

光注入同期によるパルス固体レーザーの 単一モード発振法

平等 拓範* 尾岸 久隆* 小林 喬郎*

Single Mode oscillation of Pulsed Solid-State Lasers by Injection Seeding

Takunori TAIRA, Hisataka OGISHI, and Takao KOBAYASHI

(Received Aug. 31, 1991)

Single frequency and high power oscillation of solid state lasers have received much attention in recent years mainly because of the potential performances in new coherent opto-electric applications. The injection seeding technique is useful method for single frequency operation of Q-switched lasers.

In this paper, fundamental characteristics are analyzed on the injection seeding of solid state lasers using semiclassical theory. This method was tested using the LD pumped Nd:YVO₄ micro-chip laser as a master laser to lock a Nd:YAG pulsed slave laser. A good agreement was obtained between theoretical and experimental results. A wide seeding spectral range of 59GHz and mode selection range of 282MHz was realized.

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固体レーザーは、高分解能で高感度の分光計測をはじめ、物理化学や工学分野での広い応用が期待されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。通常のレーザー共振器内に波長選択素子を挿入する単一モード化法は損失が大きく、レーザー出力が制限される。これに対して、スペクトルが高安定で単一モード発振のレーザー光を多モードで高出力のスレーブレーザーに注入して発振周波数を制御する注入同期法 (Injection Locking) は、高出力での単一モード化やスペクトル線幅の狭窄化に有効な方法である^{(4),(5)}。特に、パルス動作のレーザーに対する注入同期法はインジェクションシーディング法 (Injection Seeding : I S) と呼ばれ、一部

* 電子工学科

実用化も進められているが⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾、その基本動作特性の解析はほとんど進められておらず、また、マスタレーザの単一モード化や周波数安定化にも問題があった⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。

そこで我々は、コヒーレント光電子工学への応用を目指して、マスタレーザとして半導体レーザ(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を試作した⁽¹⁶⁾。また、スレーブレザとしてパルス放電管励起QスイッチNd:YAGレーザを用いてインジェクションシーディング特性を検討した⁽¹⁸⁾。本論文では、まず、レーザ基本方程式よりインジェクションシーディング条件を理論的に求め、次に、今回開発した固体レーザシステムを用いて実験的検討を加えた。その結果、安定かつ高出力、広帯域スペクトルでの単一モード発振特性を得たので報告する。

2. インジェクションシーディングの理論的解析

2.1 解析モデル

まず、インジェクションシーディング(以下ISと略す)の基本方程式を導出する。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。ここではスレーブレザとしてNd:YAG固体レーザを解析の対象とし、エネルギーレベルは理想的な四準位系とした。本実験で用いたNd:YAGの蛍光半値幅は約120GHzであるのに対し、一般的な共振器を仮定して、その長さを約50cmとした場合、縦モード間隔は300MHzとなり、蛍光幅内に許容される縦モード数は約400本となる。マスタレーザからの注入電界は、スレーブレザ共振器内の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結合し、他のモードの電界とは結合しないと仮定する。すなわち、注入電界の発振角周波数を ω_i 、スレーブレザのモードjの発振角周波数を ω_j 、隣接モード(j-1)の角周波数を ω_{j-1} とすと、 $|\omega_j - \omega_i| \ll |\omega_{j-1} - \omega_j|$ を満足するものと仮定する。また、これらの電界は平面波であり、利得は均一で各モードは利得結合(緩和)していると仮定する。また、自然放出光雑音は非同期モード電界強度に寄与するものとして検討を行う。

レーザシステムの動作特性は、半古典的理論によれば近似的に電界方程式と反転分布のレート方程式を用いて表せる。まず、モードjの電界を次式のように表す。

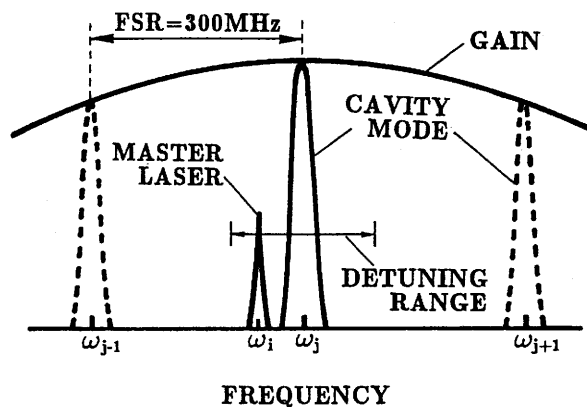


図1 インジェクションシーディングのスペクトル概念図

$$E_j = \frac{1}{2} \{ E_j(t) \exp(j \omega_j t) + c.c. \} \quad \dots(1)$$

ここで、 $E_j(t)$ は複素表示の時間変化する電界強度であるが、注入光の角周波数 ω_i で表した。この表示を用いると、IS時のレーザ方程式は、次式で与えられる^{(7)・(11)}。

$$\frac{d E_j(t)}{d t} = (G(t) + j \Delta \omega) [E_j(t) + \frac{E_i(t)}{\exp \{ 2 \tau (G(t) + j \Delta \omega) \} - 1}] \quad \dots(2)$$

