

研究

パルス固体レーザーの直交偏光注入による 単一モード動作法

平等 拓範・尾岸 久隆・小林 喬郎

福井大学工学部電子工学科 〒910 福井市文京 3-9-1

(1992年5月18日受付, 1992年7月30日受理)

Single Mode Oscillation of Pulsed Solid State Lasers by a Cross Polarization Method of Injection Seeding

Takunori TAIRA, Hisataka OGISHI and Takao KOBAYASHI

Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1, Bunkyo, Fukui 910

(Received May 18, 1992; Accepted July 30, 1992)

The advantages of single axial mode Q-switched high peak power Nd: YAG lasers for nonlinear optics and high resolution spectroscopy are well recognized. Injection seeding is a useful method for single frequency oscillation of Q-switched lasers. There are several practical seeding techniques for electro-optically Q-switched Nd: YAG lasers. In this paper, we demonstrated a newly developed cross polarization method for efficient injection seeding by the LD pumped Nd: YVO₄ microchip master laser for the acousto-optically Q-switched Nd: YAG slave laser. The average output power of 1.8 W with the corresponding peak power of 23 kW was achieved at a repetition rate of 1 kHz and the detuning range of 203 MHz was close to the axial mode separation of 220 MHz in the slave laser cavity.

1. まえがき

单一モード発振で高安定な高出力固体レーザーは、超高感度の光計測やコヒーレント光通信および非線形光学や高分解能分光などの広い分野での応用が期待されている^{1,2)}。光注入同期法の一種であるインジェクションシーディング法（以下シーディング法と略す）は、低出力のマスターレーザーにより高出力Qスイッチ動作のパルスレーザーを单一モード化、高安定化する有効な方法として考えられ、研究、開発が進められている。しかしながら、これまでの方法では、マスターレーザー光を高効率に注入するために電気光学（EO）Qスイッチを用いたパルスレーザーが主に利用されていた。しかし、EO-Qスイッチは一般に高電圧を用いるため高パルス繰返し動作が困難で、光損失も大きいという欠点がある³⁻⁵⁾。これに対し音響光学（AO）Qスイッチは、高繰返し動作が可能で光損失も小さいが、シーディング動作には注入効率の極めて低い後部鏡からの注入法に限定されてい

た。

そこで本論文では、まず、半導体レーザー（LD）励起の波長可変、单一モード発振のNd: YVO₄マイクロチップレーザー¹¹⁾をマスターレーザーとして用い、また高パルス繰返し動作の可能なAO-Qスイッチを用いたCW放電管励起Nd: YAGレーザーのシーディング法について種々の方式を比較検討した。次に、これまで不可能とされていた偏光直交型の注入法について実験を行い、極めて高効率のシーディング動作を初めて実現した。

2. インジェクションシーディングの 最小必要光電力

高出力パルスレーザーは、一般に励起が強いため利得も高く、その利得幅内に多数の光共振器縦モードが許容され、不安定な多モード発振状態となる。シーディング動作では、高安定、单一モード発振のマスターレーザー光を注入することにより、この高出力パルススレーブ

レーザーの単一モード化を可能とするものである。

Fig. 1 にシーディングのスペクトル特性の概念図を示す。スレーブレーザーは Nd: YAG レーザーで、蛍光の半値幅は約 180 GHz であり、共振器長が 68 cm の場合には周波数間隔 220 MHz で約 800 本の縦モードが許容される。マスターレーザーからの注入電界は、スレーブレーザー共振器内の j 番目の縦モードの電界と周波数が近接しているためにモード結合するが、他のモード k ($k \neq j$) とは十分に離れているためモード結合はしないと仮定する。また、モード k の電界は、自然放出光雑音が種となって成長し、モード j の電界と競合するものと考える。このとき、各モードの利得分布は均一で利得結合していると仮定する。シーディング動作は、モード j の電界を早く成長させ、利得を消費して、他のモードの利得をレーザー発振閾値以下に抑制することにより単一モード発振が実現される。このためには、注入光電力が各モードの自然放出光電力よりも十分大きなければならない。発振の種になる自然放出による光子が蛍光幅内に存在する共振器の全てのモードに均等に分配されると考える。励起により生成される全反転分布数 N は $N = \eta_q P_p t / h\nu_p$ で与えられる。このとき、 η_q は吸収の量子効率、 P_p はスレーブレーザーの励起光電力、 $h\nu_p$ は励起光のフォトンエネルギーである。CW 動作の場合、励起時間 t はレーザーの上準位寿命 τ に一致することより、シーディングに必要な最小注入光電力は次式で与えられる^{3,6)}。

