
カラーリライタブルプリンティング用緑色レーザー光源の開発

Development of a Green Laser for New Type of Printing System using Full-Color Rewritable Paper

鈴木 剛*

Tsuyoshi SUZUDO

東 康弘*

Yasuhiro HIGASHI

廣居 正樹*

Masaki HIROI

佐藤 康弘**

Yasuhiro SATOH

三船 弘庸*

Hironobu MIFUNE

要 旨

カラーリライタブルメディアを活用した、カラーリライタブルプリンティングシステムの実現を目指し、小型・高出力可視レーザー光源の研究開発を行っている。

高出力レーザー構成は、固体レーザー方式であるLD励起マイクロチップレーザーを採用し、その高出力化検討を実施した。レーザー結晶としてNd : YVO₄結晶を用いた場合に最大出力26.9Wの基本波レーザー出力を得る事が出来た。Nd : YVO₄結晶とNd : GdVO₄結晶の比較においては、輻射量子効率が結晶発熱に大きく関与している事がわかった。また、LBO (LiB₃O₅) 結晶を用いた共振器内部波長変換構成による緑色レーザー光発生を実施し、最大出力10.6Wの緑色レーザー光を得る事が出来た。

Abstract

High-power and small package visible laser source for the novel printing system using a full-color rewritable paper has been developed.

High power laser structure is a diode pumped microchip laser, and it is developed. Fundamental laser output is 26.9W using a Nd : YVO₄ single crystal. Comparing of Nd : YVO₄ and Nd : GdVO₄ microchip laser, heat generation of laser crystal depend on its radiative quantum efficiency. A 10.6W cw green output generation was achieved by intra cavity frequency conversion using LBO (LiB₃O₅) crystal.

* 研究開発本部 東北研究所

Tohoku R&D Center, Research and Development Group

** グループ技術開発本部 イメージング技術開発センター

Imaging Technology Development Center, Corporate Technology Development Group

1. 目的・背景

1-1 はじめに

オフィス内で半数を占めるといわれる「一瞥用途」（一度見たら破棄する使い方）の“紙”を削減する為に、書き換え可能な「カラーライタブルペーパー」¹⁾を利用する「カラーライタブルプリンティングシステム」実現を目指し、書き込み・書き換え用、10W級高出力可視（赤、緑、青）レーザー光源の検討を行っている²⁾。高出力可視光源としては、固体レーザー方式が有効であると考えられるが、高出力固体レーザー光源を一般的なオフィス用プリンタに搭載するためには、装置の小型化は不可欠であり、我々はレーザーヘッド容積において、100ccレベル、三原色の一体化（“Tri color Laser”：Fig.1）を最終目標としている。

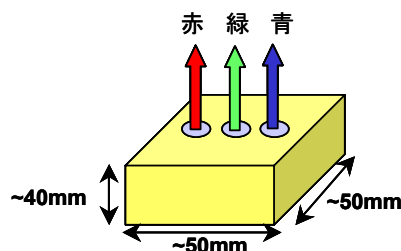


Fig.1 Target concept of “Tri Color Laser”.

1-2 カラーライタブルペーパーと光源仕様

我々が目指す、カラーライタブルプリンティングシステムは、Fig.2に示す構造をもつカラーライタブルペーパーを“紙”として使用する¹⁾。この“紙”中に配置した、フォトクロミック化合物（紫外線の照射により発色し、吸収する可視光の照射により消色する化合物）に光を照射して画像を形成するので、従来の電子写真プロセスなどの印刷原理とは異なるプリンティングシステムとなっている。ここで使用されるフォトクロミック化合物は、Fig.3に示される光吸収感度特性を持ち、3種類のフォトクロミック化合物を混合する事により、赤・青・緑色に感度を持った材料が実現でき、これによりフルカラーの表示が可能となる。

保護層
三種混合フォトクロミック化合物層
白色PETフィルム(基板)

Fig.2 Structure of color rewritable paper.

