

高出力 GaN ダイオード励起 Pr:LiYF₄ 赤色レーザー

A High Power GaN Diode-pumped Pr:LiYF₄ Red Laser

橋本浩平(D3)

K.Hashimoto

Abstract

A CW Pr:LiYF₄ laser at 639 nm pumped by a high power GaN laser diode (444 nm) was demonstrated. The highest laser power of 94 mW was achieved with the optical-optical conversion efficiency of 35 %. Characteristics of this laser at elevated temperatures were also investigated for practical applications such as a laser projector.

1 はじめに

近年、可視光レーザーはディスプレイ、銀塩写真のプリント、バイオイメージングの分野を中心に注目を集めている。特に、プロジェクションディスプレイの分野はコンシューマ向けということもあり、高出力、高安定性はもちろんのこと、高効率で安価ということも求められる。赤色の領域では、AlInGaP 系の半導体レーザーが室温で CW 発振しているが、熱に弱いため高温下での動作や高出力化に難がある[1]。半導体レーザー励起固体レーザーでは、高ビーム品質で高出力化が可能であるが、可視光のものは赤外レーザーの 2 倍波[1]もしくは多段励起[3]によるものであり効率があまり良くない。

3 価のプラセオジウムイオン (Pr³⁺) をドープした材料は青、緑、オレンジ、赤といった可視光で直接レーザー発振可能であり、440nm 帯で励起可能であるため GaN 系の半導体レーザーを励起源に使用することができ、高効率を期待できる。また、GaN 系の材料は高温下での動作に優れており丈夫であり、また現状ですです比較的高出力なものがあり、今後もさらに高出力化が進んでいくと考えられる。現在、レーザー発振が確認されている Pr³⁺ ドープ材料には、LiYF₄[5-8]、BaY₂F₈[6]、YAG[9]、YAlO₃[10] といった結晶やフッ化物ファイバ[11-13]があるが、常温で高効率な CW 動作が報告され

ているのは、フッ化物系の材料だけである。酸化物系の材料では、常温においては非輻射遷移が大きくレーザー発振を妨げているからである。近年、442nm の GaN 系半導体レーザーを励起源とした Pr³⁺:LiYF₄ レーザが赤色での発振に成功されているが[5]、励起の波長が吸収のピーク波長である 444nm からわずかにずれており、その最大励起出力が数 10mW 程度であるために、最大 1.5mW の赤色レーザー出力と、24%のスロープ効率しか得られていない。Ar イオンレーザー[4]や光励起半導体レーザーの 2 倍波[7]での励起で発振している報告もあるが、それらも吸収のピーク波長と完全に一致していないため、高濃度ドープで長い結晶が必要となっている。また、Pr³⁺ドープ材料は、数 at.%のドープでも濃度消光が起こるため高濃度のドープは好ましくない[5]。

本研究では、高出力な 440nm 帯の半導体レーザーを励起源とした Pr³⁺:LiYF₄ レーザを報告する。また、レーザーディスプレイ等の分野では高温下での動作が要求され、さらなる高出力化のためには温度特性が重要であるため、高温下でのレーザー特性や、発光スペクトルや蛍光寿命といった分光学的特性も測定した。

2 実験

本研究では、長さ 4mm、Pr³⁺を 0.5at.%ドープした LiYF₄ 結晶を使用した。この結晶は c 軸と平行にカットされており、両サイドには AR コートを施した。レーザー発振実験及び蛍光強度の観測には、日亜化学製の GaN 系半導体レーザーを使用し、その電源には旭データシステムズ社製の温度コントローラ付きのもの (ALP-7033CA)を使用した。この半導体レーザーは 444nm 付近で発振し、最大出力は 500mW ($I_{op}=550mA$) である。蛍光寿命の測定には、Q-スイッチ Nd:YAG レーザの 3 倍波 (パルス幅 3ns, 繰り返し周波数 10Hz) で励起した光パラメトリック発振器を使用した。また、蛍光計測には相馬光学製の CCD タイプの分光計 (S-2600,

分解能 2.0nm) を使っている。

レーザ発振実験では、Fig. 1 に示すように、まず、半導体レーザ光を、焦点距離 4.6mm の非球面レンズで平行光線にし、シリンダリカル凹レンズ・凸レンズ対にてできるだけ真円ビームになるようにした。レンズ対では、同時に半導体レーザの非点収差の補正も同時に行っている。コリメートされたビームは、焦点距離 50mm のレンズにて共振器内の Pr:LiYF₄ 結晶内に集光し、 π 偏向で励起した。レーザ共振器は、平面のダイクロックミラーと凹面出力ミラーで構成し、出力ミラーには、反射率が 99%、98%、96% の 3 種類を用いた。

