低温冷却型Yb系固体レーザー

河仲 準二

大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番6号)

Yb-Doped Solid-State Lasers at Low Temperature

Junji KAWANAKA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6, Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871

(Received August 18, 2004)

Laser characteristics of diode-pumped Yb-doped materials have been improved at low temperature dramatically for high power operation. A laser system in the materials has been changed from quasi-three-level to four-level at low temperature. An emission cross section is enlarged and the reduced saturation fluence enables efficient energy extraction of the storage energy even by using commercially obtainable optics. In addition, thermal conductivity of laser crystals is considerably improved. In a diode-pumped laser oscillator with a cryogenically cooled Yb:YAG crystal, quantum-defect-limited operation has been demonstrated at 90 % optical slope efficiency. A Yb:YLF chirped-pulse regenerative amplifier has been developed at low temperature and 36-mJ, 800-fs pulses have been obtained at 20 Hz.

Key Words: Yb lasers, Low temperature, Solid-state lasers, Diode pump, High power lasers

1. はじめに

近年、高輝度半導体レーザーやビーム結合技術の進歩によりkWを超えるCWレーザー出力を小型装置で得ることが可能になってきた。一方で、レーザー材料にエネルギー蓄積能力が求められるパルスレーザーは主に半導体レーザー励起によるネオジウム系固体材料によって実現されてきた¹⁻⁵⁾。応用分野における利便性や生産性の要求を満たすために高い繰り返し周波数、高い平均出力が求められ、現在ではジグザグスラブNd:YAG結晶を用いたMOPAシステムにより900 Wを超える平均出力が得られている¹⁾。また、パルスエネルギーについては、シングルショットは別としてロッド型Nd:YAG結晶やジグザグスラブ型Nd:Glassを用いて10 J前後のレーザー出力が10 Hz動作で得られている^{2,3)}。いずれの場合にも、多量に発生する熱や育成できる結晶サイズが平均出力やパルスエネルギーに制限を与えている。高パルスエネルギー化については、近年、YAGやY₂O₃など種類は限られているものの高品質のセラミクスレーザー材料が実現され結晶サイズの制約は緩和されつつある。しかし、高パルスエネルギー化によるレーザービームサイズの大型化は他の光学系にも同様の大型化を求めることにつながり、また、レーザー装置の大型化は装置の安定性や操作の簡易性を損なう原因にもなる。さらに面積と体積の比率は大型になるほど小さくなるためレーザー材料の大型化は放熱を

困難にする。これらを考慮すると、高平均出力化・高パルスエネルギー化を求める次世代のパルスレーザー材料ではNd系材料を超える高エネルギー密度動作が重要な要因になると考えられる。

そこで、高出力半導体レーザー励起による次世代高出力パルスレーザー材料に求められる性質を考えると、①誘導放出断面積が適切であること、②半導体レーザー光を効率良く蓄積するために上準位寿命が長いこと、③熱発生を少なくするため励起波長とレーザー波長が近いこと、④近赤外域に吸収帯域を有すること等々列挙すればきりが無いが、イッテルビウム系レーザー材料は今述べた特徴をほぼ満足している。これまでイッテルビウム系固体材料、中でもYb:YAGを用いた数多くのレーザー研究開発がなされてきた⁶⁻¹⁰⁾。しかし、レーザー出力などの数値で比較するとNd系材料と大きな違いはなく、現状では同材料の特徴を十分に引き出すのは困難と思える。このことは程度の違いこそあれすべてのイッテルビウム系固体材料に当てはまり、同材料による新レーザー開発にはレーザー材料以外の多くの項目について研究開発が未だ必要である。これらの開発をできるだけ必要とせず同時にレーザー材料そのものにさらに高いレーザー特性を求めて、今回、イッテルビウム系レーザー材料を低温に冷却するという視点からこれまでに行ってきた研究について解説した。

