エッジ励起マイクロチップコンポジット Yb:YAGレーザー

平等 拓範, 常包 正樹, ダスカル トライアン

分子科学研究所 分子制御レーザー開発研究センター (〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38)

Diode Edge-Pumped Microchip Composite Yb:YAG Laser

Takunori TAIRA, Masaki TSUNEKANE, and Traian DASCALU

Institute for Molecular Science, Laser Research Center for Molecular Science,

38, Nishigonaka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585

(Received December 2, 2004)

We present a simple concept for high-power microchip lasers by employing edge-pumped scheme for Yb:YAG core and YAG clad composite structure. Continuous-wave (CW) output power was up to 90 W from a 400- μm -thick diffusion bonded Yb:YAG/YAG structure with a 10 at. % Yb:YAG square core of $2 \times 2 \text{ mm}^2$; the slope efficiency and optical-to-optical efficiency with respect to the pump power were 40 % and 28 %, respectively. Measurements of the optical phase distortions induced by pumping gives a focus shift below 0.05 m and shows the absence of astigmatic effects, indicating the axial heat flow in this pumping configuration. The newly developed microchip has circular, Yb:YAG single crystal core with 5mm-diameter, surrounded by transparent, undoped YAG ceramic pump wave-guide. Near 900 W pump light from fourfold stack with 6 diodes directly coupled to the edge windows of the ceramic wave-guide with 300 μm -thickness. Output powers of 380 W (peak) was reached in quasi-continuous-wave (QCW) (10 ms, 10 Hz) operation. Improved slope efficiencies and optical conversion were 50 % and 44 %, respectively.

Key Words: Yb:YAG laser, Edge-pumping, Microchip laser, Au/Sn bonding, Ceramic YAG

1. はじめに

1980年代において進んだAlGaAs系半導体レーザー (Diode LaserまたはLaser Diode, 以下LDと省略) の高出力化, 高効率化, 長寿命化に伴い進展した半導体レーザー励起固体レーザー (Diode Pumped Solid-State Lasers, 以下DPSSLと省略) は, それまでの固体レーザーの印象を一変させた¹⁾. 放電管励起固体レーザーは, 効率が悪く高圧大電流を要し発熱も大きかったため, 強力な冷却装置が不可欠とされた. また, 頻繁に行わなければならない放電管の交換も面倒な作業の一つであったが, 何よりも出力ビーム品質が低く, 多くの研究者達を悩ませてきた. 現在では, 共振器内部SHG形Nd:YVO₄による, コンパクトで実用的な20 W級の高ビーム品質緑色光源が市場に出回るまでになっている.

LD励起は放電管励起に比べ発光スペクトルが狭いため媒質の吸収波長に合わせることで高い吸収効率が得られ, コヒーレント光であるために集光性にも優れている. LDによって実現できる高密度励起により, レーザー下準位が基底準位群に属するNd³⁺の⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2}遷移 (946 nm) の室温発振を可能にするなど質的な転換をも引き起こし

た²⁾. このような中で, T. Y. Fanが, Yb:YAGの²F_{5/2}-²F_{7/2}遷移 (1.03 μm) は厳密には三準位レーザーではなく, 強励起下では下準位吸収が飽和する, いわゆる準四準位レーザーであることを示した³⁾. 当初問題は励起用のLDが入手困難なことにあったが, 折からの光通信市場の活性化でEDFA用900 nm帯InGaAs系LDの普及, 高性能化が急速に進み, 今やYb:YAGは代表的な固体レーザーであるNd:YAGを凌ぐポテンシャルを有する高出力, 高効率レーザーとしての認識が定着したとまで言える⁴⁻⁶⁾.

本稿では, 筆者等が進めてきたYb:YAGマイクロチップレーザーの一連の研究を概説するとともに, エッジ励起Yb:YAGマイクロチップレーザーの高出力化の開発状況を紹介したい.