$$P_m > \frac{c\lambda^2 \eta P_p}{8\pi \Delta\nu V} \quad (1)$$

ここで、 P_m はスレーブレーザー共振器内での注入光電力、 η は量子効率を含めた励起効率、 V はレーザーモード体積、 $\Delta\nu$ は蛍光半値幅である。今回実験に用いた CW 励起 Nd: YAG レーザーの場合、 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 、 $\eta = 2.2\%$ 、 $P_p = 4 \text{ kW}$ 、 $V = 7.69 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ であり、これを(1)式に代入すると $P_m = 8.6 \text{ nW}$ となり、非常に低電力の注入でもシーディングが可能なことが期待され

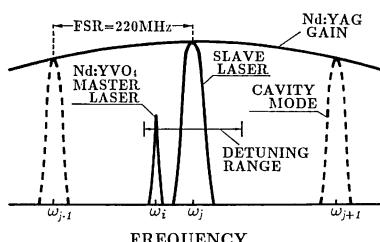


Fig. 1 Frequency spectra of the slave laser cavity modes and the master laser.

る。

一般に CW 発振のスレーブレーザーに対する光注入同期法であるインジェクションロッキング動作^{7,8)}では、発振周波数をマスターレーザー発振周波数に引き込む必要があるため、大きな注入光電力が必要なだけでなく、スレーブレーザー光とマスターレーザー光の偏光方向を含めた横モードの厳密な一致が必要である。しかし、シーディング動作の場合、注入光はスレーブレーザー共振器のあるモードを選択し、成長させるための種となるだけなので、インジェクションロッキング動作に比べて必要な注入光電力も 2~3 衍低く、また偏光や空間的なモードマッチング条件も緩くなると考えられる。

3. 後部鏡注入によるシーディング実験

3.1 装置構成

Fig. 2 に後部鏡より注入したシーディング実験の装置構成を示す。安定に单一モード発振が可能なマスターレーザーとして LD 励起 Nd: YVO₄ マイクロチップレーザーを用いた¹¹⁾。Nd: YVO₄ 結晶は Nd: YAG 結晶と比較して 800 nm 付近の吸収係数が 5~10 倍大きいため、結晶長を短くすることができます^{9,10)}、蛍光利得スペクトルの半値幅内に共振器の縦モードが 1~2 本しか許容されない短い間隔の共振器が構成でき、低損失で高安定な单一モード発振が可能になる。また吸収スペクトル幅が約 2.8 nm と Nd: YAG に比べ 1.9 倍広く、LD 励起光とのスペクトルマッチングが容易となるため、マイクロチップレーザー材料として適している¹²⁾。

試作したマイクロチップレーザーは、サイズ 3×3 mm² で、厚みが 500 μm の Nd: YVO₄ 結晶 (Nd 原子数濃度 1.1%) の両端面にミラーコーティングを施し、レーザー共振器とした。励起には最大出力 200 mW の LD (Sony 製、SLD 302 XT 型) を用い、ペルチェ素子で発振波長が 809 nm になるように温度制御を行った。レーザー発振閾値は 26.9 mW、スロープ効率は 27.4% で、励起 165 mW のときに最大出力 35.3 mW、单一モード発振では 26.7 mW の高効率、高出力特性が得られた。出力光のビーム形状は円形の TEM₀₀ モードで、広がり角は約 7 mrad であった。

また、このマイクロチップレーザーは結晶温度により結晶長と屈折率が変わり、蛍光スペクトル幅内で連続的に発振周波数可変となる。発振周波数の温度係数は $d\nu/dT = -1.60 \text{ GHz/K}$ であり、室温より約 35 K 上昇させることにより Nd: YAG の中心周波数に同調した。この時、温度分解能約 0.001 K で制御を行ってレーザー