2. イッテルビウム系固体材料

イッテルビウム系固体レーザー材料のエネルギー準位図をFig. 1に示す。大きく2つの準位からなり、それぞれの準位は結晶場により上準位が3つ、下準位が4つの副準位にStark分裂している。レーザー動作は分裂によるエネルギー差を利用する。吸収波長は近赤外域の900 nm帯にあり、高出力半導体レーザーの発光波長と一致する。また、吸収スペクトル幅は数十nmと広いため、アレイ型高出力半導体レーザーの幅広いスペクトル幅に対応し半導体レーザーの特別な温度制御も不要である。レーザー波長は1000 nm帯にありNd系レーザーとほぼ変わらないため同レーザーの代替として利用できる。さらに、励起フォトンエネルギーに対するレーザーフォトンエネルギーの比は90 %以上であり、量子欠損によるエネルギー損失はNd系材料の3分の1である。上準位の寿命は0.2 ~ 2 msとNd系材料に比べて数倍~1桁程度大きいためエネルギー蓄積能力は高い。誘導放出断面積はNd系材料よりも一桁小さく、CW動作ではNd系材料よりも数倍強い光強度を必要としパルス動作では10倍以上高いフルーエンスで動作する。このため、イッテルビウム系材料は小さい体積に大きなエネルギーを蓄積でき、エネルギーの出し入れには高い光強度を必要とすることがわかる。エネルギー準位が単純なためレーザー上準位からの再吸収が生ずることはない。また、濃度消光がおきにくく数十%の高いイオン濃度で用いることができるためレーザー材料を薄くすることができ、励起光とレーザー光の空間モード整合を高く取ることができる。

一方、Stark分裂によるエネルギー差はホスト材料により異なるが(Table 2)、上下準位とも数百 cm^{-1} 程度であり室温で下準位は熱的に励起されるため、レーザー利得を得るためには基底準位の吸収飽和が必要な準3準位レーザーである。イッテルビウム系材料にみられる非飽和吸収は蓄積されたエネルギーのレーザー光への変換を制限する。パルスレーザーに比べて比較的励起強度が弱い半導

Fig. 1 Energy levels of Yb^{3+} ions in host materials and population distribution at room and low temperature.

Table 1 Parameters of Yb-doped materials as a laser materials.

Host	λ_{ab} (nm)	$\Delta\lambda_{\text{ab}}$ (FWHM) (nm)	λ_{em} (nm)	$\Delta\lambda_{\text{em}}$ (FWHM) (nm)	σ_{abs} (10^{-20} cm^2)	σ_{em} (10^{-20} cm^2)	τ (ms)	k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
YAG	941	20	1030	9	0.8	2.3	0.9	10
S-FAP	899	4	1047	4	8.6	7.3	1.26	2
YLF	960	57	1018	47	0.46	0.75	1.5	6.2
GdCOB	900	11	1030	44	0.5	0.35	2.3	2.4
KYW	950	47	1000	76	3.5	3	0.6	3.3
KGW	950	47	1000	76	3.5	2.2	0.6	3.3

Table 2 Energy sub-levels of Yb:YAG and Yb:YLF.

Crystal	Yb:YAG (cm^{-1})	Yb:YLF (cm^{-1})
$2F_{5/2}$	10930	10730
	10624	10400
	10327	10270
$2F_{7/2}$	785	438
	612	359
	565	224
	0	0

体レーザーによる励起では小信号利得は小さいため、わずかな吸収がエネルギー引き出し効率に影響を与える。さらに低い誘導放出断面積は10 J/cm^2 以上の飽和フルーエンスに相当し光学素子のARコート破壊しきい値を超えている。以上のことから、イッテルビウム系レーザー装置の開発には、①基底状態吸収を飽和させる強い光強度を持った励起装置、②下準位の熱励起を避ける効果的な冷却方法、③光学系を破壊しない条件下でのエネルギー引き出し方法等が必要である。

Table 1にイッテルビウム系材料のレーザーパラメータを表す。Yb:YAG結晶は誘導放出断面積が大きくレーザー発振波長におけるレーザー下準位の再吸収も少ないため、室温でのLD励起においても他のイッテルビウム系材料に比べ容易にレーザー利得が得られる。加えて、熱伝導率、熱ショックパラメータが共に高いことから初期の頃から盛んに研究対象として用いられてきた。YAG結晶への Yb^{3+} イオンのドーピング量の増加と共に不純物等によるエネルギー損失等のレーザー特性の劣化が見受けられるが、25 at. %までなら問題なく使用できレーザー材料形状の自由度は大きい。また、現在ではセラミクス技術の進歩により単結晶と同程度のYAGセラミクスが実現できるためレーザー材料の大型化が可能である¹¹⁾。これらのことからYb:YAGは高い繰り返し周波数・高い平均出力と共にジュールクラスの高いパルスエネルギーを持つナノ秒レーザーや低い繰り返し周波数ながら核融合ドライバのようなメガジュール級の極めて大出力のパルスレーザーが実現できる有力な候補の1つと考えている。

