

インジェクションシーディングを用いた固体色素レーザーにおけるレーザー共振器内高効率位相共役波発生

渡辺 博文・尾松 孝茂*・立田 光廣

千葉大学工学部情報画像工学科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Intracavity Phase Conjugation in an Injection-Seeded Solid Dye Laser

Hirofumi WATANABE, Takashige OMATSU* and Mitsuhiro TATEDA

Department of Information and Image Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

We demonstrate highly efficient phase conjugation inside a solid dye laser by laser-injection-seeding. The 140 times phase conjugate energy was extracted for an energy injected externally into the phase conjugate mirror.

1. はじめに

レーザー素子の飽和増幅効果を用いる位相共役波発生は、誘導放出過程を経て非線形分極が誘起されるために応答速度がナノ秒と速い、位相共役波が誘導放出によるレーザー増幅を受けるため100%を超える反射率が得られる、等の魅力ある特徴を有する。これまでに、Nd:YAG^{1,2)}, Nd:YVO₄^{3,4)}, Ti:Sapphire⁵⁾, Rhodamine 6G ドープポリマー (固体色素)⁶⁻⁹⁾等の固体レーザー素子を用いた高効率位相共役鏡が報告されている。中でも、レーザー色素は可視域で、他の固体レーザー素子に比べ桁違いに大きな誘導放出断面積^{10,11)}をもつので、 $\sim 1 \text{ mJ/cm}^2$ の入力フルエンスで飽和増幅効果が起こる。したがって、レーザーシステムのみならず、光画像処理等の応用が期待されるデバイスとなりうる。しかしながら、これまでの報告では、位相共役波反射率こそ20000%と高い数値が得られているものの⁹⁾、プローブ光、ポンプ光エネルギー総和に対する位相共役波反射率、すなわち実効的な位相共役波エネルギー変換効率では $\sim 100\%$ 程度であった⁹⁾。

本研究では、狭帯域色素レーザー光を注入してインジェクションシーディングを施したRhodamine 6G固体色素レーザー共振器内で四光波混合を行い、位相共役波発生を観測したので報告する。位相共役波エネルギーは、シード光、およびプローブ光エネルギー和の140倍に達した。

2. 実験

2.1 固体レーザー色素の飽和増幅特性

使用した固体レーザー色素は、Rhodamine 6G色素をドープしたPMMA (Polymethyl Methacrylate)で、色素ドープ濃度は0.1-wt.%、サイズは $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ である。固体レーザー色素の増幅特性を測定するために、外部励起光として、Q-switched Nd:YAGレーザーの第二高調波(波長532 nm, 繰り返し周波数2.5 Hz, パルス幅10 ns)を用いて、固体レーザー色素の両端面から励起した。このときの励起光フルエンスの合計は 300 mJ/cm^2 である。また、プローブ光には、同じNd:YAGレーザーの第二高調波で励起された狭帯域色素レーザー(線幅 $< 0.03 \text{ cm}^{-1}$)を用いた。最大利得波長564 nmにおける固体レーザー色素のシングルパスゲイン(g_0L)、利得飽和フルエンスは、それぞれ4.3, 1.3 mJ/cm^2 であった⁹⁾。ここで、 g_0 は小信号利得、 L は相互作用長(固体レーザー色素の厚み)である。得られた固体レーザー色素の利得飽和フルエンスは、溶液レーザー色素における利得飽和フルエンス値とオーダーが等しく、また代表的な波長変換固体レーザー素子として知られるTi:Sapphireの1000分の1の値である。

2.2 マルチパス配置を用いた縮退四光波混合による位相共役波発生

実験光学系をFig. 1に示す。前述したように、固体レーザー色素の励起には、Q-switched Nd:YAGレーザー

*E-mail: omatsu@image.tp.chiba-u.ac.jp

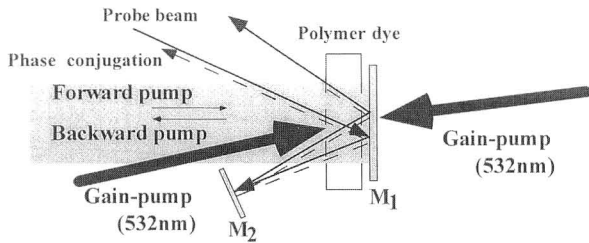


Fig. 1. Schematic diagram of the multi-pass geometries for degenerate four-wave mixing in the solid laser dye.