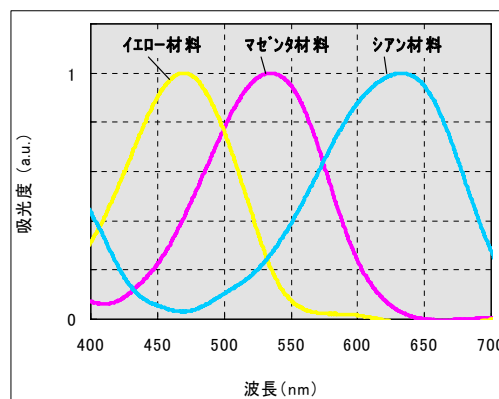


Fig.3 Sensitivity for light absorption of rewritable paper.

画像形成原理についてFig.4に示す。Fig.2の構造をもつ“紙”が消色した状態(a)では、下地材料の白色が表示される。次に紙材料に紫外光を照射(b)し、全色が発色し黒色の表示(c)となる。これに、赤、青、緑色の単色光を照射(d)する事によりフルカラー表示(e)が可能となる。

表示の書き換えに関しては、白色に戻す場合は白色光を照射(f)する事で、黒色に戻す場合は紫外光を照射(b)し、再度画像を形成するプロセスに入る。このようなサイクルで画像を形成するため、何度でも書き換えが可能な“紙”が実現でき、カラーライタブルプリンティングシステムを構築できる。

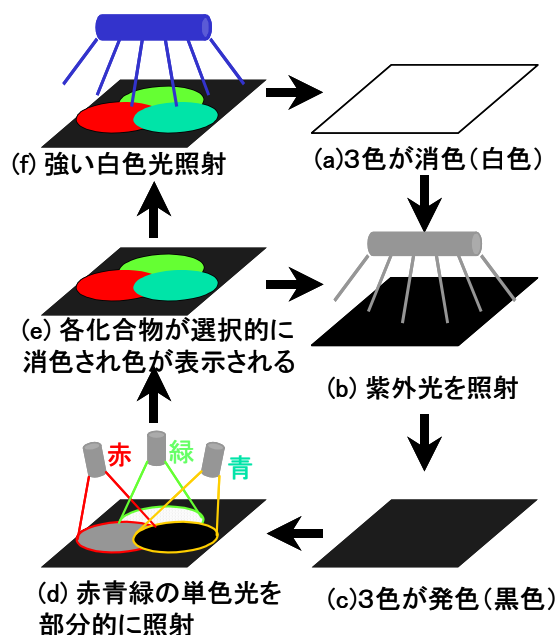


Fig.4 The principle of the rewritable printing system.

ここで、我々が目指すカラーライタブルプリンティングシステムに必要な光源仕様を以下に示す。

①レーザー波長

各フォトクロミック化合物の感度に適した波長が必要であり、具体的は以下の波長となる。

赤色：650nm以上，緑色：532nm，青色：457nm

②10W級の高出力

書き込まれた画像が自然光により消去されない程度の低い光感度とするため，書き込みエネルギーは高く，その上，使用者が不満を感じない程度のプリント速度（1分間にA4サイズ6～10枚程度）を確保するため，10W級出力が必要である^{1,2)}。

③小型・高品質レーザー光源

精細度400dpi（dot per inch）の画像形成には，ビームを70 μm ϕ 程度に絞ることが必要である。また，オフィス機器に内蔵するため，レーザー装置の小型化（目標100cc）が必要である。

1-3 小型高出力固体レーザー構成の提案

我々が提案する，高出力小型固体レーザー構成案をFig.5に示す。高出力化と小型化の両立を目的に，「エッジ励起型マイクロチップレーザー構成」による励起容積の小型化，「コンポジット型レーザー結晶」

による放熱性の向上，「バルク型擬似位相整合素子による波長変換」による高効率波長変換を行う構成としている²⁾。

また，我々が目標とする“Tri Color Laser”構成をFig.6に示す。Fig.5に示すレーザーを三種類集積することで，三原色出力を可能にする構成を目標としている。

