多重反射ビーム整形光学系を用いた LD-bar 端面励起Nd:S-VAPレーザー

非会員 赤羽陽介 (慶應義塾大)、非会員 宇藤健一 (慶應義塾大)
非会員 中西 晃 (慶應義塾大)、正 員 神成文彦 (慶應義塾大)

A LD-Bar End-Pumped Nd:S-VAP Laser with a Multiple Reflection Beam Shaper

Yosuke Akabane, Non-member (Keio University), Ken-ichi Utoh, Non-member (Keio University)

Akira Nakanishi, Non-member (Keio University), Fumihiko Kannari, Member (Keio University)

We developed an optical system that transforms a one-dimensional emission pattern of a 1-cm LD-bar into a two-dimensional spot size suitable of longitudinally pumping a solid-state laser with an excellent mode coupling efficiency. The LD-bar beams are collimated by a rod lens and a lens array in the direction perpendicular and transverse to the diode junction plane, respectively. A multiple reflection beam shaper is placed after the lens array to rearrange the entire beam profile from the linear to almost square. An aspheric condenser lens then produces a focused spot of $\sim 390 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$. We applied this shaped diode laser beam to pump a Nd:S-VAP laser. The optical distortion induced with thermal loading increases diffraction loss in the cavity. Significant decrease of the output laser power was observed as increasing the thermal load, together with the distortion in the output beam pattern.

キーワード：LD-bar、端面励起、Nd:S-VAP、熱誘起屈折率変化、単一横モード発振

1. はじめに

半導体レーザー(Laser Diode:LD)励起固体レーザーは、励起光源であるLDの電気-光変換効率が数十%と高く、LDの発振スペクトルをレーザー媒質の吸収スペクトルに整合させることにより高効率な固体レーザーの実現が可能である。また長寿命であるために保守が簡単で信頼性にも優れる。LD励起固体レーザーの高出力化は、励起源のLDの高出力化とともに進歩してきている。1988年にKrebsらにより、アレイ状のLDピクセルをさらに1次元状に配置して一体化した高出力のLD-barデバイスの連続発振が実現され⁽¹⁾、それ以来、LD励起固体レーザーの高出力化は特に著しい進展を見せている。近年では、Kerrレンズモード同期によるフェムト秒レーザーの励起源用レーザー、あるいは高効率な高調波発生による紫外レーザー発生用の基本波光源として、高出力な全固体単一横モードレーザーの開発が望まれている。

LD-barは、一素子で10W以上の高出力を発生するが、その出射開口は大きく(典型的な全体の寸法は $\sim 1 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$)、接合面に垂直な方向には回折限界で水平な方向には回折限界の1000倍以上の広がり角を有する。そのため、比較的簡単に固体レーザーの単一横モード発振が得られる端面励起には適さず、励起用光学系の工夫が必要となる。LD-barを用いた端面励起用光学系としては、LD-barの各々の発光素子についてコリメートを行い集光することで小さな集

光スポットを実現し共振器モードとの結合を改善しようとする方法が考えられている。各々の発光素子にGRINレンズアレイを対応させてコリメートし、 $300 \mu\text{m}$ の共振器モードウエストに集光し、Nd:YAGレーザーを発振させた例や⁽²⁾、発光素子各々に対応するマルチプリズム・アレイを開発し、LD-bar接合面に対し水平方向のビーム質の悪いビームのコリメートを十分に行うことにより、 $200 \mu\text{m}$ というLD-barの発光素子と同等の大きさまで集光を実現した例がある⁽³⁾。

一方、横長ビームパターンを共振器モードに効率よく結合させるように整形することも試みられている。この例として、光ファイバの一端をLD-barの発振開口に一致させるように一列に並べ、反対側の端を円形状に並べ整形したline-to-bundle法⁽⁴⁾、扇形のレンズダクトを用いて整形した方法⁽⁵⁾、横に並ぶ発光素子を縦に並べかえるように整形する光学系を用いた方法⁽⁶⁾などがある。ただし、これらの手法で得られる整形後のLD光のビーム品質は悪く、小さい励起スポットを達成するには不向きである。一方、特別な光学系を用いなくても、平行な平面鏡2枚のみからなる多重反射ビーム整形器(Multiple Reflection Beam Shaper:MRBS)がClarksonらによって開発され⁽⁷⁾、高密度励起を達成して誘導放出断面積の小さなNd:YAGの波長946nmの発振を実現している⁽⁸⁾。あまり高い励起強度を必要としないレーザー媒質に対しては、固体レーザー共振器の基本横モード自体を楕円形に整形してLD-bar励起光との結合を改善さ

せる方法も報告されている⁽⁹⁾。

また、LD-bar 光源には未だ試みられていないが、今後その応用が期待される方法としては、単一モードLD光で注入同期することによってLDアレイの空間発振パターンの改善とスペクトルの狭帯域化を行なった例がある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。フォトリラクティブ結晶を用いた位相共役型副共振器によって同様の効果を実現した例もある⁽¹²⁾。

