レーザーオリジナル

 M^2 因子を用いたLD端面励起高効率固体レーザーの設計法

平等 拓範*・鈴木 剛**・小林 喬郎*

(1996年1月4日 受理)

Design Method of Efficient, Diode End-Pumped Solid-State Lasers Using M^2 Factor

Takunori TAIRA*, Tsuyoshi SUZUDO** and Takao KOBAYASHI*

(Received January 4, 1996)

A simple design method for longitudinally diodepumped solid-state lasers has been studied. The study indicates that the requirements of the focusing optics of the pump source to realize highly efficient. The design method was achieved by using an M^2 factor to describe the multi-transverse mode beam of broad area diode lasers and was examined by using a diode pumped Nd:YVO₄ miniature laser. A good agreement was obtained between theoretical and experimental output results. A low-threshold and 58.0 % slope efficiency laser oscillation were realized with circular output beam.

Key Words: Design method, M^2 factor, High power laser diode, End-diode-pumped solid-state laser, Nd:YVO₄ laser

1. はじめに

半導体レーザー (LD) の高出力化, 長寿命化の開発は目覚ましく, 最近では20kW/cm²以上の高輝度LDが入手可能になってきている。これに伴い, LDを励起光源とした固体レーザーの研究も活発化してきた。LD励起固体レーザーは, LDの光出力の時間的特性を加工したり, 空間的, スペクトル的特性を改善する, いわゆるコヒーレンス変換器であると見なすことができる。変換器であればその効率, 寸法等を最適化する設計法が重要であるが, 高出力LD

からの出射光の強度分布がガウス形状でないため取り扱いが複雑となり, LD励起固体レーザーの設計を煩雑にしていた^{1,2)}。

一方, 近年レーザー光横モードの品質を示す量として導入された M^2 因子³⁻⁵⁾を用いれば, ブロードエリアのLDなどから得られる高次横モード光をガウシャン光として記述できる。これにより励起光の集光光学系の設計が可能になる^{6,7)}。さらに, 集光状態が計算できるため共振器の最適設計が容易となる。本論文は, M^2 因子を用いたLD励起固体レーザー設計手法を導出し¹²⁾, さらに, Nd:YVO₄小型レーザーに

*福井大学工学部電子工学科 (〒910 福井市文京3丁目9番1号)

** (株)リコー研究開発本部応用電子研究所 (〒981-12 名取市高館熊野堂字余方上5-10)

*Faculty of Fukui, Fukui University (3-9-1 Bunkyo, Fukui 910)

**General Electronics, R & D Center, RICOH, Co. Ltd. (5-10 Yokatakami, Kumanodoh, Takadate, Natori 981-12)

より、本手法の有用性を確認したので報告する。

2. 端面励起型固体レーザーの設計法

2.1 励起光の取り扱いと集光条件

M^2 因子を用いた表記法では、高次横モード光は TEM_{00} の基本横モードに比べスポット径が M 倍のガウシアン光として取り扱われるため、光軸上の位置 z におけるスポット半径、及びコンフォーカル長は次式のように表わされる³⁻⁵⁾。(付録A参照)

$$w_p(z) = w_{p0} \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda_p z}{n \pi w_{p0}^2} \right)^2} \quad (1)$$

$$l_{cp} = \frac{2n\pi w_{p0}^2}{M^2 \lambda_p} \quad (2)$$

ここで、 λ_p は波長、 n は屈折率、 w_{p0} は最小スポット半径であり $z=0$ の位置にビームウェストを持つ。 $M^2=1$ のとき TEM_{00} の基本ガウシアン光に一致する。一般に、固体レーザー励起用のブロードエリアLDからの出力光は高次横モードであるため M^2 因子を用いた表記法を採用する。

Fig. 1に端面励起型固体レーザーの共振器モデルを示す。レーザー媒質長(L)は目安として、単位吸収長($1/\alpha_p$)に取ることが多いが、ここでは一般性を持たせるため L のまま残しておく。ここで、 α_p は励起光に対する吸収係数である。なお、レーザー発振光のスポット半径($w_l(z)$)はレーザー媒質中では殆ど変化しないと仮定した($w_l(L/2) \approx w_{l0}$)。レーザー媒質の中心が励起光のウェストの位置にある場合、最小スポット半径が