また、 $G(t)$ は利得であり次式で与えられる。

$$G(t) = \frac{c \sigma L}{2 L_0} N(t) - \frac{1}{2 t_0} \quad \dots(3)$$

ここで、 $\Delta \omega = \omega_j - \omega_i$ はモードjの共振器角周波数 ω_j と注入光の角周波数との差であり、 $N(t)$ は反転分布密度、 $E_i(t)$ は共振器に注入される電界強度、 t_0 は共振器の光子寿命、 τ は共振器の片道走行時間、 L はレーザ媒質長、 L_0 は共振器長である。

次に、注入電界の位相を基準にした場合、複素表示の電界は次式で表される。

$$E_j(t) = E_j(t) \exp \{ j \psi_j(t) \} \quad \dots(4)$$

ここで、 $E_i(t)$ 、 $E_j(t)$ は位相を含まない電界強度であり、 $\psi_j(t)$ はマスタレーザに対するスレーブレーザの位相差である。これを(2)式に代入し、実数部と虚数部に分けて整理すると、電界及び位相差に対する基本方程式が得られる。

$$\frac{d E_j(t)}{d t} = G(t) E_j(t) + \frac{E_i(t)}{\exp \{ 2 \tau G(t) \} - 1} [G(t) \cos \{ \psi_j(t) \} + \Delta \omega \sin \{ \psi_j(t) \}] \quad \dots(5)$$

$$\frac{d \psi_j(t)}{d t} = \Delta \omega + \frac{E_i(t) [\Delta \omega \cos \{ \psi_j(t) \} - G(t) \sin \{ \psi_j(t) \}]}{E_j(t) [\exp \{ 2 \tau G(t) \} - 1]} \quad \dots(6)$$

また、注入光と結合しないモードk ($k \neq j$)の電界強度は、自然放出光電界 $e_s(t)$ が種になって増大するものと考え、次式で表す。

$$\frac{d E_k(t)}{d t} = G(t) E_k(t) + \frac{e_s(t) G(t)}{\exp \{ 2 \tau G(t) \} - 1} \quad \dots(7)$$

自然放出光が各モードに結合する単位時間当りの光子密度は、自然放出光の結合率 f を用いて $f N(t)/t_0$ で与えられることより、自然放出光電界は次式で与えられる。

$$e_s(t) = \left(\frac{f N(t) \hbar \omega_k}{\epsilon t_0} \right)^{1/2} \quad \dots(8)$$

ここで、 \hbar はプランク定数 ($h/2\pi$)、 ϵ は媒質の誘電率、 t_s は自然放出寿命である。また、結合率 f は自然放出による光子が蛍光帯域幅 $\Delta\omega$ 内に存在する全てのモードに均等に結合することより、全モード数の逆数として、次のように与えられる⁽⁶⁾。

$$f = \frac{\pi^2 c^3}{\omega_s^2 \Delta\omega V} \quad \dots(9)$$

ここで、 ω_s は光放出原子の中心角周波数、 V はレーザのモード体積である。

次に、反転分布のレート方程式は次式で与えられる。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\gamma c \sigma N(t) \sum_{k=1}^m S_k(t) - \frac{N(t)}{t_s} \quad \dots(10)$$

ここで、 γ は反転分布減衰係数、 m は許容される全縦モード数である。また、 $S_k(t)$ は任意のモード k の光子密度で次式で与えられる。

$$S_k(t) = \frac{\epsilon}{\hbar \omega_k} |E_k(t)|^2 \quad \dots(11)$$

以上、モード競合を含んだレーザ基本方程式が導出された。これらの連立微分方程式を解析することにより、IS動作が行われるときの位相差の時間変化、すなわち周波数差の振舞いが求められるだけでなく、IS動作に必要な注入光強度条件が求められる。

2. 2 計算結果と検討

次に、前節のIS動作のレーザ基本方程式(5)~(7)、(10)を用いて、数値計算により注入同期(Injection Locking)との特性の相違を明らかにする。

まず、電界と位相差の初期値について検討する。Qスイッチが閉じているときには、モード j の電界強度は変化しないため $dE_j(0)/dt = 0$ であり、その角周波数はマスタレーザに一致しており差は生じないため、 $d\psi_j(0)/dt = 0$ とおくことができ、電界強度の初期値は注入光電界強度に等しいと考えられる。また、注入光と結合しないモードの電界強度も $dE_k(0)/dt = 0$ として導出した。さらに、マスタレーザからの注入光は、実験条件と一致させるため、Qスイッチが閉じているときには注入され、開くと共に注入光は次第に遮断されるものとして計算した。