一方、Yb:YLF結晶は蛍光スペクトル幅が60 nm以上と広く、熱伝導率も比較的高いことから高繰り返し・高平均

出力のフェムト秒レーザーの実現が期待できる。熱伝導率は広帯域の蛍光スペクトル幅を持つ材料の中では最も高い。60 at. %の高ドープ材料についても問題なく使用でき、利用できる幅広いドープ濃度領域はレーザー材料の形状、さらにはレーザーシステムに大きな自由度を与える¹²⁾。室温における誘導放出断面積はYb:YAGの3分の1と小さく、レーザー下準位の再吸収も大きい。そのためレーザー発振のためには100 kW/cm²以上の高強度励起が必要である。

3. 低温冷却によるレーザー特性の向上

半導体レーザーの高輝度化とビーム結合技術の向上によりファイバー出力端面で200 kW/cm²を超える高い輝度でkW級出力のファイバー結合型半導体レーザーが開発されており、未だコストがかかるもののイッテルビウム系レーザー開発は容易になりつつある。しかしながら、室温における基底状態の再吸収やレーザーの高出力化に伴う多量の熱発生についての大きな問題は残る。我々は新しいレーザー材料としてイッテルビウム系固体材料を低温に冷却することに着目した。Stark分裂したレーザー下準位の熱的な分布の中心はMaxwell-Boltzmann分布に従い温度の低下と共に最下準位に近づく。適当な低温ではFig. 1に示すようにレーザー下準位の分布がほぼゼロとみなせるようになり、室温時にレーザー利得損失となっていたレーザー下準位の再吸収が全くなり理想的な4準位レーザー材料となる。Fig. 2(a), (b)は室温時と液体窒素温度(77 K)におけるYb:YAGおよびYb:YLF両結晶の吸

収・蛍光スペクトルである。室温時では吸収・蛍光両スペクトルは大部分の領域でオーバーラップしている。液体窒素温度ではこのオーバーラップはなくなりレーザー下準位の再吸収がなくなることがわかる。さらに、誘導放出断面積はピーク値で2倍以上に増加し、室温で光学系のダメージしきい値より高かった飽和フルーエンスも低減されることから高効率なエネルギー引き出し動作が期待できる。また、吸収スペクトル幅は狭くなるが偏光を選べばLDの温度制御の必要がない程十分に広く、一方で吸収断面積が増加するため効率よい吸収が可能となる。また、低温に冷却することで熱伝導率が大幅に向上し^{13,14)}、これに伴って熱ショックパラメータの増加も期待できる。Fig. 3はサファイア結晶、YAG結晶、Yb:YLF結晶の熱伝導率の温度特性を示す。Yb:YLF結晶は液体窒素温度で24 W/mKであり、室温時のYAG結晶の約2倍の大きさである。YAG結晶に至っては103 W/mKと銅や銀の4分の1、金の3分の1にまで大きくなる。

以上述べたことを再度まとめてみると、イッテルビウム系レーザー結晶を低温に冷却することで

- ①レーザー下準位の再吸収がなくなり4準位レーザーが実現できる。
- ②誘導放出断面積が大きくなり光学系を破壊することなく蓄積されたエネルギーの効率良い引き出しが実現できる。
- ③熱伝導率が大幅に向上できる。

といった特徴が得られる。一方、冷却を含めた全エネルギー変換効率をこれまで以上に高くすることは現在では難しく、高効率の冷却装置の開発が待たれる。しかしながら、このようなレーザー特性の改善は、室温時とは全く異なる新しい結晶と言えるほどに極端であり、ネオジウム系材料にないイッテルビウム系材料の特徴を大幅に損なわないためこれまでにない高いパルスエネルギーや高い繰り返し速度を持ったレーザーシステムの構築が期待できる。これらのことは他のイッテルビウム結晶についても定性的に同様である。なお、CW動作ではあるが、

Fig. 2 Absorption and emission spectra for (a) Yb:YAG(25 at. %, $t = 1$ mm) and (b) Yb:YLF (σ - and π -polarization, 45 at. %, $t = 0.3$ mm) at crystal temperature of 295 K and 8 K.

Fig. 3 Thermal conductivity of sapphire, YAG and Yb:YLF as a function of crystal temperature.

