

近赤外波長可変レーザー

佐藤 篤・浅井 和弘

近・中赤外レーザーの代表である Nd:YAG レーザー (発振波長 1.06 μm), CO₂ レーザー (同 10.6 μm) は, 高効率, 高出力性ならびに高スペクトル純度等の長所から広く理工学の分野で用いられているが, 近代科学の進歩は今以上にレーザーに対して小型・高性能化や波長同調などのインテリジェント化などを要求し始めてきた。その上, レーザー光の安全対策が叫ばれるようになり, 近年では Nd:YAG レーザーや CO₂ レーザーに置きかわるような新レーザーの出現が期待されている。

赤外レーザーの中でも水による吸収が大きい 1.4 μm 以上の波長領域で発振する Er, Tm, Ho などの希土類イオン添加の固体レーザーと光パラメトリック発振器 (optical parametric oscillator; 以下, OPO と略す) は, 眼に対する安全性が高いアイセーフ・レーザーであると共に, これら小型・高性能化ならびに波長同調化が可能であるため, 近年特に注目され着実に研究が進められている。

本稿では, アイセーフおよび理工学への応用の観点から, 波長 1.5~3 μm 域で発振する波長同調型レーザーを中心に, OPO の動作特性を含めおもに希土類イオン添加固体レーザーの動作特性と, その理工学への応用例などの研究・開発の現状を紹介してみたい。

1. アイセーフ波長領域での OPO と希土類イオン添加固体レーザー

アイセーフ波長領域で発振する固体レーザーは, 大きく 2 つに分類することができる。1 つは OPO を利用し

た赤外波長可変レーザー, もう 1 つは 3 価の希土類イオン (Er, Tm, Ho など) をレーザー・イオンとして添加した固体レーザーである。以下に OPO および Er, Tm, Ho 添加固体レーザーについて報告例をもとに両者の特長を述べる。

1.1 OPO

OPO は, 強いポンプ波を非線形結晶に入射させ, そこで発生する異なる波長の 2 波 (信号波およびアイドラ波) あるいはそのうちの 1 波を共振器内に閉じ込め発振させる技術で, ポンプ波長を可視から近赤外に選ぶことにより, 後に述べる希土類イオン添加の固体レーザーと同じ波長領域でのレーザー出力が得られる。OPO の特長は, 非線形結晶を回転させることで容易に出力光の波長を変えられることであり, その波長同調範囲は可視領域から 4 μm 付近の赤外領域にまで及ぶものもある¹⁻³⁾。図 1 に OPO の模式図ならびに波長同調化の一例を示す⁴⁾。

従来より使用されてきた OPO は, Nd:YAG レーザーの基本波 (1.064 μm) をポンプ波とし LiNbO₃ や LiIO₃ などの非線形結晶を OPO 結晶に用いていたが, これらの非線形結晶は光学損傷しきい値が低いため高出力化に適しておらず, 最近では KTP や KNbO₃, BBO (BaB₂O₄), LBO (LiB₃O₅) などが多く使用されるようになってきた²⁻⁵⁾。特に KTP, KNbO₃ は, BBO や LBO が波長 2.5 μm 以上の光を透過しないのに対し, 透過波長範囲が可視から中赤外 (4~5 μm) にまで及ぶため, 長波長領域での OPO に有効である。

OPO に関しても通常のレーザーと同様に, 変換効率および動作しきい値の改善, 出力光の狭帯域化 (線幅) などに対する研究がさかんに進められている。Gloster

Near infrared tunable lasers (1996年5月9日受理)
Atsushi SATO, Kazuhiro ASAI 東北工業大学工学部通信工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