の第二高調波，縮退四光波混合には狭帯域色素レーザーを用いた．前進ポンプ光を固体レーザー色素に入射し，その透過光をミラー M_1 で折り返し，後進ポンプ光として用いた． M_1 は 564 nm の光に対して全反射，532 nm の光に対して全透過の誘電体多層膜ミラーである．この対向ポンプ光とプローブ光のなす角度は 0.04 rad で，ビーム径はそれぞれ ϕ 4 mm， ϕ 2 mm である．飽和増幅効果による位相共役波発生では，縮退四光波混合のプローブ光と対向ポンプ光との相互作用長を長くすることで，高い反射率を得ることができる．そこで，固体レーザー色素を通過したプローブ光をミラー M_1 ， M_2 で固体レーザー色素に戻し，プローブ光が都合 4 回固体レーザー色素を通過する配置 (Four-pass geometry) を用いて位相共役波の反射率を測定した．位相共役波反射率は，プローブ光のエネルギーと位相共役波のエネルギーの比で定義している．

前進ポンプ光エネルギーに対する位相共役波反射率を Fig. 2 中の白丸 (○) で示す．このときのプローブ光エネルギーは，0.057 μ J であった．観測された位相共役波の最大反射率は 20000%，このときの入力前進ポンプ光エネルギーは 24 μ J であった．

四光波混合では，プローブ光以外にポンプ光が必要となるため，位相共役波の実効的な性能を評価するには，位相共役波反射率だけではなく，プローブ光およびポンプ光のエネルギーの和に対する位相共役波エネルギーが重要な尺度となる．実際の実験では，この他に固体レーザー色素を励起するための外部励起光が入力エネルギーとして必要となる．しかしながら，位相共役鏡の使用に際して最も重要な因子は，プローブ光 (信号光) 波長に対する光エネルギーの入出力特性である．したがって，ここでは外部励起光エネルギーを入力エネルギーには加えないことにする．結果として，縮退四光波混合における位相共役波のエネルギー取り出し効率 η を，

$$\eta = E_{conjugate} / (E_{probe} + E_{pump}) \quad (1)$$

のような式で定義する²⁾．ここで $E_{conjugate}$ ， E_{probe} ， E_{pump} は，それぞれ位相共役波，プローブ光，前進ポンプ光のエ

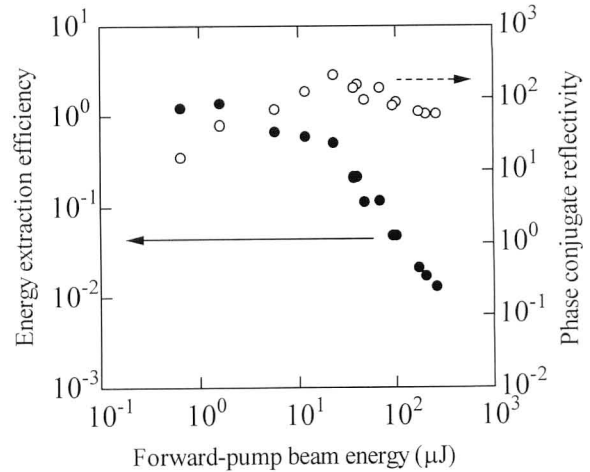


Fig. 2. Energy extraction efficiency η (filled circles) and phase conjugate energy reflectivity (open circles) in four-pass geometry versus forward pump beam energy.

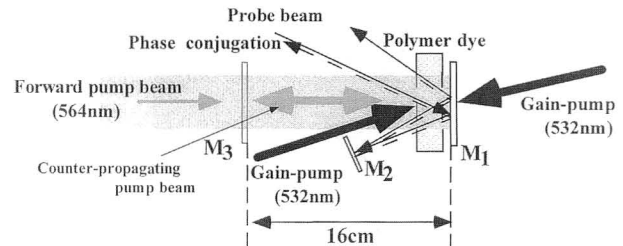
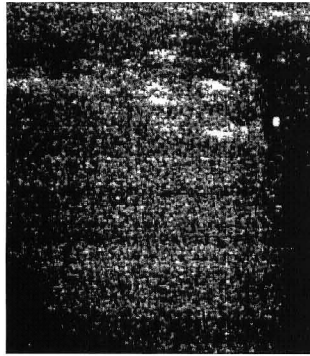


Fig. 3. Schematic diagram of intracavity phase conjugation with four-pass geometry in an injection-seeded solid dye laser.

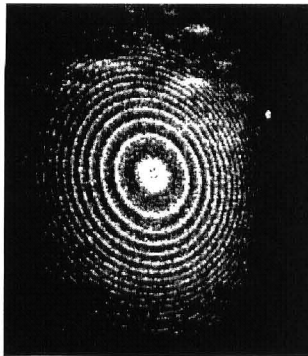
ネルギーである．Four-pass geometry を用いた位相共役鏡の前進ポンプ光エネルギーに対する η を，Fig. 2 中の黒丸 (●) で示す． η の最大値は 1 となり，そのときの前進ポンプ光エネルギーは 1.6 μ J である．