図2にIS時の反転分布密度と出力及び発振角周波数の時間変化の計算結果を示す。ここでは、同期に必要な注入光強度を求めるため、反転分布密度 $N(t)$ と注入光と結合するモード j 及びその他のモード k の出力の関係を求めた。実験条件と合わせるため最大出力時の初期反転分布密度を $N(0) = 1.7 \times 10^{24} / \text{m}^3$ とした。この計算より、スレーブレーザで発振が許容される縦モード数を $m = 4$ 本とし、注入される光電力を $P_i = 1 \text{ mW}$ とした場合、注入光と結合するモードのレーザ出力がその他のモードに比べて約 4.5×10^3 倍大きくなることが分る。また、その位相差の時間変化すなわち周波数差は、最初は零であるが出力が立ち上がるまでに共振器との角周波数差 $\Delta\omega = (\omega_j - \omega_i)$ になり、出力光はマスタレーザの角周波数 ω_i から離れて、スレーブレーザの共振器角周波数 ω_j で発振することが分る。これは、モード j の電界が増大すると(7)式の第2項が小さくなり、第1項の周波数差だけが残るためである。

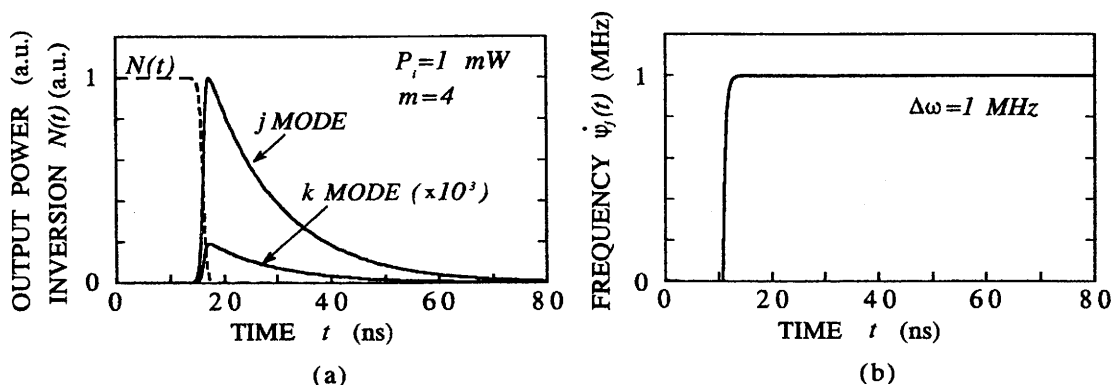


図2 インジェクションシーディング基本特性の計算結果

(a) 反転分布密度とレーザ出力の時間変化

(b) 発振周波数の時間変化

図3に、スレーブレーザの発振許容縦モード数 m をパラメータとして、ISのための注入光電力に対する注入同期効率を計算した結果を示す。ここで用いた注入同期効率は、全てのモード出力に対する j 番目のモード出力の比と定義した。また、このとき $\Delta\omega = 0$ とした。計算より、許容される縦モード数が $m = 400$ 本である場合でも、注入光電力が1 mW以上であれば注入同期効率が90%に達することが分る。さらに、共振器中にエタロン等の同調素子を挿入し、狭帯域化することによりモード数 m を減らした場合、 $100 \mu\text{W}$ 以下の注入光電力でも十分にIS動作が可能なが分る。また、一般に入/4板2枚をレーザ媒質の両端に配置するツイストモードのレーザ動作では、空間的ホールバーニング効果が低減されるため、同調素子を用いなくとも縦モード数を4~5程度に減少できることが知られている⁽¹⁷⁾。モード数が4である場合、 $100 \mu\text{W}$ で99.3%、1 mWの注入で99.9%と、高効率なIS動作が可能となるものと推定される。

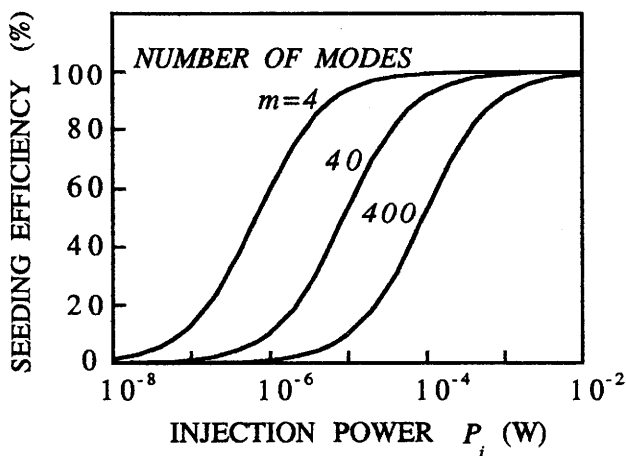


図3 注入同期効率の注入光強度特性

次に、インジェクションロッキング（以下ILと略す）の動作とIS動作を比較する。まず、ILでは既に発振しているスレーブレーザの発振周波数をマスタレーザ周波数に完全に一致させるもので、数W程度のCWレーザの場合、注入光電力は数10mWから数100mW程度必要である。これに対し、ISではレーザ光が立ち上がるときに注入光が自然放出出力よりも大きければIS可能となるため、同じクラスの出力のレーザに対して注入光電力は数10 μ Wから数100 μ Wと3桁程度小さくても十分であることが分る。ただし、ISでの発振周波数はマスタレーザではなく、それに最も近接した共振器の周波数で発振する。また、ISの効率が非常に高いため、マスタレーザの周波数を変化させることにより広帯域での単一モード化が可能になることが期待される。

