位相共役鏡を用いた高出力高品位バナデートレーザ

尾松 孝茂^{1,2}, 縄田 耕二¹¹千葉大学大学院 融合科学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)²科学技術振興機構

High Power, High Quality Phase Conjugate Vanadate Lasers

Takashige OMATSU^{1,2} and Kouji NAWATA¹¹Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-852²PRESTO, JST

(Received September 18, 2007)

We presented high quality, high power pico-second output from a diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser system with a photorefractive phase conjugate mirror. Peak output powers in the range of 2.8-6.8 MW were achieved at a pulse repetition frequency range of 0.33-1.0 MHz. The corresponding average powers of 18-26 W were obtained.

Key Words: Laser, Laser amplifier, Phase conjugation, Nonlinear optics, Ultrafast optics

1. はじめに

アブレーション加工に十分な高いピークパワーと熱伝導時間より短いレーザー照射時間を達成できる超短パルスレーザーは、金属、半導体の超精細加工から、ガラス材料の三次元加工まで、従来のレーザーでは困難だった多様な加工を可能にする¹⁾。超短パルスレーザーの代表としてフェムト秒チタンサファイアレーザーが挙げられるが、励起波長である青緑域で発振する高出力半導体レーザーが存在しないため、電力-光変換効率、1%にも満たない。このフォトンコストの高さが産業用途への普及を妨げる大きな障壁となっていることは否めない。

808 nm, あるいは、980 nm帯の高出力半導体レーザーを励起光として用いることができるNd系、Yb系固体レーザー(半導体レーザー励起固体レーザー)は、パルス幅こそピコ秒からサブピコ秒とチタンサファイアレーザーには及ばないものの電力-光変換効率は圧倒的に高く10%に迫る。産業用加工の多くの場面ではピコ秒パルスでも十分な加工性能が得られるため、半導体レーザー励起固体レーザーベースの高出力で高品位な超短パルスレーザーが実用になれば、超短パルスレーザーのフォトンコストを低減できるとともに、大きな省エネルギー効果が期待できる。Nd系レーザーは、Yb系レーザーに比べ大きなレーザー利得が容易に得られ、発振しきい値も低くシステム設計しやすい。また、最短パルス幅こそYb系レーザーに及ばないが、分散補償などの光学部品を一切必要としないNd系レーザーは、システムのコスト削減に適している。

一般に、半導体レーザー励起固体レーザーでは、励起

光である半導体レーザー光子とレーザー光子のエネルギー差(量子欠損)などの熱負荷が原因となって熱レンズ効果²⁾をはじめとする熱光学効果がレーザー光の空間モード劣化、レーザー出力低下、偏光度の低下を引き起こす。例えば、代表的な固体レーザー結晶であるNd:YAG結晶を20 Wクラスの808 nm帯半導体レーザーで端面励起した場合、熱レンズの焦点距離は5 cm以下になる³⁾。レーザー結晶の熱光学効果の補償は良好なビーム品質、高出力をめざすレーザー設計において最重要課題と言える。

Zel'dovichらによって、非線形光学現象の一つである位相共役波発生⁴⁾が発見されて35年の年月を数える⁴⁾。これまでに、位相共役波の位相補償性を利用した数多くのCWやナノ秒パルスレーザーが報告されてきた⁵⁻⁷⁾。しかしながら、超短パルス光に対して位相共役波を発生させる素子位相共役鏡(PCM: Phase conjugate mirror)がない、一般に位相共役鏡の損傷しきい値は低いので大きなレーザー出力は得られない、という二つの大きな先入観のために超短パルス高出力レーザーを開発することは不可能であると考えられてきた。

われわれは、位相共役鏡が示すスペクトル狭窄効果を抑制すること、1000倍を越えるレーザー利得を示す側面励起イットリウムバナデート(Nd:YVO₄)スラブ増幅器を用いて位相共役鏡の損傷を避けること、の二つのブレイクスルーによって、高い平均出力(> 25 W)、高いピークパワー(> 2 MW)、高い繰返し周波数(> 100 kHz)、高いビーム品質を誇るピコ秒パルス位相共役レーザーシステムを世界ではじめて開発した^{8,9)}。

高出力超短パルスレーザーで一般的に用いられている再生増幅器方式^{10,11)}とは異なり、単純なレーザー発振器-

増幅器(MOPA: Master-Oscillator Power Amplifier)からなる本システムでは、再生増幅器に比べ桁違いに速いパルスの繰返し動作が可能になるので、高い平均出力と高いピークパワーを容易に両立できる。

