

# Yb系固体レーザー

## 平等拓範

1991年にFanが、Yb<sup>3+</sup> (trivalent ytterbium ion) の<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>-<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>遷移<sup>1)</sup> (1.03 μm) が室温発振可能なことを示して以来、これまで三準位レーザーであるためレーザー媒質として不適切とされてきたYb:YAGが再評価され、現在では、Nd:YAGを凌ぐ高効率、高出力レーザーに成りうる次世代の固体レーザーとして注目されている。これは、近年の高輝度半導体レーザー (LD) の進歩によりランプに代わりLDを励起源とすることで、励起光をスペクトルの、空間的に狭い領域に集中させた高密度励起が可能となったためであり、LD励起方式が、当初より予測されていた固体レーザーの小型化、高効率化、長寿命化、高品質化を促進しただけに留まらず質的な変換をももたらしたことを示す<sup>2-4)</sup>。さらに、最近では、Yb:YAG以外にも次々と新材料の提案が行われ活況を呈している。本稿では、筆者らの研究を交えながらYb系固体レーザーの現状や研究動向を紹介したい。

### 1. 基本特性

#### 1.1 Yb系材料の特長

一般に、固体レーザーで用いられる希土類イオンは多くのエネルギー準位を有しており、このため励起状態吸収 (ESA) などのアップコンバージョン損失が問題となる。Nd:YAGの場合、図1に示すようにレーザー発振波長に相当する0.9 μm域、1 μm域、1.3 μm域、さらには第二高調 (SH) 波に相当する0.5 μm域や励起波長の0.8 μm域に相当する準位が存在するため<sup>5)</sup>、LDによる励起の高密度変化にも制限がある。一方、Yb<sup>3+</sup>イオンは、[Xe]4f<sub>11</sub>6s<sub>2</sub>電子構造であるため<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>と<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>の二準位しか存在せず、アップコンバージョンなどが起こらないた

め、高密度励起に適している。何よりもYb:YAGレーザーは、図2(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、その分高効率、高出力化が期待できる<sup>6)</sup>。また、Yb<sup>3+</sup>のイオン半径がY<sup>3+</sup>のそれに近いため高添加時の濃度消光が起きにくい。さらに、上準位寿命は0.95 ms程度と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すぐれた特長を有する<sup>7)</sup>。

図2(b)にYb<sup>3+</sup>添加濃度25 at.%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示す。Yb:YAGの吸収スペクトル半値幅は約20 nmとNd:YAGのそれに比べかなり広く、LDの発振波長に対する制限が緩和される。また、970 nm帯の吸収線を用いれば、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。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が利用できるため、今後、寿命や価格の面でも優位になるものと期待される。

表1に、これまでに提案されたYb系固体レーザー材料を示す<sup>8-12)</sup>。すぐれた熱機械特性を有するYb:YAGは高出力化が期待されるものであり、一方、Yb:YLFやYb:glassはYAGに比べ数倍広い蛍光幅を有するためモードロックなどの超短パルスレーザーに適している。またポレート系の材料は複数の希土類イオンを共添加できるため多機能なYbレーザーになるものと期待される<sup>13)</sup>。なお、表の最後の項目であるβ<sub>min</sub>はレーザーにおける反転分布の容易さを示すもので、四準位レーザーはβ<sub>min</sub>=0、三準位レーザーは0.5に対応する<sup>14,15)</sup>。Ybなどのレーザーは、これらの中間の値をとる。当然ながら、値は低いほうが発

分子科学研究所 (〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中 38)  
E-mail: taira@ims.ac.jp

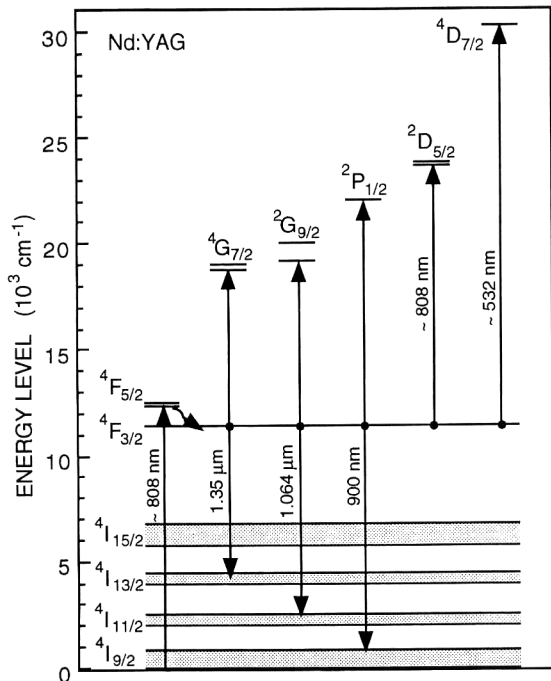


図1 Nd:YAGのエネルギー準位(レーザー上準位から各波長に対応したエネルギー準位が存在する)。

振には有利である。

### 1.2 発振モデル

表1に示したYb系材料は、当初、ルビーレーザーのような三準位レーザーと考えられてきたが、レーザー下準位が基底準位群中に含まれながらも、数百  $\text{cm}^{-1}$  程度高いため、高密度励起することで下準位吸収を飽和できる。すなわち、室温でも高効率な発振が可能となる。そのため、準四準位(または準三準位)レーザーと呼ばれ区別されるよ