3. インジェクションシーディングの実験的検討

3.1 マスタレーザの開発

まず、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試作した⁽¹⁶⁾。通常の定在波型のレーザ共振器の場合には空間的ホールバーニング効果のため、縦単一モード発振を実現するためには、共振器内にエタロン等の同調素子を挿入するか、進行波型のリング共振器⁽¹²⁾にする必要があった。これらの方法は共振器構成が複雑で大型になるため、損失や、不安定要因が増大するなどの欠点があった。これに対して、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れば、低損失で高安定な単一モード発振のレーザが可能になる。

Nd:YVO₄結晶は代表的な固体レーザ材料であるNd:YAG結晶と比較して800nm付近の吸収係数が5~10倍大きいと、その値だけ結晶長を短くすることが可能となり⁽¹³⁾、また吸収スペクトル幅が約8nmとNd:YAGに比べ約3倍広く⁽¹⁴⁾、LD励起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最適である。このため、励起光の吸収効率や熱歪特性などを考えて、結晶長の厚みを500 μ mとし、この両端面にミラーコートをし、短共振器のマイクロチップレーザを試作した。この素子の縦モード間隔は140GHzであり、蛍光半値幅が0.96nm、つまり257.0GHzであるので縦モードは1.8本許容されるが、安定な単一モード発振が実現できた。

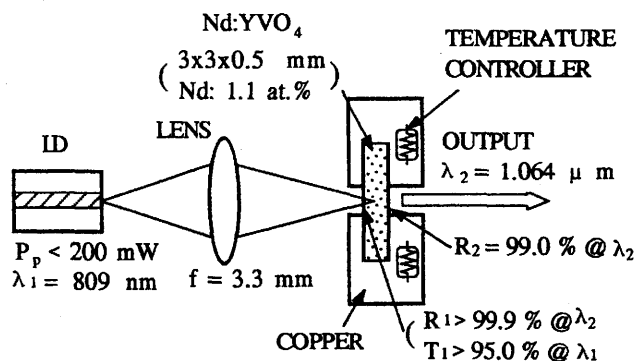


図4 Nd:YVO₄レーザの構成

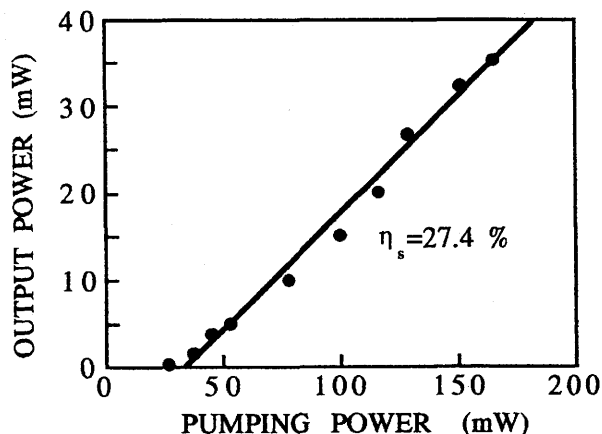


図5 Nd:YVO₄レーザーの入出力特性

試作したLD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザーの構成を図4に示す。Nd:YVO₄結晶はa軸カットで、Nd濃度1.1at.%, サイズは3x3mmで、厚みが500μm、両面の平行度はλ/10である。結晶の励起面は励起波長809nmに対して透過率95.0%、発振波長1064nmに対して反射率99.9%のダイクロミックコーティングを、また、レーザー光射出面は1064nmに対して反射率99.0%の高反射コーティングを施してチップ自体でレーザー共振器を構成した。励起には最大出力200mWのLD (Sony製、SLD302XT型)を用い、ヘルチエ素子で温度変化させて発振波長が809nmになるように制御を行った。励起光は、偏光面方向が結晶のc軸に対して平行になる状態で、焦点距離3.3mmのプラスチックレンズで集光を行った。また、結晶は直径2mmの円開口を有する銅ブロックで保持し、この中にサーミスタ及びヒータを埋め込み、結晶の温度制御を行うことによりマイクロチップレーザーの発振波長の同調を行った。このときの温度制御の分解能は約1/1000°Cであった。