最近の我々の成果ではサファイア板でサンドイッチしたYb:YAGディスクにより106 Wの励起入力に対して75 Wのレーザー出力が¹⁵⁾、また、D. J. Ripin et al.が冷却Yb:YAGロッドにより215 W入力に対して165 W出力が¹⁶⁾、共にTEM₀₀モードで得られている。

4. LD励起Yb:YAGによる量子欠損限界発振

低温冷却されたYb:YAG結晶を用いたレーザー発振はいくつかのグループで行われ高効率なレーザー動作を実現している¹⁷⁻²⁰⁾。Yb:YAGにおける励起光子エネルギーに対するレーザー光子エネルギーの比は90 %を超える。我々の知る限りこれまで最も高いスロープ効率(吸収パワーに対する出力パワーの変動比)はA. Giesenらによる85 %であり、光子エネルギー比に近い¹⁷⁾。このような高効率動作を得るために、結晶を100 K~200 Kに冷却している。さらに結晶内での励起光と発振レーザー光の空間モードの結合効率を高め同時に高い励起強度を得るために励起源にTi:sapphireレーザーを使用している。半導体レーザーを励起源とする場合、レーザーピーク強度は弱く、空間モード形状もTEM₀₀ではなくフラットトップに近い場合が多いため、Ti:sapphireレーザーのように励起強度を強くすることはできない。Fig. 4は我々が使用した半導体レーザー励起による低温冷却型フリーランニング発振器の実験図である²⁰⁾。共振器長は30 mm、出力鏡のレーザー光透過率は15 %である。Yb:YAG結晶はドープ量25 at. %, 厚さ1 mmであり、一方の端面は共振器ミラーの1つとして利用している。残る端面は励起波長に対して高反射コートしており結晶内を1往復することでほぼすべての励起光を吸収する。励起源には波長940 nm、出力0.6 Wのファイバー出力LDを用いており、結晶上での最大励起強度は1.3 kW/cm²と低い。Fig. 5は励起LDパワーに対するレーザー出力パワーの温度変化を示したものである。また、光-光変換によるスロープ効率と励起出力のレーザー発振しきい値をまとめたものをFig. 6に示す。スロープ効率は最大90 %に達した。入出力の光子エネルギー比が92 %であることからほぼ理論限界動作を達成している。また、光-光変換効率は74 %が得られている。このときの励起強度は1.3 kW/cm²と低く、アレイ型高出力半導体レーザーでも十分得られる励起強度である。スロープ効率および励起出力の発振しきい値は100 K以下でほとんど変化しないことから4準位系レーザー動作は100 K以下で実現していると

Fig. 4 Schematic diagram of diode-pumped Yb:YAG oscillator at low temperature.

Fig. 5 Laser output power as a function of diode pump power.

Fig. 6 Optical slope efficiency and threshold power as a function of Yb:YAG crystal temperature.

考えられる。近年の汎用クライオスタットは100 K以下であれば100 W程度の熱能力を有するため、量子限界動作で考えると1台の増幅器でkW増幅できることになる。発振器からのレーザー光の空間モード形状は $M^2 = 20$ 程度である。これは、励起光の結晶上でのビーム径240 μm (FWHM, フラットトップ)が共振器TEM₀₀モードのビーム径150 μm ($1/e^2$)より大きいために高次モードが発振しているからである。共振器長を75 mmに伸ばし共振器TEM₀₀モードのビーム径を220 μm ($1/e^2$)にすることで100 K以下の結晶温度で $M^2 = 1.0 \sim 1.5$ が得られた。このときのスロープ効率は80 %, 光-光変換効率は70 %であり、フラットトップ形状の励起に対しても高い効率でほぼTEM₀₀光が得られることがわかった。光-光変換効率の若干の低下はTEM₀₀レーザー光によりフラットトップ形状の外側励起部のエネルギー取り出しが十分に行えなかったためである。

高出力時における問題は熱発生による温度上昇である。熱伝導率が極端に改善されることはすでに述べた。一方、技術的には、温度上昇低減の手法として従来ドープ量を下げて単位体積あたりの熱発生を抑える手法があるが、イッテルビウム系材料では高ドープが可能である

ためにドーピング量を上げてレーザー媒質を200 μm 程度に薄くして温度上昇を下げる手法が実証された¹⁷⁾。しかしながら、レーザー特性を維持できるYb:YAGのドーピング量は25 at. %と高いものの、このような薄い材料で励起光の十分な吸収を得るためには多数回反射による励起が必要であり煩雑な励起手法が必要となることから、より高いドーピング量の高品質Yb:YAGの実現を期待したい。