うになってきた<sup>16)</sup>。まず、レーザーの入出力特性であるが、励起光とレーザー光ともに  $\text{TEM}_{00}$  ガウシアン基本モードの場合は、次式で与えられる<sup>17)</sup>。

$$P_o = \eta_s (P_i - P_{th}) = \eta_p \eta_a \eta_m \cdot \frac{T}{\delta} \cdot \frac{h\nu_L}{h\nu_p} (P_i - P_{th}) \quad (1)$$

ここで、 $P_i$  は励起光入力パワー、 $P_{th}$  は発振閾値、 $\eta_s$  はスロープ効率、 $\eta_a$  は励起光吸収効率、 $\eta_p$  は励起量子効率であり、出力鏡透過率  $T$  と共振残留損失  $L_i$  を含めた全損失  $\delta$  との比である出力結合効率、発振光光子エネルギー  $h\nu_L$  と励起光光子エネルギー  $h\nu_p$  の比で与えられる原子量子効率、さらに下準位吸収損失を考慮したモードマッチング効率  $\eta_m$  の積となる。このとき、発振閾値は、次式で与えられる<sup>17)</sup>。

$$P_{th} = \frac{\pi h\nu_p w_i^2 (1+a^2)}{4\eta_p \eta_a (f_a + f_b) \sigma \tau} (L_i + T + 2N_a^0 \sigma l) \quad (2)$$

ここで、 $w_p$  は励起光の、 $w_l$  はレーザー光のスポット半径であり、 $f_a$ 、 $f_b$  はそれぞれレーザー下準位、上準位の局所ボルツマン分布、 $\sigma$  は誘導放出断面積、 $\tau$  は上準位寿命、 $N_a^0 \sigma l$  は下準位吸収である。次に、モードマッチング効率は

$$\eta_m = \frac{1 + \frac{B}{S/C} \ln(1+S/C)}{(F/C) \int_0^\infty \frac{(F/C) \exp(-x) - Ba^2}{\{1 + (S/C) \exp(-a^2 x)\}^2} \exp(-2a^2 x) dx} \quad (3)$$

で与えられる<sup>17)</sup>。ここで、 $C = \pi w_l^2 l_c^* / 2$ 、 $a = w_p / w_l$ 、 $x = 2r^2 / w_p^2$ 、 $l_c^*$  は共振器長、 $B$  は共振器残留損失に対する下準位吸収損失であり、 $F$  は励起パワーに比例する励

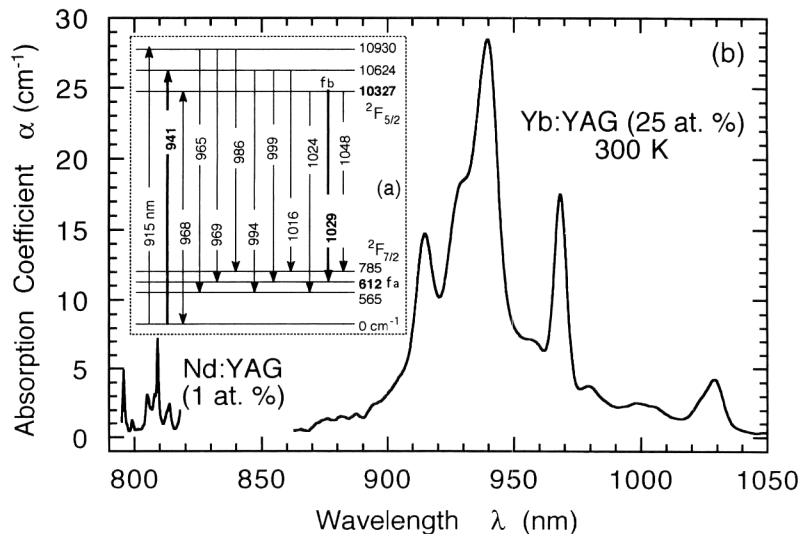


図2 Yb:YAGの分光特性。(a) Yb:YAGのエネルギー準位図、(b) Nd:YAG, Yb:YAGの励起光吸収スペクトル特性。

表1 Yb系個体レーザー材料分光特性の比較.

材 料	蛍 光					吸 収				
	波長 $\lambda_e$ (nm)	断面積 $\sigma_e$ ( $10^{-19}$ cm $^2$ )	寿命 $\tau_f$ (ms)	$\sigma_e \tau_f$ (a.u.)	バンド幅 $\Delta\lambda_e$ (nm)	波長 $\lambda_p$ (nm)	断面積 $\sigma_p$ ( $10^{-20}$ cm $^2$ )	バンド幅 $\Delta\lambda_p$ (nm)	$\beta_{min}$	
Nd YAG	1064	6.50	0.23	1.00	0.67	808		1.5		
Yb	YAG	1030	0.23	0.96	0.15	9.5	0.80	21	0.055	
	YLF	1020	0.08	2.16	0.12	37.3	0.75	—	0.098	
	FAP	1043	0.59	1.08	0.43	4.1	10	2.4	0.047	
	SFAP	1047	0.73	1.26	0.62	4.0	8.6	3.7	—	
	YVO	1017	0.02	0.75	0.01	—	9.85	3.1	10.0	0.140
	glass	1004	—	2.0	—	*	9.59	0.27	—	—
	KYW	1025	0.30	0.60	0.12	*	9.81	13.3	3.5	—
	BCBF	1034	0.13	1.17	0.10	24.0	9.12	1.1	19.0	0.097
	YCOB	1032	0.036	2.28	0.05	48.7	9.77	0.9	4.0	0.066
	GdCOB	1032	0.055	2.6	0.10	21.0	9.76	0.41	15.0	0.060
YAB	1040	0.08	0.68	0.04	*	9.75	3.4	18.7	0.044	