いずれの方法においても、単一横モード発振をかつ低い発振しきい値で得るためには、固体レーザ共振器の最低次横モード体積よりも小さい空間に効率よくLD光を励起吸収させる必要があり、レーザ発振に必要な励起強度と共振器モードの設計⁽¹²⁾を含めたデザインが要求される。

本研究では全固体高出力単一横モードレーザの実現を目指して、比較的安価で高出力が得られるLD-barに着目し、その励起光モードをビームウエスト半径 200 μm の共振器基本モードに整合させるための端面励起用光学系を開発し、実測した励起パターンと共振器モードとの整合を定量的に評価した。このような端面励起方式は、誘導放出断面積の小さい遷移の発振や、 Yb^{3+} レーザのような準3準位レーザのように、高密度励起条件が必要となる固体レーザへの応用に適しているが、小さな共振器基本モードに高励起入力した際に生じる熱誘起屈折率変化がレーザ発振に悪影響を及ぼす。そこで、本研究では、熱の効果を顕著に観測するためにあえてNd:YAGの $\sim 1/8$ と熱伝導率が悪いNd:S-VAP($\text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$)結晶を高密度励起し、その発振特性から端面励起方式での共振器モードと励起光の結合効率および熱の影響を調べた。

2. LD-bar端面励起用光学系の設計

単一横モードにおけるレーザ発振動作は、次のように表現できる⁽¹³⁾。

$$\frac{dN(x,y,z)}{dt} = G(x,y,z) - \sigma c \frac{\rho(x,y,z)}{h\nu} N(x,y,z) - \frac{N(x,y,z)}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \sigma c \int_a \frac{\rho(x,y,z)}{h\nu} N(x,y,z) dV - \frac{q}{\tau_c}, \quad (2)$$

ここに、 N : 上準位密度、 G : 単位体積当たりの励起率、 ρ : 共振器モードのエネルギー密度、 σ : 誘導放出断面積、 c : 光速、 $h\nu$: 光子エネルギー、 q : 共振器モード中の全光子数、 τ : 蛍光寿命、 τ_c : 光子寿命である。

結晶内の正規化励起分布 $g(x,y,z)$ 、モード分布係数 $\varepsilon(x,y,z)$ を以下のように定義する。

$$g(x,y,z) = \frac{G(x,y,z)}{G_0}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(x,y,z) = \frac{\rho(x,y,z)}{\rho_0}, \quad (4)$$

ここに、 G_0 : 吸収された全光子数、 ρ_0 : エネルギー密度のピーク値である。

これらの定義した変数を用いて式 (2) に式 (1) を代入し、出力パワー $P_{out} \rightarrow 0$ の極限において、入力パワー P_{in} を求

めることによって発振しきい値 P_{th} は、次式のようにになる。

$$P_{th} = \frac{A_e \gamma I_{sat}}{\eta_p} \left[\int_a \varepsilon(x,y,z) g(x,y,z) dV \right]^{-1}, \quad (5)$$

ここに A_e : 共振器モードの実効断面積、 γ : 片道の全損失、 I_{sat} : 飽和強度、 η_t : 光学系の伝送効率、 η_a : 結晶の吸収率、 $h\nu_p$: 励起光の光子エネルギー、 $\eta_p = \eta_t \eta_a (\nu / \nu_p)$: 励起効率である。

上式中の積分項は、励起光と共振器モードのエネルギーの空間的重なりを表す。例えば、完全なガウス型同志の整合条件で、この積分は 0.5 になる。積分項以外は、共振器などの実験装置を設計した時点で不変であり、励起光と共振器モードの結合状態がレーザのしきい値に影響を及ぼすことが分かる。ただし、この式の中では、LD-barといった高出力半導体レーザを用いて小さな領域に高入力したときに回折損失の増加を招くと考えられる熱誘起屈折率変化の影響は含まれていない。

本研究で用いた励起源である LD-bar (Opto Power 社製: OPC-A010) は、1 cm $\times$ 1 μm の開口で 12 個の発光素子を持ち、各々の発光素子は 1 μm $\times$ 200 μm の大きさであり、接合面に垂直な成分、水平な成分のビーム拡がり角はそれぞれ 45度、10度(FWHM)と異なる。我々は、接合面に対して垂直方向のコリメートに対しては直径 $\phi = 2$ mm、焦点距離 $f = 1.4$ mm のBK-7のロッドレンズを用いた。当初、ファイバーをレンズとして用いることを試みたが、LD-barの各エレメントが通常は完全に一直線上にアライメントされていないためにファイバーレンズ出力後のビームパターンが弓状に湾曲してしまった (smile現象)。一方、水平方向のコリメートには、焦点距離 $f = 4$ mm の小さな円筒レンズがLD-barの各々の発光素子12個に対応するように設計したアクリル製のレンズアレイを用いた。このレンズアレイは、両面とも波長 800 nm でARコーティングを施してある。