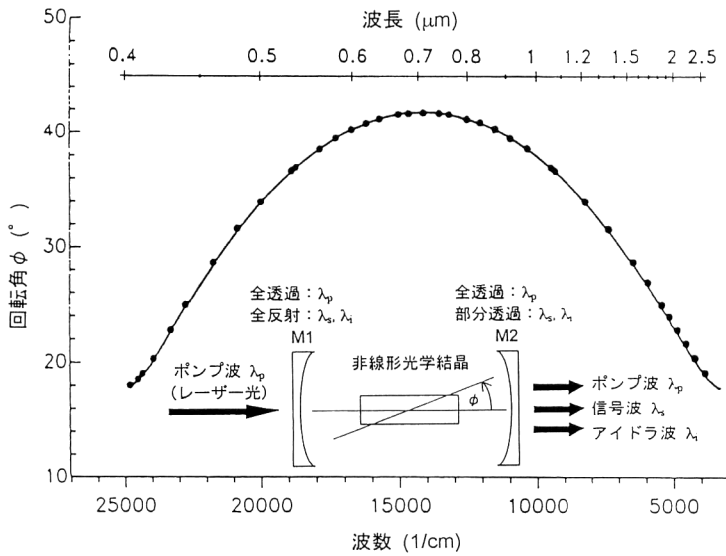


図1 OPOの模式図と波長同調特性.

らは、 β -BBOを用いたOPOにおいて、信号波の発振軸とポンプ波の光軸とが54 mradの角度をなすようにOPO共振器を構成し、波長同調範囲465 nm~1.5 μ m、最大変換効率30.9%を達成した⁵⁾。また、McCahonらは、非線形結晶にKTP、励起光源にモード同期チタンサファイアレーザー(830 nm)を用い、3~4 μ m帯での超短パルス動作(175 fs)について報告している²⁾。出力光の狭帯域化に関しては、Miltonらが半導体レーザーによる注入同期を行い、波長1.535 μ mにおいて、帯域幅0.18 GHz、パルス・エネルギー7.6 mJのOPO出力を得ている¹⁾。ここで紹介した以外にも、OPOについてはさまざまな研究が行われているが、ここでは他の文献に譲りたい。

1.2 希土類イオン(Er, Tm, Ho)添加固体レーザー

図2にErおよびTm, Hoのエネルギー準位のダイアグラムを示す。Erレーザーは、 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 間および ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 間のレーザー遷移を利用し1.5 μ m帯および3 μ m帯でレーザー遷移が起こる。励起光のエネルギーは、波長0.79 μ mおよび0.97 μ mに相当する ${}^4I_{9/2}$ 準位および ${}^4I_{11/2}$ 準位で吸収されるが、フラッシュランプ励起のErレーザーでは、効率よくフラッシュランプ光を吸収し、そのエネルギーを ${}^4I_{9/2}$ 準位へと受け渡すために、さらに感光イオンとしてCrイオンやYbイオンが添加される。1.5 μ m帯で発振するEr添加のレーザー結晶は、Cr, Yb, Er:YSGG⁶⁾, Yb, Er:YAG⁷⁾, Yb, Er:ガラス⁸⁾, Nd, Yb, Er:ガラス⁹⁾などが報告されており、これらに加えEr添加ファイバー・レーザーもまたこの波長領域で動作する^{10,11)}。3 μ m帯のレーザー結晶として

は、Er:YLF¹²⁾, Cr, Er:YSGG¹³⁾, Er:YAIO₃¹⁴⁾などが代表的である。3 μ m帯のErレーザーに関しては、Tempusらが、波長790 nmのチタンサファイアレーザーを励起源とした場合、Cr, Er:YSGGよりもEr:YLFの方が優れたレーザー特性を示すことを確かめた。またさらに、Erイオンの励起波長は790 nmより970 nmのほうが、効果的なエネルギー遷移を行えることを実験およびシミュレーションの結果から指摘した¹³⁾。

上記以外のErレーザーには、例えばカスケード・レーザーがあり、出力の飽和を防ぎ励起エネルギーを有効に利用するために、3 μ mレーザーでありながら同時に1.5 μ m帯も発振させる。このレーザーは、Pollnauらによって報告されている¹⁵⁾。