本報告では，はじめのステップとして，LD励起マイクロチップレーザーの材料に着目した高出力化の検討，及びこれを用いた高出力緑色レーザーの発生実験を実施し³⁾，10Wを超える緑色レーザー出力を得たので報告する。

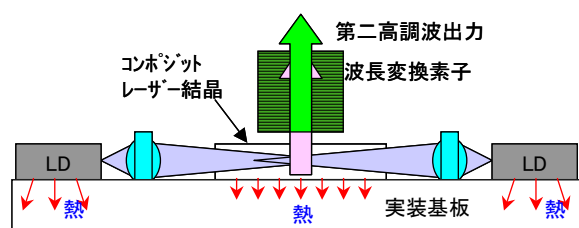


Fig.5 Basic construction of a high power and small package laser.

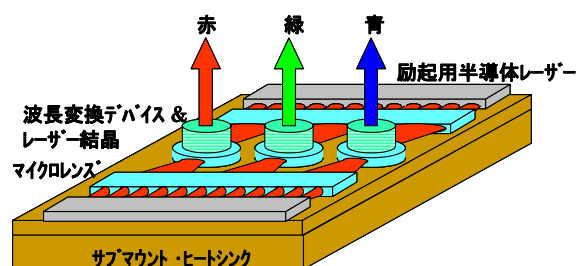


Fig.6 The goal construction of “Tri Color Laser”.

2. マイクロチップレーザーの高出力化

1-1 レーザー構成

LD励起固体レーザーの小型化にはマイクロチップ構成^{4, 5, 6)}は必須であり，その高出力可能性を検討した。実験構成をFig.7に示す。レーザー結晶はFZ（Floating Zone）法⁷⁾で作製した，a軸カット0.5at.% Nd：YVO₄もしくはa軸カット0.5at.% Nd：GdVO₄結晶（いずれも0.25mm厚み）を用い，同一実験構成による特性比較を実施した。また，レーザー結晶は水冷ヒートシンク上

にはんだを用いて接合している。励起LDは、波長808nm、最大出力110Wのファイバー結合LD（コア径400 μ m：LIMO110-F400-DL808）を用い、折り返しミラーを用いて結晶表面から入射（ビーム半径0.65mm）し、合計4回結晶中を励起光が通過するマルチパス構成としている。共振器長は約400mmとし、出力ミラーは曲率半径20mを採用した。

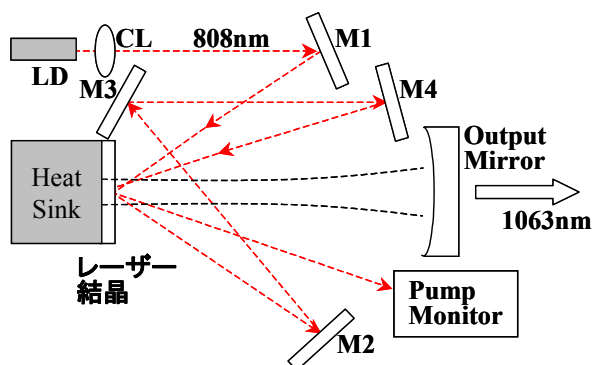


Fig.7 Experimental set up of microchip laser system.

1-2 実験結果

Fig.7の構成における入出力特性をFig.8に示す。また、主な特性の比較表をTable 1に示す。ここで、スロープ効率に関しては、高出力時にスロープ効率の低下が見られるため、低出力時のスロープ効率（直線性の高い部分）と、総合的なスロープ効率（発振開始時から最大出力時の効率）とに分けて記載をしている。

Nd：YVO₄結晶においては低出力時のスロープ効率が61.1%と小さいながら最大出力26.9Wと高い出力が得られた。一方Nd：GdVO₄結晶に関しては、低出力時のスロープ効率は71.7%と高いが、最大出力は24.2Wに留まっており、Nd：YVO₄結晶と同等の出力は得られなかった。また、両結晶共に、最大出力時にはスロープ効率が低下しているが、これは結晶発熱の影響によるものと考えられる。また、総合的なスロープ効率は両結晶共に同等であり、横モード品質はM²=3.2と同様の値を得ている。