Fig. 1 A model of an end-pumped solid-state laser.

$$w_{p0} = \sqrt{\frac{M^2 \lambda_p L}{2n\pi}} \quad (4)$$

のとき、すなわちコンフォーカル長が媒質長に等しいとき媒質長端面でのスポット半径が最小になる。この時のレーザー媒質端面におけるスポット半径は

$$w_p(L/2) = \sqrt{\frac{M^2 \lambda_p L}{n\pi}} \quad (5)$$

となる。

四準位系のレーザー媒質では、励起光とレーザー光のマッチング効率を高めるため励起光はレーザー光スポットサイズ以下にする必要がある^{7,8)}、また、発振閾値を下げるためにはモード断面積を小さくする必要がある。すなわち

$$S_{eff} = \pi w_{l0}^2 \geq \pi w_p^2(L/2) = M^2 \lambda_p L / n \quad (6)$$

が、最適なレーザー光の実効モード面積である。また、(4)式で与えられるスポット半径が、最適な集光スポット径である。すなわち、励起光の集光光学系の焦点距離は

$$f = \frac{n\pi}{M^2 \lambda_p} w_{p0} w_0 = w_0 \sqrt{\frac{n\pi L}{2M^2 \lambda_p}} \quad (7)$$

となる。ここで、 w_0 は励起光源の半径である。

2.2 レーザー共振器と発振特性

最適動作のためにはレーザー共振器も(6)式を満たす様に設計すればよい。平面-球面鏡による共振器の場合の拘束条件は次式で与えられる⁸⁾。

$$w_{l0}^2 = \frac{\lambda_l}{\pi} \sqrt{L_c(r - L_c)} \quad (8)$$

ここで、 r は球面鏡の曲率半径、 L_c は共振器長である。一方、レーザーの不飽和利得(単行)は

$$g_0 = \frac{(f_a + f_b) \sigma_e \tau \eta_a}{h \nu_p} I_p \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 f_a , f_b はレーザー下準位、

上準位の局所分布率, σ_e は誘導放出断面積, τ は上準位寿命, η_a は励起光吸収効率, $h\nu_p$ は励起光子エネルギー, I_p はレーザー媒質端面における励起光強度であり次式で近似できる。

$$I_p \approx \frac{P_i}{S_{\text{eff}}} = \frac{nP_i}{M^2 \lambda_p L} \quad (10)$$

したがって、共振器の残留損失を L_i とした場合、出力鏡の最適透過率は

$$T = \sqrt{2g_0 L_i} - L_i \quad (11)$$

と与えられる。さらに、利得と損失が釣り合う条件よりレーザー発振閾値光強度及びパワーは

$$I_{\text{th}} = \frac{P_{\text{th}}}{S_{\text{eff}}} = \frac{h\nu_p}{2\eta_a(f_a + f_b)\sigma_e\tau} (L_i + T) \quad (12)$$

となる。したがって、レーザー出力は次式で与えられる。

$$P_o = \frac{I_s S_{\text{eff}} T}{2} \left(\frac{2g_0}{L_i + T} - 1 \right) = \eta_s (P_i - P_{\text{th}}) \quad (13)$$

ここで、 η_s はスロープ効率, I_s は飽和強度で $I_s = h\nu_p / (f_a + f_b)\sigma_e\tau$ と与えられる。また、(11)式で与えられる透過率は $\partial P_o / \partial T = 0$ を満足することから最適透過率であることが確認できる。この場合には

$$P_o^{\text{max}} = \left(\frac{I_s S_{\text{eff}}}{2} \right)^2 (\sqrt{2g_0} - \sqrt{L_i})^2 \quad (14)$$

の最大出力が期待できる。

3. Nd:YVO₄小型固体レーザーによる実験的検討

3.1 LD集光光学系の設計

次に、レーザー材料としてNd:YAGに比べ吸収係数が高く小型固体レーザーに適しているNd:YVO₄を用いてM²因子を考慮した集光光学系の設計を行いレーザー発振特性を検討する。