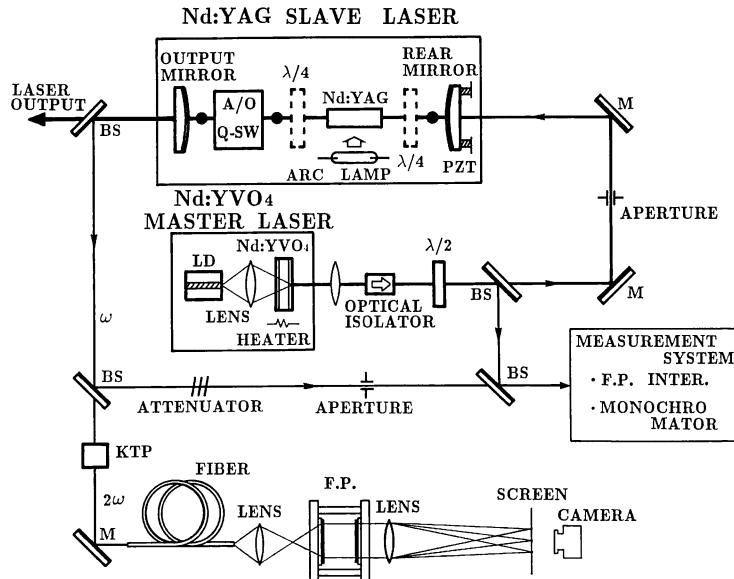


Fig. 2 An experimental setup of the Nd: YAG laser seeded from the rear mirror.

発振周波数を安定化した。

スレーブレーザーには高速繰返しQスイッチ動作の可能な放電管 CW 励起の Nd: YAG レーザー（日本電気製、SL 115 L 型）を用いた。共振器長は 68 cm, ロッド寸法は $3 \text{ mm} \phi \times 65 \text{ mm}$, ビーム径は約 $1.2 \text{ mm} \phi$ であった。AO-Q スイッチを用いて、繰返し周波数 1 kHz, 励起電流 30 A のとき波長 1064 nm の尖頭出力として 23 kW, パルス幅 90 ns, 平均出力 1.8 W が得られた。

マスター レーザーからの注入光はコリメートレンズと光アイソレータを通して後部鏡よりスレーブレーザー内に導かれる。スレーブレーザーでは Qスイッチ部の偏光板により、紙面に対して垂直方向の偏光のみが許容される。なお、注入光の偏光方向は $\lambda/2$ 板により制御する。

また、Qスイッチが開いてから発振が開始するまでの遅延時間が最小になるように、後部鏡の位置を PZT で制御して共振周波数を変えることによりシーディングの安定化を行った。

3.2 実験結果

スレーブレーザーは空間的ホールバーニングを低減させるため YAG ロッドの両側に $\lambda/4$ 板を配置し、ツイストモード型の共振器構成で動作させた¹³⁾。まず、マスター レーザーからの注入光の偏光方向がスレーブレーザーの偏光方向と平行になるように $\lambda/2$ 板で調整した。この状態で、出力のシーディング動作が達成される割合、すなわち注入同期効率の注入光電力依存特性を測定した。スレーブレーザーの励起電流比（アーカランプの

放電電流 I とレーザー発振閾値電流 I_{th} の比） $I/I_{\text{th}} = 1.31$ で、基本波の尖頭電力は 23 kW であった。このとき、スレーブレーザー共振器内における注入光電力が 15.1 nW で注入同期効率 10%, 190 nW のとき 50%, 470 nW では 90% のシーディングが達成された。すなわち、2章で示されたように、極めて低い注入光電力でもシーディングが可能なことが実験的にも確認された。 $I/I_{\text{th}} = 1.15$ のときの測定値とを併せて Fig. 3 に示す。これより励起電流が大きい方がシーディングが容易であることが確かめられた。これはこれまでの実験とも一致する傾向である⁶⁾。

Fig. 4 にスレーブレーザーの出力パルス波形を示す。レーザー発振までの遅延時間はシーディングがかからなければ 102 ns 短くなることがわかる。ただし、パルス幅には変化は見られなかった。ここでは安定にシーディングをか

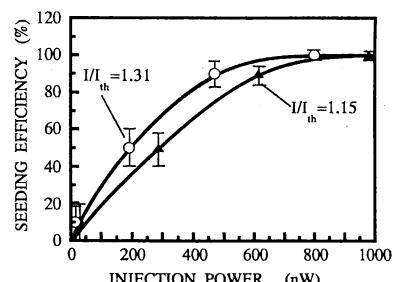


Fig. 3 Injection seeding efficiency as a function of injection power.