注) \* : 蛍光幅が広く, 970 nm 帯の呼吸と分離不可能.

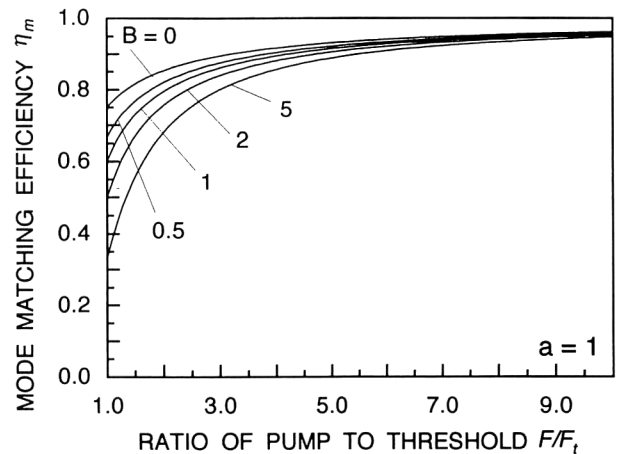
起指数,  $S$  は共振器内光子数に比例した光子指数である. 図3(a) にモードマッチング効率の励起比特性の計算結果を示す. 四準位レーザーは, 損失比  $B=0$  であるため常に高いスロープ効率が得られるが, 準四準位レーザーの場合は下準位吸収損失のためスロープ効率が低下する. しかし閾値の5~6倍以上の励起を行えば下準位吸収が飽和するため四準位レーザーに匹敵する効率を得られる. 図3(b) はモードマッチング効率のスポットサイズ比特性の計算結果を示す. 励起光半径が, レーザー光半径に比べ小さい場合 ( $a < 1$ ), 四準位レーザー ( $B=0$ ) であればモードマッチング効率は改善されるが, 準四準位レーザーの場合, 励起していない部分が損失となるため逆に効率は低下する. 閾値の10倍で励起している場合でも, 下準位吸収を飽和させるためにはレーザー光半径よりも若干大きめの  $a \sim 1.1$  の条件で励起する必要がある.

## 2. 高効率四準位固体レーザー設計

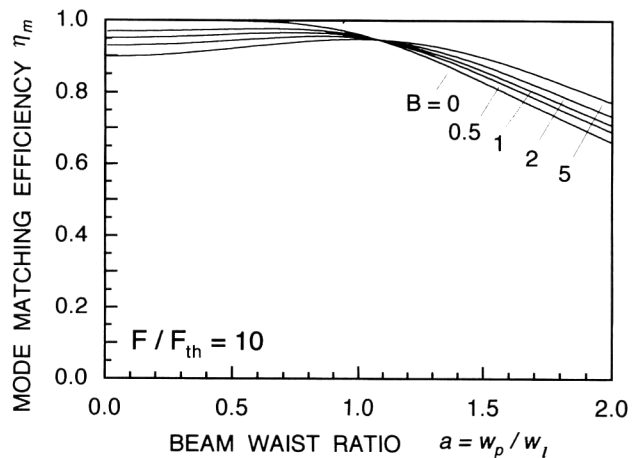
### 2.1 $M^2$ 因子による最適設計法

Ybなどの準四準位レーザーでは, 高い横モード品質を有するTi:サファイアレーザー端面励起による初期評価で高い発振効率が確認されても, LD励起では芳しくない結果となる場合が多く見受けられる. これは, LDは横モード特性が悪く, 小さい領域に集光した場合, すぐに発散し, 媒質全体にわたり高密度励起状態を維持することが困難なためである. ここではLD光伝搬特性記述に  $M^2$  因子<sup>18,19)</sup>を導入することにより, 高密度励起状態を作り出す最適設計法を紹介する<sup>20,21)</sup>.

レーザーの高効率動作を実現するためには, まず, モードマッチング効率を高めねばならない. このため, 励起光のコンフォーカル長は, 利得媒質の励起光吸収長  $L$  より



(a)



(b)

図3 モードマッチング効率. (a) 励起比特性 ( $F/F_{th}$  は発振閾値に対する励起光電力比), (b) スポット径比特性 ( $a$  は発振ビームに対する励起ビームのスポット径比).