2. Yb:YAGの基本特性

2.1 分光特性

三価のイットリビウムイオン, Yb³⁺, は, [Xe]4f¹¹6s₂電子構造であるため²F_{5/2}と²F_{7/2}の二準位しか存在せず, 励起状態吸収 (ESA) などのアップコンバージョン損失などが起こ

らない事より、高密度励起に適していると言える。何よりもYb:YAGレーザーは、Fig. 1 (a)に示すように励起波長が940 nm、レーザー発振波長が1030 nmなので励起量子効率率は91.4 %にも達する。このためNd:YAGでは励起に付随する発熱率が43 %であるのに対しYb:YAGでは10 %前後に抑えられるため3~4倍の高出力化が期待できる⁷⁾。また、Yb³⁺のイオン半径がY³⁺のそれに近いため高添加時の濃度消光が起き難く100 %置換されたYbAGにおいてもレーザー発振が確認されている⁸⁾。上準位寿命は約1 msとNd:YAGの4倍程度長く、高いエネルギー蓄積効果も期待されるなど優れた特長を有する⁹⁾。

Yb³⁺添加濃度25at. %のYAGにおける850~1100 nm付近の吸収スペクトル特性の測定結果をFig. 1 (b)示す¹⁰⁾。Yb:YAGの吸収スペクトル半値幅は約18 nmとNd:YAGの吸収

Fig. 1 Energy level diagram (a) and measured absorption spectrum (b) of Yb:YAG.

スペクトルに比べ15倍近く広く、LDの発振波長に対する制限が緩和される。また、もう一つの吸収線である970 nmを用いれば、さらに高い94 %以上の量子効率も期待でき、より高効率動作が可能となる。今後、高出力動作が可能な動作波長970 nmの励起用LDの実用化が待たれる。加えて、900 nm帯の励起にはAlGaAsよりも信頼性の高いとされるInGaAs系のLDによる励起が可能である。すでに寿命の面で優位であることが報告されつつあり¹¹⁾、今後の価格の面でも優位性が高くなるものと期待される。

また、Table 1に、Yb:YAGおよびNd:YAGの材料特性比較を示す^{6,9,10)}。Yb:YAGは熱発生が少ないことに加え、蛍光幅が約8.5 nmとNd:YAGに比べ10倍程度広いため高出力の波長可変動作や超短パルス発生などが期待できる。なお、分光的に求めた蛍光寿命は0.85 msであった。Fig. 2に分光的に求められた誘導吸収及び誘導放出断面積の特性を示す。なお990 nmより短波長側では逆算法(Reciprocity Method: RM)^{11,12)}、長波長側ではFuchtbauer-Ladenburg (FL) 法¹³⁾を用い計算した。Yb:YAGは当初より広帯域な波長可変動作が可能であると期待され、検討が行われた。Fig. 3はYb:YAGマイクロチップレーザーの共振器内に複屈折フィルターを挿入し、波長可変特性を測定した結果である。Yb³⁺では、アップコンバージョンなど起きないため、1024.1 nmから1108.6 nmと、蛍光幅の10倍に相当する84.5 nmの可変幅を得ている¹⁴⁾。これらの優れた特性を有するYb:YAGにおいて、その高出力化のみならず、広い蛍光幅を利用した超短パルス発生に関する検討も盛んに進められている¹⁵⁾。

なお、準四準位レーザー媒質の吸収量の評価については注意が必要であり、付録Aを参照されたい。

2.2 レーザー材料形状

高出力化の観点からレーザー母材に求められる特性としては、1) 熱伝導率および抗張力が高いこと、2) 高品質で大型の材料育成が可能なこと、3) 励起波長や発振波長域で吸収損失が少ないこと等が挙げられる。特に、熱機械特性としては、レーザー最大出力を制限するため各種材料の熱衝撃パラメータ R_T が評価されている¹⁶⁾。代表的な構成をFig. 4に示す。同図(a)のロッド状レーザー媒質を側面励起した場合、励起に付随した発熱によりロッド中心では圧縮力が、表面では張力が働き、最終的に応力破壊に至るため出力の抽出限界 P_{ex} は

