

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ

廣橋 淳二, 宮崎 達也, 星 正幸, 今井 浩一, 富張 康弘

株式会社オキサイド (〒408-0302 山梨県北杜市武川町牧原 1747-1)

Visible and UV Laser by Frequency Conversion for Sensing Application

Junji HIROHASHI, Tatsuya MIYAZAKI, Masayuki HOSHI, Koichi IMAI, and
Yasuhiro TOMIHARI

Oxide Corporation, 1747-1, Maginohara, Mukawa, Hokuto, Yamanashi 408-0302

(Received February 1, 2021)

Visible and UV lasers for sensing application were investigated. In order to realize compact, relatively high repetition rate, high peak power, and reasonable price pulsed lasers, pulsed fiber laser with 1064 nm, 50 kHz repetition rate, and 1 ns pulsed width laser was selected as a fundamental source. Frequency conversion part, proper non-linear optical materials were selected and the focusing and device dimension were adjusted to achieve compact frequency convertors. For visible (532 nm) laser, convertor size was achieved down to 100 cc size by utilizing PP-Mg:SLT device. For UV (355 nm and 266 nm) lasers, by selecting PP-Mg:SLT, PP-LBGO, and BBO devices, 100~200 mW level output power were achieved with the convertor size of 120~220 cc. Those compact configurations were available for mounting them on drones.

キーワード：非線形光学, 疑似位相整合, ファイバレーザ

Key Words: Nonlinear optics, Quasi phase matching, Fiber laser

1. はじめに

近年, 各種分析やセンシングの用途において, レーザ光はさまざまな分野で利用, 実用化されている。その中で, レーザの種類は, 駆動方式 (連続波やパルス波 (ns, ps, fs)), 波長 (赤外・可視・紫外), 価格帯など, 多種多様であり, 用途に合わせた装置が開発されてきた。

レーザを用いたセンシング用途の代表的なものとして近年ライダー (LIDAR: Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) 計測技術が進歩しており, 採鉱, 土木建築, 森林管理などで必要とされる広範囲な 3D データ取得する技術なども実用化されている。また, 自動車の自動運転に向けた基礎データの計測, および自動運転向け用のリアルタイム計測など, ライダーの応用分野は拡大している。現在, 3D 計測には主に赤外光 (1.5 μm 帯) のパルスファイバレーザが用いられている

が, 可視, 紫外光を用いることにより, 更なる応用展開の可能性が期待されている。

可視光を用いたライダーの適用事例としては, 水中への応用があげられる。水は赤外光が透過しないため, 透過率の高い波長帯域である青色から緑色 (波長 440~540 nm 付近) が有効であり, 資源探査, 沈没船捜索, 海中地形測量などへの応用が期待される。従来の超音波を用いたソナーと比べ, ライダーは高解像度でかつ 3 次元計測が可能であり, 従来と比べて得られる情報の量および精度が飛躍的に拡大・向上する。具体的には, 光の届かない深海の潜水調査艇による海底調査の例がある。深海では, 太陽の光が減衰して多くは届かないため, 光学カメラでの遠距離での計測が難しい。一方, 532 nm の可視レーザを用いたライダーでは数十メートル離れた位置からの測定で高解像度の地底観測ができることが報告されている¹⁾。また, 航空機に搭載して上空から河川や海底の地形をマッピングする航空レーザ

測深 (ALB: Airborne LiDAR Bathymetry) も報告されている。この方式の場合には、赤外光と組み合わせることで、陸上、水面、水底のいずれにも対応できることが報告されている²⁾。

一方、紫外光を用いたライダーへの応用は、上空における火山灰の微小なチリの計測や、空気の薄い層での風の流れを読み取るための窒素分子の蛍光を用いたライダー計測への応用が期待されている。これら計測を行うためには、波長の短い赤外光 (355 nm, 266 nm) のパルス光源が期待されている。

