

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360352

研究課題名（和文） 空間偏光制御したファイバーレーザーによる高効率・高精度レーザー加工

研究課題名（英文） Highly efficient and precise laser processing by fiber laser with controlled spatial polarization

研究代表者

佐藤 俊一（SATO SHUNICHI）

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：30162431

研究成果の概要（和文）：

偏光分布が不均一であるレーザービームの発生と増幅を行った。特に、径偏光および方位偏光ビームを中心に、高品質な種光の発生と、光ファイバーによるその増幅実験を行った。複屈折性レーザー媒質を用いて、高出力で高品質な径および方位偏光ビームの発振に成功した。さらに、薄板レーザーと偏光選択ミラーを用いて熱効果を極力抑制することによって、性能向上を実現した。高次横モードレーザーの発振にも成功した。

研究成果の概要（英文）：

We performed the generation and amplification of laser beams with inhomogeneous polarization distribution. Especially, high quality seed beams with radial and azimuthal polarizations were generated and amplified by using an optical fiber. High power and high quality beams with radial and azimuthal polarizations were successfully achieved by using a birefringent laser material. Furthermore, the performance was improved by a thin disk and polarization selective mirrors as a result of suppression of thermal effects. Higher order transverse mode laser beams were also obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：偏光、レーザー、加工

1. 研究開始当初の背景

偏光分布が不均一であるレーザービームはベクトルビームと呼ばれているが、その中でも径偏光および方位偏光は、ビームを集光しながら物体に垂直に照射した場合、それぞれ p 偏光および s 偏光のみとなるため、従来用

いられている直線および円偏光に較べて、物質に吸収される割合が異なるため、加工用レーザーとしての利用が期待されている。そのためには、十分な出力と品質を併せ持つレーザー光の利用が不可欠であるが、その技術は未開拓であった。

2. 研究の目的

本研究では、偏光分布を空間的に制御したレーザービームの発生方法を開発し、レーザー加工に十分な出力と品質を得ることを目的としている。従来われわれが開発してきた、複屈折性レーザー媒質を用いる方法に改良を加え、出力と品質の両方の改善を図りながら、より優れた方法の探索と加工用レーザーに対応できる技術開発基盤形成を目指す。

3. 研究の方法

ベクトルビームの発振には、レーザー共振器自体が円筒対称性を有していることが十分条件であるので、複屈折性レーザー結晶のc軸を光軸と一致させることで、先の条件を満たす共振器を設計・試作する。得られるレーザービームの出力や強度および偏光分布などを精密に計測し、ビーム品質の評価を行う。その結果に基づき、レーザー加工に十分な性能を有しているか、検討する。出力が十分でない場合は、光ファイバー増幅器による増幅を試みる。これらの結果を総合的に判断し、更なるレーザー特性の改善を目指した方策を立てて、実用の高いレーザー加工用光源の基盤技術の確立を図る。

4. 研究成果

まず、c軸カットのNd:YVO₄結晶を用いたベクトルビーム発振器を準備した。複数の半導体レーザー光によって結晶の側面から励起する配置となっている。得られた出力は約100mWであり、これを種光としてYbドープダブルクラッド光ファイバー内に導いた。図1に示すように、励起光源には同様に半導体レーザーを用いている。図2は種光および増幅光の強度分布の測定例である。

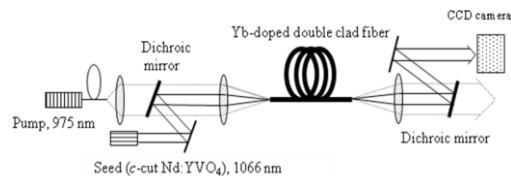


図1 光ファイバー増幅器の概略

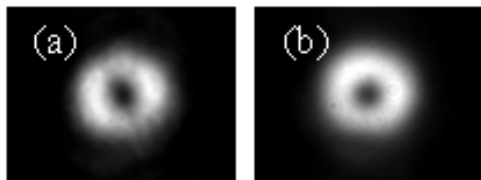


図2 径偏光ビームの強度分布。(a)種光および(b)増幅光

種光および励起光の強度をパラメータとして増幅実験を行ったところ、おおよそ10倍の増幅を確認することができた。種光の出力に依存して、増幅光のスペクトルが変化することが観測された。種光の出力が大きいほど、増幅光に含まれる増幅された自然放出光の