5. Yb:YLF結晶によるフェムト秒パルス再生増幅器

Yb:YLFの60 nm以上におよぶ広い蛍光スペクトル幅に着目しフェムト秒高ピーク出力レーザーの研究開発を行った²¹⁻²³⁾。しかし、室温ではFig. 2(b)に示すように吸収・蛍光スペクトルは大半の領域で重なっており、半導体レーザーによる励起強度で実効的に使用できる帯域は15 nm程度である。結晶を冷却すると蛍光スペクトル幅は減少するが吸収スペクトル幅も減少するため、これらの重なり合いが無くなりむしろ実効的な利得帯域は増加すると予想できる。Fig. 7に室温と液体窒素温度におけるCW発振器のレーザー波長可変範囲を示す。結晶を冷却すると実効的な利得帯域は吸収波長側にシフトすると同時に2倍以上の35 nmに広がっている。また、発振しきい値が低くなるため半導体レーザーのような低い励起強度では実効率も大きく増加する。

mJ出力の超短パルス光を1つの増幅ステージで実現する

Fig. 7 Yb:YLF laser output power as a function of wavelength at 295 K and 77 K (liquid nitrogen).

ことが当初の目的であった。このための増幅方法としてチャープパルス再生増幅法を選択した。これは、次の理由による。①冷却時における飽和フルエンスは11 J/cm²と未だ光学損傷しきい値と同程度に高いため多重パスによる増幅が必要であること。②増幅利得が10⁶以上必要であること。③共振器を用いるため空間ビーム形状が優れていること。Fig. 8は液体窒素冷却型再生増幅器の構成図である。励起には波長940 nm、出力100 Wのファイバー結合型半導体レーザー (Jenoptik社製) をQCW動作で用いている²¹⁻²³⁾。ファイバー出力は集光レンズ系により結晶上に最小600 μm で集光される。共振器はX型とし励起体積を大きく取るようにしている。20 at. %, 厚さ2 mmのYb:YLF結晶を液体窒素クライオによって熱伝導冷却している。共振器内のポッケルスセルと薄膜偏光子により共振器へのシードパルス光の取り込みと共振器からの再生増幅パルス光の引き出しを行っている。繰り返し周波数はポッケルスセルの電源で制限されており20 Hzである。シード光にはチタンサファイア発振器からの90 fsパルス1.2 kmのPMファイバーで時間的に引き伸ばしたチャープパルス光を使用した。増幅後のスペクトル幅は5 nmが得られ、グレーティングペアにより時間圧縮を行った結果、800 fsが得られた。Fig. 9に励起時間に対する増幅パルスエネルギーを示す。最大60 mJが得られ、ステージ利得は10⁹倍に達する。時間圧縮後には36 mJが得られた。

Fig. 9 Output energy of regeneratively amplified pulse as a function of pump duration for different pump peak power of 53 W, 73 W and 93 W.

Fig. 8 Schematic diagram of Yb:YLF chirped-pulse regenerative amplifier at low temperature.

イッテルビウム系固体材料は高パルスエネルギーと高平均出力エネルギーを両立できる魅力的なレーザー材料である。Yb:YAGはイッテルビウム系材料の中では誘導放出断面積が大きく比較利用しやすい材料であり数多くの研究がなされている。しかし、実際の数値で比較するとNd系材料と大きな違いは見当たらないように思われる。概してイッテルビウム系固体材料が本来の特徴を遺憾なく発揮するためには、高輝度半導体レーザーの開発、光学損傷、特に表面損傷に対する光学系の高耐力化、高出力・高効率な熱除去法の開発、新しいイッテルビウム系材料の開発など今後期待される研究開発は数多い。今回、低温に冷却するという異なった視点から研究を行った。低温冷却することでイッテルビウム系材料の特長を損なうことなく全く新しいレーザー材料が実現でき、これを用いて高効率・高エネルギー密度動作を実証した。低温冷却は一見誰もが思いつく手法であるが本格的な研究となると数少ない。先に述べた必要な開発項目と合わせて今後の発展を期待したい。

謝 辞

本解説で紹介した研究は、Yb:YLFについては電気通信大学レーザー新世代研究センターの西岡 一先生、Yb:YAGについては(財)レーザー技術総合研究所の藤田 雅之主任研究員、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの時田 茂樹氏との共同研究であり、また、セントラル硝子(株)の久保田 能徳氏には高品質のYb:YLF結晶を育成していただいた。ここに深く感謝いたします。また、本研究を展開するにあたって重要な試金石となる基礎実験は、筆者が日本原子力研究所光量子科学研究センター勤務時に行った。ご協力頂いた関係諸氏に心より感謝いたします。本研究は文部科学省科学研究費(14655276)のご支援を頂いた。深く感謝いたします。