長く設計する必要がある (図4). 一般に, 四準位レーザーに対しては, 利得媒質端面における励起光半径は, レー

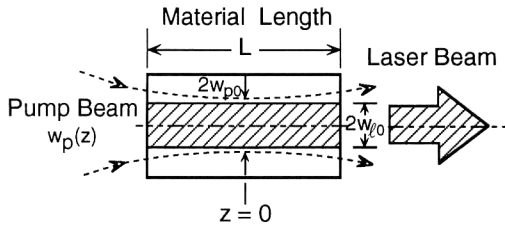


図4 高次横モード励起光とレーザー発振光の空間的な関係。

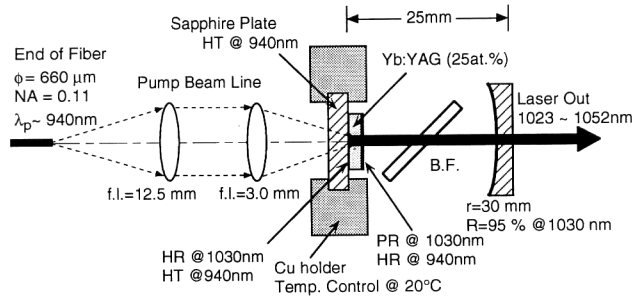


図5 複合共振器型 Yb:YAG マイクロチップレーザーの構成。

レーザー共振器光のスポット半径より小さく ( $w_p(L/2) \leq w_{l0}$ ) するが、準四準位レーザーでは励起光の集光径は、レーザー共振器のそれより若干大きくする必要があり ( $w_{p0} \geq w_{l0}$ )<sup>20)</sup>。これより、励起される領域と TEM<sub>00</sub> 共振器モード間のマッチング効率を悪化させない最小集光径が定まる。一方、高効率動作のためには、下準位吸収を飽和させるだけの高密度励起が必要で、少なくとも閾値の5倍以上の励起強度が要求され、これより許容される最大の集光スポット径が定まり、最適集光径が次式で与えられる<sup>21)</sup>。

$$\sqrt{\frac{\eta_a P_i}{5 \pi I_{t,th}}} \geq w_{p0} \geq \sqrt{\frac{M^2 \lambda_p L}{2 n \pi}} \quad (4)$$

ここで、 $w_{p0}$  は励起光の最小スポット半径、 $\lambda_p$  は励起波長、 $n$  は媒質の屈折率、 $I_{t,th}$  は下準位吸収による局所閾値強度で  $I_{t,th} = f_a N_0 L h \nu_p / (f_a + f_b) \tau$  として求められる。このとき、 $N_0$  は Yb<sup>3+</sup> の総添加イオン密度である。式(4)は、準四準位レーザーにおいて低閾値、高効率動作を実現するために許容される励起光およびレーザー光のスポット径範囲を示す。

## 2.2 発振特性

Yb:YAG レーザーを評価するため図5に示す構成で発振実験を行った<sup>21)</sup>。共振器は Yb:YAG マイクロチップとレーザー光に対する反射率95%の出力鏡よりなる。共振器内部の複屈折フィルターは波長可変実験時に使用する。Yb 添加濃度 25 at.% の YAG 結晶を厚み 400  $\mu\text{m}$  にカットし、放熱と取り扱いのためサファイア板に光学接着し、用

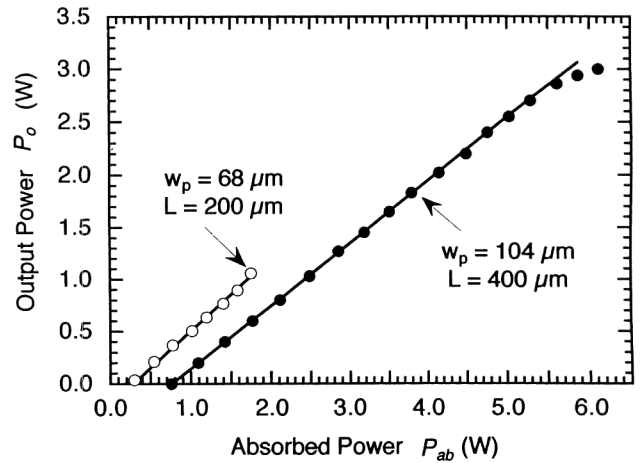


図6 Yb:YAG マイクロチップレーザーの入出力特性。

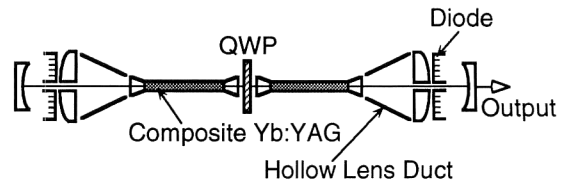


図7 ホローレンズダクトを用いた高出力 Yb:YAG ロッドレーザーの構成<sup>23)</sup>。

いた。ファイバー出力の LD 光をレンズ 2 枚を用いて直径 68~78  $\mu\text{m}$  に集光して、Yb:YAG チップを端面励起している。レーザー結晶ホルダ温度は TE クーラーにより 20°C に保った。なお、Yb:YAG の共振器内部面は、励起光に対して高反射、レーザー光に対して数%の部分反射コーティングを施してある。このため、出力鏡と Yb:YAG マイクロチップとで複合共振器が形成され、単一縦モード発振を容易にしている。

