

直交偏光注入法による固体レーザーの同期法

平等 拓範* 尾岸 久隆* 小林 喬郎*

A Crossed Polarization Type Injection Seeding Method for Solid State Lasers

Takunori TAIRA, Hisataka OGISHI, and Takao KOBAYASHI

(Received Feb. 29, 1992)

The injection seeding is a useful method for single frequency oscillation of Q-switched lasers. In this paper, we have demonstrated a crossed polarization type injection seeding method of the acousto-optically Q-switched Nd:YAG slave laser by the LD pumped Nd:YVO₄ micro-chip master laser. 1.83 W average output power with 22.8 kW peak power was achieved at 1 kHz repetition rate. Efficient injection seeding operation was realized using the crossed polarization type injection seeding method and a detuning range was extended to 203 MHz, which is closed to the axial mode separation of the slave laser cavity, 220 MHz.

1. まえがき

近年、高出力で高安定かつスペクトル幅の狭い、いわゆる高コヒーレントなレーザーは、超高感度の光計測やコヒーレント光通信、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)}。光注入同期法の一つ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、低出力のマスタレーザにより高出力Qスイッチ動作のパルスレーザを単一モード化し、高安定化を実現する方法として考えられている。しかしながら、これまでの方法では、マスタレーザ光を高効率に注入するために電気光学（EO）Qスイッチ型パルスレーザが主に利用されていたが、EO-Qスイッチは一般に高電圧を用いるため高パルス繰り返し動作が困難で、光損失も大きいという欠点がある。

* 電子工学科

あった³⁻⁵⁾。これに対し音響光学(AO)Qスイッチは高繰り返し動作が可能で、光損失も少な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、単一モード発振のNd:YVO₄マイクロチップレーザー¹²⁾をマスターレーザーとして用い、また高パルス繰り返し動作可能なAO-Qスイッチを用いたCW放電管励起Nd:YAGレーザーをスレーブレザーとして、そ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的に検討を加え、極めて高効率のシーディングを可能とした。

2. インジェクションシーディングの光電力

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縦モードが許容され、不安定な多モード発振状態となっている。インジェクションシーディングでは、この高出力パルスレーザーをスレーブレザーとし、高安定、単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スレーブレザーの単一モード化を計る。

図1にインジェクションシーディングのスペクトル特性の概念図を示す。スレーブレザーは蛍光半値幅約180GHzのNd:YAGレーザーであり、長さ76cmの共振器内には間隔220MHzで約600本の縦モードが許容されている。マスターレーザーからの注入電界は、スレーブレザー共振器内の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≠j)とは十分に離れているためモード結合はしないと考える。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する。このとき、各モードの利得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しきい値以下に抑制することが基本的に必要である。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くなければならない。自然放出による光子が共振器の全てのモードに均等に分配されると考えると、シーディングに必要な注入光電力は、次式で与えられる^{3,6)}。

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

ここで、 P_m はスレーブレザー共振器内での注入光電力、 P_o はスレーブレザーの励起光電力、 η は

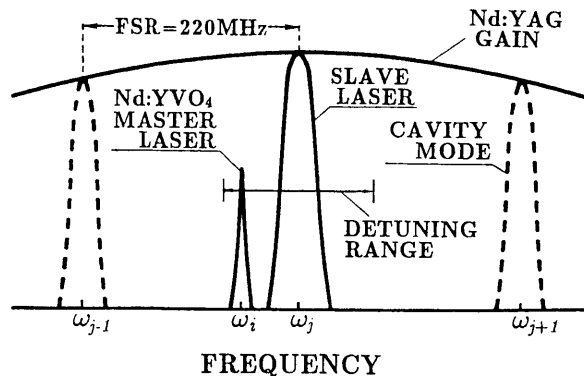


図1 インジェクションシーディングのスペクトル概念図

励起効率、 V はレーザモード体積、 $\Delta\nu$ は蛍光半値幅である。今回実験に用いたCW励起Nd:YAGレーザの場合、 $\lambda = 1.064\mu\text{m}$ 、 $\eta P_0 = 300\text{W}$ 、 $V = 2.4\text{cm}^3$ であり、これを(1)式に代入すると $P_m = 9.4\text{nW}$ となり、非常に低電力でも十分であることが分る。

一般にCW発振のスレーブレーザに対する光注入同期であるインジェクションロッキング（以下ロッキングと略す）動作では、発振周波数をマスタレーザ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、スレーブレーザ光とマスタレーザ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共振器のあるモードが選択され成長するためのきっかけとなるだけなのでロッキング動作に比べ必要な注入光電力も低く、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