Table 1 Optical properties of Yb:YAG and Nd:YAG

Parameter	Nd:YAG	Yb:YAG
Pump wavelength λ_p (nm)	808.4	940.6
Absorption bandwidth $\Delta\lambda_p$ (nm)	1.2	18
Absorption cross-section σ_a (λ_p) ($\times 10^{-20}$ cm ²)	6.59	0.82
Peak emission wavelength λ_e (nm)	1064.2	1030.1
Emission bandwidth $\Delta\lambda_e$ (nm)	0.67	8.5
Emission cross-section σ_e (λ_e) ($\times 10^{-20}$ cm ²)	26.3	2.1
Absorption cross-section σ_a (λ_e) ($\times 10^{-21}$ cm ²)	0	1.3
Min. pump intensity I_{min} (kW/cm ²)	0	1.87
Intrinsic lifetime τ_0 (ms)	0.28	0.85
Quantum defect fraction	0.24	0.11

Fig. 2 Absorption and emission cross-sections of Yb:YAG measured by Reciprocity Method (RM) and Fuchtbauer-Ladenburg Method (FLM).

Fig. 3 Tuning characteristics of the Yb:YAG microchip laser for different output coupler reflectivities.

$$P_{ex} \leq \frac{8\pi R_T L}{\chi} \quad (1)$$

で与えられる²²⁾。ここで、 L はロッド長、 χ は発熱率で回転分布量に対する発熱量比として定義される¹⁷⁾。(1)式よりも、ロッド状のレーザ媒質では、最大到達可能出力は熱衝撃パラメータ R_T に比例することがわかる。さらに、Fig. 4 (b)の面冷却の薄型ディスク^{18,19)}またはマイクロチップ状のアクティブミラーレーザ²⁰⁾の場合も同様の表式で表す事ができる²³⁾。

$$P_{ex} \leq \frac{12R_T}{\chi} \left(\frac{A}{t} \right) \quad (2)$$

ここで、 A は励起(冷却)面積、 t はその厚みである。また、同図(c)のスラブレーザ^{21,22)}も面冷却であるため、スラブ幅を w とするなら冷却面積が $A = wL$ であることから括弧の中の因子が $L(w/t)$ に置き換わるだけである。本質的には、アクティブミラーレーザの抽出限界はスラブレーザと同様の表式に帰着する。なお、スラブの抽出限界特性には、ロッドに比べ (w/t) の因子が付加されるため容易に大きな抽出限界を得る事ができる²³⁾。しかも、これ以前に、ロッド構成では熱複屈折や熱レンズ効果によりレーザ出力が低下、不安定化するため何らかの補償が必要となる。スラブレーザやアクティブミラーの場合

(a)

(b)

(c)

Fig. 4 Heat flow and beam propagation for typical solid-state laser configurations of rod (a), disc (b) and slab (c).

合、このような問題は原理的に発生しない。しかも、固体レーザの特長の一つであるパルス化、特にサブピコ秒の超短パルス化に関して、2つの点でアクティブミラー構成は優位と言える。まず、パルス発振の場合、時間的にエネルギーの尖頭値が高くなるが、アクティブミラー構成の場合レーザ媒質内でのビーム断面積を大きくすることでエネルギー密度を抑えることができ、レーザ媒質のダメージに対して有利である。次に、超短パルス発生の場合、自己位相変調に群速度分散遅延が発生するが、この値は媒質長に比例するため、厚みの薄いマイクロチップ形状のアクティブミラー構成が有利となる。

次節では、超短パルス発生を見据えた研究の一端として、マイクロチップ構成の高出力化について検討する。

3. 高出力Yb:YAGレーザ

3.1 エッジ励起構成

Fig. 5に、エッジ励起形マイクロチップレーザの基本構成を示す^{24,25)}。励起光はチップ側面から無添加YAGの導波部を経て、レーザ活性部、ここではYb³⁺:YAGの領域に導かれる。また、チップ端面が直接ヒートシンクに

Fig. 5 Configuration of diode edge-pumped, composite microchip Yb:YAG laser, top (a) and cross-sectional view (b).