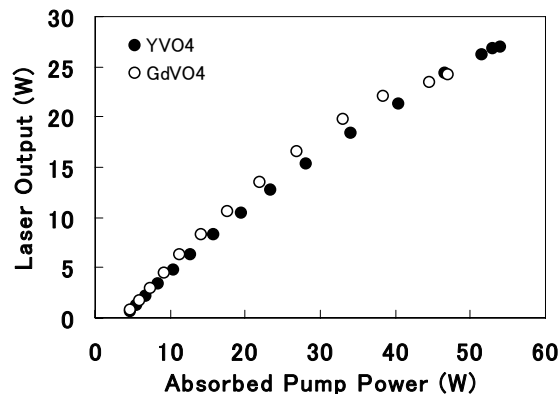


Fig.8 Performance of infrared laser output.

Table 1 The characteristics of infrared laser output.

	Nd：YVO ₄	Nd：GdVO ₄
最大出力	26.9W	24.2W
発振閾値	2.6W	1.4W
低出力時スロープ効率	61.1%	71.7%
総合スロープ効率	53.3%	55.6%
M ² （最大出力時）	3.2	3.2

1-3 レーザー結晶発熱量の検討

Fig.8から結晶の発熱により、スロープ効率が徐々に低下し高出力化が制限されている事が考えられる。そこで、マイクロチップレーザー結晶を熱的な観点で考察する。Table 2に今回用いたレーザー結晶の主な特性（Nd濃度1.0at.%）を示す^{8, 9)}。レーザー発振に寄与する特性はNd：GdVO₄結晶とNd：YVO₄結晶では大きな差が無い事がわかっているが、輻射量子効率において大きな差がある事がわかる。この差に関して熱的な考察を実施する。

Table 2 The characteristics of laser crystal.

	Nd：YVO ₄	Nd：GdVO ₄
808nm吸収係数 (cm ⁻¹)	48.4	31.3
誘導放出断面積 (10 ⁻¹⁹ cm ²)	14.1	10.3
熱伝導率 (m/WK)	12.1	10.5
輻射量子効率 (%)	93	50～70

一般的にレーザー出力 (P_{out}) は、吸収パワー (P_{abs})、発振閾値 (P_{th})、結合効率 (η_c)、励起効率 (η_p)、原子量子効率 (η_{qd})、モードマッチング効率 (η_m) を用いて式 (1) のように示される。その場合、レーザー結晶における発熱量 (P_{heat}) は発熱効率 (η_h) を用いて式 (2) のように示される^{10, 11)}。

この式から判るように、同一レーザー構成で実験を行った場合には、レーザー結晶材料の輻射量子効率 (η_r) によってその発熱量が左右されることとなる。ここで、 λ_p は励起中心波長、 λ_f は蛍光中心波長、 λ_l は発振波長としている。

$$P_{out} = \eta_c \eta_p \eta_{qd} \eta_m (P_{abs} - P_{th}) \quad (1)$$

$$P_{heat} = \eta_h P_{abs} \quad (2)$$

$$\eta_h = 1 - \eta_p [(1 - \eta_l) \eta_r (\lambda_p / \lambda_f) + \eta_l (\lambda_p / \lambda_l)] \quad (3)$$

$$\eta_l = \frac{P_{out}}{P_{abs} \eta_c \eta_{qd} \eta_p} \quad (4)$$

Fig.9には、Fig.8に示した入出力特性を元に結晶発熱を計算した値をグラフ化した。ここで、輻射量子効率は、Nd : YVO₄結晶を0.93、Nd : GdVO₄結晶を0.7として計算している。

