

高輝度中赤外ファイバーレーザー

住吉 哲 実

中赤外波長帯には、大気の透過率が高く空間伝搬に適した波長帯や、分子の振動・回転エネルギーの基本・倍音・組み合わせの各モードと選択的に相互作用する波長帯が存在する。そのため中赤外高輝度レーザー開発はリモートセンシングやレーザー医療応用において重要といえる。

Yb^{3+} や Nd^{3+} をレーザーイオンとする LD 励起 $1\mu\text{m}$ 帯シリカファイバーレーザーにおいては、ダブルクラッド構造の開発¹⁾、励起 LD の高出力化、LD アレイビームの整形技術などの最近の技術的進展により高効率・高出力動作実証 (CW 出力 35 W, スロープ効率 65%²⁾) に成功している。一方、中赤外波長帯固体レーザーを、実用的な高出力 LD (波長 $0.8\sim 0.98\mu\text{m}$) で励起する場合を考えると、励起レーザーに対する中赤外レーザーの光子エネルギーの比が $1/2\sim 1/4$ なので、熱に変換されるエネルギー成分は $1\mu\text{m}$ 帯レーザーの場合と比較すると大きい。この熱負荷は固体利得媒質内に温度上昇、熱歪みなどを発生させ、レーザー動作の効率低下をもたらす。そこで、熱的特性にすぐれたファイバーレーザーは中赤外波長レーザーを実現するにはきわめて理想的な形状であるといえる。さらに高効率な利得形成の手法 (異種イオン間のエネルギー乗、クロス緩和、アップコンバージョン, excited state absorption (ESA), カスケード発振など) を採用することによって、高効率動作の実証が進められている。レーザービームを示す特性のひとつである輝度は単位面積・単位立体角あたりの光放射パワーで評価されるので、レーザー共振器内の横モードが低次で出力パワーが大きいほど高輝度といえることができる。ファイバーレーザーの場合、導波路の細径コア (直径 $10\mu\text{m}$ 前後) で発生するレーザービ

ームの横モードは低次モードに制御される。そのため高出力化=高輝度化といえる。レーザー医療において高出力化が望まれている $2\mu\text{m}$ 帯, $3\mu\text{m}$ 帯で、最近、相次いでワットクラスの実証がなされた^{3,4)}。本稿では、室温・高効率動作実証に成功している高輝度中赤外ファイバーレーザーを中心に研究開発動向を解説する。

1. ホストガラスの特性

光伝送用に開発が進んでいる 4 種類の光ファイバーの特性を表 1⁵⁾ に示した。中赤外波長レーザー用ホストとして適しているのは、透過帯域が中赤外波長をカバーし、フォノンエネルギーの低い (約 500cm^{-1}) フッ化物ガラス (例えば, $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ など) といえる。フォノンエネルギーが低いことによって中赤外波長に対応するエネルギー遷移におけるマルチフォノン緩和レートは遅くなり、レーザーイオンからの中赤外発光が可能となる。したがって、カルコゲナイドガラス (300cm^{-1}) も有力なホスト材料といえるが、現状では他のガラス材料と比較して伝送損失が大きい⁶⁾。

シリカガラスファイバーは $2\mu\text{m}$ 帯に赤外吸収の境界があり背景損失が大きいものの、 $2\mu\text{m}$ 帯でのレーザー発振は可能である。フッ化物ガラスファイバーと比べると、シリカガラスファイバーは機械的強度ならびに製造技術の成熟度が高く、光通信応用で培われた溶融スプライス技術や WDM カップラーなどのファイバーオプティクスを転用できる点で、他のガラスファイバーよりすぐれている。シリカガラスにおいては高出力 LD アレイで励起可能なダブルクラッド型ファイバーで $1.8\sim 2.1\mu\text{m}$ 帯のファイバーレーザーが実現している^{3,7)}。

テルライトガラスは酸化物系ガラスとしてはフォノンエネルギーが 800cm^{-1} と小さく、透過帯域が $0.4\sim 5.0\mu\text{m}$

NEC 光・超高周波デバイス研究所 (〒216-8555 川崎市宮前区宮崎 4-1-1)
E-mail: sumiy@oel.cl.nec.co.jp

表1 各種ガラスファイバーの光学的特性.

