

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008 年度
 課題番号：18360031
 研究課題名 (和文) 無秩序結晶バナデート混晶の利得飽和効果を用いた超短パルス領域位相共役光学
 研究課題名 (英文) Ultra-fast phase conjugation through saturable amplification in disordered mixed vanadate crystal
 研究代表者 尾松孝茂 (TAKASHIGE OMATSU) 千葉大学・大学院融合科学研究科・教授 30241938

研究成果の概要：

側面励起型Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄増幅器を用いた超短パルス位相共役レーザーを開発した。側面励起型Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄増幅器と位相共役鏡を組み合わせた位相共役レーザーシステムにおいて平均出力16W、パルス幅<4.5psを達成した。パルス幅性能から換算したピークパワーの面でNd:GdVO₄を完全に凌駕する。得られた最大ピークパワーは200kW(励起パワー70W時)に達した。また、出力光のパルス幅は位相共役レーザーにおいて最短パルス幅である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
19年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：レーザー、非線形光学

科研費の分科・細目：応用物理学/工学基礎・量子光工学/応用光学

キーワード：レーザー、非線形光学、位相共役光学、バナデート混晶

1. 研究開始当初の背景

位相共役波は空間反転性を示す光である。位相共役波を発生する位相共役鏡を用いると光が伝播中に受ける様々な位相歪を自動的に補償することができる。例えば、高出力レーザー装置に適用するとレーザー装置に発生するいかなる熱収差も自動補償し、高いビーム品質を維持したまま高出力レーザーを発生させることができる。

もし、位相共役鏡を超微細加工、量子分光で標準光源となりつつあるサブピコ秒～フェムト秒領域で利用できたら、回折限界に迫る高いビーム品質を示す画期的な次世代高平均出力超短パルスレーザーを創成できる。

しかしながら、現在、サブピコ秒～フェムト秒領域において実用レベルにある位相共役レーザーは国内外に実在しない。

2. 研究の目的

本研究の目的は大きな誘導放出断面積と広いレーザー利得帯域を示す新しいレーザー結晶、無秩序結晶(バナデート混晶)が示す利得飽和効果を極限まで有効利用し、サブピコ秒～フェムト秒の超短パルス光に対して究極的な性能(高出力、高強度、超短パルス)を示す位相共役レーザーシステムを実現することである。

3. 研究の方法

無秩序系バナデート混晶の潜在的なポテンシャルと優位性を検証するため、以下の研究項目について検討した。実験には、結晶育成しやすいNd:Gd_xY_{1-x}VO₄混晶を用いた。

- 1) Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄のレーザー特性
- 2) Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄混晶を用いた位相共役ピコ秒レーザー
- 3) 1.3μm帯レーザー特性

4. 研究成果

1)バナデート混晶のレーザー特性

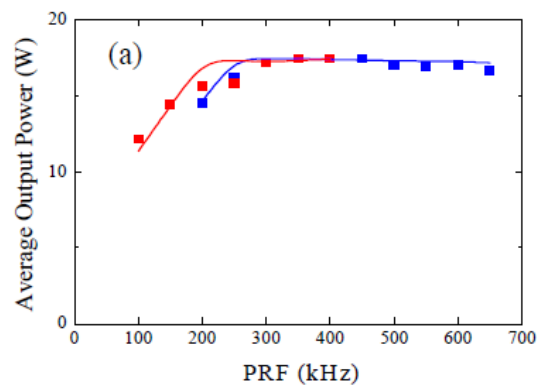
誘導放出断面積、飽和強度など主な物性を明らかにするために、Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄混晶を取り上げ、能動、受動Qスイッチにおけるレーザー特性を解析した。

一般に、Qスイッチレーザーにおいては、誘導放出断面積の大きさが得られるQスイッチパルスのパルス幅、パルス繰り返し周波数を決定する。誘導放出断面積が大きいNd:YVO₄やNd:GdVO₄では、低いパルス繰り返し周波数

では、安定に動作しない。そのため、パルスエネルギーの大きなパルスを得ることが難しい。逆に、誘導放出断面積の小さなNd:YAGでは、パルス繰り返し周波数が上がらない。

バナデート混晶では、混晶比 x を変えるだけで誘導放出断面積と蛍光スペクトル線幅が任意に調整できるので、所望のパルス繰り返し動作とパルスエネルギーを自在に達成できる可能性がある。