図6に Yb:YAG レーザーの入出力特性を示す。式(4)の条件を若干満たさないためスロープ効率は 60% に留まったが、最大出力 3 W が得られた。結晶長 200  $\mu\text{m}$  の条件では式(4)を満たすためスロープ効率 70% が得られる<sup>21)</sup>。これらの実験から、高いモードマッチングを維持した状態で、高密度励起を実現することにより Yb:YAG レーザーは、低励起パワーでも室温において高効率動作可能なことが示された。

## 3. Yb 系固体レーザーの高輝度化、多機能化

### 3.1 高出力化

Sumida らのロッド型 Yb:YAG による 0.95 kW 連続発振の報告<sup>22)</sup> に続き、Honea らはホローレンズダクトを用いた端面励起デュアルロッド構成で 1.08 kW 出力を達成した(図7)<sup>23)</sup>。光変換効率は 27.5%、 $M^2$  は 13.5 程度

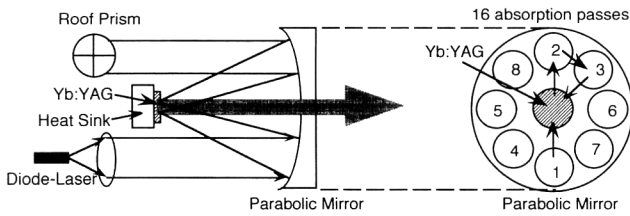


図8 高出力 Yb: YAG ディスクレーザーの構成<sup>24)</sup>.

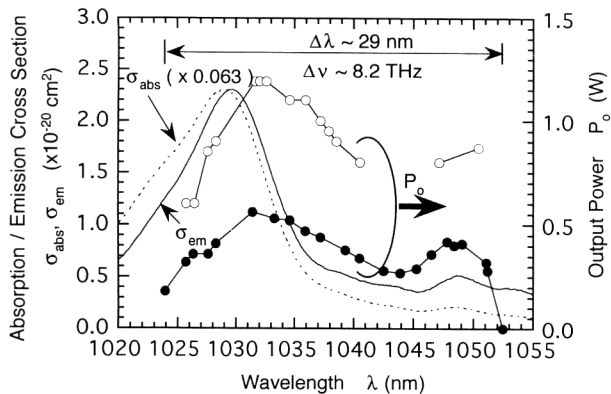


図9 Yb: YAG マイクロチップレーザーの波長可変特性.

であった。また、Giesenらは、これまでにアクティブミラー型のディスク Yb:YAG レーザーにおいて最大出力 346 W、スロープ効率 49%を得ていたが、構成が複雑であったこと、結晶温度を冷却する必要があったなどの欠点を有していた<sup>24)</sup>。最近では放物面鏡を用いることにより最大出力は 24.7 W に留まっているものの、スロープ効率を常温で 56.7%まで改善し、注目されている (図8)<sup>25)</sup>。さらに、Brownの報告では、6 mm 厚の Yb:YAG レーザーで、LN<sub>2</sub> 冷却により 250 kW の平均出力が望め、ディフュージョンボンド構造や多段スラブ構成の採用により 1 MW 以上の高平均出力動作も可能なことが示された<sup>26)</sup>。パルス発振ではすでに J 級の動作も報告されており<sup>27)</sup>、今後の展開が期待される。

### 3.2 波長可変化

Yb:YAG の利得幅は、1026~1035 nm と広く、さらに、エネルギー構造がシンプルであるため利得幅を超えた波長領域での発振も可能となる<sup>21,24)</sup>。図5の共振器内部に複屈折フィルター (厚み 1 mm の水晶) を挿入し、Yb:YAG レーザーの波長可変特性を評価した。図9に、Yb:YAG レーザーの発振スペクトル特性を示す。励起パワー 2.9 W 時には、複屈折フィルター 1 枚では 1030 nm の発振を制御できず 1041~1047 nm の領域に発振のギャップが生じた。励起パワーを 2.0 W と減じることで、波長 1023~1052 nm と蛍光幅の約 3 倍に当たる 29 nm (8.2

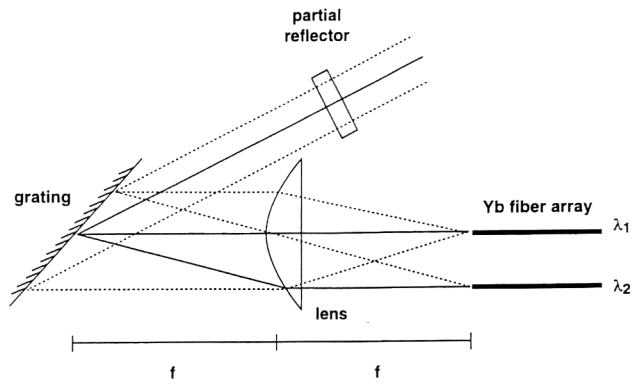


図10 異波長発振 Yb: glass ファイバーレーザーのビーム合成構成<sup>30)</sup>.