Tm添加の2 μ mレーザーでは、0.785 μ mで 3H_4 へと励起されたTmイオンがレーザー上準位 3F_4 へと緩和すると同時に、基底準位にある別のTmイオンが 3F_4 へと励起されるクロス緩和過程を経て、効率のよい励起が行われる。Tmのレーザー遷移は、 ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ 間で起こり、2.01 μ m付近で発振する。Hoレーザーの場合には、Tmイオンの 3F_4 準位からさらにHoイオンの 5I_7 準位へとエネルギーが移譲され、 ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ 間において2.09 μ m付近でのレーザー発振が得られる。フラッシュランプ励起にあたっては、前述のErレーザーと同様に感光イオンとしてCrイオンが用いられる^{16,17)}。

Er, Tm, Hoイオンは、いずれもレーザー下準位が数本のシュタルク準位で構成されている¹⁸⁾。そのシュタルク準位群はさらに上の準位群と下の準位群とに分かれており、レーザー遷移はレーザー上準位とレーザー下準

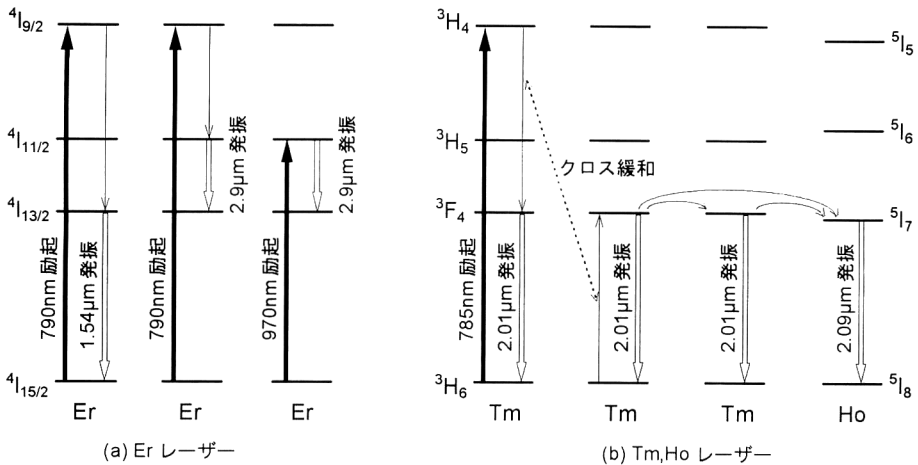


図2 希土類イオン添加固体レーザーのエネルギー遷移過程。(a), (b)はそれぞれ, ErレーザーおよびTm, Hoレーザーのエネルギー遷移過程を示し, 図中の励起波長は, いずれも励起源に半導体レーザーまたはチタンサファイアレーザーを使用した場合の値。

位内の上側のシュタルク準位群との間で行われる。このようにレーザー下準位が基底準位よりわずかに上に位置する準3準位レーザーでは, レーザー動作は温度による影響を受けるが, その依存度は3準位レーザーに比べ小さい。

2 μm レーザー用のレーザー材料は, YAG や YLF が一般的であるが, 最近では Tm:YAG に比べ半導体レーザーからの励起光を広い吸収帯でより効率よく吸収することのできる Tm:YVO₄^{19,20)} や, 新しい材料である Tm:CaYSOAP²¹⁾ などの報告もなされている。さらにレーザー材料以外にも, マイクロ・チップ化^{22,23)}, ファイバー・レーザー化^{24,25)} などの小型・軽量化への試みも高まってきている。

以上, OPO と希土類イオン添加固体レーザーの特長・原理について概説してきた。OPO は, 波長可変領域を広くとることができ, 4 μm 程度の中赤外領域まで出力として取り出すことが可能である。一方, 希土類イオン添加固体レーザーは, OPO に比べ共振器構成が簡単なので, 装置の小型化あるいは効率の面で有用であるといえる。本章ではさらに, Er, Tm, Ho 添加の波長可変レーザーに的を絞る, その動作特性などを紹介する。