接合することにより、効率の良い冷却が可能だけでなく、温度分布がビーム断面に平行になるため原理的には熱レンズ、熱複屈折が生じないことが期待できる。なお、このエッジ励起マイクロチップレーザーは、励起方法は異なるものの面冷却での排熱やレーザー発振器の構成はいわゆる「薄型ディスクレーザー」^{18,19)}とほぼ同じである。しかしながら著者(平等)は90年より端面励起、側面冷却構成のマイクロチップレーザーの研究に着手しており、今回説明するエッジ励起、面冷却構成もその研究の延長上の一つの発展型と捉えている。従って本文中においてもレーザー媒質に対しマイクロチップと言う名称を統一的に用いている。また一方「アクティブミラー」という表現は、本文中では媒質内にレーザー光を反射する面を有する面冷却の利得媒質あるいはそれを含んだレーザーの概念、総称として用いている。

さて、温度分布計算を市販の有限要素解析プログラムであるアンシス(Ansys Inc., ANSYS ED 7.0)を用いて計算した結果をFig. 6に示す²⁶⁾。この時、直径5 mmのYb:YAG (5 at.%)コアを全体直径8 mmとなるようYAGクラッドで取り巻き、チップ下面を全反射コーティング(HR)層、接合層を経て銅製のヒートシンクに接合する構成とした。なお、コア部からの熱発生は約1 kWの励起入力時を想定して100 Wと仮定し、ヒートシンクの厚みは1.5 mm、冷却水と接するヒートシンク下面のマイクロチャンネル表面における熱伝達係数は実験的に求められた値(60 kW/m²K)を用いた。HR層は厚み4 μ mで熱伝導率1.4 W/mK、接合には実験的に高熱伝導接着剤とAu/Sn混晶の両方を検討しているが、より温度上昇の厳しい接着剤の条件である厚み4 μ m、熱伝導率6 W/mKを想定した。Fig. 6 (a)はチップの厚み400 μ mにおけるヒートシンクを含む2次元の断面温度分布であり高温部を黒く濃く、低温部を白く示している。コアの中央部近傍ではチップの面にほぼ平行に温度分布が形成されることが分かる。同図(b)は、そのコア中心での厚み方向の温度分布を示したもので、パラメータ

Fig. 6 Calculated temperature profile of composite Yb:YAG microchip bonded on copper heat-sink, cross-sectional 2D contour map with 0.4-mm-thickness microchip (a) and 1D profiles at the center as a function of microchip thickness (b).

としてチップの厚みを400 μ mから100 μ mまで変えて計算したものである。コア内での総発熱量は100 Wで同じとした。当初、接着層近傍での温度上昇が懸念されたが、むしろYAG媒質部内部での温度上昇の方が大きく、同じ総発熱量でも媒質厚が薄くなることによるコア内での温度低減効果が非常に大きいことが分かった。エッジ励起方式においてはチップの厚みが薄くなってもコアにおける高い吸収率が維持できるために、チップの薄膜化はレーザー媒質内の温度低減によるレーザー出力の向上、効率の改善に非常に有利である。

3.2 エッジ励起マイクロチップレーザー発振特性

3.2.1 単結晶Yb:YAG/YAGコンポジット

Fig. 7に、4方向エッジ励起用マイクロチップコンポジットYb:YAGをヒートシンクにマウントしたヘッド外観を示す^{27,28)}。レーザー媒質として、2 mm $\times$ 2 mmの10 at.% Yb:YAG単結晶コア部を、無添加単結晶YAGが取り囲むように拡散接合(ONYX Optics Inc.)し、外径9 mmのロッド形成したものから、厚み400 μ mに薄く研磨加工することで、複数枚のYb:YAG/YAGコンポジット構造マイクロチップを作製した。さらに、ヒートシンクとの接合面側にレーザー発振波長である1030 nmに対し全反射、反対面に無反射コーティングを施した。Fig. 7では、このチップを200 μ mチャンネル幅の横水流型マイクロチャンネルヒートシンクにAu/Sn混晶化反応により接合している。なお、

Fig. 7 Composite single-crystal Yb:YAG core (2-mm-square)/single-crystal YAG clad microchip bonded on a microchannel heat-sink with transverse water-flow for four-fold edge-pumped laser system.

