

機関番号：32644

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560039

研究課題名 半導体レーザ励起マイクロチップ固体レーザの横モード制御と応用技術に関する研究

研究課題名 Research on Transverse Mode Control of Laser-Diode-Pumped Microchip Solid-state Lasers and Application Technology

研究代表者

大塚 建樹 (OTSUKA KENJU)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：60266369

研究成果の概要（和文）：半導体レーザダイオード（LD）励起薄片マイクロチップ固体レーザを舞台に、新たな手法に基づく発振横モードの制御法の開発と応用技術に関する研究を推進した。各種固体レーザ材料について、LD 端面励起大口径薄片レーザおよび小型共振器構成（マイクロチップ）レーザにおいて特徴的に発現する発振パターンと付随するスペクトル・偏光特性並びに動的効果を系統的に明らかにした。横モードの人為的制御および新奇光渦（ボルテックス）・光渦アレーレーザビーム発生手法を開発した。これらの発振パターン制御の研究と並行して、LD 励起自己混合マイクロチップ固体レーザ計測装置の高性能化および応用範囲の拡大を達成した。

研究成果の概要（英文）：We performed the research on the development of a novel technique toward controlling transverse lasing patterns and its applications with laser-diode-pumped microchip solid-state lasers. We clarified peculiar lasing pattern formation, which is inherent to wide-aperture thin-slice or microchip cavity configurations with laser-diode end pumping, associate optical spectral characteristics, polarization properties and dynamic effects. We have developed the promising technique for controlling transverse lasing patterns and generating a new class of optical vortex and vortex array laser beams. In conjunction with the research of mode control, we achieved the great advancement of self-mixing microchip solid-state laser metrology systems and widened their application schemes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学、工学基礎・応用光学、量子光工学

キーワード：レーザー

1. 研究開始当初の背景

LD励起薄片固体レーザは、非線形レーザ物理・非線形ダイナミクスの優れた研

究対象であることが、報告者らのこれまでの研究成果により実証され、複雑系の普遍現象の発見、複雑系ダイナミクスの

特徴づけの解析手法の開発に結びついている（例えば、Physical Review Letters 7 報）。直近の成果として、LD 励起薄片固体レーザーの微小な反射鏡端面でのランダムな凹凸に起因する、新奇な発振パターン（複合格子モード、単一周波数スペックルモード、等）の自己形成と付随する高速自己変調を発見している [K. Otsuka 他：Physical Review Letters, 2006; Physical Review A, 2007]。

また、LD 励起薄片固体レーザーの応用技術として、申請者らは LD 薄片固体レーザーの極めて大きな蛍光対光子寿命比に直接起因した、外部戻り光に対する驚異的な光感度の自己混合変調効果 (K. Otsuka: IEEE J. Quantum Electron. 1979) を利用した「自己混合レーザー計測技術」を開拓し、多チャンネル実時間 nm 振動計測、濃度 100 ppb 以下の水分散ブラウン粒子の運動解析、植物プランクトン等のバイオセンシング、流体計測、流体中の極微量粒子の検出などを実現してきた [例えば、Applied Optics, 2005; Japanese Journal of Applied Physics (Express Letter) 2006; Optics Express, 2006, 2007]。

2. 研究の目的

本研究では、LD 励起薄片固体レーザーを舞台にし上記成果に立脚し、非線形レーザー科学と自己混合レーザー計測技術の両面からの研究を深化・融合させるとともに、新たに、「発振パターン制御とボルテックス・レーザービームの生成と応用技術」へ展開を目指した。

3. 研究の方法

平成 20 年度は、

- ① LD に対する吸収長が短く、薄片自己混合レーザー用材料として有望な Nd や Yb を高濃度ドープしたセラミックを研究対象にし、微小結晶グレイン構造に起因する局所モードへの分裂 [K. Otsuka 他：Applied Physics Letters, 2006] を抑圧するための、発振パターン・スペクトル制御法の開発と自己混合レーザー計測への応用、
- ② LD 励起ミニアチュア共振器固体レーザーを用いて原子を含む極微粒子の捕獲・運動制御を目指したレーザー発振パターン制御と多重ボルテックス・レーザービームの新しい発生法の開発、

をターゲットに研究を行った。

後続年度では、

- ① 多点同時計測あるいは迅速な面計測などの空間並列レーザー計測技術の開発を目指した、自己混合レーザー計測用の LD 励起薄片固体レーザー・アレーの実現、
- ② 多重ボルテックス・ビームによる粒子捕獲・運動制御の自己混合レーザーによる観測・解析法の達成、
をターゲットとして研究を行った。