2. アイセーフ固体レーザーの動作特性

2.1 Er レーザー

図3は, ファブリー・ペロー・エタロンを用いた Er 添加ファイバー・レーザーの共振器構成および波長同調特性の一例を示す¹⁰⁾。このファイバー・レーザー装置に

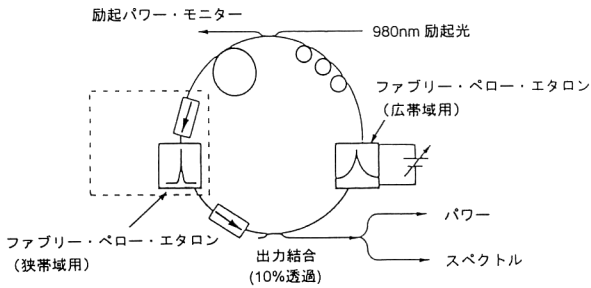
おいて, Park らは広帯域用と狭帯域用との2種類のファブリー・ペロー・エタロンを使用し, 1.53 μm から 1.56 μm にわたって単一周波数の波長同調化を達成した。また別の方法では, Komukai らが2つの回折格子から構成されるファブリー・ペロー・エタロンを出力鏡とし, 1.549~1.553 μm の範囲での波長同調化を行った¹¹⁾。

1.5 μm 帯は, 光ファイバーの使用が可能であることから応用範囲も広く, 特に光通信分野での需要が高い。他方, 3 μm 帯の Er レーザーは, 水に対し非常に強い吸収特性を示すことから, 医療分野への応用が期待されている。

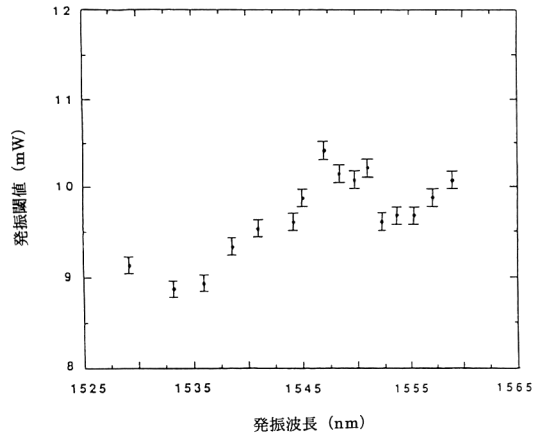
2.2 Tm, Ho レーザー

図4(a)は, 筆者らが行ったフラッシュランプ励起 Cr, Tm:YAG レーザーの波長同調化に対する実験データである²⁶⁾。波長同調は複屈折フィルターによって行い, その結果, 出力鏡の反射率 R を 95% から 98% にまで高めたとき, 波長同調範囲が長波長側に拡大されることが確認された。さらに筆者らは, 半導体レーザー励起 Tm:YAG レーザーを試作し, ファブリー・ペロー・エタロンを用いた波長同調化により, 図4(b)に示される発振特性を得た²⁷⁾。波長同調範囲は 2.01~2.014 μm であり, 図4(a)の結果と同様に高反射率の出力鏡を使用したときに, より広範囲にわたる波長同調が可能であることがわかった。また Henderson らは, 2.01~2.024 μm の広範囲同調に成功している²⁸⁾。

近年は, この 2 μm 領域においてもファイバー・レーザーの研究が進められており, Ghisler らは, Tm, Ho:

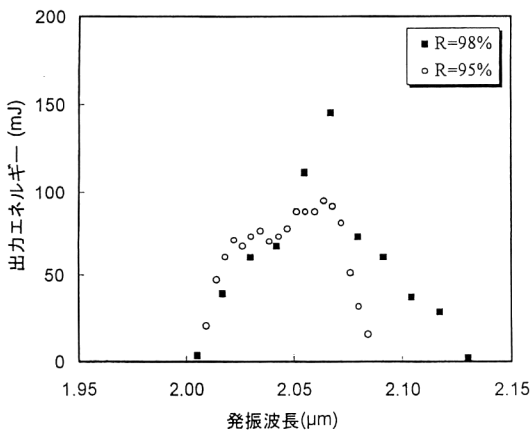


(a)