Property (Typical value)	Tellurite	Silica	Fluoride	Chalcogenide
Refractive index (n)	1.8-2.3	1.46	1.5	2.83
Nonlinear refractive index, n_2 (m^2/W)	2.5×10^{-19}	10^{-20}	10^{-21}	Higher
Transmission range (μm), UV-IR edges	0.4-5.0	0.2-2.5	0.2-7.0	0.8-16
Highest phonon energy (cm^{-1})	800	1000	500	300
Longest fluorescent wavelength (μm)	2.8	2.2	4.4	7.4
Bonding	Covalent-ionic	Ionic-covalent	Ionic	Covalent
Rare-earth ion solubility	Medium	Low	Medium	Low
Solubility in water	Low	Low	Medium	Low

表2 中赤外ファイバーレーザーの高輝度実証例.

Authors (Year)	Oscillation wavelength (μm)	Active fiber	Gain formation	Pump wavelength (μm)	Slope efficiency (%)	Output power (mW)	Ref.
Percival, <i>et al.</i> (1992)	2.055	Tm, Ho:ZBLAN	*CR & **ET	0.826 Ti:S laser	60	250	10)
Percival, <i>et al.</i> (1992)	1.47 1.82	Tm:ZBLAN	Cascade	0.79 ***Ti:S laser	43 38	130 115	13)
Pollnau, <i>et al.</i> (1995)	2.71 1.72	Er:ZBLAN	****ESA Cascade	0.791 Ti:S laser	22.6 —	158 —	19)
Schneider, <i>et al.</i> (1997)	3.90-4.00 1.2, 1.38, 2.85	Ho:ZBLAN	Cascade Cooling (77 K)	0.885 Ti:S laser	— —	11 —	27)
Jackson, <i>et al.</i> (1998)	1.94-2.01	Tm:Silica	Cladding pump	0.79 Laser diode	31	5400	3)
Sumiyoshi, <i>et al.</i> (1999)	2.87-2.94 2.045-2.070	Ho:ZBLAN	Cascade	1.15 Fiber Raman laser	30 33	1300 1400	4)

*CR=cross relaxation, **ET=energy transfer, ***Ti:S=Ti:sapphire, ****ESA=excited state absorption.

と中赤外波長域での使用が可能である。安定したガラス組成で、高屈折率、非線形定数が大きいなどの特徴を有し、最近では広帯域ファイバーアンプとして応用されるなど⁸⁾、他のガラスとは異なるアクティブファイバーデバイスとして期待されている。

2. 各種ファイバーレーザー

中赤外波長帯で固体レーザーを実現する場合に使用されるレーザーイオンとして Tm^{3+} ($2 \mu\text{m}$, $2.3 \mu\text{m}$), Ho^{3+} ($2.1 \mu\text{m}$, $2.9 \mu\text{m}$, $3.9 \mu\text{m}$), Er^{3+} ($2.7 \mu\text{m}$, $3.5 \mu\text{m}$) などがある。これらの波長におけるファイバーレーザーの設計 (励起波長, イオン濃度, ガラス組成, 増感用イオンとの組み合わせなど) はそれぞれ特徴的であり, それらを個々に解説する。表2に次節以降に解説する高出力化に成功した各波長帯のファイバーレーザーをまとめた。

2.1 $2 \mu\text{m}$ 帯 Tm, Ho コドープファイバーレーザー

波長 $1.4 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 帯はアイセーフ領域と呼ばれ, 人の目の許容露光量がきわめて高いので, 人がいる空間における画像レーザーレーダーに適用することができる⁹⁾。図1に示した標準大気の透過率特性も考慮すると, Tm^{3+} ,

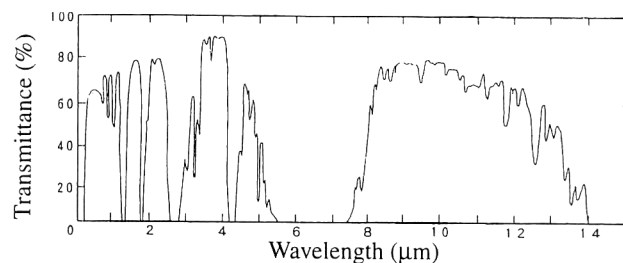


図1 標準大気の透過率特性.