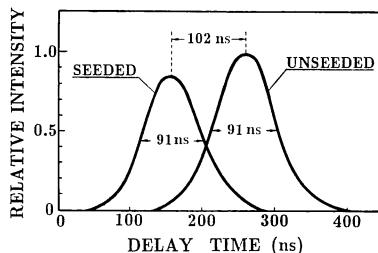


Fig. 4 Temporal behaviors of the slave laser output.

けるため注入光電力を $150 \mu\text{W}$ と高めて測定を行った。

また、波長 1064 nm のスレーブレーザー出力を KTP 結晶により可視域の 532 nm の第 2 高調波 (SH 波) に変換し、FSR 3.0 GHz 、フィネス 20 の FP 干渉計にリニヤラインセンサーを組み合わせて出力光のスペクトル状態を観測した。Fig. 5 に出力スペクトルを 100 ショット重ね合わせた場合の干渉リング形状を示す。同図 (a) はシーディングを行わない状態であり、干渉リングは確認できない。これに対し (b) 図はシーディングした状態であり、单一モード発振していることが確認できる。

次に、スレーブレーザー内の 2 枚の $\lambda/4$ 板を取り除き定在波型共振器構成とした場合でも注入光電力 400 nW で 50% 、 900 nW では 90% となり、注入同期効率が低下するが $1 \mu\text{W}$ 以下の注入光電力でもシーディングが実現されることが確認された。

一般に、シーディング動作ではスレーブレーザーの発振周波数は注入光周波数と完全には一致せず、最も近い共振器モード周波数が選択されて発振する。Fig. 6 に離調幅の注入光電力依存特性を示す。ここで離調幅は、注入光とスレーブレーザーの光周波数差の最大幅で、マスター レーザーの発振周波数を安定化し、スレーブレー-

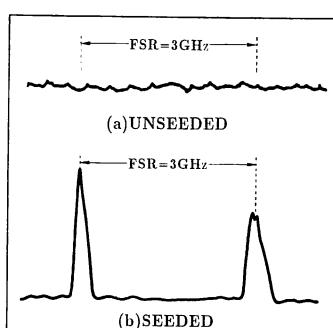
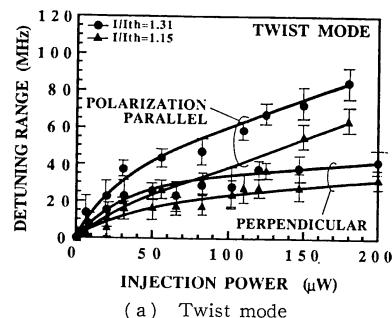
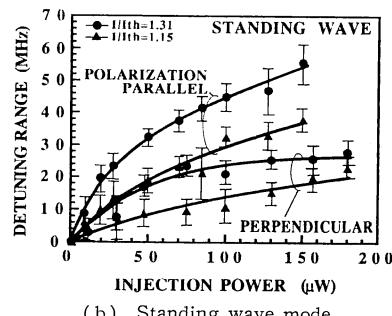


Fig. 5 Frequency spectra of the slave laser observed by a Fabry-Perot interferogram of the slave laser output. (100 shots, FSR = 3.0 GHz , Finesse $F = 20$)



(a) Twist mode



(b) Standing wave mode

Fig. 6 Detuning ranges as a function of injection power by the rear mirror injection method.

ザーの発振周波数をスキャンした場合に 90% 以上の注入同期効率が達成される領域として定義した。同図 (a) はツイストモード型、(b) は定在波型でスレーブレーザーを動作させている。また、スレーブレーザーの偏光方向に対して注入光の偏光方向を変えてシーディング実験を行った。Fig. 6 (a) よりスレーブレーザー光と注入光の偏光方向を平行としたとき、励起電流比が 1.31 の場合、 $150 \mu\text{W}$ の注入光電力に対して約 73 MHz の離調幅が得られることがわかる。

次に、注入光の偏光を直交とした場合でも注入光電力 $150 \mu\text{W}$ で約 35 MHz の離調幅が得られた。Fig. 6 (b) より定在波型の場合でもシーディング動作が可能であり、ツイストモード動作の場合と同様に偏光を直交させてもシーディング動作が可能なことがわかる。すなわち、これらの結果より從来、シーディング動作を行う場合、偏光方向を含めた二つのレーザーモードの厳密な整合が必要条件とされていたが、これらの条件の制限が極めて緩いことが確認された。また、どちらの場合にも励起電流比が大きいほど、同じ注入光電力でも離調幅が広くなることが確認できた。