Nd : GdVO₄結晶を用いた場合には、低出力時から結晶発熱が大きく、高出力になるにしたがってさらに発熱量が増加している事がわかる。これは輻射量子効率が小さいことに加えて、高出力時にスロープ効率が低下しているため、さらに発熱が加速していると考えられる。最大発熱量は約14.2Wに達しており、励起パワー (約47W) のおよそ30%以上が熱に変換されている事がわかる。

一方Nd : YVO₄結晶を用いた場合には、結晶発熱は励起パワーに対してほぼ一定であり、結晶発熱によるスロープ効率の低下によっても、結晶発熱が加速される事が無い事がわかる。このため、励起パワーをより増加する事が出来るため、最大出力を大きくすることが可能と考えられる。

今回の実験構成においては、高出力時の結晶発熱により、モードマッチング効率が低下するため、輻射量子効率の結晶発熱の寄与が大きくなり、Nd : GdVO₄結晶とNd : YVO₄結晶の特性差が最大出力の差として現れていると考えられる。

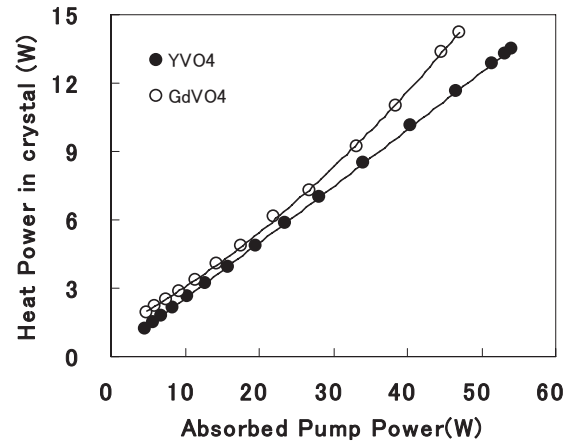


Fig.9 Relationship of heating power of laser crystal and absorbed pump power.

1-4 緑色レーザー

上記の結果より、レーザー結晶としてより高出力化が期待できるNd : YVO₄結晶を用い、共振器内部波長変換構成による緑色発生実験を行った。基本波発生構成からの変更点は、共振器長を約250mm、出力ミラー (基本波反射率99.9%、第二高調波反射率0.1%) 曲率を400mmとし、共振器内部には□4mm×L10mm (長さ) のLBO (LiB₃O₅; カット角度 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 11.5^\circ$) 結晶を配置した構成としており、出力ミラーより第二高調波 (緑色レーザー光) を出力できる構成を用いた。

緑色レーザー発振特性をFig.10に、レーザー発光の様子をFig.11に示す。最大出力として10.6Wの緑色レーザー光が得られている。この場合の励起パワーは35.4Wとなっており励起パワーからの変換効率は約30%と良好な効率を示している。

また、励起パワーに関しては基本波発振実験時と比較して、低い励起パワーで出力が飽和している。この原因としては、共振器内部の基本波レーザー光の輻射

によりLBO結晶ホルダーが加熱され、位相整合温度（25℃設定）が約数℃程度ずれている事がわかっている。また、LBO結晶配置の最適化や出力ミラーの最適化も未実施であり、今後構成を最適化する事で、緑色レーザー出力を増加させることが可能であると考えている。

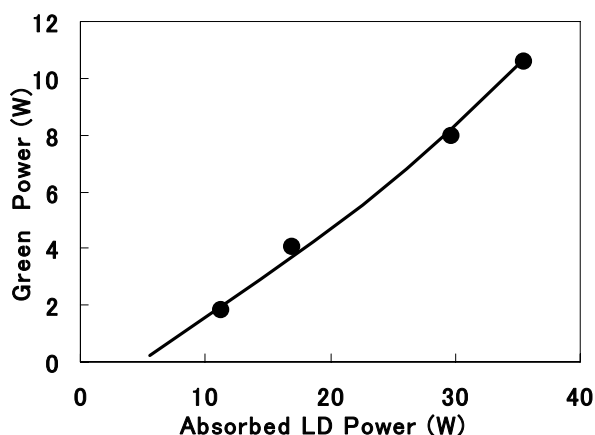


Fig.10 Performance of the green laser.