4. 研究成果

研究の経過と主要な成果を年度ごとに述べる。対応する成果として、**主な発表論文**の項目に記載した原著論文・国際会議論文・図書論文の番号を付記した。

平成 20 年度：

研究計画書に則り、平成 20 年度は、高効率な半導体レーザー (LD) 励起固体レーザー用材料として有望な Nd や Yb を高濃度ドープしたセラミックを対象に、横モード制御の研究を遂行すると共に、自己混合レーザー計測へ応用し、更なる高光感度化を図った。以下の成果が得られた。

横モード制御

- (1) 平均グレイン・サイズが 1 μm 程度の微粒 Nd:YAG セラミックレーザーを LD により端面励起することにより、単一周波数、直線偏光の基本横モード (TEM₀₀) 発振が達成された。グレイン・サイズが数 10 μm のセラミックレーザーにおける局所横モードへの分裂が高密度に存在するグレイン境界で熱歪が劇的に緩和されることを偏光特性の解析より明らかにした (原著論文リスト: **論文4**)。
- (2) LD 軸ずれ励起法によりエルミート・ガウス [Hermite-Gauss (HG)] モードの選択発振を実現し、試作した回転制御型モード変換器に導入し、多重チャージ光渦ビームの生成を達成した (**論文1, 3**)。
- (3) 薄片 LNP レーザーの大口径非対称 LD 励起により、インス・ガウス [Ince-Gauss (IG)] モードペアの生成と非線形相互作用に基づく、光渦アレービームの自己生成を発見し、理論的に再現した (**論文6**, 国際会議論文リスト: **論文1**)。また、この光渦生成原理を応用し、多重ピンセット用光

渦アレーを制御性良く生成する手法を考案し、理論的に検証した(論文2)。

- (4) 軸ずれ励起法で生成したIGモードビーム対を 180° の位相差を持つ非対称マッハ・ツェンダー光干渉計を用いて合波し、光渦アレービームを生成する手法を開発した(論文5)。

応用技術—自己混合レーザ計測

- (1) LD励起薄片Nd:GdVO₄レーザ、3チャンネルの周波数シフト光帰還系およびFM検波器で構成される多点・3次元測定用の自己混合レーザ計測装置を構築し、一台のレーザにより、①3つの独立したnm振動ターゲットの実時間同時計測、②ブラウン粒子の3次元運動計測、および③流体の速度ベクトル計測、を達成した(論文7)。

平成21年度：

研究計画書に則り、平成21年度は、半導体レーザ(LD)励起マイクロチップ固体レーザの発振パターン制御と光渦生成技術及び自己混合レーザ計測技術の高度化を中心に研究を遂行し、以下の成果が得られた。

横モード制御

- (1) 平均グレイン・サイズが $1\mu\text{m}$ 程度の微粒Nd:YAGマイクロ共振器セラミックレーザを直線偏光LDにより軸ずれ/斜角励起することにより、実効利得の偏光依存性、及びセラミック媒質の熱レンズ効果を介した発振ビームの曲がりにより、ベッセル・ガウス並びにマシュー・ガウスビームでの自己発振を見出した。微粒子を長い距離に亘ってトラップできる非回折ビームの生成として意義が大きい(論文8)。
- (2) LD軸ずれ励起法によるインス・ガウスモードの選択発振を実現し、自作の回転制御型非点収差モード変換器により、多様な形状(正方形、長方形、楕円)と空間的に分離した位相特異点(線状・格子状配列)を有する新規光渦ビームの生成に成功した。微粒子運動制御の自由度を拡大した点に意義がある(国際会議論文リスト：論文2)。

- (3) 蛍光異方性ない方向に切り出したC軸カットのNd:GdVO₄結晶を用い、LDにより軸ずれ/斜角励起することにより、直交偏光したインス・ガウスモードペア間の横モード同期現象を介した「空間一偏光もつれ発振」を見出し、理論的に再現した。ベクトル特異点を有するコヒーレント状態と考えられる(論文11)。

- (4) グレイン・サイズに依存するセラミックレーザの横モード、スペクトル、並びに偏光特性についての総合報告(招待論文)をOnline Web Bookに発表した(図書1)また、微粒セラミックレーザに関する外国特許を、米国及び欧州連合に出願し、現在、公開中である。