ビーム整形には、MRBS⁽⁷⁾を採用した。このMRBSは、2枚の平行な平面鏡のみで構成される。この2枚の平面鏡によって、コリメートされた入射ビームを、ビーム幅の広い水平方向は分割し減少させ、ビーム幅の狭い垂直方向はその分割したビームを積み重ね増加させて共振器モードとの結合状態を高めるように整形するものである。そのビーム幅は水平方向、垂直方向、各々、次の式で表せられる。

$$I_a = 2d \sin \theta_a, \quad (6)$$

$$I_b = 2nd \sin \theta_b, \quad (7)$$

ここに、 I_a 、 I_b : それぞれMRBS入射前の水平方向垂直方向のビーム幅、 θ_a 、 θ_b : 入射角、 n : 水平方向ビームの分割数、 d : 鏡面間隔である。

この式から分かるように、MRBSは水平方向、垂直方向独立にビーム幅を決定でき、鏡面間隔及び入射角を変化させることによって、単レンズで対称な形に点集光可能な垂

直方向、水平方向の M^2 (14) が等しいビームに整形できるという利点がある。また、MEBS 自体は単純な 2 枚の全反射鏡を 2 枚対向させた構造であり、回折レンズアレイやマイクロプリズムといった特別に設計された微小光学系を必要としない。

今回我々の用いた MRBS での分割数は LD-bar の接合面に垂直な方向のビームコリメートが焦点距離の長いレンズでしか実現できなかったため $n=3$ である。前述した LD-bar の湾曲の問題がなければ、細いファイバーレンズを用いてコリメートされた細いビームを形成し 12 分割して正方形に整形することによってより小さいパターン of 励起光に整形できる。我々は、コリメート用レンズアレイを用いて水平方向のコリメートを完璧にすることによって、MRBS 内での光伝送効率を改善し、その結果、整形されたビームのコリメートも改善することができた。Clarkson らは、MRBS への入射ビームを緩やかに集光させることによって MRBS 内の伝送効率を改善する方法を取っている (7)。MRBS によって整形されたビームは、球面収差のない焦点距離 $f=53\text{ mm}$ の非球面レンズで集光した。

Nd:S-VAP レーザ共振器は、平面鏡と凹面鏡で構成される。出力鏡である凹面鏡の反射率は $R=98\%$ 、曲率半径 $r=750\text{ mm}$ である。安定条件を満たすように共振器長 $L=200\text{ mm}$ とし、共振器のモードウエスト半径を $\omega \sim 200\text{ }\mu\text{m}$ に設計した。本研究で用いた Nd:S-VAP (LOC 社製) は、 $3\times 3\times 4\text{ mm}$ の大きさで Nd 濃度 0.38 wt % である。結晶の両面は、波長 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ で AR コーティングを施してある。Nd:S-VAP 結晶は、Nd:YVO₄ 同様に広い励起スペクトルを持ち、かつ発振しきい値が低いのが特徴であるが、屈折率の温度変化率、熱伝導率が YLF 結晶よりもそれぞれ 2.6 倍、3.5 倍劣る。

設計した光学系 (光学系-I) 全体を 図 1 に示す。また、この光学系と比較のためにさらに 2 種類の集光系を試みた。ひとつは、光学系-I において MRBS を取り除いた場合であり (光学系-II)、光学系-III では、焦点距離 $f=25\text{ mm}$ と $f=53\text{ mm}$ の非球面レンズ対からなるビームエキスパンダを MRBS 入射ビームのコリメート改善のために用いた。レンズを共焦点位置に配置したビームエキスパンダでは、光源に近いレンズの焦点距離を f_1 、遠いレンズの焦点距離を f_0 とすると、入射ビームのビーム拡がり角は、ビームエキスパンダ通過後には、 f_1/f_0 になる。今回用いたビームエキスパンダでは、 $f_1/f_0=25/53$ である。さらに、集光時に単レンズでは起こってしまう非点収差を防ぐために、焦点距離 $f=50\text{ mm}$ と $f=20\text{ mm}$ の円筒レンズでそれぞれ、垂直方向、水平方向の集光を行った。

3. LD-bar 集光実験

<3.1> 集光パターン測定結果

前述した 3 種類の LD-bar 端面励起用集光系について、CCD カメラを焦点付近を中心に光軸 (z 軸) 方向に 0.5 mm 間隔で移動し、その集光パターンを測定した。CCD カメラ

図 1. 実験装置図。

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

図 2. 集光ビームのビーム幅変化 (FWHM);
□ 光学系-I (x), ■ 光学系-I (y), ○ 光学系-II (x),
● 光学系-II (y), × 共振器モード。

Fig. 2. Changes in focusing beam width (FWHM) along the optical axis: □ Optical system-I (x), ■ Optical system-I (y), ○ Optical system-II (x), ● Optical system-II (y), × Cavity mode.

