

氏 名 孔 维鹏

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1625 号

学位授与の日付 平成25年9月27日

学位授与の要件 物理科学研究科 機能分子科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Edge-pumped Yb:YAG ceramic microchip laser for high-power  
mode control

論文審査委員 主 査 教 授 大島 康裕  
准教授 平等 拓範  
准教授 藤 貴夫  
教 授 岡本 裕巳  
教 授 佐藤 俊一 東北大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

The pursuit of compact high power laser devices has led to the edge-pump scheme based on composite Yb:YAG ceramic microchip. This pump scheme separates pump, laser, and heat dissipation directions, offering great flexibility for the pump design. The pump distribution can govern the spatial overlap in laser resonator between pump photons with different kinds of transverse modes for gain control. The quasi-four-level nature of Yb:YAG performs re-absorption in the non-pumped area, which can be applied as new mechanism for mode loss control. In addition, Yb:YAG material with simple energy level structure and low quantum defect is good candidate for high-power, efficient laser operation. The current research bridges three different regimes: edge-pump scheme, mode-control theory, and Yb:YAG laser material aiming for the development of high-power, compact, and easy-mode-operation laser module.

In chapter 2, we introduce the design principle of edge-pumped laser module based on the composite ceramic Yb:YAG and diode pump source. We also study the pump shape in our current 4-direction diode stacks edge-pumped microchip laser. We simulate the mode selection between TEM00 mode and TEM01 mode under different pump shape. The simulation results indicate that Gaussian-like pump shapes are preferable for high-power TEM00 mode generation; contrarily, top-hat shape and basin shape are easy to break into multi-mode oscillation.

In chapter 3, we design the lens-less edge-pumped microchip laser, which is directly pumped by single-emitter diode chips from multi-direction. The lens-less design is compact and efficient for the coupling of pump beam; the multi-direction pump scheme can realize the desired pump shape by pump manipulation. As the experimental result, the 9-direction edge-pumped laser module was successfully assembled. The measured fluorescence image shows us the Gaussian-like pump shape, which is greatly agreed with our calculation. We also propose the optimized pump shape by simulation towards uniform ideal shape for high-power TEM00 mode generation.

The mode control study does not only rest on fundamental mode, because of the booming high-order modes researches. Chapter 4 focuses on the high-order Hermit-Gaussian (HG) modes and vortex modes generation. Compare with traditional end-pumped scheme, which is only limited in HG $n_0$  modes and several mW level, the edge-pumped microchip laser with big gain aperture shows the advantage both in power scaling and desired mode generation. The pump design can realize complex pump shape concerning with high-order mode. It is easy to scale the HG $n_0$  to HG $nm$  by the method of two-dimensional pump manipulation. In addition, the re-absorption loss of Yb:YAG can suppress un-wanted mode competition. By using our 9-directions edge-pumped microchip laser module and V-type laser cavity, we experimentally realized the generation of HG $n_0$  modes with the highest index number  $n = 22$  and HG $nm$  modes

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

with index number  $1 < n, m < 7$ . The continuous wave output power of these HG modes is from mW to several W. Next, we demonstrated the vortex beam and vortex arrays generation directly from the laser oscillator, as vortex modes can be simply represented by a superposition of HG mode pairs with locked phase shift of  $\pi/2$ . By carefully selecting the mode areas across the gain aperture on microchip, we got 7 W of doughnut shape vortex beam and hundred mW to several W vortex array modes.

The theory study and experimental demonstration in chapter 4 show us, it is promising to design the laser module for the generation of desired transverse mode towards efficient and high power. In chapter 5, we propose the laser module design to achieve hundred-W-level doughnut mode as an example of high-order mode selection and power scaling. By numerically calculation, we can achieve 150 W output power with 24.2% optical-optical conversion efficiency by using a 4.25 mm diameter Yb:YAG microchip. The re-absorption loss plays the important role for mode-selection and scale about 2 times output power of selected doughnut mode. Since most of the mode-selection experiments are based on  $\text{Nd}^{3+}$  doped laser material, in our case, purer mode and better mode selectivity will be expected. Moreover, not only limited in HG modes and vortex modes generation, we expect edge-pump system will show the advantage in high-power Laguerre-Gaussian scalar modes, even vector beams generation in soon.