側面励起型のレーザー配置で音響光学素子(AOM)によるQスイッチ動作を行った。用いた結晶はNd:Gd_{0.4}Y_{0.6}VO₄、Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄の2種類である。前者は300-650kHz、後者は100-400kHzのパルス繰り返し周波数の範囲でパルス幅10-40nsの安定なQスイッチ動作を示



し、レーザー出力も10Wを超えた。

図1 パルス繰り返し周波数とレーザー出力。青は Nd:Gd_{0.4}Y_{0.6}VO₄、赤は Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄を示す。

Nd:YVO₄では、パルス繰り返し周波数が1MHzを超え、大きなパルスエネルギーが取れず、また、Nd:YAGでは、パルス繰り返し周波数は200kHzを超えない。このことから、Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄混晶の最も大きな特徴である混晶比を変えることで誘導放出断面積が可変できることが実験的に検証できた。

また、Cr:YAGを用いた受動Qスイッチにおいても8Wを超える安定なQスイッチ動作を確認した。さらに、混晶比 x やNd添加濃度を変えることで、バナデート混晶の誘導放出断面積が自在に制御できるため、安定にQスイッチ動作するパルス繰り返し周波数を制御できることが分かった。誘導放出断面積と利得帯域幅の積は一定であることから、混晶比を変えることで利得帯域幅も可変できる。

最も利得が小さくなるNd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄においても最大パルス繰り返し周波数がNd:YAGの2倍であることから、蛍光線幅でNd:YVO₄の2-3倍広く、誘導放出断面積でNd:YAGの2倍大きな優れたレーザー特性が確認できた。

2) バナデート混晶を用いた位相共役ピコ秒レーザー

側面励起型Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄増幅器のピコ秒レーザーに対する小信号利得を測定した。測定に用いたマスターレーザーは1064nm帯で1nm以上のスペクトル幅を示すピコ秒(~5ps)ファイバーレーザーである。利得帯域幅を広くするため、混晶比は0.6のものを用いた。励起パワーとともにNd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄増幅器の小信号利得は増加し、50W励起時に~40倍を観測した。この値は、Nd:YAGに比べ桁近く大きく、バナデート混晶が大きな誘導放出断面積を有することを示す。また、一般に飽和増幅が起こると増幅光のスペクトル線幅は狭窄化され、パルス伸長が起こるが、Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄増幅器では、パルス伸長は一切観測されなかった。

このことから、Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄増幅器がNd:YVO₄やNd:GdVO₄より広い利得幅を有することがわかる。

これらの実験を踏まえ、側面励起型Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄増幅器を用いた超短パルス位相共役レーザーを開発した。側面励起型Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄増幅器と位相共役鏡を組み合わせた位相共役レーザーシステムにおいて平均出力16W、パルス幅<4.5psを達成した。パルス幅性能から換算したピークパワーの面でNd:GdVO₄を完全に凌駕する(図2)。

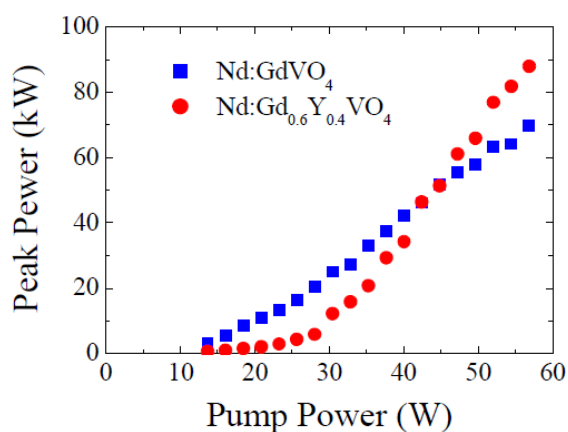


図2 Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄位相共役レーザーとNd:GdVO₄位相共役レーザーの比較特性。

得られた最大ピークパワーは200kW(励起パワー70W時)に達した。得られた出力光のバ

ルス幅はマスターレーザーより短く、スペクトル線幅の狭窄化も一切見られない。このパルス幅はこれまで得られた位相共役レーザーにおいて最短パルス幅である。利得帯域幅を有効に利用してパルス圧縮を行えば、サブピコ秒パルスの発生も可能である。

