

LD 励起固体レーザーの熱複屈折評価

山 中 正 宣

近年、半導体レーザー (LD) 励起固体レーザー (DPSSL) が著しく進展し、数 kW の平均出力まで達している¹⁾。ランプ励起に比べて LD 励起の効率は 10 倍大きく、その結果 DPSSL の電気・光変換効率として 10%以上が達成され、レーザープロセッシングやレーザー核融合等への応用が期待されている¹⁾。しかし、LD 波長 (807 nm または 803 nm) を固体レーザー波長で割った量子効率は Nd:YAG (1064 nm) と Nd:ガラス (1054 nm) の場合、約 76%となる。したがって、 $1 - 0.76 = 0.24$ が熱となって固体レーザー材料中に残り、熱効果（熱レンズ、熱複屈折、熱変形）発生の原因となり、レーザー出力とビーム品質を低下させることになる¹⁾。LD 励起はランプ励起に比べて熱効果は小さいが、10%程度の熱複屈折損失を補償すると、DPSSL 出力値は理論値とよく合い、またエネルギー抽出効率が著しく向上することが示されたので、ここに紹介する²⁾。

1. ポラリメーター

DPSSL における比較的小さな ($< \pi/4$) 相対位相差 $\delta = 2\pi d(n_x - n_y)/\lambda$ (d は複屈折媒質長、 n_x, n_y は x, y 方向の屈折率、 λ は波長) を測定するために、図 1 の簡単なポラリメーター（回転検光子法と呼ぶことにする）を新たに考案した³⁾。このポラリメーターの入力光強度 I_0 に対する透過光強度 I は、例えば右回り円偏光に対して

$$I = (I_0/2)\{1 + \sin 2(\phi - \theta)\sin \delta\} \quad (1)$$

で与えられる³⁾。ここで、 ϕ は検光子の回転角、 θ は主軸方向の角度である。式(1)より δ が微小な値 ($< \pi/4$) の場合、透過プローブ光強度は、従来のコノスコープ¹⁾ では $\sin^2(\delta/2)$ に比例するのに対して、 $\sin \delta$ に比例するので高感度であり、LD 励起固体レーザー材料中における比較的小さな複屈折の 2 次元分布画像計測を初めて可能とした³⁾。測定に際しては、波長 632.8 nm のレーザープローブ平行光束を右回り円偏光にして LD 励起された固体レーザー材料に入射し、検光子の一定の回転角度 ϕ ごとに 2 次元検知器 (CCD カメラ) で受光し、各点ごとに電算機中で、デー

タ点に式(1)をカーブフィッティングして、 δ と θ の 2 次元分布を求めた。なお、複屈折損失は、プローブレーザー光が熱複屈折材料を通過後、偏光ビームスプリッターを透過するときに生ずる損失として求めた。プローブ光に対する損失 l はジョーンズ行列により

$$l = 1 - (\cos^4 \theta + 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos \delta + \sin^4 \theta) \quad (2)$$

となる⁴⁾。この l を数千点 (1 点 = 4 ピクセル) にわたって計算し、レーザー光束の断面当たりに平均化した値を複屈折損失 L とした。

2. DPSSL における熱複屈折効果

ポラリメーター中に LD 効起 1054-nm Nd:ガラスレーザー発振器をセットし (図 2)，熱複屈折の 2 次元分布を測定した例を図 3 に示した⁵⁾。波長 807 nm の LD で効起された Nd:ガラス (HAP4) 中の 2 次元熱複屈折分布 (図 3 (a)) が、図 2 の左右の Nd:ガラスロッドでほぼ同一となるように LD の出力と位置を調整した後、2 個のロッドの中間に 90° 石英旋光子を置き熱複屈折効果を補償したのが図 3 (b) である。 $L = 9.8\%$ が $L < 0.9\%$ と小さくなり、ほぼ補償されていることが示されている。なお、この LD 効起条件下で測定された熱レンズ焦点距離は 42 m と測定システム