図5にレーザーの入出力特性を示す。レーザー出力は、励起光の偏光方向が結晶のc軸方向のときに最大となった。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の高効率、高出力の単一縦モード発振が得られた。また、出力光のビーム形状は円形のTEM₀₀モード

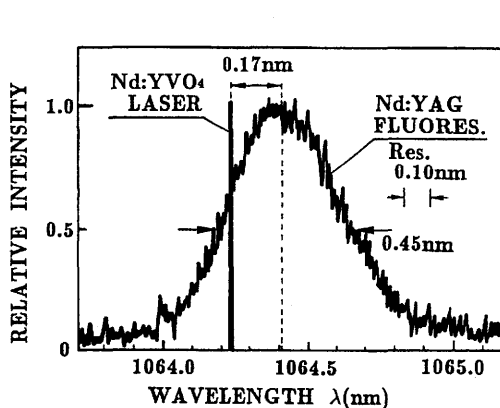


図6 Nd:YAGの蛍光とNd:YVO₄レーザースペクトルの比較

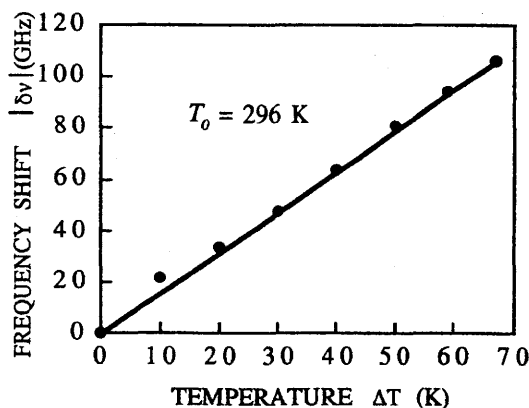


図7 YVO₄レーザーの発振周波数移動量の温度特性

ドで、広がり角は約7 mradであった。なお、レーザ光の偏光は、励起光の偏光方向に関係なく常にc軸方向に偏光した直線偏光であった⁽¹⁶⁾。

図6にNd:YAGの蛍光スペクトルとNd:YVO₄マイクロチップレーザの発振波長とを併せて示す。Nd:YVO₄の蛍光の中心波長は1064.24nmで、蛍光の半値幅は0.96nm (257.0GHz)であった。マイクロチップレーザは常温で1064.24nmで発振するように調整してある。このとき、Nd:YVO₄の発振波長がNd:YAGの蛍光スペクトルの中心に比べ約0.17nm (45.1GHz)短波長側にあることが分る。また、Nd:YAGの蛍光幅は0.45nm (約120GHz)であることが確認できた。なお、Nd:YAGの蛍光についてはNd濃度や励起条件などにより多少の違いが認められた。

このマイクロチップレーザのもう一つの特長として、結晶温度を制御することにより結晶長と屈折率を変えて蛍光スペクトル幅内で連続的に発振周波数が可変であることが挙げられる。図7にNd:YVO₄レーザ発振スペクトルの温度依存性を示す。結晶温度を室温より67K上昇させることにより単一モード発振で、発振周波数を107GHzだけ低周波数側に連続的にシフトできた。これより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ってNd:YAGレーザの中心発振周波数に同調できることが分った。

3.2 シーディング実験装置の構成

図8にNd:YVO₄マイクロチップレーザによるNd:YAGレーザのIS実験の装置構成を示す。スレーブレザにはパルス放電管励起QスイッチNd:YAGレーザ(Continuum製、YG660-30型)を用いた。このレーザは長さ50cmの不安定型共振器の構成でガウシャン反射率分布形状ミラーにより直径6mmのガウス形状の出力光が得られる。パルス繰り返し周波数は30Hzで、波長1064nmでの最大出力は210mJである。このレーザのQスイッチにはKD*P結晶の電気光学素子が用いられている。まず、Qスイッチが閉じているときは、Nd:YAG結晶からの光のうち紙面に対して平行