まず、活性層幅100 μm のGaAlAs系のブロー

ドエリアLD (Optopower製, OPC-810-CT/100型) の特性について測定した。LDのM²因子は発光領域の寸法 $w_{0x(y)}$ 、及び拡がり角 $\theta_{x(y)}$ より次式で推定できる。(光ファイバー出力のLDに関しては付録B参照)

$$M_{x(y)}^2 = \frac{n\pi w_{0x(y)}}{\lambda} \tan\theta_{x(y)} \approx \frac{n\pi w_{0x(y)} \theta_{x(y)}}{\lambda} \quad (15)$$

ここで、活性層に水平方向をx座標、垂直方向をy座標とし、ピーク値に対して $(1/e^2)$ に光強度が低下する角度を拡がり角とした。測定の結果 $\theta_{x(y)} = 116.9$ (754.0) mradであった。これより $M_{x(y)}^2 = 22.7$ (1.5)となる。なお、発光領域は $w_{0x(y)} = 50$ (0.5) μm とした。LD光を集光する場合、レンズの収差などが無ければM²因子は保存されるため(1), (2)式の関係は成立するはずである。

Fig. 2の励起光集光系の構成を用いて、レンズの焦点距離や組み合わせを変えてスポットサイズとコンフォーカル長の測定を行った。y方向のコリメートには直径330 μm のファイバーレンズ(住友電工製, MK-03型)を、またy方向は直径1.6 mmのシリンドリカルレンズにAR

Fig. 2 Focusing optics of a broad-area diode laser. (a) Side-view, (b) top-view.

(a)

(b)

Fig. 3 Focused spot size of the diode laser as a function of confocal length. (a) y-Direction, (b) x-direction.

コーティングを施したものをを用いた。集光には焦点距離 3.3 mm (Konica 製, T103K 型), 3.9 mm (Hoya 製, A25 型), 4.5 mm (Konica 製, AP4545 型) の非球面レンズを用いた。

Fig. 3 に集光時の最小スポット半径を変えたときのコンフォーカル長の測定結果を示す。幅 $5\mu\text{m}$ のスリットを用いて、ピーク値に対して $(1/e^2)$ に光強度が低下する変位量からスポット半径を求めた。同図(a)よりy方向に関しては $M_y^2 = 1.9$ となり、拡がり角から求めた M^2 因子に近い値が得られている。しかし、y方向のコリメートに、ファイバーレンズを用いない場合、 M^2 因子は10程度まで悪化した。図中の点線はそのときの集光特性を示す。また、同図(b)に

Fig. 4 Focused diode-laser beam propagating in the z-direction.

においても、計算で求めた値に良く一致した集光特性が得られている。中でも $f = 3.9\text{mm}$ の非球面レンズを用いた場合が一番良く、 $M_x^2 = 24.9$ が得られた。良く似た手法としてマイクロレンズを用いた集光法が提案されているが^{10,11)}、ブロードエリアLDには適用されていない。

Fig. 4 にこれらのレンズを組み合わせて得られる集光状態の測定結果を示す。Nd:YVO₄ 発振実験に用いる結晶および外部鏡から決まるレーザー光の最小スポットサイズも併せて記してある。この集光系ではシリンドリカルレンズの位置を変えることで、x, yの焦点位置を制御できるため、従来より多用されている複雑なアナモルフィックプリズムペアなどを用いなくても、より小さく、かつ長いコンフォーカル長で真円に近い集光形状が容易に作成できた。なお、図中の実線、点線はそれぞれの集光状態をABCDマトリックスにより計算した値である。また、このレンズ系のLD光の伝達効率はやく90%と高効率でもある。

3.2 Nd:YVO₄ 小型レーザーの発振特性

次に、開発した集光光学系を用いてNd:YVO₄ 小形レーザーの発振実験を行った。Fig. 5 にNd:YVO₄ 小形レーザーの構成を示す。結晶長 1mm, Nd 濃度 1.1 at.% の YVO₄ (NEC 製) の片端面をミラーコートし、曲率100 mm

Fig. 5 Schematic of the diode-laser pumped Nd:YVO₄ laser.