しかし、離調幅が最大の時でもスレーブレーザーの縦モード間隔 220 MHz の $2/3$ 程度はシーディングが得られず、单一モード化されない不安定な領域である。こ

れは後部鏡注入法では、鏡の反射率が98%と高いため注入光電力のうち共振器内に取り込まれる注入効率が2%と極めて低くなり、共振器内に注入される光電力が極めて小さくなることに起因している。

4. 直交偏光注入法によるシーディング実験

次に、注入光の偏光方向がスレーブレーザーの偏光方向と直交していてもシーディング可能なことより、注入光を後部鏡からではなくスレーブレーザー共振器内の偏光ビームスプリッタ(PBS)を通して導くことを試みた。

Fig. 7 に直交偏光注入法によるシーディングシステムの構成を示す。基本的構成は **Fig. 6** の装置と変わらないが、この場合には高効率に注入するため、注入光の偏光方向は紙面に対して水平、すなわちスレーブレーザーの偏光方向と直交させている。なお、この構成では後部鏡の損失が少ないので、前節の実験と同じ出力を得る励起電流比は1.21および1.10と低下した。励起電流比1.21でスレーブレーザーがツイストモード型共振器の場合、注入電力0.25 μWで50%，0.50 μWで90%の注入同期効率が得られた。また、定在波型の場合でも1.6 μWで50%，2.9 μWで90%の注入同期効率が得られた。後部鏡注入によるシーディングに比べると、注入同期効率はやや低下するもののシーディング光の注入効率はほぼ90%に高まる。

Fig. 8 に直交偏光注入法での離調幅の注入光電力依存特性を示す。定在波型で励起電流比が1.21の場合、注入光電力が7.4 mWで89 MHz、ツイストモード型の場合では、注入光電力が7.0 mWで離調幅は203 MHzと大幅に広がることがわかった。すなわち、レー

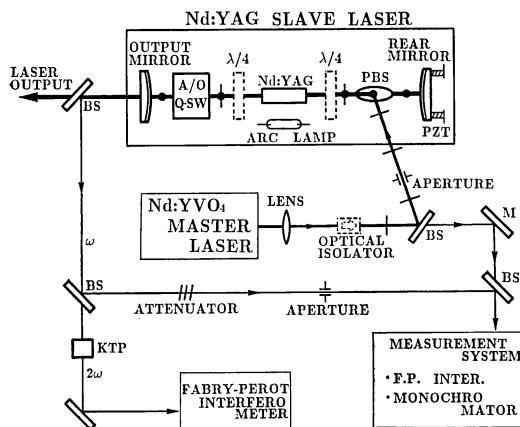


Fig. 7 An experimental setup of the Nd:YAG laser seeded by the cross polarization method.

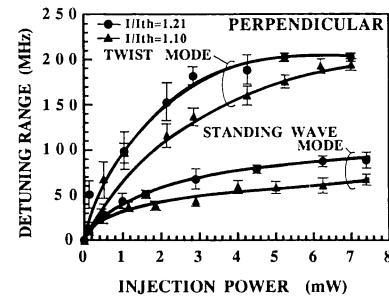


Fig. 8 Detuning ranges as a function of injection power by the cross polarization method.

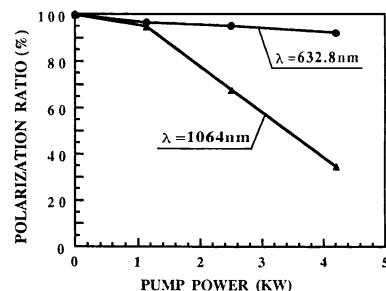


Fig. 9 Degrees of polarization of light (polarization ratio) as a function of pumping power for two wavelengths.

ザースペクトルの縦モード間隔の約90%がシーディング可能となり、中間の17 MHzだけが不安定な領域であった。また、励起電流比が低くなるときには離調幅が狭くなる傾向は同じであった。

ここで、注入光の偏光方向が直交していてもシーディング動作が可能な理由として、励起による発熱に起因するNd:YAGロッドの熱複屈折効果が原因と考えられる。これを解明するために、**Fig. 9**にHe-Neレーザー光(632.8 nm)を用いてランプ励起電力を変えた場合の偏光度を測定した結果を示す。図より最大励起でも偏光度は92%と高く、ほぼ直線偏光のままであることがわかる。次に、マスター レーザー光(1064 nm)を用いて偏光度を測定したところ、ほぼ34%まで低下することがわかった。これらのことより、励起による発熱に起因したNd:YAGの複屈折効果により注入光の偏光が乱れ、これがロッド内で増幅し共振器の縦モードと結合するものと結論される。