図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。安定に単一モード発振が可能なマスタレーザとしてLD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザを用いた¹²⁾。Nd:YVO₄結晶はNd:YAG結晶と比較して800nm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^{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、低損失で高安定な単一モード発振が可能になる。また吸収スペクトル幅が約2.8nm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材料として適している。

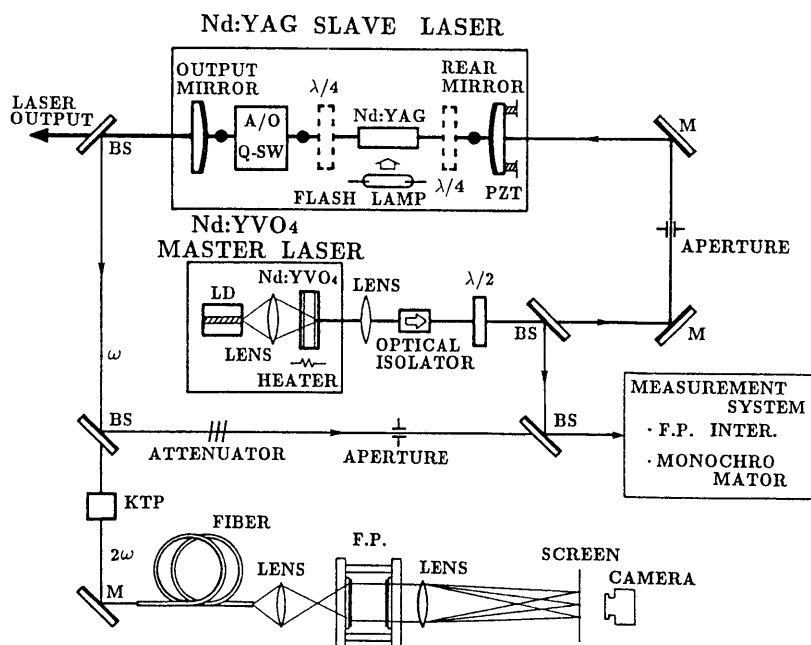


図2 後部鏡注入型シーディング装置とスペクトル計測システムの構成

試作したマイクロチップレーザは、サイズ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ で、厚みが $500 \mu\text{m}$ 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、レーザ共振器とした。励起には最大出力 200mW の LD (Sony 製, SLD302XT 型) を用い、バルチエ素子で発振波長が 809nm になるように温度制御を行った。レーザ発振閾値は 26.9mW、スロープ効率は 27.4% で、励起 165mW のときに最大出力 35.3mW、単一モード発振では 26.7mW 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 28K 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 0.001K で制御を行ってレーザ発振周波数を安定化した。

スレーブレーザには高速繰り返し可能な放電管 CW 励起の Nd:YAG レーザ (日本電気製, SL115L 型) を用いた。共振器長は 68cm、ロッド寸法は $3 \text{ mm} \phi \times 65 \text{ mm}$ 、ビーム径は約 $1.5 \text{ mm} \phi$ であった。A-O-Q スイッチを用いて、繰り返し周波数 1kHz、励起電流 30A のとき波長 1064nm の尖頭出力として 22.8kW、パルス幅 90ns、平均出力 1.83W が得られた。

マスターレーザ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内に導かれる。スレーブレーザでは 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。まず、マスターレーザからの注入光の偏光方向がスレーブレーザ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頻度、すなわち注入同期確率の注入光電力依存特性を測定した。スレーブレーザの励起電流比 (フラッシュランプ励起電流 I とレーザ発振閾値電流 I_{th} の比) $I/I_{th} = 1.31$ で、基本波の尖頭電力は 22.8kW、平均出力は 1.83W であった。このとき、スレーブレーザ共振器内における注入光電力が 150nW で同期確率 50%、470nW では 90% で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かかることが実験的にも確認された。

図 3 にスレーブレーザの出力パルス波形を示す。レーザ発振までの遅延時間はシーディングがかかれば 102ns 小さくなることが分る。ただし、パルス幅には変化は見られなかった。このときの注入光電力は $150 \mu\text{W}$ であった。

また、波長 1064nm のスレーブレーザ出力を KTP 結晶により可視域の 532nm の第 2 高調波 (SH 波) に変換し、FSR 3.0GHz、フィネス 20 の FP 干渉計にリニヤラインセンサを組合わせて出力光のスペクトル状態を観測した。図 4 に出力スペクトル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、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、単一モード発振していることが確認できる。