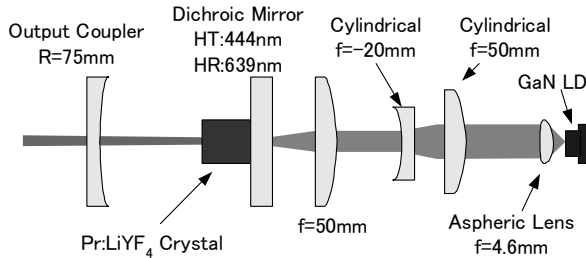


Fig. 1 Schematic of Pr:LiYF₄ laser oscillation experiment

3 実験結果

Fig. 2 は、出力ミラーの反射率を 99%、98%、96% としたときの、吸収パワーに対する、赤色レーザ光 (639nm, ³P₀-³F₂, σ 偏光) の出力である。この結晶では、励起源の半導体レーザの電流が 460mA 以下の時は 90%以上の励起光を吸収した。LD のケースが 20°C の時、その駆動電流を 130mA から 460mA に増加させると、その中心波長は 442.9nm から 444.2nm に変化していた。出力ミラーの反射率が 99%、98%、96%の時の発振閾値は、それぞれ 7 mW, 13 mW, 22 mW であり、出力ミラーの反射率が 96%の時に、266mW の吸収パワーに対し最大 94mW の光出力を得ることが出来、その光-光変換効率は 35%であった。また、この結果より共振器内部の損失は 0.7%程度と見積もらた。よって、この共振器でのスロープ効率の限界は 45%、量子効率は 65%であると考えられる。なお、原子量子効率 ($h\nu_L/h\nu_P$) は 69%である。

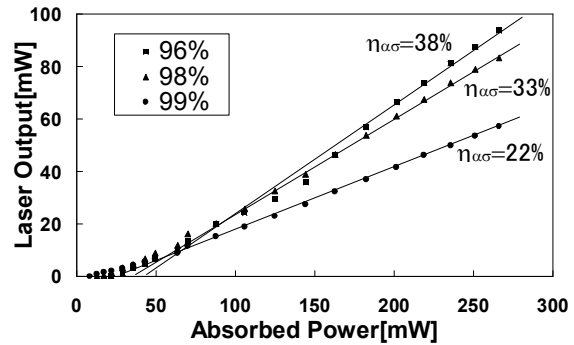


Fig. 2 Plots of the output power at 639 nm as a function of absorbed pump power for various output couplers.

Fig. 3 は出力ミラーを 99%とし、Pr:LiYF₄ 結晶を 300K から 380K まで加熱したときのレーザ出力の結果である。高温下でのレーザ発振実験では結晶を加熱するため、隣接する入力ミラーにダメージが入る恐れがある。そのため、入力ミラーから Pr:LiYF₄ 結晶を数 mm 程度離さなければならず、発振効率はわずかに減少する。結晶の温度が 300 K, 350 K, 380 K の発振閾値はそれぞれ 9 mW, 17 mW, 22 mW であり、380K では閾値が常温の 2 倍以上になっていた。しかし、加熱することによるスロープ効率の悪化は観測されなかった。

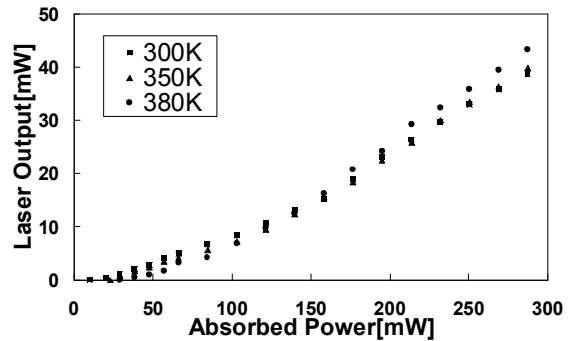


Fig. 3 Output power at 639 nm as a function of absorbed pump power for various crystal temperatures with a 99% output coupler.

Fig. 4 は、300K と 380K における、 π 偏向および σ 偏向の蛍光スペクトルである。 π 偏向の 522 nm (³P₁-³H₅) の蛍光を除いては、加熱することで蛍光強度が著しく弱くなることが確認された。Pr³⁺イオンの蛍光は、ほとんどが ³P₀ レベルからの発光であるが、522nm の緑

色発光はそれよりもエネルギーが 500 cm^{-1} 程度高い 3P_1 レベルからの発光である。 3P_0 と 3P_1 は熱的に結合しているため、高温下では 3P_1 の分布が増え緑色の蛍光強度が増加したと考えられる。また、200K 以下の低温ではこの蛍光が全く観測されなくなることも確認している。

300K 及び 380K における赤色発光の寿命はそれぞれ $38\mu\text{s}$, $37\mu\text{s}$ であった。20K における蛍光寿命は $49\mu\text{s}$ であったが、200K から 380K の間では蛍光寿命が大きく変化することはなかった。