さらに、光アイソレータの代りに直径1 mmの開口を挿入し、注入光の光軸を1 mradだけ傾けて注入する簡易注入法を試みた。この結果、100 μWの注入電力でシーディング動作が認められ、200 μWの場合には平行偏光のとき約70 MHz、直交偏光でも約30 MHzの離調

幅が得られた。

5. む　す　び

以上、コヒーレントライダーや超高分解光計測光源等への適用を目指して、高繰返し可能な CW 放電管励起 AO-Q スイッチ型 Nd : YAG レーザーの高効率インジェクションシーディング法について検討を加えてきた。

まず、後部鏡注入によるシーディング実験を行い、基本特性を求めた。その結果、シーディングには $1 \mu\text{W}$ 以下の低注入光電力で十分であり、注入光とスレーブレーザーの偏光方向が直交していてもシーディング動作が可能なことがわかった。

次に、共振器内の PBS よりマスターレーザー光を注入する直交偏光シーディング法を検討した。その結果、注入光電力 $150 \mu\text{W}$ と微小でもツイストモード構成ではシーディングの離調幅は後部鏡注入法に比べ約 2 倍の 203 MHz に達した。これは、縦モード間隔 220 MHz の約 90% に相当する値である。また、スレーブレーザーを定在波構成にした場合でも約 90 MHz の離調幅を得ることができた。さらに、開口を用いて注入光の光軸を傾けて入れることによってもシーディングが可能なことが確認され、高価な光アイソレータを使用しなくとも、低注入光電力で広帯域に单一モード化が可能であることが実証された。

文　献

- 1) S.W. Henderson, C.P. Hale, J.R. Magee, M.J. Kavaya and A.V. Huffaker: "Eye-safe coherent laser rader system at $2.1 \mu\text{m}$ using Tm, Ho : YAG lasers," Opt. Lett., **16** (1991) 773-775.
- 2) 河島信樹: "重力波検出用レーザー干渉計", 応用物理, **60** (1991) 919-923.
- 3) T. Okada, M. Maeda and Y. Miyazoe: "Spectral narrowing of a flashlamp-pumped high-energy dye laser by two-stage injection locking," IEEE J. Quantum Electron., **QE-15** (1979) 616-623.
- 4) Y.K. Park, G. Giuliani and R.L. Byer: "Single axial mode operation of a Q-switched Nd : YAG oscillator by injection seeding," IEEE J. Quantum Electron., **QE-20** (1984) 117-125.
- 5) E.S. Fry, Q. Hu and X. Li: "Single frequency operation of an injection-seeded Nd : YAG laser in high noise and vibration environments," Appl. Opt., **30** (1991) 1015-1017.
- 6) 平等拓範, 尾岸久隆, 小林喬郎: "光シーディングによるパルスレーザーの単一モード選択法", 電子情報通信学会論文誌, **J 75-CI** (1992) 415-421.
- 7) 霜田光一, 矢島達夫 編著: 量子エレクトロニクス (上) (裳華房, 1972) pp. 70-242.
- 8) C.D. Nabors, A.D. Farinas, T. Day, S.T. Yang, E.K. Gustafson and R.L. Byer: "Injection locking of a 13-W cw Nd : YAG ring laser," Opt. Lett., **14** (1989) 1189-1191.
- 9) G.J. Kintz and T. Baer: "Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths," IEEE J. Quantum Electron., **QE-26** (1990) 1457-1459.
- 10) 小島哲夫, 佐々木孝友, 中井貞夫, 桑野泰彦: "LD 励起マイクロチップ固体レーザー", レーザー研究, **18** (1990) 646-651.
- 11) T. Taira, A. Mukai, Y. Nozawa and T. Kobayashi: "Single mode oscillation of laser diode-pumped-Nd : YVO₄ microchip lasers," Opt. Lett., **16** (1991) 1955-1957.
- 12) 小林喬郎, 平等拓範: "LD 励起 Nd : YVO₄ レーザーの高機能化", 平成 4 年電気学会全国大会講演論文集, S. 7-5 (1992) pp. 17-20.
- 13) V. Evtuhov and A.E. Siegman: "A twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity," Appl. Opt., **4** (1965) 142-143.