割合が低下することが見出された。このことにより、さらに大きな増幅光出力を得るためには、より大きな種光出力が必要であることが判明した。

そこで、種光用のレーザー共振器を再度設計・試作を行った。今回は、励起効率を上げるために、励起光である半導体レーザー光を光ファイバーによってレーザー結晶の端面から入射する配置とした。これによって、共振器内のレーザービームと励起光の空間的重複が改善され、量子効率の向上を期待した。実際に、レーザー発振を試みたところ、約1Wの出力を得ることができた。ただし、レーザー光の偏光分布は方位偏光となっていた。この原因を探るために、出力ビームの特性を詳細に検討したところ、レーザー媒質であるNd:YVO₄結晶内で強い熱効果が生じていることが判明した。これは、レーザー共振器をできるだけコンパクトになるように設計したため、Nd:YVO₄結晶長を短くしたことが大きな理由であると考えられた。すなわち、Ndのドーパ量を大きくしたため、単位長さあるいは体積当たりの光吸収あるいは発熱量が大きくなり、十分に排熱されずに結晶内に熱が蓄積し、結果として結晶内に温度分布に起因する屈折率分布を誘起したものと考えられる。しかしながら、得られた方位偏光ビームの出力やビーム品質は十分である上に、波長板をベースにした偏光変換素子によって容易に径偏光へ変換することができるので、光ファイバー増幅用種光として問題は無いことが分かった。

これらの成果を踏まえ、熱効果を低減したベクトルビームの発振方法を検討した。前述のレーザー結晶はロッド状であるため、中心部分で発生した熱は結晶内を伝わってロッド外に届く必要があり、結晶と雖も排熱には限界があった。これに対して、レーザー結晶を数100ミクロンまで薄くし、熱伝導に優れた金属を接触させた構造にすると、熱の蓄積が大きく改善されることが分かっている。本研究では、この薄板レーザーに注目し、ベクトルビームの発振器として採用することを検討した。前述の方法では、レーザー結晶の複屈折性を利用して、レーザービームの偏光を制御したが、薄板レーザーに適している媒質は等方性であるため、この方法を適用することが困難である。そのため、レーザー共振器の一部であるミラーとして、反射多層膜の2次元周期構造に起因して偏光選択性を有するミラーを採用することとした。その結果、薄板の熱伝導特性を全く損なうことなく、ベクトルビームの発振を得ることができた。径および方位偏光ビームに対して、それぞれ約20Wおよび40Wの出力が得られた。この出力の違いは、偏光に起因するものではなく、使用した偏光選択ミラーの仕様によるもの

で、最適化することによって径偏光の場合でも 40W の出力が期待できる。ビーム品質も理論値とほぼ等しい値が得られており、レーザー加工用ベクトルビーム光源として十分な出力および品質を有する光源を開発することができた。

さらに、高アスペクト比を有するレーザー加工を実現するための光源として必要な、高次横モードベクトルビームの開発も行った。通常のレーザーはガウス型の強度分布を有しているため、高次横モードは徹底して排除されるようなレーザー共振器構造が採用されていた。しかし、ここでは逆に高次横モードを選択的に発振する必要があるため、従来の方法では高次横モードの発振は期待できない。本研究では、レーザー共振器の空間的損失または利得を制御する方法を新たに開発した。損失を制御する方法では、数多くの高次横モードベクトルビームの発振が観測された。また、利得を制御する方法においても、複数の高次横モードビームの発振に成功した。特に、ベクトルベッセルガウスビームでは、モード次数が 30 を超えるビームの発振が確認された。詳細な偏光計測を行ったところ、このビームは伝播と共に偏光の割合が変化することが明らかとなった。これは、ベクトルヘルムホルツ方程式から予測される、ベクトルビームに特有の現象であり、世界的にも初めて観測されたものと考えている。

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 12 件)

- ① Ken Kano, Y. Kozawa and S. Sato, Generation of a purely single transverse mode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror, 査読有, *International Journal of Optics*, **2012**, 359141 (2012).
- ② P. Senthilkumar, Jan Masajada and S. Sato, Interferometry with vortices, 査読有, *International Journal of Optics*, **2012**, 517591 (2012).
- ③ K. Shimohira, Y. Kozawa and S. Sato, Transverse mode control by manipulating gain distribution in a Yb:YAG ceramic thin disk, 査読有, *Optics Letters*, **36**, 4137-4139 (2011).
- ④ Y. Kozawa, T. Hibi, A. Sato, H. Horanai, M. Kurihara, N. Hashimoto, H. Yokoyama, T. Nemoto, and S. Sato, Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam, 査読有, *Optics Express*, **19**, 15947-15954 (2011).
- ⑤ S. Vyas, M. Niwa, Y. Kozawa and S. Sato,

Diffraction properties of obstructed vector Laguerre-Gaussian beam under tight focusing condition, 査読有, *Journal of Optical Society of America A*, **28**, 1387-1394 (2011).