励起光取り込み用に幅2 mmの窓をチップ側面形成する際に、寄生発振を防ぐため斜め研磨(3~5°)を施している。励起には、中心波長940 nmのファイバー結合形LD(JOLD-100-CAXF-15A, JENOPTIK Laserdiode)光をレンズにて励起窓に集光し、用いた。この時、測定された励起光吸収効率は約74 %と高く、式(2)の(A/I)を大きくしなければいけないという要請は、エッジ励起の場合、厚みに関係なく吸収光路を長くとれるため、簡単な励起光学系でも吸収効率を高くできることになり高出力化に有利であることが分かる。

このエッジ励起マイクロチップYb:YAG/YAGレーザーの入出力特性をFig. 8に示す。共振器は、曲率100 mmの出力結合鏡を、チップから約50 mm位置に配置し、半共焦点形構成とした。透過率 $T=5\%$ 時に出力最大となり、90.2 Wが得られた。この時の励起入力318 W、しきい値は約55 Wで、その倍程度の励起に対するスロープ効率は40 %であった。 $T=3\%$ の場合、しきい値は約40 Wと改善できるが、スロープ効率は37 %と低下した。 $T=10\%$ ではさらに31 %スロープまで低下した。ところで、Yb:YAGコア

Fig. 8 CW output power versus input pump power for the fiber-coupled diode edge-pumped composite Yb:YAG/YAG laser.

面積は、上記の共振器構成の基本モードの面積に比べ数10倍大きいので、その発振モードは高次横モードとなる。そこで、平面全反射後部鏡と曲率1 mの出力鏡により、長さ660 mmのV形共振器を構成し、後部鏡から約360 mm位置にYb:YAGチップを配置することにより横モードの低次元化を図った。最大出力は約25 %低下したものの、 M^2 値は5程度まで改善された。

次に、Fig. 9に示す構成にて励起に付随した発熱による波面歪みについて評価を行った。直径3 mmのHe-Neの出力光をプローブとしYb:YAG結晶を1往復させ、その透過光をシャックハルトマン波面センサー(Wavefront Science Inc., CLAS 2D)にて解析を行った。測定の結果、拡散接合周辺は大きな歪みが残っており、これがレーザー発振横モードを劣化させている1つの原因と分かった。さらに、評価を進めるため、コア中心部の直径1.9 mm領域のみ選択し、Zernike係数を抽出した。これにより出力波面が再構築される。得られた係数 $C_{2,1}$ より曲率 $R_c = R_z^2 / (2C_{2,1})$ が求まり、これより等価的焦点距離 $f = R_c / (n-1)$ が計算される。また、係数 $C_{2,0}$ と $C_{2,2}$ は歪みを表す量である。ここで、 R_z はZernike円形マスクの大きさを表す因子で、 n はレーザー媒質の屈折率である。なお、これらを除く高次係数は小さいため無視した。解析より得られた焦点シフトと歪み変化をFig. 10に示す²⁸⁾。入射励起パワー40 Wから180 Wの範囲内で、焦点シフト量はほぼ一定で0.05 m、歪みの変化も0.01 mと良好な結果を得た。このことは、Au/Sn混晶により結晶と金属間で高い面内均一性を維持したまま、低い熱抵抗接合が可能であることを示すものである。

3.2.2 単結晶Yb:YAG/セラミックYAGコンポジット

近年国産での透光性セラミックを媒質とした様々な固体レーザーの研究が注目されている。また同時にセラミックの自由度の高い製法を利用して製作したコンポジット構造は、前節で述べた結晶同士のコンポジット構造に比べ、量産性やコスト、納期の点から将来の産業用の固体レーザー媒質として実用性が高いと考えられる。

Fig. 9 Experimental setup for thermal effects measurements in the microchip composite Yb:YAG/YAG laser.

そこでさらにマイクロチップとしてセラミックによるコンポジット構造を検討した。Fig. 11にその構成を示す。レーザー媒質には、5 at.% Yb:YAG単結晶を直径5 mmに丸め、その周辺に無添加のセラミックYAGクラッドを焼結し、直径10 mmの単結晶Yb:YAG/セラミックYAG複合構造を形成させた(神島化学工業: Konoshima chemical co. Ltd)。これを300 μm 厚に切り出し研磨し、側面に4ヶ所、6 mm幅の窓を研磨作製した。チップの両面には先と同様のコーティングを施し、HR面を高熱伝導率接着剤を用いてヒートシンクに接合させた。励起にはコリメートレンズ付き6バースタックLD(JOLD-240-CAFN-6A, Jena Optics)を組み合わせレンズを用いて0.1 mm $\times$ 4 mmに集光しマイクロチップエッジ端面に導入した。Fig. 12にヒートシンクに接合した単結晶Yb:YAG/セラミックYAGコンポジット構造マイクロチップレーザーの外観を示す。