これらライダー用の計測光源として求められる性能としては、計測の観点からは分解能やノイズを低減させるために、繰り返し周波数が高いこと、ピークパワーが高いことが求められる。さらに、実用上は潜水調査艇や航空機に搭載する場合、小型で持ち運びができ、かつ価格的にも普及可能な価格帯であることが望まれる。特に、近年では Drone への搭載が期待されており、そのサイズ・重量の小型化および低消費電力化への要求は大きくなっている。このような用途向けのパルスレーザの特徴について、その構成方式による比較を Table 1 に示す。

一般に、DPSS ベースのレーザは、高繰り返しの構成をとるとサイズが大きくなり、可搬が難しくなる。一方でマイクロチップレーザなどに代表されるパッシブ Q スイッチ方式のレーザなどは、小型化が可能である一方で、繰り返し周波数を上げることが難しく、パルスジッターもあり、計測上問題となる場合がある。そこでわれわれは高繰り返し、高ピークパワー、可搬性を兼ね備えたレーザ光源として、ファイバレーザベースの特長に着目し、これらと波長変換を組み合わせた波長変換レーザの開発を進めている。

本稿では、パルスファイバレーザとして、1064 nm レーザを適用し、これと組み合わせた波長変換レーザについて説明する。パルスファイバレーザは加工用途に多く適用されているが、そのほとんどは波長線幅が数 nm でランダム偏光となっており、波長変換効率が極端に悪く適していない。そこで本稿

では、波長 1064 nm、平均出力約 1 W、ピーク出力最大 25 kW、繰り返し周波数 50 kHz、パルス幅約 1 ns のパルスファイバレーザで、波長変換で重要となる波長線幅は 200 pm 以下、直線偏光で LMA (Large mode area) の PM ファイバ (コア径 20 μm) で伝搬されたものを採用した。サイズは 120 mm × 120 mm × 27 mm と比較的コンパクトで先端は FC/APC コネクタで終端されている。以下では本光源を基本波レーザとして用いた可視、紫外レーザについて報告する。

2. 小型可視レーザ

水中での計測を考えた場合、水に対して最も透過率の高い 460~480 nm 近傍の青色が適しているが、これらの波長を直接発振、または 920~960 nm 帯の波長変換をする構成を考えた場合、計測の感度を上げるための高ピークパワーレーザを実現することが難しい。そのため、水中ライダーの用途には、現在の実現可能な技術としては、より高いピークパワーを容易に得られる 1030~1070 nm 帯の赤外基本波を波長変換する方式がコスト・性能の面で優れている。赤外光を緑色に変換する波長変換材料としては、角度位相整合を用いた LBO と疑似位相整合を用いた PP-KTP, PP-Mg:LN, PP-Mg:SLT など多くの候補がある (LBO: LiB₃O₅, KTP: KTiOPO₄, Mg:LN: Mg-doped LiNbO₃, Mg:SLT: Mg-doped near stoichiometric LiTaO₃)³⁻⁴⁾。その中でも、前記の基本波レーザに対する波長変換素子として、Walk-off がなく常温動作が可能で、且つ光損傷 (フォトリフラクティブやグレートラック) に対する耐性の強い PP-Mg:SLT を採用した。波長変換デバイスの選定においては、変換効率、材料耐性 (ピークパワー、平均出力) のバランスを考えて最適化が必要である。デバイス長とピークパワー密度 (フォーカシング条件) を複数の条件で検討した結果、2 mm 長を選定することで、Fig. 1 に示すように変換効率約 50% の出力を得ることができ、出力ビームは中央部が特に

Table 1 Comparison of pulsed laser properties by different laser configuration.