THz) にわたる広帯域の可変特性が実現された<sup>21)</sup>。最近、出力鏡の反射率を高めることで、出力は減少するが 1021.7~1088.0 nm と 66.3 nm (18 THz) にわたる広帯域な発振も確認され、波長可変レーザーとしても有望なことが示されつつある。

一方、Yb<sup>3+</sup> 添加ファイバーレーザーも改善が著しく、これまでにダブルクラッドファイバーから 110 W 以上の高出力動作 ( $M^2 \sim 1.7$ ) が報告されるとともに<sup>28)</sup>、1110~1020 nm と 80 nm 近くの広帯域波長可変動作も確認されている<sup>29)</sup>。さらに、異なる発振波長の Yb:ファイバー出力を回折格子とレンズを併用することで結合する方法 (図10) が提案されるなど、ファイバーレーザーの新たな波長多重伝送方式が試みられつつある<sup>30)</sup>。

### 3.3 短パルス化

Yb:YAG は広い蛍光幅を有するが、一般的な受動モードロックは困難で、当初 AOM を用いて 80 ps が得られた程度であった<sup>31)</sup>。最近の半導体技術の進歩により作成された半導体可飽和吸収鏡 (SESAM) を利用するに至り、540 fs の自己スタートの超短パルスが平均出力 150 mW で得られるようになった<sup>32)</sup>。また、Keller らは SESAM を改良し、変調深さ ~1% の低フィネス SESAM を用いてパルス幅 340 fs を中心波長 1.033 μm、スペクトル幅 3.2 nm で得ている<sup>33)</sup>。さらに、40 W LD 励起で CW 出力 4.3 W が得られる構成において、SESAM とプリズム対の追加によりパルス幅は 1 ps ながらも平均出力 1.5 W、繰り返し 45 MHz を得ている (図11)<sup>34)</sup>。これまで述べたように、LD 励起 Yb:YAG は第一に高効率、高出力レーザーとして期待されており、Ti:サファイアレーザーに比べ小型で使いやすいパワーモードロックレーザーとしての高い可能性をもっているといえる。

一方、Nd:glass や Nd:YLF は、Nd:YAG に比べ広い蛍光幅、長い上準位寿命を有するため短パルス化に適し

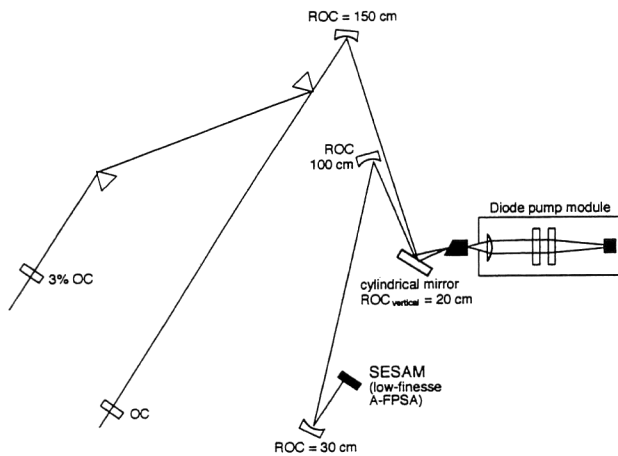
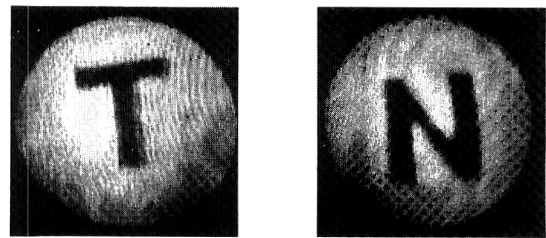
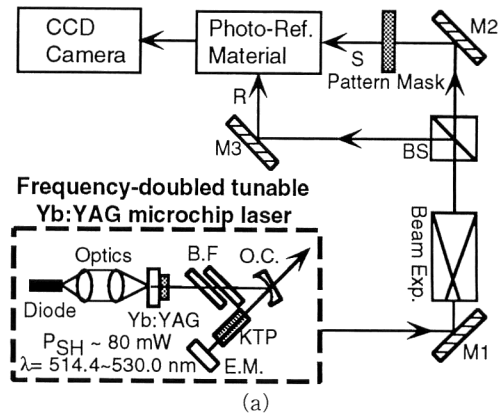


図11 LD励起Yb:YAGモードロックレーザーの構成<sup>34)</sup>.

ているが、熱伝導率が低いため高平均出力化には制限が生ずる。Yb系の材料はNd系に比べ蛍光幅が広く上準位寿命も長くなるが、何よりも熱負荷が小さいため、Ybを上記媒質に添加し、短パルス発生実験を試みている<sup>35)</sup>。Kellerらは、2 mm厚のYb添加リン酸系ガラスをLD励起することで、発振波長1058 nmにおいて繰り返し112 MHz、平均出力65 mWの58 fsパルスを得ており<sup>36)</sup>、さらなる短パルス化も検討されつつある。