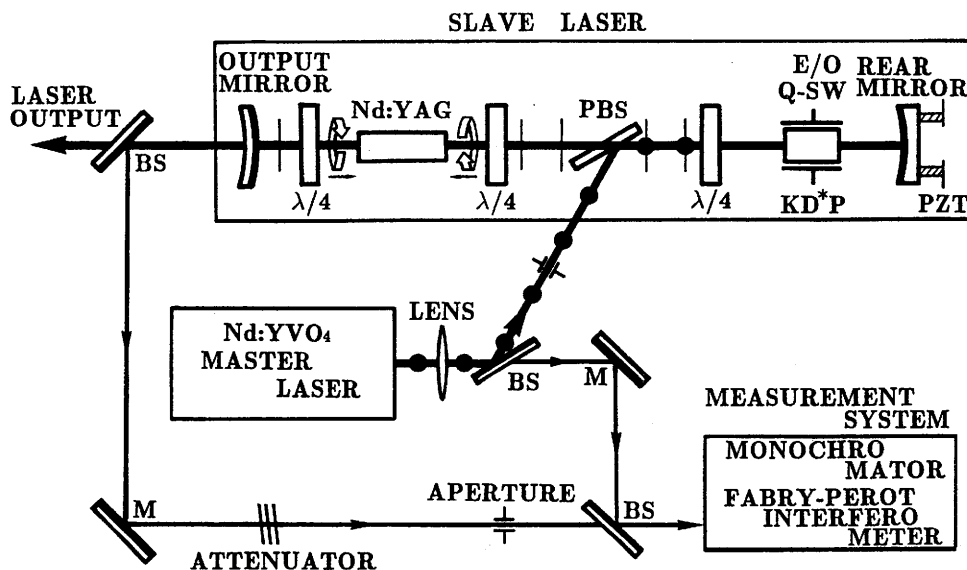


図8 インジェクションシーディング実験装置の構成

な方向の水平偏光の光がPBSを通り抜けるが、 $\lambda/4$ 板を往復することにより偏光方向が 90° 回転して垂直になるため高損失の状態となる。次に、Qスイッチが開いたとき、すなわちKD・P結晶に高電圧が印加されると結晶は $\lambda/4$ 板として働くため往復してきた光の偏光方向は 180° 回転し、PBSでの損失は無くなりレーザー発振が開始する。また、YAGロッド(6mm ϕ x115mm)の両側には $\lambda/4$ 板が配置され、空間的ホールバーニングを低減させるツイストモードで動作させてある。

マスターレーザには単一モード発振LD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザを用いた。まず、注入光は偏光方向を紙面に垂直方向にして、コリメートレンズと直径1mmのアイリスを通してスレーブレーザのPBSよりレーザ内に導かれる。Qスイッチが閉じているとき $\lambda/4$ 板を往復することにより偏光方向が回転し、水平偏光になるためPBSを低損失で透過し、Nd:YAGロッドに入って、シーディングが行われる。次に、Qスイッチが開くとKD・P結晶と $\lambda/4$ 板を往復したシード光の偏光方向は垂直偏光となりPBSで反射され、注入光が遮断されると同時にレーザパルスが立ち上がる。レーザ光の戻り光はPBSでほとんど反射されず、また、アイリスで空間的に大部分がカットされる。すなわち、注入光の光軸を2mradだけ傾けて注入することにより、マスターレーザ側へのスレーブレーザの光の戻り光成分を5.33nJと極めて小さくする構成としている。また、Qスイッチが開いてからレーザー発振が起きるまでの遅延時間が最小になるように、スレーブレーザのリアミラーをPZTで制御して共振器周波数を変えるによりシーディングの安定化を行った。スペクトルの測定には分光器とエタロンを用いた。

3.3 シーディング実験結果

波長1064nmのスレーブレーザ出力をKD・P結晶により可視域532nmの第2高調波(SH波)に変換し、試作したFSR 1.5GHz、フィネス20のファブリー・ペロー干渉計でシーディング出力のスペクトル状態を観測した。図9にレーザパルスを30ショット重ねた干渉縞写真を示す。このとき、共振器に注入されるマスターレーザ光電力は10mWであった。同図(a)はシーディングを行ってない状態の写真で、干渉縞は確認できていない。これに対し(b)図はシーディングを行った状態であり、

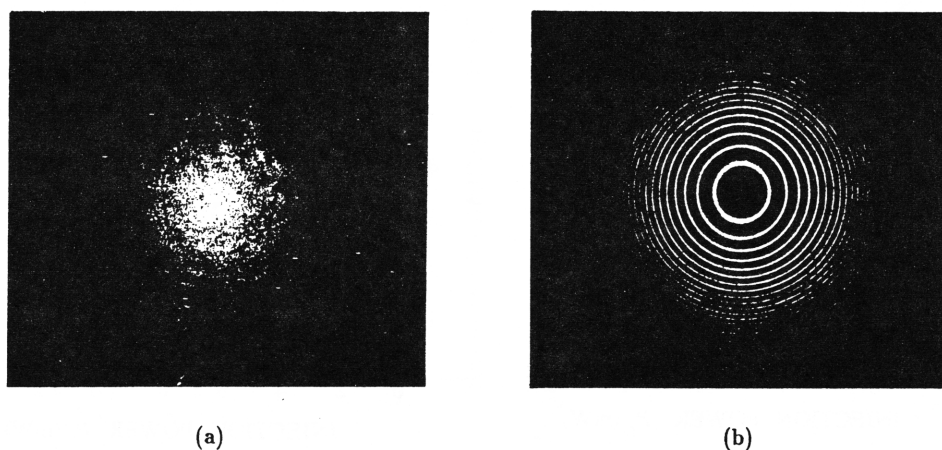


図9 スレーブレーザSH波の干渉縞(30ショット, FSR=3.0GHz, F=20)