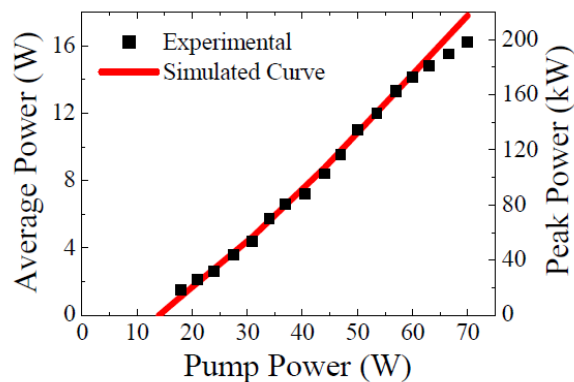


図3 Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄位相共役レーザーの出力特性。

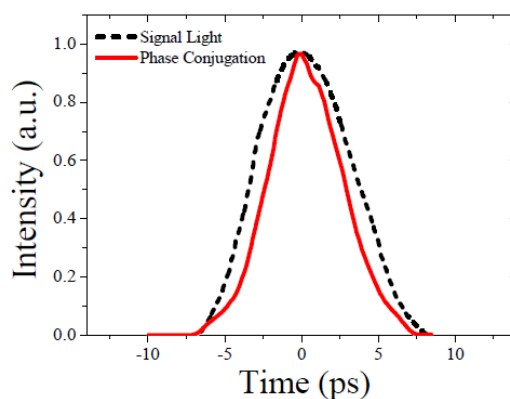


図4 Nd:Gd_{0.6}Y_{0.4}VO₄位相共役レーザーの出力パルス波形。パルス幅は4.5psとこれまでの最短である。

4) 1.3μm帯レーザー特性

バナデート混晶の1.3μm帯における誘導放出断面積、飽和強度など主な物性を明らかにするために、Nd:Gd_xY_{1-x}VO₄結晶を取り上げ、受動Qスイッチ素子V:YAGを用いてレーザー特性を解析した。

その結果、通常のバナデートに比べ、ピークパワーで2倍、最短パルス幅で1/2というはるかに良好なQスイッチ特性が見られた。パルス繰り返し周波数は150kHzで安定なQスイッチ動作を示す。レーザー出力も6Wを超えることから、バナデート混晶が1.3μmレーザー結晶としても有望であることがわかった。今後、位相共役レーザーへ展開する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1) N. Shiba, Y. Morimoto, K. Nawata, K. Furuki, Y. Tanaka, M. Okida, T. Omatsu, "Picosecond master-oscillator, power-amplifier system based on a mixed vanadate phase conjugate bounce amplifier", Optics Express, **16** Issue 21, (2008) 16382-16389.

2) M. Ostermeyer, H.J. Kong, V.I. Kovalev, R.G. Harrison, A.A. Fotiadi, P. Mégret, M. Kalal, O. Slezak, J.W. Yoon, J.S. Shin, D.H. Beak, S.K. Lee, Z. Lü, S. Wang, D. Lin, J.C. Knight, N.E. Kotova, A. Sträßer, A. Scheikh-Obeid, T. Riesbeck, S. Meister, H.J. Eichler, Y. Wang, W. He, H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka, T. Hatae, H. Park, C. Lim, T. Omatsu, K. Nawata, N. Shiba, O.L. Antipov, M.S. Kuznetsov and N.G. Zakharov, "Trends in stimulated Brillouin scattering and optical phase conjugation", Laser and particle beams, **26** No.3 (2008) 297-362.

3) 尾松孝茂、縄田耕二、"位相共役鏡を用いた高出力高品位バナデートレーザー"、レーザー研究、**36** No. 5 (2008) 289-293.

4) T. Omatsu, A. Minassian, M.J. Damzen, "Passive Q-switching of a diode-side-pumped Nd doped mixed gadolinium yttrium vanadate bounce laser", Appl. Phys. B **90** No.3-4 (2008) 445-449.

5) K. Nawata, M. Okida, K. Furuki, T. Omatsu, "MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier", Optics Express, **15**, No. 15 (2007) 9123-9128.