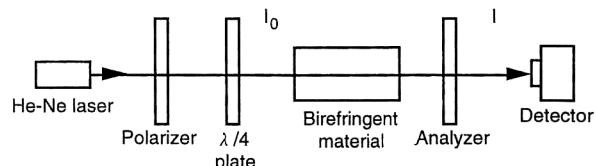


図 1 ポラリメーター（回転検光子法）の測定原理図³⁾。

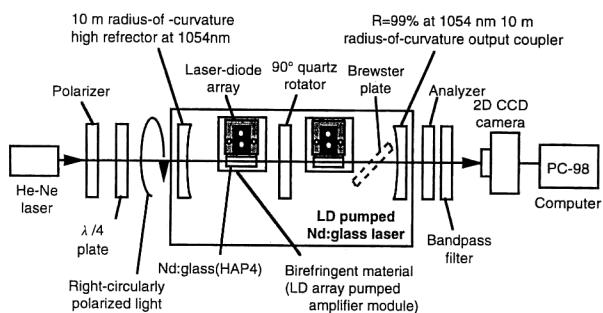


図 2 LD 効起 1054-nm Nd:ガラスレーザー発振器における熱複屈折効果の 2 次元分布測定配置図⁴⁾。

大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565-0871 吹田市山田丘 2-6)
E-mail: masanobu@ile.osaka-u.ac.jp

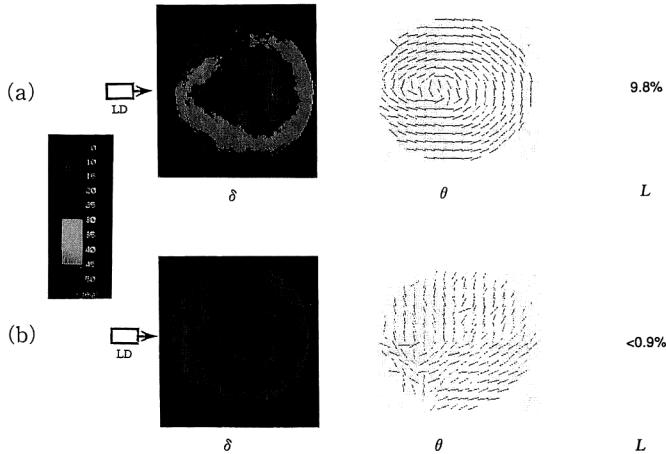


図3 LD励起 Nd:ガラス(HAP4)ロッド($3.5\text{ nm}\phi \times 15\text{ mm}l$)の2次元熱複屈折分布(相対位相差 δ と主軸方向 θ)の測定結果と熱複屈折損失量 L (632.8 nmでの値)の計算結果、全平均LD励起パワー(波長807 nm)が2.8 Wの場合、熱複屈折効果の(a)補償前と(b)補償後⁵⁾。なお、632.8-nmプローブ光の直径は3.5 mmとした。

ムに比べて十分長く、熱レンズ効果は無視でき、幾何光学的な平行光束に対して90°旋光子で熱複屈折効果がほぼ補償されていることになる⁶⁾。

図3(a)に示されているように、測定された δ と θ を式(2)に代入し断面当たりに平均化した熱複屈折損失 L を、均一広がりのレーザー出力の式¹⁾に代入し、実験値と理論値を比較したところ、図4に示したように、両者はよく一致することがわかった⁴⁾。ここで、波長632.8 nmのプローブ光で測定した δ の値に632.8/1054を掛けて波長1054 nmでの値に直して損失量 L を求めた。その際、これら波長における屈折率分数は小さいとして無視した。