で、レーザー波長 $1.064 \mu\text{m}$ に対する反射率が 1.1, 4.4 及び 6.0% の外部出力鏡を用い、ミラー間隔を約 50mm とし半共焦点型の共振器を構成した。このとき LD の偏光方向は Nd:YVO₄ の c 軸方向に平行 (π 偏光) とし、また発振波長を吸収のピークである 809 nm になるように温度制御を加えた。この LD による実効的な吸収係数は $\alpha_p = 29\text{cm}^{-1}$ 、吸収効率は 94.5% であった。

(4) 式に実測の M² 因子を代入することより、集光スポット半径の最小値は $w_{px0} = 40.0 \mu\text{m}$ と求まるが、Nd:YVO₄ は YAG と異なり熱特性が悪く、タイトフォーカスにより破壊されるため、 $w_{px0} = 67.5 \mu\text{m}$ 程度に留めた。一方、 $w_{py0} = 12.5 \mu\text{m}$ まで集光可能であるが、Fig. 5 に示すように Nd:YVO₄ の位置を励起光の最小スポット位置からずらし、結晶内部で励起光が真円になるようにした。なお、用いた外部鏡の曲率半径が 100 mm であり、結晶端面でのレーザースポット半径は $130 \mu\text{m}$ 程度であるため励起光はレーザー光モード面積以下になっている。レーザー光の実効モード断面積は $S_{\text{eff}} = 5.31 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ であるため、吸収励起パワーが 660 mW であれば (10) 式より励起光強度は $I_p = 1.24 \text{kW/cm}^2$ となり、不飽和利得は (9) 式より $g_0 = 0.66$ であるため、共振器残留損失 L_i が 1.76% であれば (11) 式より最適透過率は $T = 13.5\%$ 、その出力は (14) 式より $P_o^{\text{max}} = 373$

Fig. 6 Input-output power characteristics of a Nd:YVO₄ laser.

Fig. 7 Output power (●) and laser threshold power (▲) versus mirror transmission with the parameter of internal loss in the Nd:YVO₄ laser. These experimental results are in good agreement with designed value (lines).

mW となる。透過率が $T = 6.0\%$ であれば (13) 式より $P_o = 347 \text{mW}$ が期待される。

Fig. 6に、レーザー発振の入出力特性を示す。ここで、励起光の吸収量を入力としている。出力鏡透過率が 1.1% のときレーザー発振閾値は約 14.4 mW でスロープ効率が 29.0% であったのに対して透過率を 6.0% にしたとき発振閾値が約 44.6 mW、スロープ効率 58.0%、吸収励起パワー 660 mW 時に最大出力 360 mW を得た。この値は、先の設計値に良く一致している。出力光の拡がり角は約 $3.1 \times 3.2 \text{mrad}$ とほぼ等しく、M² は 1.00×1.02 と、TEM₀₀ の基本モードに近

い出力が得られた。この実験結果より共振器の残留損失を求めたところ $L_i=1.76\%$ と推定される。さらに、不飽和利得と発振閾値の関係より、吸収励起パワーが660 mW時の不飽和利得は $g_0=0.68$ と推定される。したがって実験的には最適透過率は $T=13.7\%$ と、本手法による設計値とほぼ同一の値が得られた。

次に、Fig. 7にレーザー出力と発振閾値の出力鏡透過率依存特性の測定結果を示す。ここでは、共振器の残留損失をパラメータとした。図中の実線は(13)式より求めたレーザー出力の設計値であり、破線は(12)式より求めたレーザーの発振閾値の設計値である。レーザー出力、発振閾値ともに設計段階でかなりの精度で予測できることが確認された。また、図よりもレーザー出力は、出力鏡透過率が4%近くからほぼフラットな特性を示すため、 $T=6.0\%$ の状態でも最適な動作に近い状態が実現できた。従って、本手法に基づいた設計により、低閾値、高効率のLD励起固体レーザーが実現できた。

4. むすび

以上、LD端面励起型の固体レーザーの設計法として M^2 因子を用い励起光源の特性を記述することを試みた。これにより、ブロードエリアのLDや光ファイバーからの高次横モード光をガウシアン光として取り扱えるため、励起光学系の設計やレーザー共振器の設計が容易になる。次に、励起光とレーザー光のモードサイズを一致させ高効率動作を得る設計条件を導いた。