6) K. Nawata, Y. Ojima, M. Okida, T. Ogawa, T. Omatsu, "Power scaling of a pico-second Nd:YVO₄ master-oscillator power amplifier with a phase-conjugate mirror", Optics Express **14**, No. 22 (2006) 10657-10662.

7) T. Omatsu, M. Okida, A. Minassian, M.J. Damzen, "High repetition rate Q-switching performance in transversely diode-pumped Nd doped mixed gadolinium yttrium vanadate bounce laser", Optics Express **14** No.7 (2006) 2727-2734.

[学会発表] (計 11 件)

1) 尾松孝茂、"100W 級高出力ピコ秒位相共役

レーザーシステム"、レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会(徳島大学、2009/1/12)(招待講演)

2) 尾松孝茂、"レーザーディスプレイ用固体レーザー" 第 1 回レーザーディスプレイ研究会 (東京大学生産技術研究所・コンベンションホール、2008/7/14)(招待講演)

3) 尾松孝茂、"高速繰り返し高出力ピコ秒バナデートレーザーの開発とその最新動向"、多元技術融合光プロセス研究会第 1 回研究交流会(アルカディア市ヶ谷、2008/7/8)(招待講演)

4) 尾松孝茂、"サブ MHz 繰り返し高強度コンパクトピコ秒パルスレーザーとその加工応用" 第 70 回レーザー加工学会講演会 (大阪大学コンベンションセンター、2008/5/28)(招待講演)

5) K. Nawata, N. Shiba, M. Okida, T. Omatsu, "11 MW pico-second pulses with >70 W average power from a phase-conjugate Nd:YVO₄ bounce laser system", CLEO 2008 (San Jose, 4-9 May 2008) CFB5

6) N. Shiba, K. Nawata, K. Furuki, Kenji, T. Omatsu, "0.35 MW Pulses with 44 W Average Power from a Picosecond Phase-Conjugate Nd:GdVO₄ Laser System", Advanced Solid-State Photonics (ASSP) 2008 paper: MC5

7) T. Omatsu, K. Nawata, K. Kuroda, A. Minassian, M.J. Damzen, "High Power Pico-Second Output from a Diode-Pumped Nd:YVO₄ Phase Conjugate Laser", Controlling Light with Light Topical Meeting (PR2007) (California, USA, 14 - 16 Oct., 2007) TuB4

8) K. Nawata, T. Omatsu, "Mega-Watt Pulse Generation from a Pico-second Nd:YVO₄ Phase Conjugate Laser System", CLEO Pacific-Rim 2007, (Seoul, Korea, 26-31 Aug. 2007) MA2_5

9) T. Omatsu, "High power pico-second phase conjugate Nd:YVO₄ laser", SBS and Phase Conjugation workshop 2007 (Potsdam, Germany, 25-28 Sept. 2007) (招待講演)

10) T. Omatsu, K. Nawata, "Ultra-fast phase conjugate laser system", CLEO-Europe 2007 (Munich, 17-22 June 2007) CC3_5(招待講演)

11) 尾松孝茂、"位相共役鏡を用いた高品位高出力超短パルスレーザー"、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会 (宮崎市フェニックスシーガイアリゾート、2007 1/18-19)(招待講演)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 3 件）

1)“レーザー加工方法”、特願2009-79680、尾松孝茂、森田隆二、丹田 聡、2009.3.27.

2) “光増幅器及びそれを用いた光増幅システム”、特願2008-141704, 尾松孝茂、2008.5.29

3) “レーザー増幅器、レーザー発振器、レーザー増幅方法およびレーザー発振方法”、特願2007-136864、尾松孝茂、2007.5.23.

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

「新聞発表」

1)2008.1.7 化学工業日報 100 ワットピコ秒パルスレーザー開発へ

2)2006/7/11 位相共役鏡を用いた小型ピコ秒パルスレーザー アルネアラボラトリーとの共同開発が日刊工業新聞に掲載

「解説記事」

1) 尾松孝茂、”位相共役光学を用いた高出力ピコ秒レーザーのコヒーレンス制御”、応用物理 **78** No.3 (2009) 242-247.

6. 研究組織

(1)研究代表者

尾松孝茂 (TAKASHIGE OMATSU) 千葉大学・大学院融合科学研究科・教授・30241938

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

和田智之 (SATOSHI WADA) 理化学研究所・固体光学デバイスユニット・ユニットリーダー・90261164