次に、平均出力1.25 WのLD励起1064-nm Nd:YAG 8パスジグザグスラブレーザー増幅器の熱複屈折損失が $L=10\%$ (波長1064 nmにて)のとき、熱レンズ焦点距離が134 mと長く熱レンズ効果を無視できたので、90°石英旋光子により熱複屈折効果が補償され、Frantz-Nodvikの式とよく一致するモード当たりのエネルギー抽出効率73%(世界最高値)が高ビーム品質($M^2=1.2$)で測定された^{2,7)}。同様に、平均出力68 Wの8パスジグザグスラブ1064-nm Nd:YAG DPSSLにおいても、熱レンズ焦点距離は約100 mと長く熱レンズ効果が無視でき、90°石英旋光子によって熱複屈折効果が補償され、モード当たりのエネルギー抽出効率61%が達成された⁸⁾。

DPSSLにおける微小な($\delta < \pi/4$)熱複屈折分布を測定できる簡便なポラリメーターを新たに開発し、熱レンズ効果が無視できるDPSSLにおいて熱複屈折の2次元分布を測

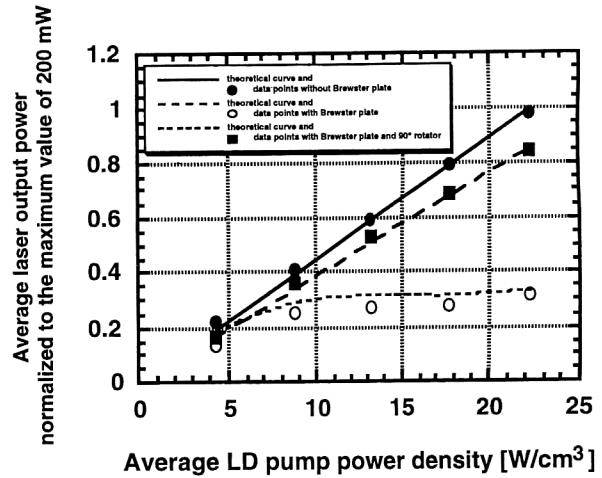


図4 時間平均LD励起パワー密度に対する規格化したLD励起1054-nm Nd:ガラスレーザー発振特性の理論値と実験値との比較⁴⁾。

定した。その測定された熱複屈折損失は10%程度であったが、熱レンズ効果が無視できる場合、90°石英旋光子によって熱複屈折効果をほぼ完全に補償できた。この結果、熱複屈折効果補償後のレーザー出力は理論式とよく一致することを明らかにした。

しかし、今後DPSSLの平均出力が1 kW以上と大きくなってくると、熱レンズや熱変形が無視できなくなり、それらを補償・制御後に熱複屈折効果を、2次元分布を測定しつつ、補償することが不可欠となってくる。

文 献

- 1) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering* (Springer, Berlin, 1996).
- 2) 桐山博光：“半導体レーザー励起固体レーザーの熱複屈折補償と性能向上に関する研究”，大阪大学博士（工学）論文（1998）。
- 3) M. Ohmi, et al.: “High-sensitivity two-dimensional thermal-and mechanical-stress-induced birefringence measurements in a Nd: YAG rod,” *Appl. Opt.*, **33** (1994) 6368-6372.
- 4) H. Kiriyama, et al.: “Thermal birefringence effect on the performance of a laser-diode pumped solid-state laser,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 7197-7201.
- 5) H. Kiriyama, et al.: “High-sensitivity two-dimensional observation of thermal birefringence compensation in laser-diode pumped Nd: glass laser rods,” *Opt. Rev.*, **3** (1996) 14-16.
- 6) 桐山博光ほか：“LD励起固体レーザー材料における2次元熱複屈折分布測定とその補償”，レーザー研究, **24** (1996) 343-352.
- 7) H. Kiriyama et al.: “Laser diode-pumped eight pass Nd: YAG slab amplifier,” *Proc. SPIE*, **3264** (1998) 30-36.
- 8) S. Wakai, et al.: “Highly efficient thermal-birefringence compensated laser-diode pumped solid-state laser with high beam quality,” Submitted to *Laser Phys.*

(1998年7月23日受付)