For application, big interesting has shown in the compact laser module for specific mode generation like vortex arrays. Since these modes with the spiral phase front and phase singularities can be very useful in multi dark optical trapping and manipulating as the new class of optical tweezers. Especially the output power reaches the W level, which is enough high for some of the applications. Even  $\text{HG}_{nm}$  modes can be applied for multi-trapping and orientation torque. With the flexibility of edge-pumped scheme, multiple modes shifting are also promising for multiple trapping tools or super-resolution microscope. In future power scaling, several tens W even hundred W level  $\text{TEM}_{00}$  mode are critical for pulse operation, doughnut beam could be applied for laser processing.

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

近年、全固体レーザーは急速な発展を示しており、大規模加工から小型電化製品まで、極めて広範囲に利用されている。レーザーにおいては、横モードと呼ばれる出力光の空間パターンが最も基本的な特性の1つである。中でも、超高強度の短パルス発生のための効率的励起源として、 $TEM_{00}$ モードと呼ばれる基本横モードが重要視されている。その一方で、軌道角運動量や位相特異点などの特性を示す高次の横モードもまた、光トラップや光操作などに広く利用可能であり、近年、研究が活発化している。本論文は、半導体レーザーを励起源とするセラミックスマイクロチップレーザーを対象として、出力と直交する方向からレーザー媒体を励起する配置（エッジ励起と呼ばれる）を採用した場合に、レーザー共振器の形状や励起の条件が発振する横モードとどのように相関するかを明らかにし、高次横モードの発生に対する新たな提案を行ったものである。以下にその概要を示す。

本論文は、全六章からなる。第一章は序論であり、研究背景、動機および目的が述べられている。

第二章では、エッジ励起システムの配置、レーザー材料の特性、レーザー装置の設計指針、モード制御モデルが述べられている。この章において出願者は、モード制御シミュレーション計算に基づいて、ガウス型の励起光形状を用いると  $TEM_{00}$  モードが優先的に高出力で発振すると結論づけている。

第三章では、励起光分布操作およびレーザーモジュールの組み立てについて記述している。この章で出願者は、ダイオードレーザーチップを用いた新規レーザー構成を提案している。励起方向を増やした場合の励起光形状分布をシミュレーション計算し、均一なガウス型形状の励起分布を得るための条件を探索・最適化を行っている。最終的に、9方向からの励起により理想形状に近いガウス型励起分布が得られることを実験的に実証した。

第四章では、高次モード光の選択的発生に関する理論的検討および実験的確認について述べている。理論的検討では、励起形状を操作できるエッジ励起システムによって高次横モード光が容易に発生・制御できることを述べている。実際に、高次横モードの一つであるラゲルモードおよびボルテックスモード光を比較的高出力で発生させることに成功したことが報告され、さらに励起や共振器のパラメーターと発振する高次横モードの相関に関する解析結果も示されている。

第五章では、高効率発生および出力増大のための特殊モードに関するシミュレーションについて述べている。特に、単一モード動作を維持するためには、再吸収損失が重要な役割を果たすと説明している。この章は、前章の理論および実験結果に基づいており、開発したレーザーモジュールのさらなる高効率・高出力動作に向けた将来展望について述べられている。

(Separate Form 3)

第六章は、本論文の結論であり、類似する研究との比較を行っている。理論で示されたように、本研究の手法は極めて有用なものであり、Yb:YAG およびエッジ励起方式を用いたレーザーシステムは、高出力モード制御での利用や種々の応用分野への展開が期待できると結論されている。

以上のように、本論文は、固体レーザーにおいて新規な励起配置を採用することにより、単純かつ効果的な高強度励起や横モード選択が可能となることを理論と実験の両面から明らかにしたものであり、レーザー特性の制御に関する物理的理解を深めたものとして高く評価できる。本論文の成果の一部は査読付国際学術誌に公表されている。以上より、本論文は博士論文に値するものであると審査員全員一致で結論した。