(a) 非シーディング時 (b) シーディング時

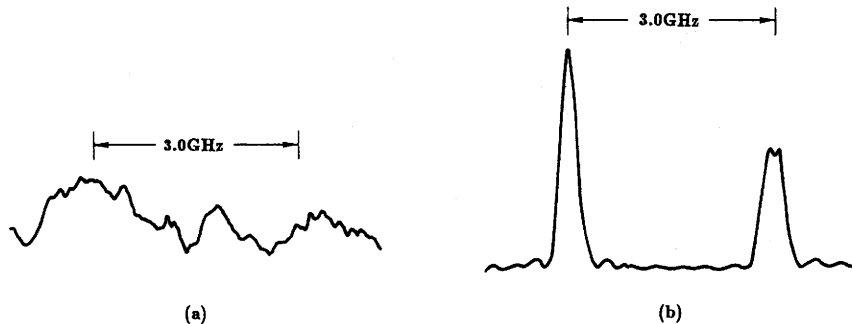


図10 スレーブレーザSH波の干渉計によるスペクトル測定結果 (FSR=3.0GHz, F=20)
 (a) 非シーディング時 (b) シーディング時

発振スペクトルが単一で安定であるため、常に同じ位置に干渉縞ができているのが確認できる。また、基本波スペクトルをFSR 10GHz、フィネス160の共焦点スキャニング・ファブリー・ペロー干渉計で観測したところ、スペクトル幅は約80MHzであり、フーリエ限界に達していることが分った。

図10は1ショットレーザ出力による干渉縞をリニアラインセンサで取り込んだスペクトル特性である。スレーブレーザは励起電圧比(フラッシュランプに印加された励起電圧 V とレーザ発振閾値電圧 V_{th} の比) $V/V_{th}=1.21$ で、このときの基本波出力は210mJであった。同図(a)は、シーディングしていない状態のスペクトルである。ツイストモード動作のため、3.0GHzのFSR周波数中に4~5本程度の縦モードが認められる。また(b)図はシーディング状態のスペクトルでモードが1本だけ存在して単一モードとなっていることが明瞭に確認できる。

次に、IS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同一にならず、注入光周波数に最も近い共振器モード周波数が選択されて発振することが前節で理論的検討により示された。このモード選択特性を実験的に検証した。図11に離調幅(モード選択幅)の注入光電力依存特性を示す。ここで、離調幅とは、IS動作の確認される注入光周波数とスレーブレーザ共振器周波数

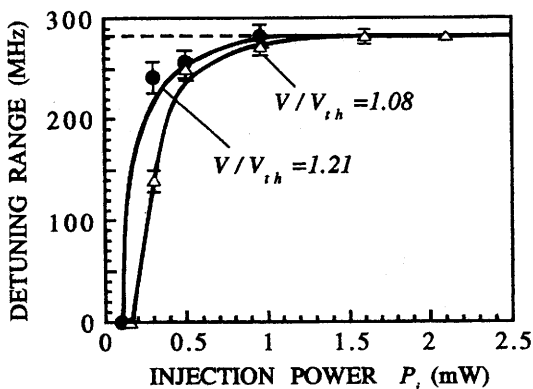


図11 離調幅の注入光電力依存特性

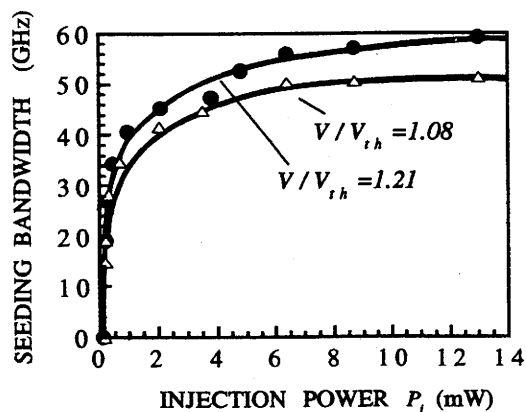


図12 シーディング可能全帯域幅の注入光電力依存特性

差の最大幅のことである。励起電圧比が1.21のとき、注入光電力は計算で求めた値に近い $100\mu\text{W}$ で約90%の割合でシーディングがかかり、 0.96mW 注入時にはほぼ100%の割合でシーディングがかかることが確認され、282MHzのモード選択幅が得られた。すなわち、縦モード間隔300MHzの内で中間部の約18MHzだけが不安定な領域で、他の282MHzはシーディング可能な領域であることが分った。また、励起電圧比が1.08のときにはシーディングの割合が低くなり、注入光電力が $150\mu\text{W}$ 以上必要となり、 2.1mW 以上ではモード選択幅282MHzが得られた。一般に、ISではスレーブレーザの励起が高くなるとモード選択幅が広くなり、シーディングがかかり易くなることを見出され、この特性もILと異なるものである。