Ho^{3+} コドープファイバーレーザー (発振波長 $2.1 \mu\text{m}$) がアイセーフレーザーレーダー光源として適している。 Tm^{3+} , Ho^{3+} コドープ系における反転分布形成の手法を図2に示した。励起波長 $0.8 \mu\text{m}$ で Tm^{3+} を1個励起すると ($^3\text{F}_4$), 基底状態 ($^3\text{H}_6$) の Tm^{3+} とのクロス緩和 ($^3\text{F}_4$, $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$, $^3\text{H}_4$) により2個の励起 Tm^{3+} を生成する。この Tm^{3+} ($^3\text{H}_4$) は次に Ho^{3+} ($^5\text{I}_7$) に共鳴的にエネルギー移乗し Ho^{3+} の $^5\text{I}_7 - ^5\text{I}_8$ 間で反転分布を形成する。励起光子1個から2個の励起状態を生成することから, 本レーザーは高い発振効率が期待できる。クロス緩和の確率を高くするには Tm^{3+} の $^3\text{F}_4$ 励起寿命を長くする必要があり, その寿命が 1.5 ms のフッ化物ガラスが適している。

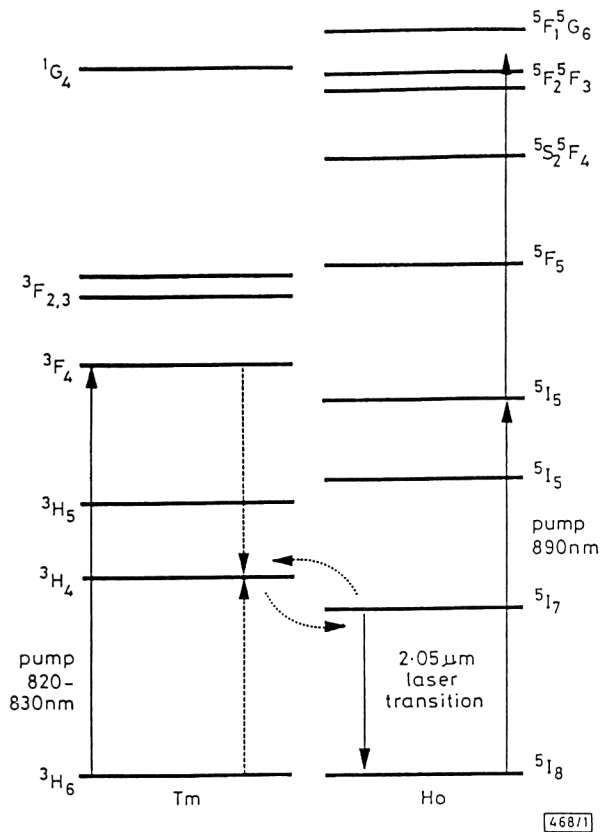


図2 Tm³⁺, Ho³⁺ コドープ系の反転分布形成を示すエネルギー準位図。

Percivalらは、Tm³⁺, Ho³⁺:ZBLANファイバー（コア径6.5μm, ファイバー長1m）をTi:sapphireレーザーで励起することによってスロープ効率52%, 出力250mWを得た¹⁰⁾。クロス緩和とエネルギー移乗によって形成される2μm帯利得はTm³⁺とHo³⁺のドープ濃度比に強く依存する。DoshidaらはZBLANガラスよりも耐水性, 耐熱性, 機械的特性にすぐれたalumino-zirconium-fluorideガラスを用いたファイバーレーザーで利得の濃度比依存性ならびに励起強度依存性を明らかにした¹¹⁾。

また、ホスト材料にシリカガラスを使用し、ダブルクラッド構造の採用による高出力化への検討も行われている⁷⁾。使用したファイバーはコア径6.5μm, 励起クラッド径125μmの同軸型ダブルクラッド型で、ファイバー長はシリカガラスの背景損失47dB/mを考慮して30cmである。ファイバーの側面から励起光をクラッドに導入する方法において、出力20mW, スロープ効率3.3%が得られている。特性改善にはイオン濃度, ファイバー構造の最適化などが必要である。