2.3 インジェクションシーディングを用いた共振器内位相共役波発生

η を大きくするために，われわれはインジェクションシーディング (注入同期) 法を用いた．実験配置図を Fig. 3 に示す．前進ポンプ光の光路に，色素レーザーの波長に対して反射率 30% のミラー M_3 を配置した． M_1 と M_3 からなる固体色素レーザー共振器は，前進ポンプ光のスレーブレーザーとして働く．共振器長は 16 cm であった．レーザー発振が起こると，共振器内の発振光と前進ポンプ光の波長が等しくなる．したがって，共振器内を往復する発振光は縮退四光波混合における対向ポンプ光として機能し，プローブ光と相互作用する．その結果，位相共役波が発生する．注入同期効率は，フリーランニング時のレーザー共振器モードとシード光の空間的な重なり効率で決まる．フリーランニング時の固体色素レーザー共振器の発振モード



(a)



(b)

Fig. 4. Spectrum of injection-seeded solid dye laser measured by solid etalon with FSR=0.67 cm⁻¹ and Finesse=16. (a) Under free-running operation, (b) under injection-seeded operation.

サイズが ϕ 5 mm であったため、シード光としての前進ポンプ光のビームサイズを ϕ 5 mm にして実験を行った。

注入同期が機能していることを確認するために、スレーブレーザーである固体色素レーザー共振器の発振光のスペクトルをエタロン (FSR=0.67 cm⁻¹, フィネス=16) で観測した (Fig. 4)。このときの外部励起光フルエンス、シード光である前進ポンプ光エネルギーは、それぞれ 300 mJ/cm², 0.4 μ J であった。発振光スペクトルは 0.05 cm⁻¹ 以下であり、注入同期が機能していることがわかる。

シード光に対するエネルギー取り出し効率 η 、および位相共役波反射率をそれぞれ Fig. 5 に示す。このときの外部励起光フルエンスは 300 mJ/cm² であった。位相共役波の反射率は、シード光エネルギーが 0.14 μ J から 3.4 μ J の範囲でほぼ一定で \sim 10000% であった。注入同期法を用いていない位相共役鏡では、固体レーザー色素媒質内で増幅された四光波のフルエンスが固体レーザー色素の利得飽和フルエンスに達したときに、最大位相共役波反射率を示す。これに対して、注入同期法を用いた位相共役鏡では、縮退四光波混合の対向ポンプ光は固体色素レーザー共振器

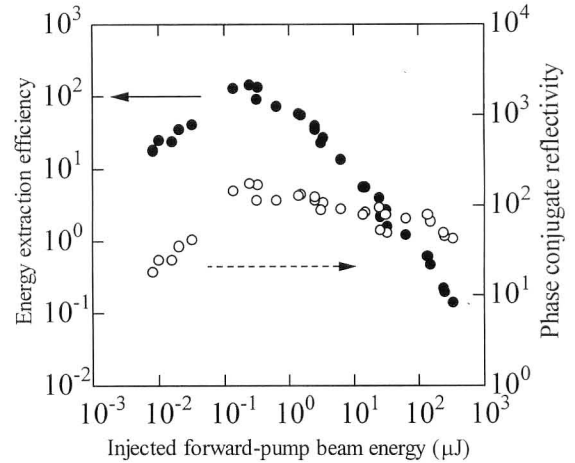


Fig. 5. Energy extraction efficiency η (filled circles) and phase conjugate energy reflectivity (open circles) of intracavity phase conjugation in an injection-seeded solid dye laser versus injected forward pump beam energy.

内の発振光である。一般に、スレーブレーザー共振器内の発振光フルエンスは、シード光のエネルギーによらず、レーザー利得、利得飽和フルエンス、レーザー共振器の Q 値にのみ依存する。したがって、固体色素レーザー共振器の発振光である対向ポンプ光はシード光エネルギーの大きさによらず、自動的に利得飽和フルエンスに近いフルエンスをもつことになる。結果として、注入同期閾値を超えるシード光エネルギーが注入されている場合、位相共役波反射率はシード光エネルギーに依存せず一定の値を示す。

η の最大値は \sim 140 で、そのときのプローブ光エネルギーは 1.1 μ J である。また、シード光エネルギーを 100 nJ 以下にすると、注入同期が機能し難くなり、急激に反射率、およびエネルギー取り出し効率 η が低下する。実験から得られた、注入同期を機能させるための最小シード光エネルギー (閾値) は \sim 10 nJ であり、この値が実効的な位相共役波発生閾値となる。