の出力は、パソコン上で Sensor Physics 社製の解析ソフト Laser Test Model LS-4 で解析を行なった。

図 2 に光学系-I, II それぞれにおいて、接合面に水平な方向 (x 方向)、垂直な方向 (y 方向) のビーム幅 (FWHM) の光軸に沿った方向での変化を示す。ただし、ビームパターン自体が変化するため、ガウス型にフィットして得たビーム幅は共振器モードとの結合効率を議論するには正確さを欠く。ここでは、3 種類の励起光学系の比較をする目的で示した。光学系-I, II について、光軸上の異なる位置でのビームプロファイルを図 3 に示す。光学系-I のビームプロファイルより、ビーム幅の広い x 方向は分割、狭い y 方向は重ねることによって MRBS によってビームの整形が行われ、焦点付近では $390\times 220\text{ }\mu\text{m}$ の形に整形できた。コリメートされた後の LD-bar 出力は、 y 方向がロッドレンズにより拡がり角 $\sim 5\text{ mrad}$ に、 x 方向がレンズアレイで $\sim 40\text{ mrad}$ にコリメートされていたが、 x 方向のコリメートが悪いために最終的に非点収差が生じていることが、図 2 のプロットよりわかる。

図 4 に、光学系-I, II, III それぞれの焦点付近のビームプロファイルを示す。それぞれのスポットサイズ (FWHM) は順に、 $0.39\times 0.22\text{ mm}$ 、 $1.51\times 0.09\text{ mm}$ 、 $0.23\times 0.20\text{ mm}$

図3. CCDカメラで測定した集光ビームプロファイル: (a) 光学系-I, (b) 光学系-II.

Fig.3. Changes in the focusing beam profiles measured by a CCD camera :
(a) optical system-I and (b) optical system-II.

図4. 焦点位置でのビームプロファイル ;
(a)光学系-I, (b) 光学系-II, (c) 光学系-III.

Fig.4. Beam profiles at focal position measured by a CCD camera; (a) optical system -I, (b) optical system-II, and (c) optical system- III.

である。光学系-IIIが最も小さな集光スポットが得られており、かつ x , y 方向を異なる焦点距離の円筒レンズで集光したので光学系-I, IIで問題となる非点収差は著しく解消できた。また、各光学系の伝送効率は、光学系-Iで $\sim 40\%$ 、光学系-IIで $\sim 65\%$ 、光学系-IIIで $\sim 25\%$ である。この光学系において、大部分の損失は、レンズアレイとMRBSで生じる。レンズアレイでの損失は、レンズアレイの設計がLDビームの半値全幅で決まる広がり角をもとにしているので各LDエレメントからの発光の x 方向成分すべてを一つのレンズに納めることができず、隣のレンズにまたがってし

まい、小さな円筒レンズ間のつなぎ目によって回折光が生じてしまうためである。このため、レンズアレイの伝送効率は $\sim 75\%$ である。MRBSの損失は、入射ビームの一部が平面鏡のエッジ部に引っかかり損失するためと考えられ、伝送効率は $\sim 60\%$ である。光学系-IIIの伝送効率が小さいのは、オブティクス数が多いこともあるが、円筒レンズの大きさが 1 cm^2 と小さいためにレンズに入りきらないためである。また、ロッドレンズ、非球面レンズにはARコーティングを施していないので、コーティングを行うことで、例えば、光学系-Iでは伝送効率は $\sim 50\%$ まで改善できると考えられる。

<3.2> モード結合と発振しきい値解析

共振器モードと励起光のエネルギー的な結合状態が式(5)の関係で発振しきい値に影響することを前に示した。積分項以外は一定であるので、この積分項の結合効率を、CCDカメラで実際に測定した集光パターンと設計した共振器モードとの3次元積分を計算することで、発振しきい値 P_{th} を計算できる。この計算を光学系-I、光学系-IIについて行った。ここで、MRBSを用いた励起用光学系として、その評価に光学系-IIIを用いなかった理由は、図1に示すように本実験で用いた共振器では短い焦点距離の集光レンズを用いることができなく、また、光学系の伝送効率が極端に悪いためである。