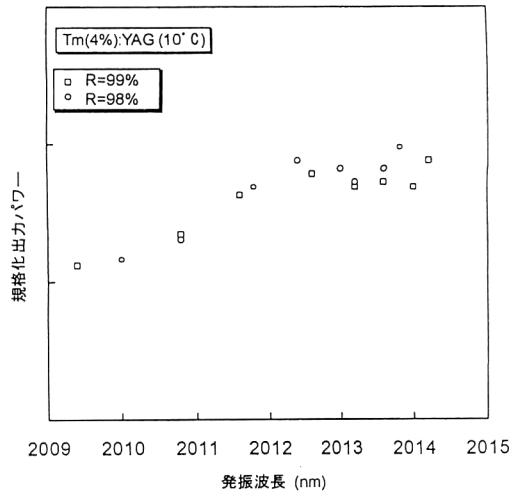


(b)

図3 Er添加ファイバー・レーザーの例。(a)はファイバー・レーザー装置の構成、(b)は波長同調時における発振しきい値の変化を表す。



(a) フラッシュランプ励起 Cr,Tm:YAG レーザー



(b) 半導体レーザー励起 Tm:YAG レーザー

図4 (Cr,)Tm:YAG レーザーの波長同調曲線。(a)はフラッシュランプ励起のパルス動作、(b)は半導体レーザー励起のCW動作によるもの。

SiO₂ グラスファイバーについて、温度制御による方法とファイバー長を変化させる方法で、1.96~2.032 μm の範囲での波長同調を行った²⁵⁾。

3. 応用例

アイセーフ・レーザーは、この波長領域の光がもつ特長から、主に次に挙げる2つの分野で応用されている。

3.1 環境計測への応用

レーダーの送信光源にレーザー光を利用したレーザ

ー・レーダー（以下、ライダーと略す）は、有効な大気観測の手段である反面、レーザー光が大気中を伝搬するため、その運用にあたっては十分な事故防止対策が必要となる。それゆえ、環境計測分野においてアイセーフ・レーザーの必要性は高く、特に大気透過特性にも優れている 2 μm 帯のレーザーは魅力的である²⁹⁾。

一例として、図5に 2 μm ドップラー・ライダーを用いたスペース・シャトル着陸時における風測定の結果を示す³⁰⁾。図中の実線はドップラー・ライダーの測定デー

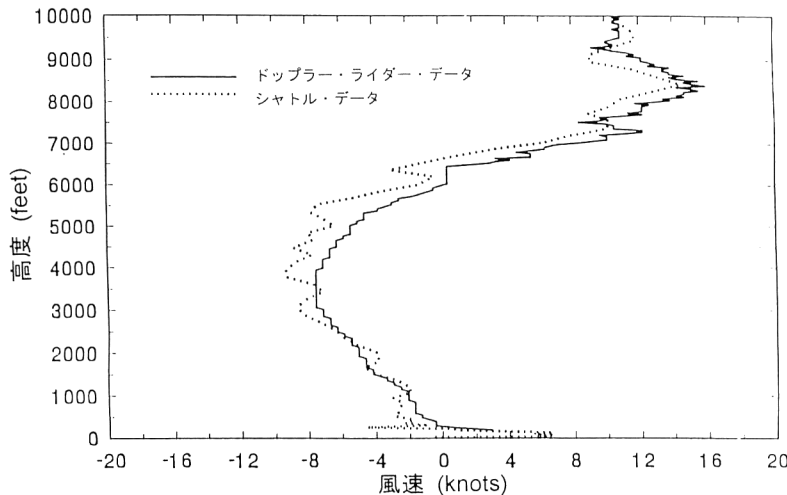


図5 2 μm ドップラー・ライダーを用いた風観測データ。

タ、点線はスペース・シャトル搭載機器により観測した大気データである。両者のデータは非常によく一致しており、この結果から2 μm ライダーの有効性がうかがえる。このように2 μm レーザーを利用したライダー・システムは、安全性の面からだけではなく測定精度の面からも利用価値は高く、筆者らも全固体化2 μm コヒーレント・ライダーの実用化に向け研究を進めている^{31,32}。