スレーブレーザー共振器のフレネル数 (横モード)、縦モード数を N_T , N_L とすると、それぞれ、

$$N_T = \pi \omega^2 / \lambda L^{(2)} \quad (2)$$

$$N_L = \Delta \nu_f / \Delta \nu \quad (3)$$

と表される。ここで、 ω , λ はそれぞれ発振光のビーム半径および波長、 L はスレーブレーザーの共振器長、 $\Delta \nu_f$ は固体レーザー色素の蛍光スペクトル幅、 $\Delta \nu (= c/2L)$ はスレーブレーザー共振器の縦モード間隔を表す。したがって、スレーブレーザー共振器内に存在しうるモード総数 N は、

$$N = N_T \cdot N_L \quad (4)$$

で与えられる。外部励起光エネルギー、波長、自然放出光

の波長をそれぞれ E_{pump} , λ_{pump} , λ_f とすると, 各共振器モードへ寄与する自然放光エネルギー E_{min} は,

$$E_{min} = (\lambda_{pump}/\lambda_f) \cdot E_{pump}/N \quad (5)$$

と表される。注入同期によってスレーブレーザー共振器の特定の単一モードのみを選択的に励振するためには, シード光エネルギーは E_{min} より大きくなければならない。式(5)に $\omega = 2.5$ mm, $\lambda = 564$ nm, $L = 16$ cm, $\Delta\nu_f = 40$ THz, $\Delta\nu = 1$ GHz, $E_{pump} = 236$ mJ, $\lambda_{pump} = 532$ nm, $\lambda_f = 564$ nm を代入すると ~ 26 nJ であり, この値は実験における位相共役波発生の最小シード光 (前進ポンプ光) エネルギーとよく整合する。

3. ま と め

われわれは, インジェクションシーディング (注入同期) を施した飽和増幅素子固体レーザー色素のレーザー共振器内で縮退四光波混合を行い, 位相共役波を発生させた。通常の四光波混合では, 位相共役波のエネルギー取り出し効率がたかだか $\eta \sim 1$ であるのに対して, 注入同期を行うことで, 最大エネルギー取り出し効率 $\eta \sim 140$ まで向上した。このときのシード光エネルギーは 250 nJ であった。また, 位相共役波を発生させるのに必要な最小シード光エネルギーは ~ 10 nJ であり, このとき $19 \mu\text{J}$ の位相共役波を観測した。このことから, 注入同期法が位相共役波発生におけるエネルギー取り出し効率を向上させるのに, きわめて有効であることがわかる。本研究で得られた結果は, 実用デバイスとしての高効率位相共役鏡の実現に大きな意味をもつと同時に, 高機能レーザーシステム, 光画像情報処理デバイスへ大いに応用が期待できる。

本研究の一部は, 文部省科学技術研究費基盤研究 (B) (課題番号 11555010) の補助を受けて行われたものである。

文 献

- 1) A. Tomita: "Phase conjugation using gain saturation of a Nd:YAG laser," *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979) 463-464.
- 2) G. J. Crofts, R. P. M. Green and M. J. Damzen: "Investigation of multipass geometries for efficient degenerate four-wave mixing in Nd:YAG laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 920-922.
- 3) A. Brignon, G. Feugnet, J.-P. Huignard and J.-P. Pocholle: "Efficient degenerate four-wave mixing in a diode-pumped microchip Nd:YVO₄ amplifier," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 548-550.
- 4) S. Mailis, J. Hendricks, D. P. Shepherd, A. C. Tropper, N. Moore, R. W. Eason, G. J. Crofts, M. Trew and M. J. Damzen: "High-phase-conjugate reflectivity (>800%) obtained by degenerate four-wave mixing in a continuous-wave diode-side-pump Nd:YVO₄ amplifier," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 972-974.
- 5) G. J. Crofts, X. Banti and M. J. Damzen: "Tunable phase conjugation in a Ti:Sapphire amplifier," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1634-1636.
- 6) P. J. Soan, A. D. Case, M. J. Damzen and M. H. R. Hutchison: "High-reflectivity four-wave mixing by saturable gain in Rhodamine 6G dye," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 781-783.
- 7) 林 直之, 尾松孝茂, 長谷川朗, 立田光廣: "飽和増幅素子固体色素を用いた高効率位相共役鏡", *光学*, **27** (1998) 285-290.
- 8) T. Omatsu, N. Hayashi, H. Watanabe, A. Hasegawa and M. Tateda: "Tunable, visible phase conjugator with a saturable-amplifier polymer laser dye," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1432-1434.
- 9) H. Watanabe, T. Omatsu, T. Hirose, A. Hasegawa and M. Tateda: "Highly efficient degenerate four-wave mixing with multipass geometries in a polymer laser dye saturable amplifier," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1620-1622.
- 10) 佐々木孝友: "新固体レーザー材料と非線形光学結晶", *応用物理*, **64** (1995) 878-887.
- 11) P. R. Hammond: "Spectra of the lowest excited singlet states of Rhodamine 6G and Rhodamine B," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 624-632.
- 12) A. E. Siegman: *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, California, 1986) pp. 769-770.