計算では、設計した共振器モードウエスト $\omega = 200\text{ }\mu\text{m}$ から、 $A_e = \pi \times (200 \times 10^{-6})^2\text{ m}^2$ とした。結晶での損失を $0.004\text{ mm}^{-1(15)}$ と見積り、出力鏡の反射率が $R = 0.98$ あることから $\gamma = 0.004 \times 4 - 0.5 \times \ln 0.98 = 0.026$ 、 $I_{sat} = 1.62 \times 10^7\text{ W/m}^2$ 、 $\eta_t = 1$ 、 $\eta_a = 0.6$ とすることで $\eta_p = 0.67$ とした。 (P_{th}) は、集光レンズ透過後の強度で表示する。)、Nd:S-VAPの屈折率 $n = 1.8$ から結晶中の光学距離は真空中の1.8倍になることを考慮して計算を行い、結晶内の励起光焦点位置を変化させた時の発振しきい値の変化を光学系-Iにつ

図5. 焦点位置に対する光学系-Iの発振しきい値の計算値. 点は共振器モードと励起光が完全に一致したときの計算値.
Fig. 5. Calculated threshold power P_{th} of optical system-I as a function of focal position. A small dot represents the value when cavity mode and pump mode are completely overlapped.

図6. 焦点位置に対する光学系-IIの発振しきい値の計算値. 点は共振器モードと励起光が完全に一致した場合の計算値.
Fig. 6. Calculated threshold power P_{th} of optical system-II as a function of focal position. A small dot represents the value when cavity mode and pump mode are completely overlapped.

いて図5に、光学系-IIについて図6に示した。図2の"0"の位置が結晶の中心に対応する。最も結合状態が良い状態に集光した場合のTEM₀₀モードの発振しきい値は、光学系-Iは0.19 W、光学系-IIは0.46 Wと求められた。開発した光学系-Iは共振器モードと励起光の結合状態が高く、低しきい値動作の実現可能であることが計算から予想される。また、共振器モードと励起光が完全に一致した場合の発振しきい値は、0.15 Wとなり、光学系-Iでは、その~1.2倍が達成された。

4. Nd:S-VAPレーザ発振実験

<4.1> 実験装置

レーザ媒質であるNd:S-VAPは、吸収の大きいc軸に平行な π 偏光とLD-barの偏光方向一致させるようにアルミ製ホルダーにシリコンゴムを挟んで固定した。このホルダーは積極的な冷却は行わず自然放熱のみである。

図1に示したように、熱の影響を調べるためには、励起光をオプティカル・チョッパ(CH)を用い任意間隔でチョップし、そのOn time / Off time比であるDuty比を変え、熱

図7. マイケルソン干渉計実験装置図.
Fig.7. Schematic of experimental setup of a Michelson's interferometer.

負荷を変化させ発振特性測定を行った。CW動作での評価を行うために、On timeをNd:S-VAPの蛍光寿命230 μ sに比べ十分長い2.5 msとした。また、図7のようにHe-Neレーザを用いたマイケルソン干渉計を構成し、非発振時の干渉縞測定をCCDカメラを用いて行い、結晶の熱誘起屈折率変化を観測した。このときNd:S-VAP結晶の励起側端面からの反射光を干渉計を構成するのに用いた。

焦点位置変化によるモード結合効率の変化が発振特性へ影響する度合いを測定するためには、本来なら共振器全体を光軸方向に移動する必要があるが、共振器全体を動かすことはアライメント上非常に困難なので、集光レンズである非球面レンズを光軸方向に移動することで結合状態を変化させ、発振特性を測定した。MRBS後のビームのコリメート度から、この手法による焦点でのスポットサイズの変化は5%以内である。以上の実験を光学系-IIについても行い、比較を行った。

発振実験はLD-bar冷却用の恒温水槽温度を16度とすることでLD-barの駆動電流14 Aでの励起光の吸収率が最大になるようにした。従って、駆動電流の変化によって若干のスペクトル変化が起こり励起吸収率が変わるが、実験では事前に各駆動電流時の定常時に結晶の吸収率を測定してお

図8. 熱負荷に対する光学系-Iの出力特性.

Duty比は $\blacktriangle$ 0.02, $\triangle$ 0.08, $\bullet$ 0.17, $\circ$ 0.5.

Fig.8. Plots of laser output peak power with an optical system-I as a function of absorbed peak power; duty ratio is $\blacktriangle$ 0.02, $\triangle$ 0.08, $\bullet$ 0.17, $\circ$ 0.5.

図9. 熱負荷に対する光学系-IIの出力特性。
Duty比は ▲ 0.02, ▽ 0.08, ● 0.17.

Fig.9. Plots of laser output peak power with an optical system-II as a function of absorbed peak power; duty ratio is ▲ 0.02, ▽ 0.08, ● 0.17.

図10. 吸収ピークパワー2.2 W時の出力ピークパワー。
△ 光学系-I, ▲ 光学系-II.

Fig.10. Plots of laser output peak power obtained at a absorbed peak power of 2.2 W as a function of duty ratio; △ optical system-I, ▲ optical system-II.