### 3.4 非線形波長変換

Yb:YAGは1030 nmを中心に発振するもので、そのSH波はArイオンレーザーと同じ515 nmに対応する。Bibeauら<sup>37)</sup>はYb:YAGのSH波で平均出力76 Wを得ており、小型で簡単な構成で、Arイオンレーザーをはるかに上回る高出力化が実現されている。また、Yb:YAGレーザーのSH波も波長可変であることを利用した応用が提案されている。図12(a)に、波長多重記録型ホログラフィック光メモリの構成を示す<sup>38)</sup>。記録用光源には図5のYb:YAGマイクロチップレーザーの共振器内部に長さ5 mmのKTPを配置しSH波発生を図った。図12の構成で最大出力200 mW、発振波長514.4~530.0 nmまでの15.6 nm (17.7 THz)にわたる単一周波数青緑光を得た。一方、記録媒体にはFeイオン添加LiNbO<sub>3</sub>を、*c*軸にホログラム格子の $K$ ベクトルが平行に作られるように配置した。単一波長による角度多重記録の結果を図12(b)に示す。さらに、レーザーの波長を変えることによって4種類の画像を波長多重記録できることを確認した。小型化、高出力化ばかりでなく、高性能化の面でもArイオンレーザーを凌駕できることが示された。また、最近では、Yb:YCOB、Yb:GdYCOBなどの材料は自己第二、第三高調波発生が可能であることが示され、簡便で広帯域な多機能光源に成りうる新材料として期待されてい



(b)

図12 共振器内部SHG型Yb:YAGマイクロチップレーザーを用いたホログラフィック光メモリー。(a)装置構成、(b)角度多重記録結果。

る<sup>12,13)</sup>。

以上、1990年代半ばごろより活発化したYb系固体レーザーについて解説してきた。Yb系固体レーザーでは、第1に高い量子効率、長い蛍光寿命などの効果により既存のレーザーを上回る高出力、高効率レーザーが望める。第2に、濃度消光が起きにくく、Yb<sup>3+</sup>を高濃度添加できるため、高効率のマイクロチップレーザーが可能となる。第3に、比較的広い蛍光幅を利用した波長可変レーザーや超短パルスレーザーも可能となる。加えて、Yb<sup>3+</sup>がアップコンバージョンを起こさないことがこれらの効果を促進させるであろう。また、高輝度光源を利用した非線形波長変換では、青緑域の波長可変コヒーレント光が高効率に得られるため、従来のArイオンレーザーに代わる高機能光源となることが示された。さらに、高次高調波の高効率発生も望めるためエキシマレーザーなどの固体化も促進されるであろう。一方、小型高輝度レーザーは光パラメトリック発振や差周波発生なども容易にするため、手ごろな中、遠赤外光光源も可能になるであろう。

LD励起固体レーザーは、LDに対抗するレーザーではなく、むしろLD単体では困難な輝度の改善が望める特殊光学系とみなせる。すなわち、大量のLD出力光を束ね、同時に空間的、スペクトル特性を改善するコヒーレンシーコンバーターとも解釈できる。LD励起方式により室温

発振可能となった Yb 系高輝度固体レーザーは上記変換を高効率に行うことができるだけでなく、Q スイッチ化やモードロック化のように LD では不可能であった時間的特性の加工が可能なる多機能輝度変換器と成りうる夢のあるレーザーではなかろうか。

Yb: YAG レーザーの実験に協力していただいた総研大博士課程 2 年の齋川次郎君およびご討論いただいた分子科学研究所栗村直助手、庄司一郎博士、Nicolaie Pavel 博士に感謝いたします。