	DPSS High rep. rate	DPSS Low rep. rate	Fiber laser
Rep. rate	High	Low	High
Jitter	Small	Large	Small
Peak power	Low	High	Medium
Portability	Unable	available	available
Cost	High	Low	Medium

DPSS laser: diode pumped solid state laser

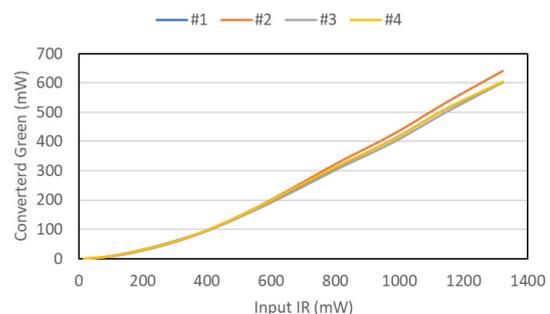


Fig. 1 Frequency conversion property of 532 nm generation for different units,



532nm/500mW
40(W) × 40(H) × 62(L)mm³

Fig. 2 532 nm laser module.

バックコンバージョンすることなく、ほぼ円形のビームを得ることができた。さらに、複数素子に対して検証した結果、ほど再現することを確認した。

この基礎データに基づき、波長変換レーザを構成した。波長変換素子は機能させるためには温度制御が必要であるが、そのための温度制御回路は波長変換モジュール内に搭載する設計として、ファイバレーザと波長変換部の両方の小型化を図った。その結果、Fig. 2 に示すように、100 cc 以下の波長変換モジュール構成を実現できた。

現在この構成は Drone に搭載された水中計測ライダーへの応用が進んでいる。また、近年では、高出力化、赤外と可視の2波長同時出力化、より青に近い波長のレーザなどの要望も多く、現在それぞれの用途に合わせた設計条件の最適化も進めている。

3. 小型紫外レーザ

次に、紫外レーザについて説明する。はじめに355 nm レーザを考えた場合、355 nm を発生させるためには、SHG (Second harmonic generation) および THG (Third harmonic generation) の2つの波長変換過程が必要となる。Table 2 に両過程の波長変換素子の組み合わせ候補を示す。

上記の中で、潮解性がなく変換光のビームが円形を保つことのできる No. 3 と No. 4 のペアについて検討した。なかでも No. 3 のペアについては、同じ材料を用いていることから、一つの素子に2つの波長変換機能をインテグレートしたモノリシック波長変換素子を設計、作製した。Fig. 3 に波長変換の光学系を示す。

モノリシック構造のそれぞれの変換過程の最適化をするため、SHG 部の素子長を2~4 mm、THG 部の素子長を3~7 mm とした複数の素子水準の組み合わせを検討し、あわせて各組み合わせに対して基本波の集光条件も複数確認し、最適となる素子長、集光条件の組み合わせについて、実験的に確認をし

Table 2 Comparison Nonlinear optical device pair for 355 nm generation⁵⁻⁸⁾.

Pair	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
SHG	LBO	PP-Mg:SL	PP-Mg:SLT	PP-Mg:SLT
THG	LBO	LBO	PP-Mg:SLT	PP-LBGO
Beam shape	Elliptical	Elliptical	Circle	Circle
Operation temp.	150°C	R. T.	R. T.	R. T.
Power durability	High	High	Low	Medium
Hygrosopicity	Weak	Non	Non	Non
Efficiency	Low	Low	High	Low

LBGO: LaBGeO₅, R.T: room temperature
SHG: second harmonic generation
THG: third harmonic generation

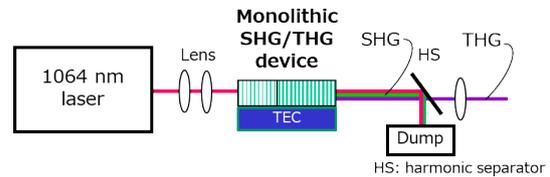


Fig. 3 Schematics of THG setup for monolithic device.