2. 固体レーザー素子に誘起される熱効果

固体レーザー結晶中では、光子エネルギーの量子欠損の他、レーザー上準位の無輻射緩和、レーザー上準位からのアップコンバージョン遷移などのさまざまな要因から熱が発生する¹²⁾。この熱が結晶の膨張や屈折率変化を誘起して熱レンズなどの熱光学効果を引き起こす。Fig. 1は、Nd:YVO₄結晶を20 W半導体レーザーアレイで側面励起した場合の結晶温度分布を計算したものである。観測される温度上昇は最大で40度を超え、熱レンズの焦点距離に換算するとおおよそ3 cmになる¹³⁾。高励起時には、この強いレンズ効果に加え各種収差も複合的に現れるので、普通の光学系を用いて熱効果を完全に補償し、レーザーを安定に動作させることは極めて難しい。

3. 実験

3.1 超短パルスレーザーのための位相共役鏡

PCMは入射した波面の空間反転(あるいは時間反転)させた光波面、位相共役波を発生する素子である。PCMを

Fig. 1 (a) Schematic diagram of side-pumping geometry, and (b) simulated temperature distribution in the Nd:YVO₄ slab amplifier.

MOPAシステムの一部に配置すると、増幅器を通過したマスターレーザー光が位相共役波として増幅器に再び戻る間に増幅器内部で受けた熱光学効果が自動的に補償されてビーム品質の高い増幅光が取り出せる。このようなシステムをPC-MOPAと呼ぶことにする。従来、CWやナノ秒パルスに対するPC-MOPAはこれまでに数多く報告されているが、ピコ秒パルスに対しては、われわれの研究を除き報告例がない。その一つは位相共役鏡によるレーザースペクトルの狭窄化効果にある。フォトリフレクティブ効果を用いた位相共役波発生 の起源は、結晶内に形成された屈折率回折格子による入射光のBragg回折である。結合波方程式に従うと屈折率回折格子のBragg回折による波長許容幅 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = \frac{2\kappa\Lambda^2 n_0 \cos\theta_B}{\pi} \quad (1)$$

と書ける¹⁴⁾。ここで、 κ は二光波混合結合係数、 Λ は屈折率格子の格子間隔、 n_0 はBaTiO₃結晶の屈折率、 θ_B は屈折率格子を形成する二光束のなす角度の半角である。波長許容幅 $\Delta\lambda$ は屈折率格子の格子間隔 Λ に強く依存することが分かる。反射型や2k型と呼ばれる格子間隔 Λ の狭い屈折率回折格子は波長許容幅が極端に狭くなり強い波長選択性を示すので、発生される位相共役波のスペクトルは狭窄化される。この現象は、位相共役波のフィードバックを受けた半導体レーザーなどで顕著に見られ、一般に、位相共役波のスペクトルは $< 0.2 \text{ nm}$ になる¹⁵⁾。

われわれは反射型、2k型回折格子の形成を抑えて位相共役鏡によるスペクトル狭窄を回避するために、リング型位相共役鏡を用いた(Fig. 2)。

Fig. 2 (a) Total internal reflection (TIR) phase conjugate mirror. (b) Self-pumped ring phase conjugate mirror. Formation of reflection as well as 2 k gratings is inhibited.

また、リング型共振器の頂角を小さくして透過型回折格子の格子間隔を広げ、位相共役鏡の波長許容幅を可能な限り広くした。その結果、150 fsのフェムト秒パルスに対しても、50 %程度の高い位相共役波反射率を確認できた(Fig. 3)。

3.2 側面励起バナデートレーザー増幅器

側面励起バナデート増幅器はBernardらによって1993年に初めて報告がなされた¹⁶⁾。Ndドープバナデートは808 nm半導体レーザー光に対して強い吸収を示すため、スラブ結晶側面近傍に反転分布密度の高い部分ができる^{17,18)}。この部分を通過するレーザー光はバナデートの示す強い誘導放出によって大きなレーザー増幅を経験する。おおよそ20-30 Wの励起時に、スラブ型バナデート結晶を一度通過するだけで、100倍を超える増幅率が容易に得られる(Fig. 4)。

実際のシステム図をFig. 5に示す。増幅器に用いた結晶はNdイオン濃度1 at. %, a-カットNd:YVO₄スラブでサイズは20 mm×5 mm×2 mmである。結晶の両端面は結晶内部での寄生発振を抑制するために、励起面鉛直方向に対して5度傾いている。励起半導体レーザーはダイオードアレイスタックで発振波長808 nm、最大出力は135 Wである。各アレイから出た光はシリンドリカルレンズ(CLD)で増幅器励起面に直線状に集光されている。励起光の集光ビームサイズはおおよそ0.3 mm×18 mmである。マスターレーザーにはCWモードロックNd:YVO₄レーザー(波長1064 nm、最大出力250 mW、パルス幅7 ps、繰返し周波数(PRF)100 MHz)を用いた。マスターレーザーのPRFはRTP結晶からなるポッケルスセルによって330 kHz-1 MHzの間で可変である。この場合、ポッケルスセル通過後のマスターレーザー出力は<2 mWになる。Nd:YVO₄増幅器の楕円形をしている励起領域と効率よく結合するようにマスターレーザー光は2枚のシリンドリカルレンズ(HCL₁,

Fig. 3 Experimental phase conjugate reflectivity as a function of probe pulse width.