ヒートシンクには、従来の横水流型のマイクロチャンネル構造からチップを接合する面の裏側にマイクロチャンネル構造を設け、チャンネルに対して縦水流で直接冷却媒体を衝突させる構造とした。ヒートシンクに70WのLD光を照射し、その冷却特性を評価したところ、従来の構成では約80 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇した表面温度が、35 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで下がった。この時の冷却水温度が20 $^{\circ}\text{C}$ であったことより、冷却能力にして約4倍向上したことになる²⁶⁾。このヒートシンクの採用によりレーザー特性の大幅な向上が期待される。

Fig. 13にレーザー発振出力特性を示す。まず、透過率97%，曲率25 cmの出力結合鏡を共振器長50 mmで配置することにより、CW動作にて最大出力120 Wを励起399 W時に得た。入射光に対するスロープ効率率は39%，全体効率率30%であった。次に、準CW(QCW)動作にてその特性を評価した。繰り返し10 Hz，デューティ10%動作時に、最大出力380 W，スロープ効率率は50%，全体効率率44%を室温で得ることに成功した²⁹⁾。これらの結果は、エッジ励起Yb:YAGマイクロチップレーザー構成においては、複雑な励起構成を用いなくとも高効率なアクティブミラーレーザーが実現できることを示すものである。なお、現在、マイクロチップとヒートシンクの接合に、先に試したAu/Sn混晶接合法を適用することでさらなる高平均出力

Fig. 10 Focus shift and astigmatic difference between sagittal and tangential plane vs pump power for a He-Ne probe beam that pass forth and back the Yb:YAG core.

Fig. 11 Schematic of directly-coupled diode edge-pump composite microchip Yb:YAG/YAG laser.

Fig. 12 Composite single-crystal Yb:YAG core/ceramic YAG clad microchip bonded on a microchannel heat-sink with vertical water-flow, impingement jet cooling.

Fig. 13 CW and QCW output power versus input pump power for the new composite Yb:YAG/YAG laser.

動作の実証を検討中である。

4. まとめ

以上、エッジ励起マイクロチップレーザーについて検討を行ってきた。アクティブミラーの特長を備えたこのレーザーは、結晶厚を薄くし、その面積を広げることで平均出力数kWを超える高出力動作も可能と期待される。問題は、如何に簡単な構成で薄くなるレーザー媒質にお

ける励起光吸収効率を高めるかであり、また、如何に理想的なヒートシンクへの接合を実現するかであった。まず、拡散接合法を用いレーザー活性領域と導波部を接合したコンポジット構成において、エッジ励起方式を検証し、簡単で高効率励起が可能であることを検証した。さらに、焼結法を用いることで簡便に求められる複合構造を作製できることを示した。

次の問題であった、低い熱抵抗でレーザー媒質と冷却媒体とを接合する手法に関して、高熱伝導率の接着剤とAu/Sn混晶化反応を利用した異種材料接合について検討した。最初に拡散接合による単結晶Yb:YAG/YAGマイクロチップをAu/Sn混晶によりマイクロチャンネルヒートシンクに接合し、室温にて最大CW出力90.2 Wをスロープ効率40 %で得た。出力パワー密度は2.2 kW/cm²であった。次に、焼結法により作製した単結晶Yb:YAG/セラミックYAGを接着剤を用いヒートシンクに接合し、QCWにて380 Wをスロープ効率50 %で得た。CWでも120 Wを39 %効率で得ており、接着剤による接合でもかなりのポテンシャルを有している事が分かった。高熱伝導性接着剤による接合は製作プロセスの簡素化やコストの点でも有利であり、低出力レーザーへの適用も十分考えられるため引き続き注目して行きたい。またさらなる高出力化を実現するために、Au/Sn混晶による接合技術の最適化も進めており、ごく最近CWで300W超の動作も確認している。