2.2 2μm帯Tmファイバーレーザー

Tm³⁺を単体でドープしたファイバーレーザーは2μm近傍に2つの発振波長帯（³H₄→³H₆:1.9μm帯, ³F₄→

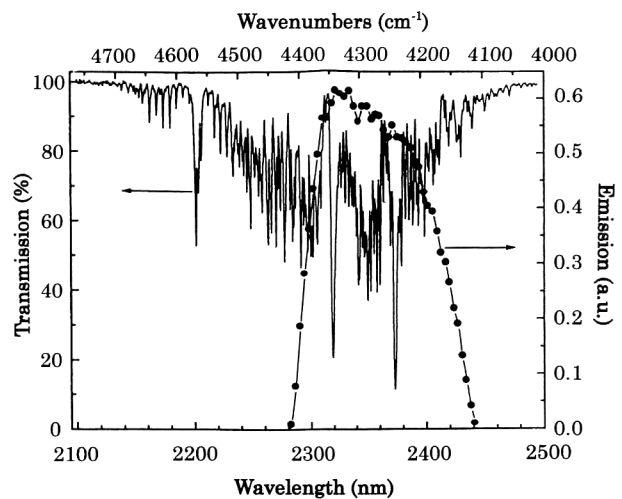


図3 メタンの吸収スペクトルとTm³⁺レーザーの発振スペクトル。

³H₆:2.3μm帯)を有する。これらの波長帯では、水蒸気, 二酸化炭素, 各種炭化水素ガスの吸収スペクトルと一致するためリモートセンシング用光源に適用できる。

PercivalらはTm³⁺:ZBLANファイバーレーザー（Tm濃度1000ppm）において、790nmTi:sapphireレーザーで³F₄を励起し、³F₄→³H₆, ³H₄→³H₆のカスケード発振を実現した¹²⁾。準位³F₄からの遷移では2.3μmと1.47μmが競合するので、このレーザー共振器に使用したリアミラーは1.5μm帯において透過率80%以上, 2.3μm帯において反射率99.5%以上という波長選択性を有している。得られた出力と効率は波長1.925μmでそれぞれ90mW, 37%, 2.35μmでそれぞれ45mW, 20%であった。しかし、高出力領域においてスロープ効率の低下が確認されており、その要因に励起光による³H₅→¹G₄のESAが挙げられている。高出力化に対して不都合なこのESAを抑制するために、³H₅準位を経由しないようなカスケード発振（³H₅→¹G₄:1.47μm, ³H₅→¹G₄:1.82μm）が実証されている¹³⁾。得られた出力と効率は、1.48μmでそれぞれ130mW, 43%, 1.88μmでそれぞれ115mW, 38%, 2波長同時出力のスロープ効率は81%ときわめて大きい。

実際のガスのリモートセンシングにおいてはレーザーの発振スペクトルを狭帯域化する必要がある。McAleaveyらは、メタン（CH₄）検知用に2.3μm帯Tm³⁺:ZBLANファイバーレーザー（チューニング幅130nm, 線幅207MHz）を開発した¹⁴⁾。発振特性としてスロープ効率19%, 出力5.5mW以上を得ている。図3にはメタンの吸収スペクトルと2.3μm帯Tm³⁺レーザーの発振スペクトルを示した。この発振特性によりppbオーダーのメ