自己混合レーザ計測

- (1) 自己混合レーザのキラール・アプリケーションとして、多数のブラウン粒子の運動を一個の仮想粒子の運動に集約して計測する手法を開発し、仮想粒子と実粒子充填液の間に成立するスケール則を見出した。また、仮想粒子の平均自乗変位より、正確に実粒子の拡散係数が求められることを検証した(論文9)。
- (2) 蛍光寿命がNd系レーザより10倍長く、蛍光対光子寿命比に比例する自己混合変調の増強が見込まれるYb系固体レーザを検討した。Yb:YAGセラミックレーザを用いたドップラー速度計測の実験により、計測のS/NがNd:GdVO₄レーザに比べて20dB向上することが検証され、量子雑音効果を取り入れた理論解析により再現された。Yb:YAGを組み込んだ自己混合振動計を構築し、-120dBの光強度帰還率の下で、現実には不可避な環境振動に埋もれた10nm振幅のピエゾ振動の検出に成功した(論文10)。
- (3) 鞭毛により自発運動するプランクトン運動を補足し、平均速度や個体サイズを非修飾で定量的に計測することに世界で初めて成功した(論文12)。

平成22年度：

横モード制御

- (1) 前年度までに得られた、マイクロチップ固体レーザにおける横モードパターン生

成・制御に関する総合報告（招待論文）をマックス・プランク複雑系物理研究所でのワーク・ショップで行った（国際会議論文4, 5）。

- (2) 平成21年度に発見した、量子力学におけるSU(2)コヒーレント状態の巨視的Analogueである「空間一偏光もつれ」レーザー発振の崩壊のシナリオを実験的に見出した。軸ずれ励起による“利得導波モード”と光共振器による“幾何学的導波モード”の競合に基づく、動的不安定性の発現を検証した（論文14）。

自己混合レーザー計測

- (1) 「空間一偏光もつれ状態」で発振するマイクロチップ固体レーザーを用いて、自己混合レーザードップラー速度 (Laser Doppler Velocimetry; LDV) 計測を行い、もつれ状態を形成するIGモード対の電界強度比（即ち、偏光もつれ度）の増加に伴い、自己混合変調度が大幅に増加することを見出した。直線偏光で発振するレーザーに比べ、自己混合LDV信号強度が10 dB以上大きくなることが実験的に確認され、偏光もつれレーザーの自己混合レーザー計測への応用可能性が開けた。現在、理論的検証を行っている。
- (2) 報告者(大塚)が1979年に発見した、薄片固体レーザーにおける自己混合変調効果の原理と、我々が10年来、東海大学において行った自己混合レーザー計測技術とその将来展望をレビューした総合報告（招待論文）をSensors (Online Journal) に発表した（論文13）

5. 主な発表論文等

- (1) 原著論文【14件（うち、査読付き14件）】

平成20年度:

1. S.-C. Chu and K.Otsuka, "Doughnut-like beam generation of Laguerre-Gaussian mode with extremely high mode purity," Optics Communications **281**, 1647-1653 (2008).

2. T. Ohtomo, S.-C. Chu, and K. Otsuka, "Generation of vortex beams from lasers with controlled Hermite- and Ince-Gaussian modes," Optics Express **16**, 5082-5094 (2008).
3. S.-C. Chu, T. Ohtomo, and K. Otsuka, "Generation of doughnutlike vortex beam with tunable orbital angular momentum from lasers with controlled Hermite-Gaussian modes," Applied Optics **47**, 2583-2591 (2008).
4. K. Otsuka and T. Ohtomo, "Polarization properties of laser-diode-pumped micro-grained Nd:YAG ceramic lasers," Laser Physics Letters **5**, 659-663 (2008).
5. S.-C. Chu, C.-S. Yang, and K. Otsuka "Vortex array laser beam generation from a Dove prism-embedded unbalanced Mach-Zehnder interferometer," Optics Express **16**, 19934-19949 (2008).
6. K. Otsuka and S.-C. Chu, "Generation of vortex array beams from a thin-slice solid-state laser with shaped wide-aperture laser-diode pumping," Optics Letters **34**, 10-12 (2009).
7. T. Ohtomo, S. Sudo, and K. Otsuka, "Three-channel three-dimensional self-mixing thin-slice solid-state laser-Doppler measurements," Applied Optics **48**, 609-616 (2009).

平成21年度:

8. K. Tokunaga, S.-C. Chu, H.-Y. Hsiao, T. Ohtomo, and K. Otsuka, "Spontaneous Mathieu-Gauss mode oscillation in micro-grained Nd:YAG ceramic lasers with azimuth laser-diode pumping," Laser Physics Letters **6**, 635-638 (2009).
9. K. Otsuka, T. Ohtomo, H. Makino, S.

Sudo, and J.-Y. Ko, "Net motion of an ensemble of many Brownian particles captured with a self-mixing laser," *Applied Physics Letters* **94**, 241117, 1-3 (2009).