次に、利得幅内でIS動作が可能なスペクトル帯域の注入光電力依存特性を求めた結果を図12に示す。励起電圧比が1.21の場合、注入光電力が約 1mW でシーディング可能なスペクトル全帯域幅は41GHz、注入光電力が 13mW では59GHzの値が得られた。また、励起電圧比を1.08にした場合、特性は低下するものの、最大で51GHzのシーディング可能なスペクトル全帯域幅が得られた。この値はNd:YAGの蛍光利得幅120GHzの約半分に対応した広帯域での単一モード化が可能となった。

4. むすび

以上、単一モード発振のLD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザをマスターレーザとしたパルス放電管励起Qスイッチ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理論及び実験の両面より検討を加えた。まず、半古典的取扱によるインジェクションシーディングの基本式を導出し、その特性、およびシーディング条件を検討した。その結果、インジェクションシーディングでは、その発振周波数はスレーブレーザ共振器で決定され、また $100\mu\text{W}$ 程度と、かなり低い注入光電力でも十分な注入同期効率が得られ、また、スレーブレーザ共振器周波数で発振することも分った。

次に、マスターレーザとしてLD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザを試作し、パルス放電管励起QスイッチNd:YAGレーザのインジェクションシーディング実験を行った。まず、Nd:YVO₄は、励起光吸収係数がNd:YAGの数倍大きいいため共振器の小型化が可能になり、共振器長を $500\mu\text{m}$ と短くし、蛍光幅内に許容される縦モード数を1ないし2本とすることで単一縦モード発振を得た。このときスローブ効率27.4%、最大出力 35.3mW と高効率、高出力特性が得られた。また、発振波長がNd:YAGレーザと異なるため、結晶の温度制御を行い発振波長をスレーブレーザに同調させることによって、インジェクションシーディングを行い、高出力の単一モード発振を実現した。スペクトル幅は80MHz以下とフリーエ限界に達しており、このときパルス繰り返し周波数は30Hz、励起電圧比は1.21、注入光電力は $100\mu\text{W}$ であった。また、利得中心付近での離調幅は282MHzと縦モード間隔とほぼ同程度の領域でモードの選択が可能であり、また、シーディング可能な全帯域も蛍光幅のほぼ半分の59GHzにわたっており、また、空間的モードマッチングを厳密に満たさなくともシーディングが可能なことを見出し、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分った。

今後、スレーブレーザの長時間にわたる高安定化を行い、コヒーレントライダや非線形光学への応用を進めると共に、より高効率なインジェクションシーディング法についても検討を進める。

参考文献

- (1) M.V.Kavaya, S.W.Henderson, J.R.Magee, C.P.Hall and R.M.Huffaker, "Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system": *Opt. Lett.*, 14, pp.776-778 (1989)
- (2) 総合研究(B), 研究成果報告書, "重力波の基礎研究", 代表 早川幸男(1990)
- (3) L.A.Rahan, and R.L.Farrow, and R.P.Lucht: "Effects of laser field statistics on coherent anti-Stokes Raman spectroscopy intensities", *Opt.Lett.*, 9, pp.223-225 (1984)
- (4) 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, pp.1189-1191 (1989)
- (5) O.Cregut, C.N.Man, D.Shoemaker, A.Brillet, A.Menhert, P.Peuser, N.P.Schmit, P.Zeller, and K.Wallmeroth: "18 W single-frequency operation of an injection-locked, CW, Nd:YAG laser", *Phys. Lett.*, 140, pp.294-2
- (6) 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, pp.616-623 (1979)
- (7) 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, pp.117-125 (1984)
- (8) R.L.Schmitt and L.A.Rahn: "Diode-laser-pumped Nd:YAG laser injection seeding system", *Appl. Opt.*, 25, pp.629-633 (1986)
- (9) 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, pp.1015-1017 (1991)
- (10) 平等, 向井, 尾岸, 小林: "Nd:YVO₄によるパルスNd:YAGレーザーの注入同期", 第38回春期応物学会予稿集, 29p-PB-24, p912 (1991)
- (11) 霜田, 矢島編著, 量子エレクトロニクス (上) 裳華房 pp.70-242 (1972)
- (12) T.J.Kane and R.L.Byer: "Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser", *Opt. Lett.*, 10, pp.65-67 (1985)
- (13) G.J.Kintz and T.Baer: "Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-26, pp.1457-1459 (1990)
- (14) 小島, 佐々木, 中井, 桑野: "LD励起マイクロチップ固体レーザー", *レーザー研究*, 18, pp.646-651 (1990)
- (15) J.J.Zayhowski and A.Mooradian: "Single-frequency microchip Nd lasers", *Opt. Lett.*, 14, pp.24-26 (1989)

- (16) 平等, 向井, 野沢, 小林: "LD励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザの高出力・単一モード発振特性", 信学技報, QQE 91-30 (1991)
- (17) V.Evtuhov and A.E.Siegman: "A twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity", Appl. Opt., 4, pp.142-143 (1965)