き、その結果をもとに励起吸収パワーを求めた。

<4.2> 熱負荷特性

<4.2.1> 出力特性

最初に、CHのDuty比を変化させることでレーザ結晶の熱負荷を変化させ熱負荷に対する出力特性を測定した。CHのDuty比は、0.02、0.08、0.17、0.50とした。光学系-Iの出力特性を図8に、光学系-IIの出力特性を図9に示す。光学系-Iは、光学系-IIと比較して、低発振しきい値で高効率発振可能な光学系であることが実験的に確認できた。全く熱の影響がないときの限界がDuty比0であるから、Duty比0.02の曲線からCW励起時には入力2.2 Wで光学系-Iでは530 mW、光学系-IIでは150 mW以上の連続出力が得られることが予想される。しかし実際には、著しい熱誘起屈折率変化による回折損失の影響と思われる要因のため、2.2 W励起時の連続発振動作は実現できなかった。吸収ピークパワー（CHがONの状態での定常値をここではピークパワーと記述する）2.2 W励起時のDuty比に対する出力を図10に示す。光学系-I、光学系-IIともにDuty比を増加させ、熱負荷を増加させることで、出力、スロープ効率が低下し、

図11. Duty比によるビームプロファイル変化；

(a) 光学系-I, (b) 光学系-II.

Fig.11. Changes in the profile depending on the duty ratio;(a) optical system-I and (b) optical system-II.

発振しきい値は高くなった。この熱負荷影響による出力、発振しきい値変化は、小さな領域に高入力を行う光学系-Iの方が大きい。光学系-IではDuty比0.17においてすでに、Duty比0.02の出力の半分に低下してしまう。

<4.2.2> 発振ビームパターン

Nd:S-VAPレーザ共振器から42 cm離れたところにCCDカメラを設置し、熱負荷変化による発振ビームパターンを観測した。吸収ピークパワーは2.2 Wである。その様子を図11に示す。

光学系-I、光学系-IIともに発振パターンが熱負荷増加とともに劣化するのを確認した。光学系-IIでは、その発振はマルチモード発振であった。一方、光学系-IではDuty比0.02でそのビーム質を表す $M^2 \sim 1.6$ が得られた。また、出力自体が大きく減少するDuty比0.17で、両光学系ともに発振ビームパターンが大きく変化している。

<4.2.3> 干渉測定

He-Neレーザを用いた非発振時のマイケルソン干渉計による干渉縞測定で図12のような干渉縞を観測した。

干渉パターンの変化から、励起光による熱誘起屈折率変化の様子が、視覚的にとらえることができる。この干渉計では、He-Neレーザが結晶中を往復して干渉を起こす。結晶長4 mmの往復での光路変化が、He-Neレーザ発振波長の633 nmの半波長となったときに、干渉縞の明線(山)～暗線(谷)変化となる。これから、干渉縞の明線(山)～暗線(谷)変化は～4度の結晶温度変化にあたると計算される。端面励起用に開発した小さな共振器モードに励起光を入力できる光学系-Iの方が干渉縞変化が大きく、結晶中での熱の影響が大きいことが分かる。また、発振パターンが大きく変化したDuty比0.17で干渉縞が大きく変化している。

熱伝導率が低く、屈折率の温度依存性が大きいS-VAP結晶では、高密度励起時に熱誘起屈折率変化による回折損失が非常に高くなり、発振しきい値の増加、出力の低下を起

図12. Duty比による干渉縞変化. (a) 光学系-I, (b) 光学系-II.
Fig.12. Changes in the interferometer pattern depending on the duty ratio;
(a) optical system-I and (b) optical system-II.

図13. 光学系-Iの焦点位置変化に対する出力特性.
▲ -2mm, △ -1mm, ● 0mm, □ +1mm, ■ +2mm.
Fig.13. Output performance for various focal positions
with an optical system-I;
▲ -2mm, △ -1mm, ● 0mm, □ +1mm, ■ +2mm.

図14. 光学系-IIの焦点位置変化に対する出力特性.
▲ -2mm, △ -1mm, ● 0mm, □ +1mm, ■ +2mm.
Fig.14. Output performance for various focal positions
with an optical system-II;
▲ -2mm, △ -1mm, ● 0mm, □ +1mm, ■ +2mm.