ところで、Yb系レーザーでは、その広い利得幅を利用した超短パルス発生が試みられている。我々もYAGにScを導入したYb:YSAGセラミックスを用いて280 fsまでの超短パルスを得ており³⁰⁾、さらに短パルス化が可能である事が分かっている。今後の展開として、超短パルスを用いた非熱効果による機能性材料加工に対する検討のため、エッジ励起マイクロチップレーザーを用いて高平均出力超短パルス発生に関する検討を進める予定である。

謝 辞

本研究は文部科学省による福井県地域結集形共同研究事業(CREATE)「光ビームによる機能性材料加工創成技術開発」の一環として分子科学研究所にて行われた。また本研究の遂行に当りご協力、ご助言頂いた当研究室の斎川次郎君、佐藤 庸一博士、またヒートシンクやレーザーヘッドの製作に関し分子科学研究所、装置開発部の鈴木班長に感謝する。またさらに励起光の集光、接着剤を用いた結晶のヒートシンクへの接合に関し、ご協力頂いた三菱電機情報総合研究所の平野 嘉仁博士、山本 修平氏に感謝する。

参考文献

- 1) R. L. Byer: Science **239** (1988) 742.
- 2) T. Y. Fan and R. L. Byer: IEEE J. Quantum Electron. **QE-23** (1987) 605.
- 3) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan: Opt. Lett. **16** (1991) 1089.
- 4) 平等 拓範: 光技術コンタクト **35** (1997) 682.
- 5) 平等 拓範: 光学 **28** (1999) 435.

- 6) W. F. Krupke: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **6** (2000) 1287.
- 7) D. C. Brown: IEEE J. Quantum Electron. **QE-33** (1997) 861.
- 8) F. D. Patel, E. C. Honea, J. Speth, S. A. Payne, R. Hutcheson, and R. Equall: IEEE J. Quantum Electron. **QE-37** (2001) 135.
- 9) H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byren: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **3** (1997) 105.
- 10) J. Saikawa, Y. Sato, T. Taira, and A. Ikesue: Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 1898.
- 11) G. Bonati: Photonics Spectra, (2003) 56.
- 12) D. E. McCumbe: Phys. Rev. **136** (1964) A954.
- 13) S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and W. F. Krupke: IEEE J. Quantum Electron. **QE-28** (1992) 2619.
- 14) J. Saikawa, S. Kurimura, I. Shoji, and T. Taira: Opt. Mat. **19** (2002) 169.
- 15) E. Innerhofer, T. Sdmeyer, F. Brunner, R. Hring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Hnninger, M. Kumkar, and U. Keller: Opt. Lett. **28** (2003) 367.
- 16) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, 5th Ed. (Springer-Verlag, 1999) p. 412.
- 17) D. C. Brown: IEEE J. Quantum Electron. **QE-33** (1997) 861.
- 18) A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower: Appl. Phys. B. **58** (1994) 365.
- 19) C. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen, and H. H. Hügel: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **6** (2000) 650.
- 20) D. Brown, J. Kelly, and J. Abate: IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981) 1755.
- 21) W. Jones, L. Goldman, J. Chernoch, and W. Martin: IEEE J. Quantum Electron. **QE-8** (1972) 535.
- 22) J. Eggleston, T. Kane, K. Kuhn, J. Unternahrer, and R. Byer: IEEE J. Quantum Electron. **QE-20** (1984) 289.
- 23) T. Rutherford, W. Tulloch, E. Gustafson, and R. Byer: IEEE J. Quantum Electron. **QE-36** (2000) 205.
- 24) J. Saikawa, S. Kurimura, N. Pavel, I. Shoji, and T. Taira: OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers **34** (2000) 106.
- 25) N. Pavel, J. Saikawa, and T. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 146.
- 26) T. Tsunekane, T. Dascalu, and T. Taira: Extended Abstracts (The 65th Autumn Meeting, 2004), The Japan Society of Applied Physics, **4a-P12-32** (2004) 954.
- 27) T. Dascalu, T. Taira, and N. Pavel: Opt. Lett. **27** (2002) 1791.
- 28) T. Dascalu, N. Pavel, and T. Taira: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 4086.
- 29) T. Tsunekane, T. Dascalu, and T. Taira: Extended Abstracts (The 65th Autumn Meeting, 2004), The Japan Society of Applied Physics, **4a-P12-33** (2004) 955.
- 30) J. Saikawa, Y. Sato, T. Taira, and A. Ikesue, Reports on the 324th Topical Meeting of the Laser Society of Japan, **RTM-04-19** (2004) 29.
- 31) J. Saikawa, Y. Sato, T. Taira, and A. Ikesue, Appl. Phys. Lett. **85** (2004) (to be published).
- 32) T. Taira, W. M. Tulloch, and R. L. Byer: Appl. Opt. **36** (1997) 1867.
- 33) T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayshi, and R. L. Byer: IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron. **3** (1997) 100.
- 34) Y. Sato, T. Taira, N. Pavel, and V. Lupei: Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 844.
- 35) Y. Sato and T. Taira: IEEE J. of Quantum Electron. **40** (2004) 270.
- 36) W. Krupke and L. Chase: Opt. and Quantum Electron. **22** (1990) S1.
- 37) S. Payne, L. DeLoach, L. Smith, W. Kway, J. Tassano, W. Krupke, B. Chai, and G. Loutts: J. Appl. Phys. **76** (1994) 497.