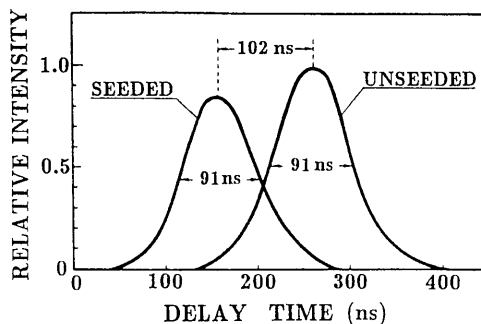


図3 レーザ出力パルス波形

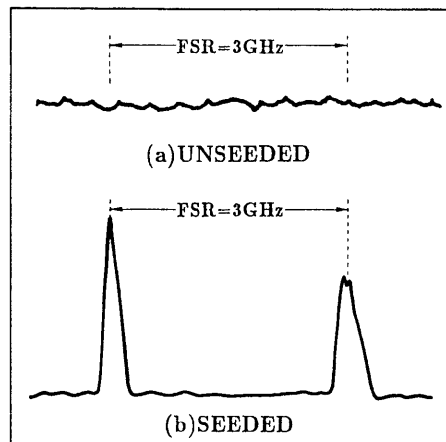
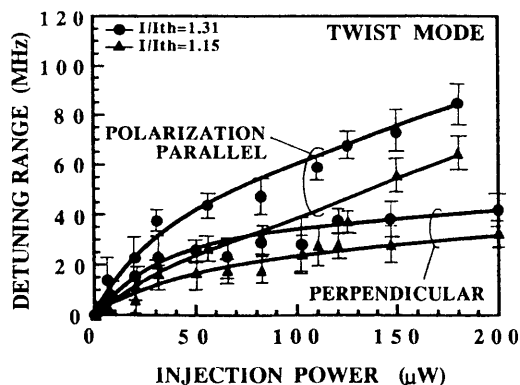


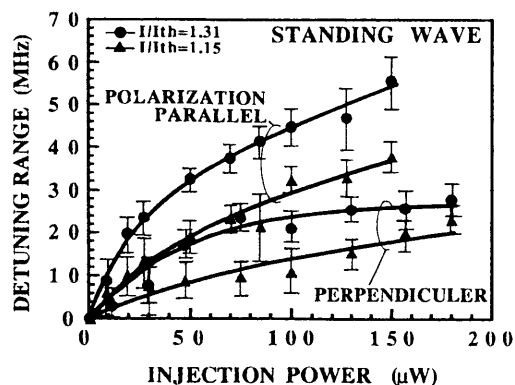
図4 出力スペクトルの干渉リング形状

次に、スレーブレーザ内の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400nWで50%，900nWでは90%となり，同期確率が低下するが $1\mu\text{W}$ 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．図5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の光周波数差の最大幅で，90%以上の同期確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を動作させている．また，スレーブレーザ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．図5(a)よりスレーブレーザ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73MHzの離調幅が得られることが分る．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35MHzの離調幅が得られた．図5(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が分る．すなわち，これらの結果より従来，シーデ



(a) ツイストモード



(b) 定在波モード

図5 後部鏡注入型での離調幅の注入光電力依存特性

イング動作を行う場合、偏光方向を含めた2つのレーザ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程、同じ注入光電力でも離調幅が広がることが確認できた。

しかし、離調幅が最大でもスレーブレザの縦モード間隔220MHzの2/3程度はシーディングが得られず、単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、共振器内の注入光電力が極めて小さい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ザ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ザ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。図6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。基本的構成は図5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ザ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ため、前節の実験と同じ出力を得る励起電流比は1.21及び1.10と低下した。励起電流比1.21でスレーブレザがツイストモード型共振器の場合、注入電力 $0.25\mu\text{W}$ で50%、 $0.50\mu\text{W}$ で90%の同期確率が得られた。また、定在波型の場合でも $1.6\mu\text{W}$ で50%、 $2.9\mu\text{W}$ で90%の同期確率が得られた。後部鏡注入によるシーディングに比べて、同期確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。

図7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 7.4mW で89MHz、ツイストモード型の場合では、注入光電力が 7.0mW で離調幅は203MHzと大幅に広がることが分った。すなわち、レーザスペクトルの縦モード間隔の約90%がシー