た。

その中で、最もロバストな組み合わせのひとつとして、SHG 部を2 mm、THG 部を4 mm、全長6 mm としたモノリシックデバイスに対する最適な集光条件を見出した。Fig. 4 に355 nm の出力が最大となるように調整した集光条件における入力ー出力特性の結果を示す。1素子で1064 nm からの変換効率で10%程度、平均出力100 mW 以上の355 nm の出力条件を見出すことができた。従来の方式の場合、波長変換素子が必ず2つ必要なり、2つの素子間にコリメート/集光のレンズが必要であり、さらにそれぞれの温度調節が必要であった。一方、本構成の場合、SHG 素子の素子長が2 mm 程度で温度、

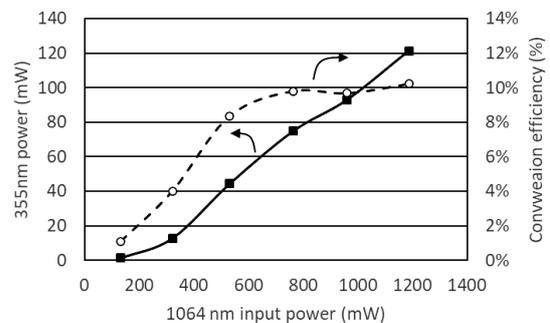


Fig. 4 Frequency conversion property of 355 nm generation by monolithic PP-Mg:SLT device.

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ (廣橋 淳二)



Fig. 5 Compact 355 nm laser module.

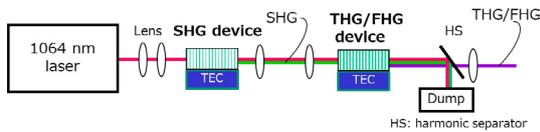


Fig. 6 Schematics of THG/FHG setup. (FHG: forth harmonic generation)

波長共に許容幅が十分広い設計をしたことから、一つの温度調節機能のみで SHG/THG の両方の位相整合条件を満たす構成を実現できた。

これらの基礎データに基づき、小型波長変換器の試作を行った結果、Fig. 5 に示すように 532 nm レーザとほぼ Compatible な 355 nm レーザを実現することができ、変換モジュールのサイズも 120 cc 程度に抑えることができた。

前記で述べた 355 nm 波長変換レーザの場合、小型化のメリットはあるが、材料の吸収の関係のため、最大出力は~100 mW 程度で制限されてしまう。そこで、より出力の高い変換器を目指すに当たり、Table 2 に示す No. 4 のペアの構成について検討した。一般的な加工機等に用いられているレーザの場合、高出力耐性を優先し、SHG/THG の組み合わせとしていずれも LBO を用いたものが多くみられる。一方で、LBO の場合、Walk-off によるビーム整形が必要であることから、本開発では Walk-off がなくビーム整形が容易な PP-LBGO 素子に着目して検討を行った。

Fig. 6 に、355 nm の波長変換の評価系を示す。SHG 部には PP-Mg:SLT 素子を用い、THG 部に PP-LBGO 素子を用いた。PP-LBGO 素子の形状は、厚み 0.5 mm、幅 7 mm、長さ 10 mm、周期約 6.4 μm の 1 次 QPM 構造のものを用いた。SHG/THG 部それぞれ TEC により個別に温度制御されている。Fig. 7 は基本波 1064 nm の入力に対する 355 nm 光の出力特性である。ここで、基本波に対する波長変換効率は 15% 以上、平均出力として 200 mW 以上の変換を得ることができた。その時の温度許容幅として

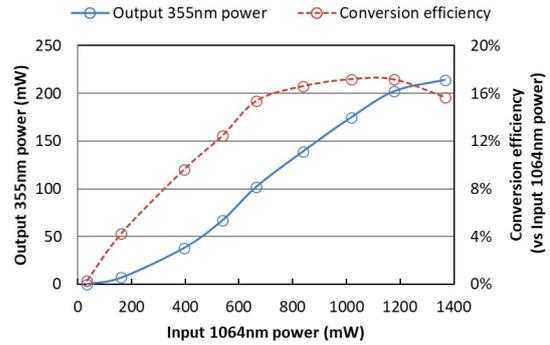


Fig. 7 Frequency conversion property of 355 nm generation by PP-Mg:SLT and PP-LBGO devices.