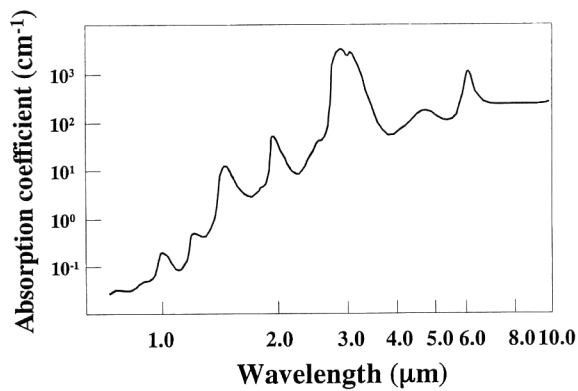


図4 水の吸収スペクトル。

タンガス濃度を検知可能なリモートセンシングシステムが構築できる¹⁴⁾。

次に医療应用到に必要なワット級動作の実証を紹介する。図4に水の吸収スペクトルを示したが、2 μm帯は水の吸収ピークのひとつに一致するため、水を主成分とする生体の軟組織に照射した場合、吸収長が約1 mmでたんぱく質の熱凝固に伴う止血作用を有する。Jacksonらはダブルクラッド型 Tm³⁺:シリカファイバーレーザーをLDで励起し、出力5.4 W、スロープ効率31%の高出力CW動作を実証した³⁾。使用したファイバーはTm³⁺を1.85 wt.%ドープしたコア径17 μm、NA 0.2のマルチモードファイバーで、励起クラッドのサイズは300 μm×110 μm、NAは0.41であった。励起光源には2 W級の790 nm LDを16個使用し、これらのビームを空間的に配列する特殊光学系を用いて励起クラッド上に200 μm×50 μm、NA 0.37で集光照射した。励起されたTm³⁺は³F₄から³H₄へ無放射緩和し、1.88~2.033 μmで発振する。時間波形の観察から緩和振動が確認されており、その時定数は約2.5 μsと約100 μsの組み合わせであることがわかった。この理由のひとつとして、アップコンバージョン (³H₄, ³H₄)→(³H₆, ³F₄)による損失過程が挙げられている。2 μmファイバーレーザーに関する研究開発の推移は文献15)にまとめられているので参照されたい。

2.3 2.7 μm Er ファイバーレーザー

3 μm帯レーザーは2 μm帯よりも水の吸収が大きく、生体軟組織への吸収長が約1 μmと短いことから、高精細な切開などの医療应用到に期待されている。この波長帯における最初のCW動作は波長2.7 μmのEr³⁺:ZBLANPファイバーで成功した¹⁶⁾。Er³⁺の2.7 μm帯⁴I_{11/2}→⁴I_{13/2}は下準位寿命が上準位寿命より長い自己終端遷移であり、高効率なCW動作のためには蓄積する下準位を早く緩和する手法が必要とされる。最初のCW発振においては励起

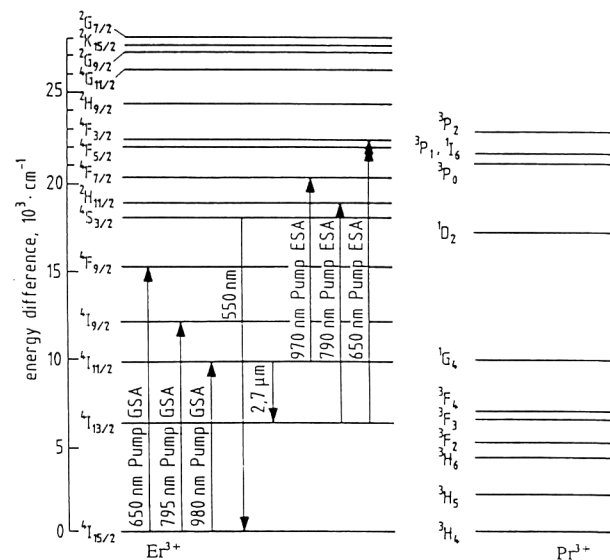


図5 Er³⁺, Pr³⁺:ZBLANのエネルギー準位図。

光源に488 nmのArイオンレーザーが使用され、レーザー下準位⁴I_{13/2}のESAによって2.7 μm帯の連続的な利得を実現した。

一方、Schneiderらは他のイオンにエネルギー移乗することによって高効率な下準位数密度の低下を図った。図5にEr³⁺, Pr³⁺のエネルギー準位を示したが、Er³⁺の⁴I_{13/2}からPr³⁺の³F₃にエネルギー移乗することで、2.7 μm帯の利得(反転分布)を持続させることが可能である。使用したEr³⁺, Pr³⁺:ZBLANファイバーはコア径10 μm、ドープ量Er³⁺:5000 ppm, Pr³⁺:300 ppm、ファイバー長30 cmである。励起波長として650 nm帯、800 nm帯、980 nm帯を試し、800 nm帯でもっともよい結果を得、励起波長796 nmのとき、2.7 μmの最高出力26 mW、スロープ効率13.3%を得た¹⁷⁾。しかし、入射パワー150 mW以上においてスロープ効率の低下(13.3%→6.2%)がみられた。このスロープ効率の低下は、800 nm帯励起のEr³⁺:ZBLANファイバーレーザーにおいても観測された¹⁸⁾。その理由は、励起波長791 nmにおけるレーザー下準位からのESA吸収断面積(⁴I_{13/2}→⁴S_{3/2})が基底準位の吸収断面積よりも約2倍大きく、さらには⁴S_{3/2}→⁴I_{13/2}(850 nm)の誘導放出によって2.7 μm帯の上準位⁴I_{11/2}を乗り越して緩和してしまうことによる¹⁹⁾。そこで、レーザー上準位⁴I_{11/2}に励起エネルギーを誘導するために、⁴S_{3/2}→⁴I_{9/2}(1.7 μm)を同時発振させることによって高出力化に成功した²⁰⁾。使用したファイバーはEr³⁺濃度1000 ppm、長さ4.8 mで、共振器ミラーは850 nmの反射率を10%に抑え、1.72 μmの反射率を99%としている。2.71 μmレーザーの動作特性として、最高出力158 mW、スロ