- 1) J. G. Ho, R. J. St. Pierre, J. Morais, J. Poylio, W. Long, M. Weber, and M. M. Valley: *Advanced Solid-State Lasers OSA TOPS* **34** (2000) 28.
- 2) Y. Izawa, M. Yamanaka, T. Kanabe, H. Matsui, Y. Kawada, R. Kandasamy, T. Eguchi, M. Nakatsuka, S. Nakai, T. Kawashima, Y. Okada, T. Kanzaki, H. Miyajima, M. Miyamoto, and H. Kan: *Advanced Solid-State Lasers OSA TOPS* **34** (2000) 100.
- 3) K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka, T. Kase, Y. Akahane, and H. Takuma: *Opt. Lett.* **23** (1998) 1468.
- 4) R. J. St. Pierre, G. W. Holleman, M. Valley, H. Injeyan, J. G. Berg, G. M. Harpole, R. C. Hilyard, M. Mitchell, M. E. Weber, J. Zamel, T. Engler, D. Hall, R. Tinti, and J. Machan: *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **3** (1997) 64.
- 5) A. V. Okishev, D. J. Battaglia, I. A. Begishev, and J. D. Zuegel: *Advanced Solid-State Lasers OSA TOPS* **68** (2002) 418.
- 6) E. C. Honea, Raymond J. Beach, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, S. B. Sutton, and S. A. Payne: *Opt. Lett.* **25** (2000) 805.
- 7) T. Taira, W. M. Tulloch, and R. L. Byer: *Appl. Opt.* **36** (1997) 1867.
- 8) E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Honninger, M. Kumkar, and U. Keller: *Opt. Lett.* **28** (2003) 367.
- 9) C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell, M. A. Emanuel, J. Skidmore, C. A. Ebbes, S. B. Sutton, and K. S. Jancatis: *IEEE J. Quantum Electron.* **34** (1998) 2010.
- 10) W. F. Krupke: *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.* **6** (2000) 1287.
- 11) J. Lu, T. Murai, K. Takaichi, T. Uematsu, K. Misawa, M. Prabhu, J. Xu, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A. A. Kaminskii, and A. Kudryashov: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 3586.
- 12) N. Uehara, K. Ueda, and Y. Kubota: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) L499.
- 13) D. N. Nikogosyan: *Properties of Optical and Laser-Related Materials A Handbook*, John Wiley & Sons, Chichester, 1997, p. 20.
- 14) F. D. Patel, E. C. Honea, J. Speth, S. A. Payne, R. Hutcheson, and R. Equall: *J. Quantum Electron.* **37** (2001) 135.
- 15) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima, and Y. Izawa: *Advanced Solid-State Photonics 2005 (ASSP 2005, OSA)*, MF45.
- 16) D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan: *Opt. Lett.* **29** (2004) 2154.
- 17) A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower: *Appl. Phys. B* **58** (1994) 265.
- 18) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan: *Opt. Lett.* **16** (1991) 1089.
- 19) T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano: *Appl. Opt.* **38** (1999) 5149.
- 20) T. Shoji, S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, and Y. Izawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) L496.
- 21) J. Kawanaka, H. Nishioka, N. Inoue, and K. Ueda: *Appl. Opt.* **40** (2001) 3542.
- 22) J. Kawanaka, K. Yamakawa, H. Nishioka, and K. Ueda: *Opt. Exp.* **10** (2002) 455.
- 23) J. Kawanaka, K. Yamakawa, H. Nishioka, and K. Ueda: *Opt. Lett.* **28** (2003) 2121.

レーザーワード

イッテルビウム系レーザー (Yb laser)

Yb³⁺イオンをドープした固体材料を用いたレーザー。一般に、誘導放出断面積がNd系材料より1桁程度小さく高いエネルギー蓄積能力を持つ。また、アップコンバージョンがないことや、一般に蛍光寿命が1 ms前後と長く光吸収波長が900 nmから1 μmの間にありInGaAs系高出力半導体レーザーによる高効率励起が可能であることから半導体レーザー励起高出力レーザー材料に適している。量

子欠損が小さく高平均出力レーザーとしても有望である。準3準位レーザー材料であり、レーザー利得を得るためには数十kW/cm²以上の高強度励起が必要であるため高輝度半導体レーザーの開発が待たれる。また、高い飽和フルエンスをしのぐ高耐力光学系の開発も重要課題の1つである。

(河仲 準二)