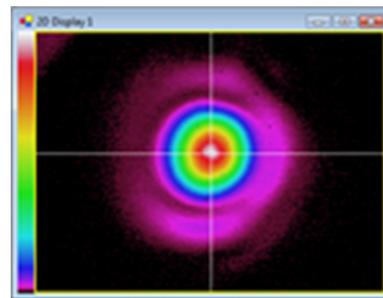


Fig. 8 355 nm beam profile generated by PP-LBGO.

は SHG/THG とともに 5℃ 以上の半値幅があり、安定性が高いことが確認できた。また、Fig. 8 に示すように、出力ビームは Walk-off のない円形のビームを得ることができた。

次に、同様の構成で、THG デバイスを FHG デバイスに変更し、深紫外 (266 nm) の波長変換について検討した。532 nm 発生部の波長変換素子としては、Walk-off のない PP-Mg:SLT を用いその集光条件および素子長は前章の 532 nm 変換器の条件を踏襲した。

その後、1064 nm 光は分離し 532 nm のみ FHG デバイスに集光した。266 nm への波長変換素子の候補としては、BBO, CLBO, PP-LBGO が挙げられる⁹⁻¹⁰⁾。それぞれ、BBO は変換効率が高い、CLBO は Walk-off が小さく出力耐性が高い、PP-LBGO は潮解性がなく Walk-off がない、という特長がある。一般的には BBO が最も多く用いられているが、近年ではより高出力が必要な加工・検査用途においては CLBO も用いられる。これらの材料は Walk-off や潮解性の点で不利な点も存在するためこれらの問題が存在しない PP-LBGO もデバイスの候補として挙げられる。本稿では、基本波レーザの強度の最もマッチングのよい BBO に着目し、素子長や集光条件を変えて変換効率やビームのプロファイル特性の評価を行った。

Fig. 9 に素子長 3 水準および集光ビーム径 3 水準

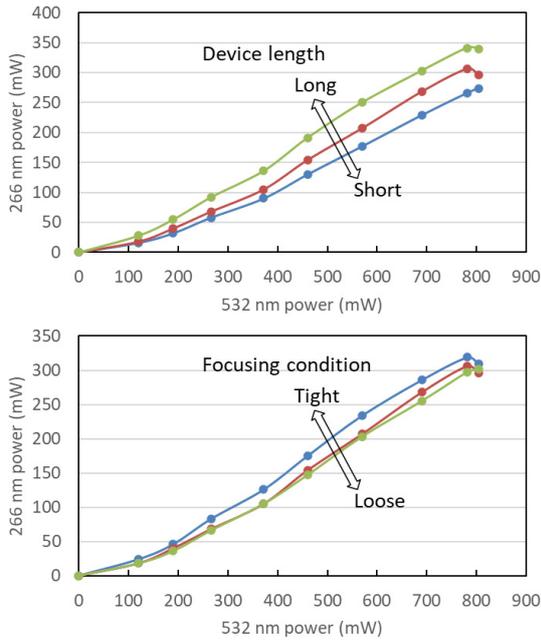


Fig. 9 Conversion properties of 266 nm in different focusing condition and device length.

に対する変換効率特性を示す。いずれの素子長，集光条件に対しても出力 200 mW 以上の出力を得た。その中でも最もロバストな条件として，集光条件，及び素子長水準を一つずつ決定し，ビーム径の評価及びビーム整形の光学系の選定を行った。

Fig. 10 に素子からの伝搬距離に対するビーム径について，ビーム整形前とビーム整形後のビームプロファイルを示す。ビーム整形前においては，BBO の Walk-off を大きく反映した楕円形のビームが確認された。一方，ビーム整形を施すことで，ほぼ円形となり，かつ伝搬距離に大きく依存せずコリメートに近い状態を実現できる解を見出した。