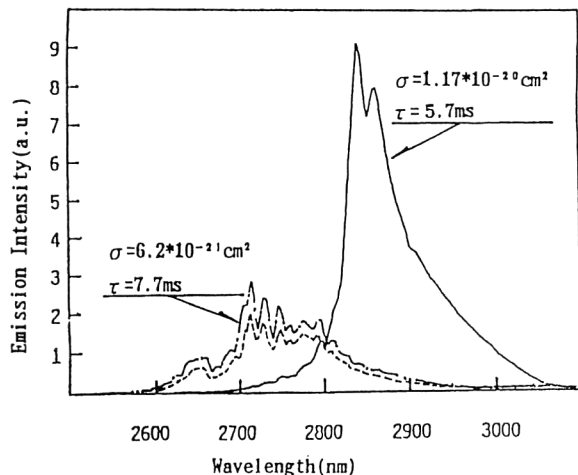


図6 AZF ガラスにドーピングした Er^{3+} と Ho^{3+} の放射スペクトル。

ープ効率 22.6%を得ている。さらに、 $2.7\ \mu\text{m}$ 帯下準位と基底準位でレーザー発振を行う 3 波長カスケード発振によって、スロープ効率は 25.4%に向上することが実証された²¹⁾。

この $2.7\ \mu\text{m}$ Er^{3+} :ZBLAN ファイバーレーザーでワット級の高出力化を図ろうとする場合、ESA とカスケード発振を組み合わせた方式によるスケールアップが困難なことが数値シミュレーションより示されている²²⁾。その理由は以下のとおりである。励起波長 800 nm における高出力・高効率励起光源としてマルチモード LD が最適であるがこの低輝度ビームを入射するために、利得ファイバーにダブルクラッド型ファイバーを使用する必要がある。しかし、コアの直接励起と比較するとクラッド励起では励起光強度が低下するために、ESA 効率が低く $1.72\ \mu\text{m}$ のカスケード発振にいたらず、したがって、 $2.7\ \mu\text{m}$ 発振効率が低下するという。Pollnau らはさらに ESA スペクトルを実験的に明らかにすることにより、励起波長 800 nm 帯よりは 979 nm が適切と判断し Pr^{3+} のコドーピングによる ${}^4\text{I}_{13/2}$ のエネルギー移乗を採用することを提案している。この場合、励起パワー 7 W で $2.7\ \mu\text{m}$ 出力 1 W を得ることができるとの計算結果を得ている²³⁾。

2.4 2.9 μm Ho^{3+} :ZBLAN ファイバーレーザー

$3\ \mu\text{m}$ 帯で発振可能な Ho^{3+} :ZBLAN ファイバーレーザーの発振スペクトルは Er^{3+} :ZBLAN ファイバーレーザーよりも水の吸収ピークとよく一致するため、医用レーザーメスとしてさらにすぐれた波長特性を有するといえる。 Ho^{3+} と Er^{3+} の放射スペクトルを図 6 に示した²⁴⁾。

Ho^{3+} の $3\ \mu\text{m}$ 帯 ${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$ は Er^{3+} と同様に自己終端型遷移なので、CW 発振のためには効率的に下準位を緩和する必要がある。そのため Wetenkamp は Ho^{3+} の励起に 640