こし、連続発振自体得られない。単純に計算すると、たとえYLF結晶を用いてもこのような小さいスポットへの励起時には約10倍の励起強度でS-VAPと同様の熱誘起屈折率変化の影響が予想される。もちろん、この環境は結晶の冷却によって緩和されるが、 $\sigma\tau$ の小さいレーザ、あるいは準3準位系レーザのように高密度励起が必要なレーザにおいては、励起強度の上限を決定する要因に他ならない。とくに、MRBSを用いて整形されたビームを用いる場合には、高密度励起において複雑な発振パターンが得られたことからわかるように、ビーム内のホットスポットによって複雑な屈折率分布が形成されるため、ガウスビームによって形成された熱レンズのような取り扱いができないという欠点が生じる場合がある。

<4.3> 焦点位置変化による発振しきい値特性

集光レンズである非球面レンズを0.5 mm間隔で動かし、結晶中での励起光の焦点位置を変化させ、その共振器モードと励起光の結合状態を変えることにより、その発振しきい値などの発振特性を測定した。測定は、熱の影響の最も少ないDuty比0.02で行った。

図13に光学系-Iの出力特性、図14に光学系-IIの出力特性を示す。焦点位置を移動させ、結合状態を悪くすると発振しきい値が増加し、出力は低下する様子が実験的に確認できた。吸収ピークパワー2.2 W時の、対応する発振パターンをCCDカメラで測定したものを図15に示す。焦点位置を変えることによって、その発振パターンが変化している様子が観測できた。これは、MRBSで整形されたビームが集光されるときに光軸に沿ったビームプロファイルの変化は、図3に示すようにガウス型ビームとは著しく異なるため、これによって各共振器横モードとの結合状態が変

図15. 焦点位置によるビームプロファイル変化. (a)光学系-I, (b) 光学系-II.
Fig.15. Changes in the beam profile depending on the focal position;
(a) optical system-I and (b) optical system-II.

図16. 光学系-Iの焦点位置に対する発振しきい値特性. 点は共振器モードと励起光が一致した場合の計算値. 白点は実験値. 実線は計算値.
Fig.16. Characteristics of lasing threshold as a function of focal position with an optical system-I: Solid dot denotes the value when cavity mode and pumping mode are exactly overlapped. Open dots denote the experimental value. A solid curve represents the calculated results.

図17. 光学系-IIの焦点位置に対する発振しきい値特性. 点は共振器モードと励起光が一致した場合の計算値. 白点は実験値. 実線は計算値.
Fig.17. Characteristics of lasing threshold as a function of focal position with an optical system-II: Solid dot denotes the value when cavity mode and pumping mode are exactly overlapped. Open dots denote the experimental value. A solid curve represents the calculated results.

わるためである。光学系-Iでも、励起光と共振器モードとの結合状態が悪くなると基本モード発振は得られなかった。

最後に、出力特性測定で得られた焦点位置変化による発振しきい値特性の実験値と前章の計算値とを比較した。光学系-Iについて図 16 に、光学系-IIについて図 17 に示す。ただし、図 16, 17 中の理論曲線はTEM₀₀モードに対する計算値である。このように実験値と計算値では光学系-I、光学系-IIともに～2倍実験値の方が大きくなった。Duty比 0.02でかつ発振しきい値近傍の低励起強度では、熱誘起屈折率変化は微小であるはずであるから、この理論との食い違いは、式(5)において結晶中の損失を過小評価したためであると予想される。

5. おわりに

本研究では単一横モード発振を実現するためのLD-bar端面励起用光学系を開発し、かつ、あえて熱伝導特性の悪いNd:S-VAPを励起することによって、その発振特性から共振器モードと励起光との結合状態と励起時の熱負荷の影響について測定し、以下のような基礎特性が得られた。

1. 複数の低コヒーレンスなLD-アレイから成るLD-barをロッドレンズとレンズアレイでコリメートし、多重反射ビーム整形器(MRBS)で行いて整形を行ない、非球面レンズで集光する光学系を構築し、390×220 μm (FWHM) の集光スポットサイズと共振器最低次モードとの高い結合率(MRBSを用いない場合の約3倍)を実現できた。ただし、この複雑な光学系の伝送効率は無反射処理を施したとしても50%程度である。このMRBS 光学系を用いたLD-bar 端面励起方式は、高密度励起が要求される固体レーザーにおいては有効な手法である。

2. Nd:S-VAPレーザーの発振実験を行ない、Duty比 0.02、ピーク励起吸収入力 2.2 Wにおいて、M²～1.6 のレーザー発振がピーク出力 522 mWで得られた。MRBS による整形を行なわないと、Duty比 0.02 においてピーク出力155 mW

のマルチモード発振となり、MRBSを含む励起光学系がLD-barによる低しきい値、高効率動作に適していることを示した。

3. 屈折率の温度変化率、熱伝導率がYLF結晶よりもそれぞれ2.6, 3.5倍劣るS-VAP結晶では、励起時の熱屈折率分布による回折損失が非常に高くなり、発振しきい値の増加、発振パターンの劣化、出力低下を起こし連続発振自体得られなかった。しかし、単純に計算してもたとえYLF結晶を用いてもこのような小さいスポットへの励起時には約10倍の励起強度でS-VAPと同じ熱誘起屈折率変化を起こすことが予想される。