今回の実験では励起光の M^2 因子をレーザー結晶まで保持できる集光光学系を検討した。その結果、LDに近接した領域でコリメートすれば M^2 が増大しないことがわかった。その結果アナモルフィックプリズム法を用いなくともコンフォーカル長が長い微小面積の真円の励起パターンが得られた。励起光の集光径を約70 μm に抑え、レーザー光モードとのマッチングを良くすることにより高効率化を図った。その結果、 M^2 因子が1.0程度で閾値44.6 mW、スローブ効

率58.0%、励起入力660 mWにおいて最大出力360 mWとTEM₀₀の基本横モードで低閾値かつ高効率のLD励起Nd:YVO₄小型レーザーが実現できた。これにより本設計手法の有用性が確認された。

なお、ここでは、例として単体のLDを用いて最適設計を行ったが、本手法は、高次横モード光をガウシアン光として取り扱えるため、複数のLDや光ファイバーを組み合わせた光源による端面励起固体レーザーの設計も可能である。

謝辞

研究に協力いただいた本研究室の古畑充由君、また、(株)応用光電研究室の茂木哲哉氏、ならびに有益なご助言をいただいた東北大学の伊藤弘昌教授に感謝いたします。なお、本研究は科学研究費補助金重点領域研究(課題番号50216595)により行われた。

付録A M^2 因子による高次横モード光の取り扱い

高次横モードのスポット半径 $w_p(z)$ はTEM₀₀の基本横モードのスポット半径 $w(z)$ のM倍であるとした場合、

$$w_p(z) = Mw(z) \quad (\text{A1})$$

と書ける。 $w(z)$ は基本横モード光であることより

$$w_p(z) = Mw_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_p z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (\text{A2})$$

である。ここで、 w_0 は基本横モード光の最小スポット半径である。そこで、高次横モード光の最小スポット半径を $w_{p0} \equiv Mw_0$ として上式を書き改めるなら

$$w_p(z) = w_{p0} \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda_p z}{\pi w_{p0}^2} \right)^2} \quad (\text{A3})$$

となる。高次横モード光はTEM₀₀の基本横モードに比べスポット径がM倍のガウシアン光であるとして取り扱うことにより、本文の(1)式が導出された。

付録B 光ファイバー出力のM²因子の推定

高出力LDの中には光ファイバー出力のものも多く、そのようなLDに本設計手法を適用するためにM²因子を知る必要がある。光ファイバーの開口数NA及び直径φより

$$M^2 = \frac{n\pi\phi}{2\lambda} \tan\{\sin^{-1}(NA)\} \approx \frac{n\pi\phi(NA)}{2\lambda} \quad (\text{B1})$$

と推定できる。

参 考 文 献

- 1) A. E. Siegman: SPIE Proc. Vol. 1224 Optical Resonators (1990).
- 2) T. F. Johnston, Jr.: Laser Focus World 26 (1990) 173.
- 3) D. Wright, P. Greve, J. Fleischer and L. Austin: Optical and Quantum Electron. 24 (1992) S993.
- 4) T. Y. Fan and A. Sanchez: IEEE J. Quantum Electron. QE-26 (1990) 311.
- 5) T. Y. Fan: Appl. Opt. 30 (1991) 630.
- 6) D. Kopf, J. Aus der Au, U. Keller, G. L. Bona and P. Roentgen: Opt. Lett. (1995) 1782.
- 7) T. Y. Fan and R. L. Byer: IEEE J. Quantum Electron. QE-23 (1987) 605.
- 8) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering (Springer-Verlag, 1992) 198.
- 9) W. P. Risk: J. Opt. Soc. Am. B5 (1988) 1412.
- 10) J. J. Snyder, P. Reichert and T. M. Bear: Appl. Opt. 30 (1991) 2743.
- 11) J. J. Snyder: SPIE Proc. Vol. 1992 Miniature and Micro-Optics and Micromechanics (1993).
- 12) 鈴木剛, 柴田章光, 平等拓範, 小林喬郎: 第56回応用物理学会学術講演会予稿集 27aD10 (1995) 843.

1) A. E. Siegman: SPIE Proc. Vol. 1224 Optical