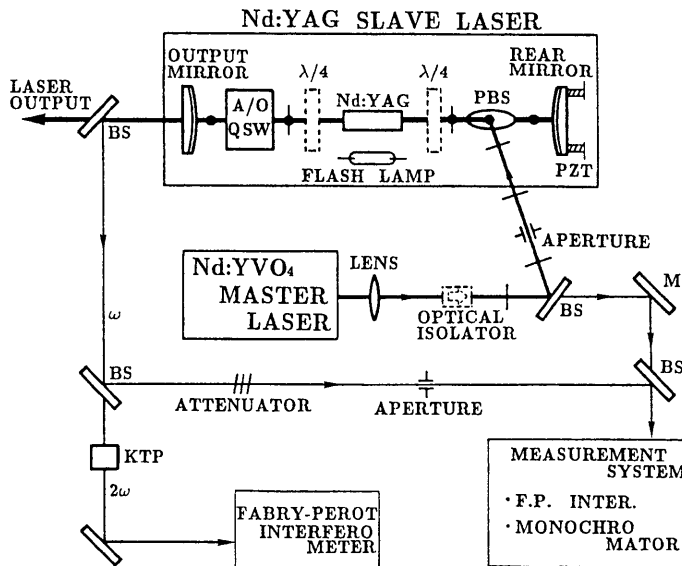


図6 直交偏光注入法シーディング装置の構成

ディング可能となり、中間の17MHz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、図8にHe-Neレーザー光(632.8nm)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分る。次に、マスタレーザ光(1064nm)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分った。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わりに直径1mmの開口を挿入し、注入光の光軸を1mradだけ傾けて注入する簡易注入法を試みた。この結果、100 μ Wの注入電力でシーディング動作が認められ、200 μ Wの場合には平行偏光のとき約70MHz、直交偏光でも約30MHzの離調幅が得られた。

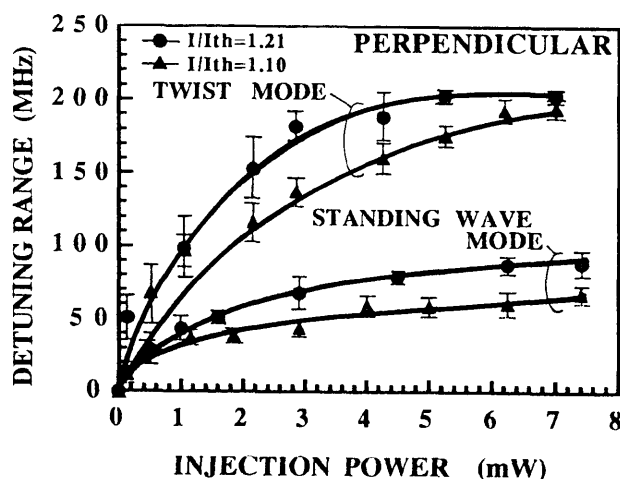


図7 直交偏光注入法での離調幅の注入光電力依存特性

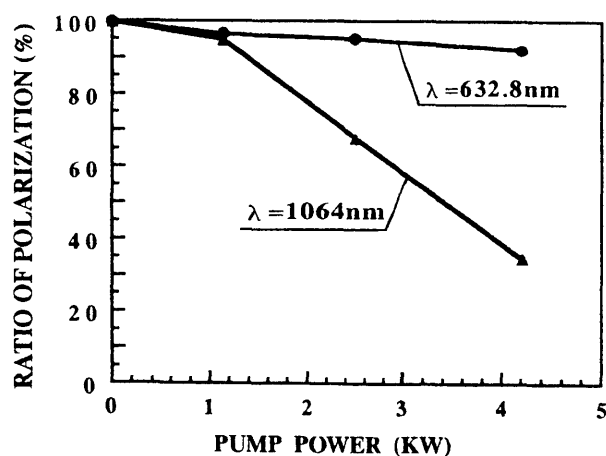


図8 偏光度の励起電力依存特性

5. まとめ

以上、コヒーレントライダや超高分解光計測等への応用に適する高コヒーレントレーザとして、高繰り返し可能なCW放電管励起AO-Qスイッチ型Nd:YAGレーザのインジェクションシーディング特性について検討を加えた。

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分った。

次に、共振器内のPBSよりマスターレーザ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203MHzに達した。これは、縦モード間隔220MHzの約90%に相当する値である。また、スレーブレーザを定在波構成にした場合でも約90MHz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単一モード化が可能であることが実証された。

<参考文献>

- 1) S.W.Henderson, C.P.Hale, J.R.Magee, M.J.Kavaya, and A.V.Huffaker: "Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 μm 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の単一モード選択法", 電子情報通信学会論文誌, J75-C1 (1992) (印刷中).
- 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) 70-242.
- 8) T.J.Kane and R.L.Byer: "Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser",

- Opt. Lett., 10 (1985) 65-67.
- 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) J.J.Zayhowski and A.Mooradian: "Single-frequency microchip Nd lasers", Opt. Lett., 14 (1989) 24-26.
 - 12) T.Taira, A.Mukai, Y.Nozawa, T.Kobayashi: "Single Mode Oscillation of Laser Diode Pumped Nd:YVO₄ Micro-Chip Lasers", Opt. Lett., 16 (1991) 1955-1957.
 - 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.