3.2 医療分野への応用

アイセーフ波長領域のレーザー光は、前述したように水に対して強い吸収特性を示す。医療分野ではその特徴をいかし生体治療にアイセーフ・レーザーが利用される^{33,34}。特に、2.5 μm 以下の波長領域は光ファイバーの使用が可能であるため、レーザー光の導波も簡便である。

波長2 μm 付近における水の吸収スペクトルのピークは1.94 μm に存在するが、Tm添加の固体レーザーは波長同調によってこの波長領域でのレーザー動作が可能であるため、細胞組織への影響を最大限に期待できる。波長2.1 μm 付近で発振するHoレーザーと比較しても、水での吸収係数が約1.5~2.5倍大きいTmレーザーは、外科手術、眼科治療などをはじめとする医療分野での有効性が立証されている³⁴。

以上紹介したように、アイセーフ・レーザーはその発振波長のもつ特長から利用価値が高く、これからのレーザー応用技術において特に注目される存在となるであろう。しかしながら、レーザー装置に対する精力的な研究開発が進められる一方で、この波長領域における光学素子やコーティング技術の開発が立ち遅れており、今後こ

れらの問題を含めた波長可変アイセーフ・レーザーの研究と開発が必要とされる。

文 献

- 1) M. J. T. Milton, T. D. Gardiner, G. Chourdakis and P. T. Woods: "Injection seeding of an infrared optical parametric oscillator with a tunable diode laser," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 281-283.
- 2) S. W. McCahon, S. A. Anson, D.-J. Jang and T. F. Boggs: "Generation of 3-4 μm femtosecond pulses from a synchronously pumped, critically phase-matched KTiOPO_4 optical parametric oscillator," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2309-2311.
- 3) G. Robertson, A. Henderson and M. H. Dunn: "Broadly tunable LiB_3O_5 optical parametric oscillator," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 271-273.
- 4) H.-J. Krause and W. Daum: "Efficient parametric generation of high-power coherent picosecond pulses in lithium borate tunable from 0.405 to 2.4 μm ," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 2180-2182.
- 5) L. A. W. Gloster, Z. X. Jiang and T. A. Kin: "Characterization of an Nd:YAG-pumped $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ optical parametric oscillator in collinear and noncollinear phase-matched configurations," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 2961-2969.
- 6) K. Spariosu, M. Birnbaum and M. Kokta: "Room-temperature 1.643- μm $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (Er:YSGG) laser," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 8272-8275.
- 7) D. P. Shepherd, D. C. Hanna, A. C. Large, A. C. Tropper, T. J. Warburton, C. Borel, B. Ferrand, D. Pelenc, A. Rameix, P. Thony, F. Auzel and D. Meichenin: "A low threshold, room temperature 1.64 μm Yb:Er:Y₃Al₅O₁₂ waveguide laser," *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 7651-7653.
- 8) J. A. Hutchinson and T. H. Allik: "Diode array-pumped Er, Yb:Phosphate glass laser," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 1424-1426.
- 9) M. Lukac: "Transient population dynamics in flashlamp pumped sensitized erbium glass lasers," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 2489-2494.
- 10) N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala and C. Miller: "All

- fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 2369-2371.
- 11) T. Komukai and M. Nakazawa: "Tunable single frequency erbium doped fiber ring lasers using fiber grating etalons," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L679-L680.
 - 12) R. C. Stoneman, J. G. Lynn and L. Esterowitz: "Direct upper-state pumping of the 2.8 μm Er^{3+} :YLF laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 1041-1045.
 - 13) M. Tempus, W. Luthy, H. P. Weber, V. G. Ostroumov and I. A. Shcherbakov: "2.79 μm YSGG:Cr:Er laser pumped at 790 nm," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 2608-2611.
 - 14) J. Frauchiger, W. Luthy, P. Albers and H. P. Weber: "Laser properties of selectively excited YAlO_3 :Er," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 964-966.
 - 15) M. Pollnau, Ch. Ghisler, G. Bunea, M. Bunea, W. Luthy 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.
 - 16) G. J. Quarles, A. Rosenbaum, C. L. Marquardt and L. Esterowitz: "Efficient room-temperature operation of a flash-lamp-pumped, Cr, Tm:YAG laser at 2.01 μm ," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 42-44.
 - 17) K. H. Kim, Y. S. Choi, N. P. Barnes, R. V. Hess, C. H. Bair and P. Brockman: "Investigation of 2.1- μm lasing properties of Ho:Tm:Cr:YAG crystals under flash-lamp pumping at various operating conditions," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 2066-2074.
 - 18) S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway and W. F. Krupke: "Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er^{3+} , Tm^{3+} , and Ho^{3+} ," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2619-2630.
 - 19) H. Saito, S. Chaddha, R. S. F. Chang and N. Djeu: "Efficient 1.94- μm Tm^{3+} laser in YVO_4 host," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 189-191.
 - 20) C. Hauglie-Hanssen and N. Djeu: "Further investigations of a 2- μm Tm: YVO_4 laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 275-279.
 - 21) G. H. Rosenblatt, G. J. Quarles, L. Esterowitz, M. Randles, J. Creamer and R. Belt: "Continuous-wave 1.94- μm Tm:CaY₄(SiO₄)₃O laser," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1523-1525.
 - 22) M. E. Storm and W. W. Rohrbach: "Single-longitudinal-mode lasing of Ho:Tm:YAG at 2.091 μm ," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4965-4966.
 - 23) H. Nakajima, T. Yokozawa, T. Yamamoto, H. Hara and N. Djeu: "Power optimization of 2 μm Tm, Ho:YAG laser in monolithic crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L1010-L1011.
 - 24) L. E. Nelson, E. P. Ippen and H. A. Haus: "Broadly tunable sub-500 fs pulses from an additive-pulse mode-locked thulium-doped fiber ring laser," *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 19-21.
 - 25) C. Ghisler, W. L  thy and H. P. Weber, *Fellow*: "Tuning of a Tm^{3+} : Ho^{3+} :silica fiber laser at 2 μm ," *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (1995) 1877-1879.
 - 26) 佐藤 篤, 浅井和弘, 松坂文夫, 剣持備一, 原 熙, 板部敏和: "複屈折フィルターを用いた Cr, Tm:YAG レーザの波長同調化", 第 42 回応用物理学関係連合講演会, 29 p-PA-26.
 - 27) 小川卯人, 大山真敏, 菅野 学, 浅井和弘, 板部敏和: "半導体レーザー励起 Tm:YAG レーザの単一周波数動作特性", 第 42 回応用物理学関係連合講演会, 28 p-PA-4.
 - 28) P. J. M. Suni and S. W. Henderson: "1-mJ/pulse Tm: YAG laser pumped by a 3-W diode laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 817-819.
 - 29) 浅井和弘: "アイ・セーフ固体レーザー", *応用物理*, **53** (1994) 478-482.
 - 30) S. W. Henderson, P. J. M. Suni, C. P. Hale, S. M. Hannon, J. R. Magee, D. L. Bruns, E. H. Yuen: "Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **31** (1993) 4.
 - 31) K. Asai, M. Oyama, S. Ogawa and A. Sato: "2 μm coherent lidar at CRL/TIT," *Coherent Laser Radar*, OSA Tech. Digest Ser., 19 (1995) pp. 262-265.
 - 32) K. Asai and T. Itabe: "Tm, Ho:YAG laser with tunable range of 2.08-2.12 μm and its applications to spectroscopy," 16th Int. Laser Radar Conf. Tech. Digest (1992) L 22.
 - 33) Y. Domankevitz, M. S. Lee and N. S. Nisioka: "Effects of irradiance and spot size on pulsed holmium laser ablation of tissue," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 569-573.
 - 34) M. M. Pankratov, D. F. Perrault, Jr., S. M. Shapshay, J. F. Pinto, D. Esterowitz and H. T. Aretz: "Comparative laser-tissue interaction effects at 1.96 and 2.01 μm of Cr; Tm:YAG laser," *Proc. SPIE*, **1646** (1992) 30-41.