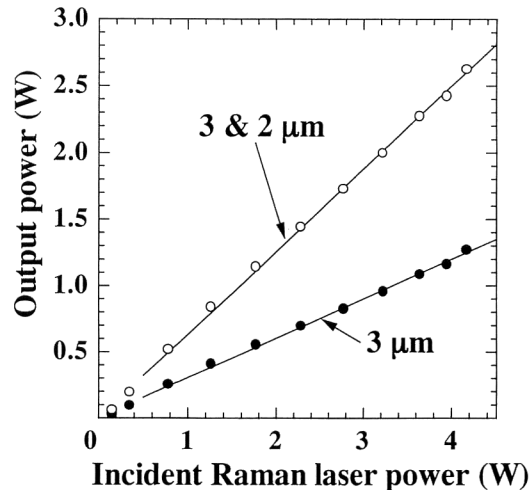


図7 $3\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ Ho^{3+} :ZBLAN カスケードファイバーレーザーの入出力特性。

nm の色素レーザーを使用し、ESA (${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{F}_3$) によりはじめて CW 発振に成功した²⁵⁾。このとき得られた出力は 12.6 mW、吸収パワーに対するスロープ効率は 2.9%であった。

筆者らは、 $1.1\ \mu\text{m}$ 帯ファイバーラマンレーザー励起 (${}^5\text{I}_8 \rightarrow {}^5\text{I}_6$) により Ho^{3+} の $3\ \mu\text{m}$ 帯と $2\ \mu\text{m}$ 帯のカスケード発振を用いた高効率・高出力動作の実証を行った⁴⁾。コア径 $10\ \mu\text{m}$ 、NA 0.26 のマルチモードファイバー (1.3 m) で 2 波長合計出力 2.7 W、スロープ効率 63% の高効率・高出力動作に成功している (図 7)⁴⁾。レーザー共振器は、 3 , $2\ \mu\text{m}$ 帯において HR コーティングを施した入射ミラーとファイバー端面のフレネル反射 (4%) で構成した。筆者らはこの 2 波長レーザービームをウサギの皮膚・肝臓に同時照射し、止血しながら精細な切開が可能であること、すなわち高機能レーザーメスとして利用できることを実証している²⁶⁾。

中赤外波長帯における高輝度ファイバーレーザーの研究開発動向を紹介した。これまでに微量ガスマイモトセンシング用の発振スペクトルの狭帯域化や医療応用を目指したワット級の高出力化が実証されており、それらの応用研究も増加している。また、本稿では詳しく述べなかったが、もっとも大気透過率の高い $3.5\sim 4\ \mu\text{m}$ におけるファイバーレーザーも実現している²⁷⁾。今後の中赤外ファイバーレーザーの高性能化とともにさらなる応用研究の広がりを期待したい。

文 献

- 1) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli and B. C.