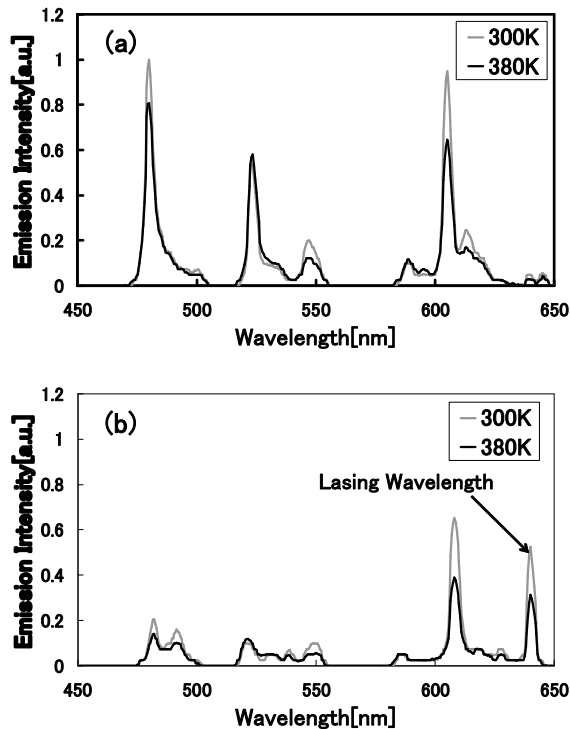


Fig. 4 (a) π -polarization and (b) σ -polarization emission spectra of the Pr:LiYF₄ crystal pumped at the GaN laser diode at 300 and 380 K.

4 結論

本研究では、我々が知る限りでは、最も高出力で高効率な GaN 系半導体レーザー励起の赤色 Pr:LiYF₄ レーザの発振に成功した。また、380K という高温下においても発振閾値 22mW という低閾値を実現し、スロープ効率が悪くならないことも確認した。赤色レーザーとしては AlInGaP 系の半導体レーザーがあるが、熱に弱いため高温下での動作や高出力化が難しい。それに比べ、

GaN 系の半導体は大電流密度駆動に対して堅固な材料であり、比較的高温な状態でも動作可能である。また、今回の実験結果より、Pr:LiYF₄ レーザは高温下でもパフォーマンスがほとんど落ちないため、GaN 半導体レーザー励起 Pr:LiYF₄ レーザは、高温下で高出力・安定動作が求められるディスプレイ用等の光源には非常に有用であると言える。Pr:LiYF₄ 結晶は半導体レーザー励起に対しては十分な吸収帯域を持つが、それほど広くないため、励起光の波長制御は重要である。

今後は、さらなる高出力・高効率化と共に、緑色、オレンジ色での発振、さらには波長変換による紫外光発生を進めていく予定である。

References

- [1] K. Itaya, H. Sugawara, G. Hatakoshi, J. Cryst. Growth, 138 (1994) 768.
- [2] X.P. Hu, X. Wang, Z. Yan, H.X. Li, J.L. He and S.N. Zhu, Appl. Phys. B, 86 (2007)265.
- [3] P. W. Binum, T. L. Boyd, M. A. Pessot, Opt. Lett., 21(1996)34.
- [4] T. Sandrock, T. Danger, E. Heumann, G. Huber and B. H. T. Chai, Appl. Phys. B, 58(1994) 149.
- [5] A. Richter, E. Heumann, E. Osiac, G. Huber, W. Seelert and A. Diening, Opt. Lett., 29 (2004) 2638.
- [6] A. Richter, N. Pavel, E. Heumann, G. Huber, D. Parisi, A. Toncelli, M. Tonelli, A. Diening, W. Seelert, Opt. Express, 14 (2006)3282.
- [7] S. C. Buchter, H. P. Jessen, OSA TOPS 19(1998)34.
- [8] A. A. Kaminskii, A. I. Lyashenko, N.P. Isaev, V. N. Karlov, V. L. Pavlovich, S. N. Bagayev, A. V. Butashin, L. E. Li, Quantum Electron., 28(1998) 187.
- [9] M. Malinowski, M. F. Joubert, B. Jacquier, Phys. Stat. Sol.(a), 140(1993)K49.
- [10] T. Danger, A. Bleckmann and G. Huber, Appl. Phys., B 58(1994) 413.
- [11] R. G. Smart, J.N. Carter, A.C. Tropper, D.C. Hanna, S.T. Davey, S.F. Carter and D. Szebesta, Opt. Comm., 86(1991) 337.
- [12] A. Richter, H. Scheife, E. Heumann, G. Huber, W. Seelert, A. Diening, Electron. Lett.,41(2005)794.
- [13] J. M. Sutherland, P. M. W. French, J.R. Taylor and B. H. T. Chai, Opt. Lett.,29(1996) 797.