいグリーンレーザーへ向けて」, Material Stage, 9(3), pp.57-59, (2009).
- [6] O. Louchev, N. E. Yu, S. Kurimura, and K. Kitamura, "Thermal inhibition of high-power second-harmonic generation in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> crystals," Appl.Phys.Lett., 87,131101 (2005).
- [7] S.V. Tovstonog, S. Kurimura, I. Suzuki, K. Takeno, S. Moriwaki, N. Ohmae, N. Mio, T. Katagai, "Thermal effects in high-power CW second harmonic generation in Mg-doped stoichiometric lithium tantalate", Optics Express, 16, p.11294 (2008).
- [8] 片貝年男, Jianhong Shi, 庄司一郎, 栗村直, 大前宣昭, 三尾典克, 「高出力波長変換時の廃熱評価」, 第57回応用物理学関係連合講演会, 19p-A-3 (2010).
- [9] S. Sinha, D. S. Hum, K. E. Urbanek, Y. Lee, M. J. F. Digonnet, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Room-Temperature Stable Generation of 19 Watts of Single-Frequency 532-nm Radiation in a Periodically Poled Lithium Tantalate Crystal", J. Lightwave Tech., **26** (2008) 3866.