付録A 発振効率評価に対する注意事項

準四準位系に属するYb:YAGは、室温においてレーザー下準位に分布が存在するため、発振波長の自己吸収が起きる。しかしながら、基底状態より約600 cm⁻¹上位にあるため、強励起時には下準位吸収を飽和させることがで

き、しきい値の数倍の励起領域では効率的なレーザー発振が可能となる^{31,32)}。

ただ、強励起が必要とされたり大きな吸収断面積を有する材料の吸収効率評価には注意が必要で、次式で表されるような吸収飽和が起きる^{33,34)}。

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\alpha_0}{1 + \beta \frac{I_p}{I_s}} \quad (\text{A1})$$

ここで、 α_0 は不飽和時の吸収係数、 I_p は入射光強度、 I_s は飽和光強度、 β は飽和パラメータであり、準四準位レー

ザーの場合、基底準位の局所ボルツマン分布を f_0 、レーザー上準位のそれを f_3 とするなら $\beta = f_3/f_0$ となる。すなわち、強励起の場合、基底準位分布の枯渇が起き、吸収が飽和する^{35,36)}。しかし、レーザー共振器内部では、強い誘導放出が起き、その分基底準位分布が回復するため、同一励起強度でもレーザー発振状態、非発振状態では吸収効率が異なる。大まかには、発振が始まるまでは吸収係数は減少するが、しきい値以上では減少が止まると考えて良い³⁴⁾。レーザー発振効率を吸収パワーに対して求める場合や、レーザーアンプを設計する際には注意が必要である。

レーザーワード

イッテルビウム添加ヤグレーザー (Yb:YAG laser)

三価のイッテルビウムイオン、 Yb^{3+} をレーザー発光中心として含むYAG(イットリウム・アルミニウム・ガーネット=ヤグ)レーザー。Yb:YAGレーザーは波長940 nmのLDにより励起され1030 nmで発振する。このため励起量子効率91.4 %に達し、一般的な808 nm励起のNd:YAGに比べ発熱量が1/3以下に抑えられ高出力動作で有利である。また吸収スペクトル半値幅も約18 nmとNd:YAGに比べ15倍近く広く、LDの波長変動に対する許容幅も広い。また、 Yb^{3+} のイオン半径が Y^{3+} のそれに近いため高濃度添加が可能で本質的には濃度消光が起きないため、高濃度添加により薄いマイクロチップにおいても励起光を十分

吸収させることができる。上準位寿命は約1 msとNd:YAGの4倍程度長く、励起状態吸収(ESA)などのアップコンバージョン損失などが起こらないため高いエネルギー蓄積効果も期待できる。加えてYb:YAGは蛍光幅が約8.5 nmとNd:YAGに比べ10倍程度広いため、波長可変動作やフェムト秒の超短パルス発生も可能である。しかしながら準四準位系レーザーであるために室温では発振光の自己吸収があり高効率発振が阻害される場合がある。また下準位吸収を飽和させるためには高密度励起が不可欠で、レーザー媒質へ励起、発振、冷却方法の設計には注意が必要である。
(平等 拓範)