10. T. Ohtomo and K. Otsuka, "Yb:Y₃Al₅O₁₂ laser for self-mixing laser metrology with enhanced optical sensitivity," *Japanese Journal of Applied Physics* **48**, 070212, 1-3 (2009).
11. K. Otsuka, S.-C. Chu, C.-C. Lin, K. Tokunaga, and T. Ohtomo, "Spatial and polarization entanglement of lasing patterns and related dynamic behaviors in laser-diode-pumped solid-state lasers," *Optics Express* **17**, 21615-21627 (2009).
12. S. Sudo, T. Ohtomo, Y. Takahashi, T. Oishi, and K. Otsuka, "Determination of velocity of self-mobile phytoplankton using a self-mixing thin-slice solid-state laser," *Applied Optics* **48**, 4049-4055 (2009).
13. K. Otsuka, "Polarization properties of laser-diode-pumped microchip Nd:YAG ceramic lasers," *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, Book edited by: Bishnu Pal, ISBN: 978-953-7619-82-4, Publisher: InTech, Publishing date: February 2010
[Invited paper]

平成 2 2 年度:

13. K. Otsuka, "Self-mixing thin-slice solid-state laser metrology," *Sensors*, **11**, 2195-2245 (2011).
14. K. Otsuka, Y.-T. Chen, S.-C. Chu, C.-C. Lin, and J.-Y. Ko, "Chaotic oscillations associated with the breakup of polarization entangled coherent states in a microchip solid-state laser," *Optics*

Letters **36**, 960-962 (2011).

(2) 国際会議 【5件 (うち、招待講演3件)】

平成 2 0 年度:

1. K. Otsuka, "Spontaneous pattern formation and dynamic effects in thin-slice solid-state lasers with shaped laser-diode pumping," *Dynamics Days in Asian Pacific*, Nara (September 2008). **[Invited paper]**

平成 2 1 年度:

2. S.-C. Chu, T. Ohtomo, K. Tokunaga, and K. Otsuka, "Generation of vortex laser beams by converting Ince-Gaussian laser beams with an astigmatic mode converter," *Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO) Pacific Rim*, Shanghai (September 2009).
3. S.-C. Chu and K. Otsuka, "Selective excitation of high-order laser modes and its application to vortex array laser beams generation," *SPIE Photonic West*, San Francisco (January 2010).

平成 2 2 年度:

4. K. Otsuka, "Transverse pattern formation in solid-state lasers and dynamic effects," *Workshop on Optical Microcavities*, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden (May 2010). **[Invited paper]**
5. K. Otsuka, "Controlling transverse modes and singular optics with microchip

solid-state lasers,” *Workshop on Optical Microcavities*, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden (May 2010). **[Invited paper]**

(3) 国内学会【5件（うち、招待講演1件）】

平成20年度:

1. 大友高行, 須藤誠一, 大塚建樹「半導体レーザー励起薄片自己混合固体レーザーによる多点・多次元実時間計測」第69回応用物理学学会学術講演会, 中部大学(2008年9月)
2. 宮坂善彦, 大塚建樹「LD励起マイクロチップ固体レーザーによる光渦ビームの生成」第69回応用物理学学会学術講演会, 中部大学(2008年9月)

平成21年度:

3. 徳永恵祐, 林慶一, 大友高行, 大塚建樹「半導体レーザー励起微粒Nd:YAGセラミックレーザーにおけるベッセルビーム的自発発振」第56回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学(2009年4月1日)
4. 大友高行, 大塚建樹「Yb:YAGレーザーによる自己混合計測の高感度化」第56回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学(2009年3月30日)

平成22年度:

5. 大塚建樹「薄片固体レーザーにおける自己混合変調効果と光計測技術への応用」散乱研究会、日本薬学会長井記念館、東京(2010年11月4日) **【招待講演】**

(4) 図書【1件】

1. K. Otsuka, “Polarization properties of laser-diode-pumped microchip Nd:YAG ceramic lasers,” *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, Book edited by: Bishnu Pal, ISBN: 978-953-7619-82-4, Publisher: InTech, Publishing date: February 2010 **[Invited paper]**

(5) 特許出願【2件】

外国出願

1. 欧州連合:K. Otsuka, “Laser Oscillator and Laser Beam Oscillation Method” PCT/JP2008/64755 (国内番号: 特願2009-530056); EP 2 187 487 A1 (公開日: 2010年5月19日)
2. 米国:K. Otsuka, “Laser Oscillator and Laser Beam Oscillation Method” PCT/J P2008/64755 (国内番号: 特願2009-530056); US-2010-0215069-A1 (公開日: 2010年8月26日)

[その他]

<http://www.ds.u-tokai.ac.jp/news/>
(ホーム・ページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 建樹 (OTSUKA KENJU)
東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 60266369

(2) 研究分担者

該当なし