以上の結果に基づき，2 素子の構成による 355 nm および 266 nm 波長変換レーザーモジュールの設計・試作を行った。Fig. 11 に外観写真を示す。いずれも，リアパネルおよびフロントパネルについては小型のレーザーモジュールを踏襲した互換性のある構造で，全長が 355 nm 用で 128 mm (204 cc)，266 nm 用で 138 mm (220 cc) とほぼ同程度のサイズの構成を実現できた。波長変換特性は基本設計で得られた基礎特性を確認できた。また，コネクタ着脱により容易に波長を切り替えられることも確認した。

4. まとめ

本稿では，計測用途に適した高繰り返し，高ピークパワーのファイバレーザをより高機能化させる観点で，波長変換技術を用いて実現した可視，紫外パルスレーザについて述べた。ファイバレーザおよび

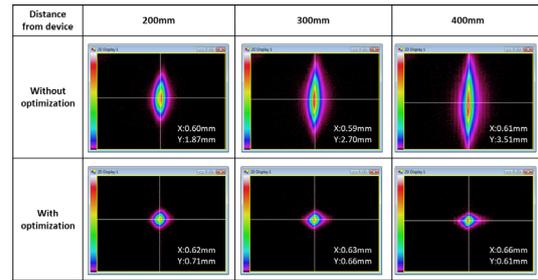


Fig. 10 Beam profile of BBO with and without optimization.

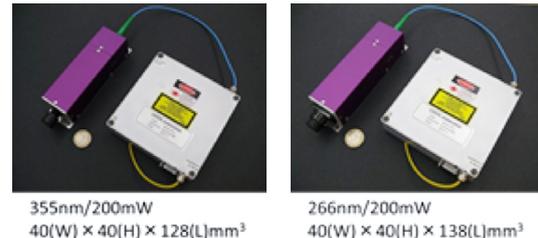


Fig. 11 355 nm (left) and 266 nm (right) laser module.

波長変換モジュールともに小型に構成することで，Drone への搭載も可能なサイズ・重量を実現した。今後は，これまで航空機では計測できなかった狭小なエリアにおいても上空からのセンシングを適用できるようになるなど，計測分野がより身近なところまで展開できると考えられる。また，本開発で実現したレーザの可搬性はその他の応用分野としてウイルスの不活性化用途などにおいても注目されており，今後応用範囲がより広がることを期待される。

謝辞

本研究の一部は，(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究事業の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 石橋正二郎，光技術コーディネートジャーナル「OPTRONICS」/株式会社オプトロニクス社，2016，Vol. 35，58 (in Japanese).
- 2) 中村圭吾，水環境学会誌 Vol. 42 (A)，174，2019 (in Japanese).
- 3) S. Wang et al., J. Appl. Phys. **96**, (2004) 2023.
- 4) K. Kitamura et al., Ferroelectrics **257**, (2001) 235.
- 5) A. A. Kaminskii et al., phys. Stat. sol (a) **125**, (1991) 671.
- 6) S. Miyazawa, et al., Phys. Stat. Sol., A **208** (2011) 1195.
- 7) J. Hirohashi, et al., CLEO 2014, SM4I. 6, San Jose (2014).
- 8) J. Hirohashi et al., Advanced solid state laser 2014, Atu4A. 4 (2014).
- 9) M. Nishioka et al., J. Cryst. Growth **279** (2005) 76.
- 10) J. Hirohashi, et al., CLEO 2015, STh3H. 5, San Jose (2015).

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ (廣橋 淳二)

廣 橋 淳 二 1999年東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士前期課程修了, 2000年三井化学株式会社, 2003年 Royal Institute of Technology, Sweden, Applied Physics department 客員研究員を経て2006年同校博士課程修了, Ph.D. 同年より株式会社オキサイドにて主に強誘電体材料の分極制御・非線形光学材料による波長変換デバイスおよびそれを用いたモジュール設計に従事.