## 文 献

- 1) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: "Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **16** (14) (1991) 1089-1091.
- 2) R. L. Byer: "Diode laser-pumped solid-state lasers," *Science*, **239** (1988) 742-747.
- 3) T. Y. Fan and R. L. Byer: "Diode laser-pumped solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24** (1988) 895-912.
- 4) T. Y. Fan and R. L. Byer: "Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 605-612.
- 5) W. F. Krupke: "Radiative transition probabilities with the  $4f^3$  ground configuration of Nd:YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-7** (1971) 153-159. また、最近では S. Guy, C. L. Bonner, D. P. Shepherd, D. C. Hanna, A. C. Tropper and B. Ferrand: "High-inversion densities in Nd:YAG: upconversion and bleaching," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-34** (1998) 900-909.
- 6) D. C. Brown: "Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-33** (1997) 861-873.
- 7) D. Sumida and B. A. Wechsler: "Laser host crystals: physical, optical, and thermomechanical properties," *CLEO/QELS 96 short course notes*, Course Number 129 (1996).
- 8) L. D. DeLoach, S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway and W. F. Krupke: "Evaluation of absorption and emission properties of Yb<sup>3+</sup> doped crystals for laser applications," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-29** (1993) 1179-1191.
- 9) G. Lei, J. E. Anderson, M. I. Buchwald, B. C. Edwards, R. I. Epstein, M. T. Murtagh and G. H. Sigel, Jr.: "Spectroscopic evaluation of Yb<sup>3+</sup>-doped glasses for optical refrigeration," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-34** (1998) 1839-1845.
- 10) P. Wang, J. M. Dawes, P. Dekker and J. A. Piper: "Highly efficient diode-pumped ytterbium doped yttrium aluminium borate laser," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. PD15.1-PD15.4.
- 11) N. V. Kuleshov, A. A. Lagatsky, A. V. Podlipensky, V. P. Mikhailov, E. Heumann, A. Diening and G. Huber: "Highly efficient CW and pulsed lasing of Yb doped tungstates," *OSA TOPS*, **10** (1997) 415-419.
- 12) F. Auge, F. Mougél, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, G. Aka, A. K.-Harari and D. Vivien: "High-efficiency cw diode-pumped lasing and tunability of Yb:GdCOB," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. 277-279.
- 13) M. Yoshimura, H. Furuya, I. Yamada, K. Murase, H. Nakano, M. Yamazaki, Y. Mori and T. Sasaki: "Non-critically phase-matched second harmonic generation of a Nd:YAG laser in GdYCOB crystal," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. PD11.1-PD11.3.
- 14) 平等拓範: "半導体レーザー励起 Yb: YAG レーザ", 光技術コンタクト, **35** (1997) 682-690.
- 15) 平等拓範: "LD 励起ミニチュア Yb: YAG レーザーの高機能化", レーザー学会研究会報告, **RTM-97-50** (1997) 19-24.
- 16) T. Y. Fan: "Diode-pumped solid-state lasers," *Laser Sources and Applications*, eds. A. Miller and D. M. Finlayson (IOP Publishing Ltd., Bristol, 1995) pp. 163-193.
- 17) T. Taira, W. M. Tulloch and R. L. Byer: "Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers," *Appl. Opt.*, **36** (9) (1997) 1867-1874.
- 18) A. E. Siegman: "New developments in laser resonators," *SPIE Proc.*, **1224** Optical Resonators (1990).
- 19) 平等拓範: "レーザービーム品質測定の基礎", レーザー研究, **26** (1998) 723-729.
- 20) 平等拓範, 鈴木 剛, 小林喬郎: "M<sup>2</sup> 因子を用いた LD 端面励起高効率固体レーザーの設計法", レーザー研究, **24** (1996) 360-366.
- 21) T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayashi and R. L. Byer: "Diode-pumped tunable Yb:YAG miniature lasers at room temperature: modeling and experiment," *IEEE, JSTQE-3* (1997) 100-104.
- 22) H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, R. W. Byron and M. Mangir: "High power Yb:YAG lasers," *IEEE LEOS 1997*, paper ThF1.
- 23) E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell and P. V. Avizonis: "183 W, M<sup>2</sup>=2.4 Yb:YAG Q-switched laser," *Tech. Dig. CLEO* (OSA, 1999) p. 29, paper CMF2.
- 24) U. Brauch, K. Kontag, A. Giesen, I. Johannsen, M. Karszewski, C. Stewen and A. Voss, "Thin disc laser design for high-power diode-pumped solid-state lasers," *Tech. Dig. CLEO* (OSA, 1997) p. 478, paper CFE1.
- 25) S. Erhard, K. Contag, A. Giesen, I. Johannsen, M. Karszewski, T. Rupp and C. Stewen: "Novel pump design of Yb:YAG thin disc laser for operation at room temperature with improved efficiency," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. 79-81.
- 26) D. C. Brown: "Nonlinear thermal and stress effects and scaling behavior of YAG slab amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-34** (1998) 2393-2402.
- 27) H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder and R. W. Byron: "Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers," *IEEE, JSTQE-3* (1997) 105-116.
- 28) V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P.S. Yeh and E. Zucker: "110 W fiber laser," *Tech. Dig. CLEO* (OSA, 1999) paper CPD11.
- 29) J. Nilsson, J. A. A.-Chavez, P. W. Turner, W. A. Clarkson, C. C. Renaud and A. B. Grudinin: "Widely tunable high-power diode-pumped double-clad Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. 285-287.
- 30) C. C. Cook and T. Y. Fan: "Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. PD7.1-PD7.4.
- 31) S. R. Henion and P. A. Schulz: "Yb:YAG laser: mode-locking and high-power operation," *Tech. Dig. CLEO* (OSA, 1992) p. 540, paper CThQ2.

- 32) C. Honninger, G. Zhang, U. Keller and A. Giesen: "Femtosecond Yb:YAG laser using semiconductor saturable absorbers," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2402-2404.
- 33) U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek and J. A. der Au: "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE, JSTQE-2* (1996) 435-453.
- 34) C. Honninger, R. Paschotta, F. M.-Genoud and U. Keller: "Diode-pumped high-power soliton modelocked Yb:YAG laser," *Advanced Solid-State Lasers Conf. Ser.13* (OSA, 1999) pp. 12-14.
- 35) 西岡 一, 鬼澤敦子, 上原 昇, 植田憲一: "新しいLD励起 Ybドープレーザー", 電気学会研究会資料, OQD-99-4 (1999) 19-24.
- 36) C. Honninger, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, L. R. Brovelli and C. Harder: "Efficient and tunable diode-pumped femtosecond Yb:glass lasers," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 126-128.
- 37) C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell, M. A. Emanuel, J. Skidmore, C. A. Ebberts, S. B. Sutton and K. S. Jancaitis: "High-average-power 1- $\mu$ m performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-34** (1998) 2010-2019.
- 38) J. Saikawa and T. Taira: "Frequency-doubled tunable Yb:YAG microchip laser for holographic volume memories," *Tech. Dig. CLEO* (OSA, 1999) p. 333, paper CWO5.

(1999年5月8日受理)