- Mccollum: "Double-clad, offset core Nd fiber laser," Opt. Fiber Commun. Conf. Paper PD5 (1988).
- 2) M. H. Muendel: "High-power fiber laser studies at the Polaroid Corporation," Proc. SPIE, **3264** (1998) 21-29.
 - 3) S. D. Jackson and T. A. King: "High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser," Opt. Lett., **23** (1998) 1462-1464.
 - 4) 住吉哲実, 関田仁志, 荒井恒憲, 佐藤俊一, 石原美弥, 菊地眞: "2波長 (3 μm , 2 μm) CW カスケード発振ホルミウムドープファイバーレーザーの高出力化", レーザー学会学術講演会第19回年次大会講演予稿集 (1999) p. 45.
 - 5) J. S. Wang, D. P. Machewirth, F. Wu, E. Snitzer and E. M. Vogel: "Neodymium-doped tellurite single-mode fiber laser," Opt. Lett., **19** (1994) 1448-1449.
 - 6) 野田行雄: "赤外光ファイバーとセンシングへの応用", レーザー研究, **25** (1997) 29-34.
 - 7) Ch. Ghisler, W. Lüthy and H. P. Weber: "Cladding-pumping of a Tm³⁺:Ho³⁺ silica fibre laser," Opt. Commun., **132** (1996) 474-478.
 - 8) A. Mori, Y. Ohishi, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, K. Oikawa and S. Sudo: "1.5 μm broadband amplification by tellurite-based EDFAs," Opt. Fiber Commun. Conf. Paper PD1 (1997).
 - 9) 斎藤英明, 土志田実: "アイセーフ・レーザー", レーザー研究, **25** (1997) 3-8.
 - 10) R. M. Percival, D. Szebesta, S. T. Davey, N. A. Swain and T. A. King: "Thulium sensitized holmium-doped CW fluoride fibre laser of high efficiency," Electron. Lett., **28** (1992) 2231-2232.
 - 11) M. Doshida and M. Obara: "Analysis on the Tm³⁺, Ho³⁺ concentration in alumino-zirco-fluoride glass for efficient 2- μm ," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 3562-3565.
 - 12) R. M. Percival, D. Szebesta and S. T. Davey: "Highly efficient and tunable operation of two colour Tm-doped fluoride fibre laser," Electron. Lett., **28** (1992) 671-673.
 - 13) R. M. Percival, D. Szebesta and S. T. Davey: "Highly efficient CW cascade operation of 1.47 and 1.82 μm transitions in Tm-doped fluoride fibre laser," Electron. Lett., **28** (1992) 1866-1868.
 - 14) F. J. McAleavey, J. O'Gorman, J. F. Donegan, B. D. MacCraith, J. Hegarty and G. Mazé: "Narrow linewidth, tunable Tm³⁺-doped fluoride fiber laser for optical-based hydrocarbon gas sensing," IEEE J. Quantum Electron., **3** (1997) 1103-1111.
 - 15) 土志田実: "2 μm 帯アイセーフ・ファイバーレーザー", レーザー研究, **25** (1997) 35-40.
 - 16) M. C. Brierley and P. W. France: "Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre," Electron. Lett., **24** (1988) 935-937.
 - 17) J. Schneider, D. Hauschild, Ch. Frerichs and L. Wetenkamp: "Highly efficient Er³⁺:Pr³⁺-codoped CW fluorozirconate fiber laser operating at 2.7 μm ," Int. J. Infrared Millimeter Waves, **15** (1994) 1907-1922.
 - 18) S. Bedö, W. Lüthy and H. P. Weber: "Limits of the output power in Er³⁺:ZBLAN singlemode fibre lasers," Electron. Lett., **31** (1995) 199-200.
 - 19) S. Bedö, M. Pollnau, W. Lüthy and H. P. Weber: "Saturation of the 2.71 μm laser output in erbium-doped ZBLAN fibers," Opt. Commun., **116** (1995) 81-86.
 - 20) M. Pollnau, Ch. Ghisler, G. Bunea, M. Bunea, W. Lüthy and H. P. Weber: "150 mW unsaturated output power at 3 μm from a single-mode-fiber erbium cascade laser," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 3564-3566.
 - 21) M. Pollnau, Ch. Ghisler, W. Lüthy, H. P. Weber, J. Schneider and U. B. Unrau: "Three-transition cascade erbium laser at 1.7, 2.7, and 1.6 μm ," Opt. Lett., **22** (1997) 612-614.
 - 22) M. Pollnau: "The route toward a diode-pumped 1-W erbium 3- μm fiber laser," IEEE J. Quantum Electron., **33** (1997) 1982-1990.
 - 23) M. Pollnau, Ch. Ghisler, W. Lüthy and H. P. Weber: "Cross sections of excited-state absorption at 800 nm in erbium-doped ZBLAN fiber," Appl. Phys. B, **67** (1998) 23-28.
 - 24) B. Peng and T. Izumitani: "Ho³⁺ doped 2.84 μm laser glass for laser knives, sensitized by Yb³⁺," Rev. Laser Engin., **22** (1994) 9-15.
 - 25) L. Wetenkamp: "Efficient CW operation of a 2.9 μm Ho³⁺-doped fluorozirconate fibre laser pumped at 640 nm," Electron. Lett., **26** (1990) 883-884.
 - 26) T. Sumiyoshi, H. Sekita, T. Arai, S. Sato, M. Ishihara and M. Kikuchi: "High power continuous wave 3 and 2 μm cascade Ho³⁺:ZBLAN fiber laser and its medical applications," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., to be published.
 - 27) J. Schneider, C. Carbonnier and U. B. Unrau: "Characterization of a Ho³⁺-doped fluoride fiber laser with a 3.9- μm emission wavelength," Appl. Opt., **36** (1997) 8595-8600.

(1999年5月11日受理)