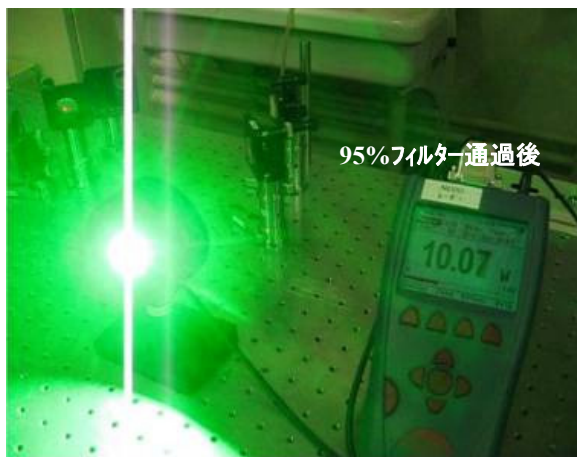


Fig.11 Photograph of green laser output.

3. まとめ

LD励起マイクロチップレーザーの高出力化を検討し、輻射量子効率の大きいNd:YVO₄結晶を用いた場合に、より高出力化が可能である事を確認した。基本波レーザーの最大出力としては26.9Wが得られ、横モードはM₂=3.2程度であった。現在検討を実施している、小型・高出力レーザー構成では、レーザー結晶の発熱が

大きく出力に関与しており、レーザー結晶の輻射量子効率が出力特性に大きく影響する事がわかった。

また、LBO結晶を用いた共振器内部波長変換構成による、緑色レーザー発生実験を実施し、最大出力として10.6Wの高出力緑色レーザー光を確認し、10Wクラスの出力が可能である事を検証した。

今後はレーザー構成の最適化を実施し、さらに緑色レーザー出力の増加を狙う。また、当初の狙いである“Tri color Laser”実現へ向けて、「コンポジット型レーザー結晶」を採用した小型レーザーの開発も進めており¹²⁾、「バルク型擬似位相整合素子」の搭載も含め、10Wクラスの150cc緑色レーザーの検討を行っている。

4. 謝辞

本研究の実施において、共同研究先である自然科学研究機構 分子科学研究所 平等研究室、および、(株)オキサイドに協力をいただきました。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究「カラーリライタブルプリンタ用高効率小型可視光光源“Tri Color Laser”の研究開発」により行われた。

参考文献

- 1) 高橋裕幸, 篠田雅人, 松島良華: 日本画像学会 2005 年度第 4 回技術研究会講演要旨集, (2005), pp.25-30.
- 2) T.Suzudo et al.: Technical report of IEICE, EID2006-22, October, (2006), pp. 35-38.
- 3) 東康弘 他: 第 68 回応用物理学会学術講演会予稿集, 7P-F-14, (2007)
- 4) Y. Sato, N. Pavel and T. Taira: Advanced Solid State Photonics, WB5, (2004, Santa Fe, U.S.A)
- 5) V. Lupei et al.: Opt. Lett., 28, (2003), p.2366.
- 6) N. Pavel and T. Taira: Opt. Commun., 260, (2006), p.271.
- 7) T. Shonai et al.: “Float zone growth and laser performance of Nd:GdVO₄ single crystals”, J.

Cryst. Growth, 241, (2002), p159.

- 8) Y.Sato and T. Taira : Opt. Express, 14, 22 (2006), p.10528.
- 9) T.Taira : IEEE J Sel. Top Quant. Electron., 13, 3, (2007), p.798.
- 10) I.Shoji, T. Taira and A.Ikesue : Optical Materials, 29, (2007), p. 1271.
- 11) T.Y.Fan : IEEE J. Quantum Electron., 29, (1993), p. 1457.
- 12) T.Suzudo et al. : Advanced Solid State Photonics, WD4, (2008 Nara, Japan).