- ⑥ S. Vyas, M. Niwa, Y. Kozawa and S. Sato, Self-healing of tightly focused scalar and vector Bessel-Gauss beams at the focal plane, 査読有, *Journal of Optical Society of America A*, **28**, 837-843 (2011).
- ⑦ W. C. Shen, C. W. Cheng, M. C. Yang, Y. Kozawa and S. Sato, Fabrication of novel structures on silicon with femtosecond laser pulses, 査読有, *Journal of Laser Micro/nanoengineering*, **5**, 229-232 (2010).
- ⑧ Y. Kozawa and S. Sato, Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams, 査読有, *Optics Express*, **18**, 10828-10833 (2010).
- ⑨ Y. Kozawa and S. Sato, Demonstration and selection of a single-transverse higher-order-mode beam with radial polarization, 査読有, *Journal of Optical Society of America A*, **27**, 399-403 (2010).
- ⑩ A. Ito, Y. Kozawa, and S. Sato, Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror, 査読有, *Journal of Optical Society of America A*, **27**, 2072-2077 (2010).
- ⑪ A. Ohtsu, Y. Kozawa, and S. Sato, Calculation of second-harmonic wave pattern generated by focused cylindrical vector beams, 査読有, *Applied Physics B*, **98**, 851-855 (2010).
- ⑫ S. Sato and Y. Kozawa, Radially polarized annular beam generated through a second-harmonic-generation process, 査読有, *Optics Letters*, **34**, 3166-3168 (2009).

[学会発表] (計 35 件)

- ① S. Vyas, Y. Kozawa, S. Sato, Self-Healing of Vector Bessel-Gauss Beam in High Numerical Aperture Focusing, *Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe*, Munich, Germany, 2011.5.24
- ② M. Niwa, Y. Kozawa, S. Sato, Calculation of Focusing Properties of a Radially Polarized Beam with Annular Intensity Distribution, *Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe*, Munich, Germany, 2011.5.24
- ③ S. Sato, Y. Kozawa, T. Nakamura, Generation of White-Light Supercontinuum with Axially Symmetric Polarization, *High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS)*, Istanbul, Turkey, 2011.2.16

- ④ K. Shimohira, Y. Kozawa, S. Sato, Transverse Mode Control by a Crossing Pair of Linearly Pumped Regions in a Yb:YAG Ceramic Thin Disk, *Advanced Solid State Photonics 2011*, Istanbul, Turkey 2011.2.16
- ⑤ K. Yamagishi, Y. Kozawa, S. Sato, Generation of an Azimuthally Polarized Laser Beam from an End-pumped Laser Cavity with a *c*-cut Nd:YVO₄ Crystal, *Advanced Solid State Photonics 2011*, Istanbul, Turkey, 2011.2.14
- ⑥ Y. Kozawa, A. Ohtsu, S. Sato, The effect of the longitudinal electric field of a radially polarized laser beam for second harmonic generation, *Advanced Solid-State Photonics 2010*, San Diego, USA, 2010.2.1
- ⑦ A. Ito, Y. Kozawa, S. Sato, Generation of cylindrical vector beams of a single higher order transverse mode, *Advanced Solid-State Photonics 2010*, San Diego, USA, 2010.2.1
- ⑧ T. Chubachi, Y. Kozawa, S. Sato, TM₀₁ mode operation of an Yb-doped double-clad fiber amplifier, *Conference on Laser and Electro-Optics*, Baltimore, USA, 2009.6.4
- ⑨ Y. Kozawa, S. Sato, Selective generation of radially polarized Nd:YAG laser beams of higher-order transverse mode, *Conference on Laser and Electro-Optics*, Baltimore, USA, 2009.6.4
- ⑩ A. Ito, Y. Kozawa, S. Sato, Selective TM₀₁ and TE₀₁ mode operation of Nd:YAG laser based on cavity stability incorporating thermal effects, *Conference on Laser and Electro-Optics*, Baltimore, USA, 2009.6.4

[図書] (計1件)

- ① 佐藤俊一、オーム社、「光エレクトロニクスとその応用」、2011、376-383 ページ

[その他]

ホームページ等

<http://satolab.tagen.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 俊一 (SATO SHUNICHI)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：30162431

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

中村 貴宏 (NAKAMURA TAKAHIRO)

東北大学・多元物質科学研究所・助教
研究者番号：50400429

小澤 祐市 (KOZAWA YUICHI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教
研究者番号：90509126