Fig. 4 Experimental single-pass gain in the Nd:YVO₄ slab amplifier.

Fig. 5 Experimental setup.

VCL)で楕円形に整形されている。増幅器から出たマスターレーザー光は、レンズ、プリズムからなる等倍の結像光学系を介して再び増幅器に戻り、さらに増幅され位相共役鏡へと伝播する。

位相共役鏡には、RhイオンドープBaTiO₃結晶(Rhイオン濃度1000 ppm、8 mm×7 mm×6 mm)を用いた。結晶の外部に配置したリング共振器の頂角は~15度である。光吸収に伴うBaTiO₃結晶の温度上昇を抑制するため、BaTiO₃結晶は水冷されたアルミ製ホルダーにマウントされている。

マスターレーザー光が入射後、1-2分で位相共役鏡は立ち上がり、その反射率は50 %になる。増幅されたマスターレーザー光の位相共役波は再び増幅器に戻り、偏光ビームスプリッター(PBS)より出力される。したがって、マスターレーザー光は都合4回Nd:YVO₄レーザー増幅器を通過することになり、増幅器の利得は数mW程度のわずかな入力パワーで十分飽和させることができる。

3.3 実験結果

まず、ポッケルスセルをオフにしてPRFは100 MHzで実験を行った。励起パワーに対するレーザー出力をFig. 6に示す。パルスレーザー出力は励起パワーにほぼ比例して増大し、最大励起パワー時(80 W)に25 Wに達した。光-光変換効率は30 %を超える。マスターレーザーから見た増幅率は100倍を超えるので、実際に位相共役鏡に入射しているレーザー光のパワーは2 W(～100 W/cm²)程度である。位相共役鏡の光損傷しきい値(<1 kW/cm²)より入射光強度は十分小さいので、位相共役鏡の光損傷なくさらなるパワースケーリングは可能である¹⁹⁾。

引き続きポッケルスセルをオンにし、PRFを1 MHzにした。この場合、システムに入射しているマスターレーザー光は～2 mWである。マスターレーザー入力¹が1/100に低下しているにもかかわらず、励起パワー最大時のレーザー出力(26.3 W)はほとんど変化しないことがわかる。また、オートコリレーション波形(Fig. 7)から換算したパルス幅(8 ps)と増幅光パルスのコントラスト比(600:1)を用いてピークパワーに換算すると、2.8 MWに達した。

次に励起パワーを80 Wに固定したままさらにPRFを変えてレーザー出力を測定した。PRFが小さくなるにつれてレーザー出力は若干低下するが、PRFが330 kHzでも20 W近い平均出力が得られる。パルス幅、パルスコントラスト比から換算するとピークパワーは6.8 MWに達する。これらの結果は、前述したようにNd:YVO₄増幅器の利得が大きくmW程度の微弱な入力で十分利得が飽和できることによる。

図中の破線は、CW時の飽和増幅に対して用いられる

Fig. 6 (a) Plot of average output power as a function of pump power at a PRF of 100 MHz. (b) Average output power for various PRFs. (c) Estimated peak power as a function of PRF. The dashed lines show the simulated values calculated on the basis of the continuous-wave gain saturation and the partitioned gain models.

Fig. 7 (a) Auto-correlation trace of the amplified output. (b) Temporal evolution of amplified output. Measured contrast ratio of prepulses to main pulses is ~1:600.

$$g(I) = \frac{g_0}{1 + I/I_s} \quad (2)$$

を仮定して、相互作用する光波の数で利得領域を領域分割したモデルにより数値計算した結果である^{20,21)}。ここで、 g_0 は小信号利得、 I は増幅器へ入射する光強度、 I_s (～1 kW/cm²)は利得飽和強度である。実験値と良い整合が得られている。

空間モードはFig. 8に示すように良好であり、 M^2 値に換算して<1.5である。これに対して位相共役鏡に入射する直前の増幅されたマスターレーザー光のビーム品質は M^2 値で～4であることから、位相共役鏡がレーザー増幅器の熱収差を十分に補償していることがわかる。

現状では、Nd:YVO₄増幅器を冷却するために使用しているチラーの冷却能力と結晶マウントからの放熱の問題で励起パワーは80-90 Wで制限されているが、冷却ユニットの改善によって使用している半導体レーザーの最大出力まで励起することは十分可能である。

4. まとめ

位相共役鏡を用いた高出力ピコ秒レーザーシステムを開発した。最大平均出力は25 W、最高ピークパワーは6.8 MWである。光-光変換効率は30 %を超える。出力ビームの品

Fig. 8 Far-field pattern of the amplified output laser.