また、等価的な熱屈折率変化である熱レンズ効果であるなら、結晶自身を熱レンズを補正するように結晶を加工したり、また、補正用のレンズなどの光学系を共振器内に挿入するなど、熱レンズが生じてはじめて安定になるように共振器を設計するなどの改善方法がある。しかし、本実験においては、複数の発光体が反映した励起ビーム内のホットスポットによりガウス型ビームで励起した場合とは異なる複雑な屈折率分布が誘起されているはずであり、そのために大きい回折損失が生じた可能性もある。そして、その場合には単純な熱レンズ補正は難しい。単なるモード結合の向上のみならず、スムーズなガウス型励起パターンの形成が強励起においては重要になる。

(平成8年6月4日受付、同8年8月29日再受付)

文 献

- (1) C. A. Krebs and B. D. Vivian: "High power quasi-cw and cw laser diode bar arrays", *SPIE High Power Laser Diodes and Applications*, **893** 35 (1988)
- (2) S. Yamaguchi and H. Imai: "Efficient Nd:YAG Laser End-pumped by a 1 cm Aperture Laser-Diode Bar with a GRIN Lens Array Coupling", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-28**, 4, 1101 (1992)
- (3) S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito and K. Chiba: "Collimation of emissions from a high-power multi-stripe laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot", *Opt. Lett.*, **20**, 8, 898 (1995)
- (4) Th. Graf and J. E. Balmer: "High-power Nd:YLF laser end pumped by a diode-laser bar", *Opt. Lett.*, **18**, 16, 1317 (1993)
- (5) G. Feugnet, C. Bussac, C. Larat, M. Schwarz and J. P. Pocho-He: "High efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array", *Opt. Lett.*, **20**, 2, 157 (1995)
- (6) R. P. Edwin: "Stripe stacker for use with laser diode bars", *Opt. Lett.*, **20**, 2, 222 (1995)
- (7) W. A. Clarkson, A. B. Neilson and D. C. Hanna: "Novel beam shaping technique for high-power diode bars", *CLEO'94*, CThL2 (1994)
- (8) W. A. Clarkson, R. L. Koch, K. I. Martin and D. C. Hanna: "High-power 946 nm Nd:YAG laser longitudinally pumped by a diode bar" *CLEO'95*, CMD4 (1995)
- (9) F. Krausz, J. Zehetner, T. Brabec and E. Winter: "Elliptic-mode cavity for diode-pumped lasers", *Opt. Lett.*, **16**, 19, 1496 (1991)
- (10) G. L. Abbas, S. Yang, V. W. S. Chan, and J. G. Fujimoto: "Injection Behavior and Modeling of 100 mW Broad Area Diode Lasers" *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 4 609 (1988)
- (11) B. Beier, J. P. Meym, R. Knappe, K. J. Boller, G. Hubar, and R. Wallenstein: "A 180 mW Nd:LaSc₃(BO₃)₄ Single-Frequency TEM₀₀ Microchip Laser Pumped by an Injection-Locked Diode-Laser Array", *Appl. Phys. B*, **58**, 381 (1994)
- (12) S. MacCormack and J. Feinberg: "High-brightness out-put from a laser-diode array coupled to a phase-conjugating mirror", *Opt. Lett.*, **18**, 3, 211 (1993)
- (13) P. Laporta and M. Brussard: "Design Criteria for Mode Size Optimization in Diode-Pumped Solid State Lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**, 10, 2329 (1991)
- (14) T.F. Johnston, Jr.: "M² concept characterizes beam quality", *Laser Focus World* **26**, May, 173 (1990)
- (15) J.L. Dallas: "Frequency-modulation mode-locking performance for four Nd³⁺-doped laser crystals", *Appl. Opt.*, **33**, 27, 6373 (1994)

赤羽 陽介

(非会員) 1970年9月11日生。94年3月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。96年3月同大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月富士写真フイルム株式会社に入社。

宇藤 健一

(非会員) 1973年2月23日生。95年3月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院理工学研究科電気工学専攻入学。現在に至る。主としてLD励起固体レーザーの研究開発に従事。

中西 晃

(非会員) 1973 年5 月31 日生。96 年3 月
慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。
同年 4 月同大学大学院理工学研究科電気
工学専攻入学。現在に至る。主としてLD
励起固体レーザの研究開発に従事。

神成 文彦

(会員) 1958 年1 月15 日生。85 年慶應義
塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻
博士課程修了。84 年9 月よりイギリス・
SERCラザフォード・アブレトン研究所
研究員。86 年アメリカ・スペクトラ・テ
クノロジー社（現、STIオプトロニクス
社）上級研究員。88 年慶應義塾大学理工
学部助手。以降、専任講師を経て、93 年同助教授となり、
現在に至る。工学博士。紫外・真空紫外レーザとその応用、
固体レーザ、非線形光学、弱電離プラズマのモデリングな
どの研究に従事。応用物理学会、レーザ学会、米国光学会
会員。