質は M^2 値に換算して <1.5 であった。システムの最大平均出力はNd:YVO₄増幅器の冷却を受け持つチラーの性能で制限されているが、冷却系の改善によって励起半導体レーザーの最大出力まで励起できれば、40 Wを超えるスケールアップは可能である。今回の実験では、入手しやすい808 nm帯半導体レーザーを励起光に用いたが、Ndイオンをレーザー上準位に直接励起できる880 nm帯半導体レーザーを用いれば、熱負荷が軽減できるのでパワースケールアップも容易になる。また、光-光変換効率も向上するので、さらなる省エネルギー効果が期待できる。

われわれが開発したレーザーシステムは一般に良く用いられている再生増幅器とは異なり、高利得増幅器と位相共役鏡だけで構成されている単純なMOPAシステムである。したがって、パルス繰返し周波数はポッケルスセルのスイッチング速度だけで決まり、100 kHzを超える高い繰返し動作が可能である。100 kHzを超える高い繰返し周波数とMWを超える高いピークパワーを兼ね備えた本レーザーシステムを用いれば、スループットの高い超高速微細加工が可能になる。

パルス幅がピコ秒～フェムト秒の超短パルスレーザーは潜在的に幅広い応用が期待されているが、高いフォトンコストが普及の大きな障害となっている。パワースケールアップの容易な高出力ピコ秒レーザーは超短パルス光のフォトンコストを大幅に下げ、超短パルスレーザーの潜在的市場を掘り起こす起爆剤になる可能性がある。

参考文献

- 1) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tunnermann: *Appl. Phys. A* **63** (1996) 109.
- 2) W. Koechner: *Solid-state laser engineering 4th ed* (Springer, 1995).
- 3) J. L. Blows, J. M. Dawes, and T. Omatsu: *J. Appl. Phys.* **83** (1998) 2901.
- 4) B. Ya. Zel'dovich, V. I. Popovichev, V. V. Ragul'skii, and F. S. Faizullov: *Sov. Phys. JEPT Lett.* **15** (1972) 109.
- 5) K. Tei, F. Matsumoto, M. Kato, Y. Maruyama, and T. Arisawa: *Opt. Lett.* **25** (2000) 481.
- 6) A. Brignon, J.-P. Huignard, M. H. Garrett, and I. Mnushkina: *Opt. Lett.* **22** (1997) 442.
- 7) T. Omatsu and M. J. Damzen: *Opt. Commun.* **198** (2001) 135.
- 8) T. Imaizumi, M. Goto, Y. Ojima, and T. Omatsu: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 2515.
- 9) K. Nawata, M. Okida, K. Furuki, and T. Omatsu: *Opt. Express* **15** (2007) 9123.
- 10) C. Stolzenburg and A. Giesen: *Proc. Advanced Solid-State Photonics (ASSP)* (2007) paper MA6.
- 11) F. Röser, D. Schimpf, O. Schmidt, B. Ortaç, K. Rademaker, J. Limpert, and A. Tünnermann: *Opt. Lett.* **32** (2007) 2230.
- 12) J. L. Blows, T. Omatsu, J. Dawes, H. Pask, and M. Tateda: *Photon. Tech. Lett.* **10** (1998) 1727.
- 13) S. A. Amarande and M. J. Damzen: *Opt. Commun.* **265** (2006) 306.
- 14) P. Yeh: *Introduction of photorefractive nonlinear optics* (Wiley, 1993).
- 15) K. Vahala, K. Kyuma, A. Yariv, S. Kwong, M. Cronin-Colomb, and K. Y. Lau: *Appl. Phys. Lett.* **49** (1986) 1563.
- 16) J. E. Bernard and A. J. Alcock: *Opt. Lett.* **18** (1993) 968.
- 17) M. J. Damzen, M. Trew, E. Rosas, and G. J. Crofts: *Opt. Commun.* **196** (2001) 237.
- 18) A. Minassian and M. J. Damzen: *Opt. Commun.* **230** (2004) 191.
- 19) L. Lombard, A. Brignon, J. P. Huignard, E. Lallier, G. Lucas-Leclin, P. Georges, G. Pauliat, and G. Roosen: *Opt. Lett.* **29** (2004) 989.
- 20) A. Yariv: *Optical Electronics 4th Ed.* (Saunders, 1991); R. Fisher: *Optical phase conjugation* (Academic, 1983).
- 21) Y. Ojima, K. Nawata, and T. Omatsu: *Opt. Express* **13** (2005) 8933.