

1212nm励起全ファイバーTm-Hoファイバーレーザーの研究

植田研究室 桑山哲朗

1.はじめに

2 μm 域のレーザーは大気の透過率特性がよく(2.0 μm ~2.5 μm)、太陽や雲からの輻射の影響が少ないことから空間通信や、リモートセンシング等の応用が考えられている。また、水の強い吸収(2.0 μm 、水蒸気の場合は1.9 μm)があることから、網膜まで達しにくいために障害が起りにくく、アイセーフレーザーとして知られている[1]。そして2 μm 域のレーザーは生体組織を切開することができると同時に、タンパク質を凝固させ止血することができる。こういったことより、医療用のレーザーとしての応用も考えられている。2 μm 域のレーザーとしてはTm³⁺、Ho³⁺などを用いたものが研究されている。その中で我々はTm-Ho添加石英ファイバーレーザーについて研究している。これまで、WDMカップラーを介した共振器構成のものを報告したとき、WDMカップラーの損失や帯域特性の影響で発振波長が制約されていた[2,3]。しかし新たにFBG(Fiber Bragg Grating)を用いることで発振波長を制御し、高効率な発振を得ることができたので報告する。また、出力の特性等についても紹介する。

2.実験

2.1 励起波長

これまでのTm-Ho添加ファイバーレーザーの研究は、励起波長としてはNd:YAGレーザーの1064nm[4]、Ti:Sapphireレーザーの812nm[6]、LDや色素レーザーの800nm付近が用いられている[7]。しかし、800nm帯での励起は1064nm励起に比べて量子効率が低い欠点があり、また1064nmでの励起では強い励起状態吸収により励起効率が低くなる(Fig.1)。Tm-Hoの励起、発振の機構としてはTm³⁺を³H₆の準位から³H₄準位へ励起してHo³⁺の⁵I₇準位へエネルギー移行をしてHo³⁺の⁵I₇-⁵I₈間でレーザー発振をさせる。しかし1064nmで励起をした場合、³H₄準位へ励起されたTm³⁺が1064nmの励起光によって³F₄準位へ励起され、さらに³F₄準位から¹G₄へ励起されるという励起状態吸収の過程がある。このような過程が起こると、Tm³⁺からHo³⁺へのエネルギー移行効率が低下し高効率発振が

得られなくなる。そのため、我々はこれまで用いられてきた励起波長ではなく1212nmでの励起を行うことにした。1212nmでは励起状態吸収が大幅に減少する上[5]、³H₆→³H₅遷移の吸収ピークのために短いファイバー長で高効率な励起が可能である(Fig.2)。しかし、1212nm光は適当な希土類イオンや半導体がないため、我々はラマンファイバーレーザーで波長変換を行い全ファイバー構成のTm-Hoファイバーレーザーを構築した。

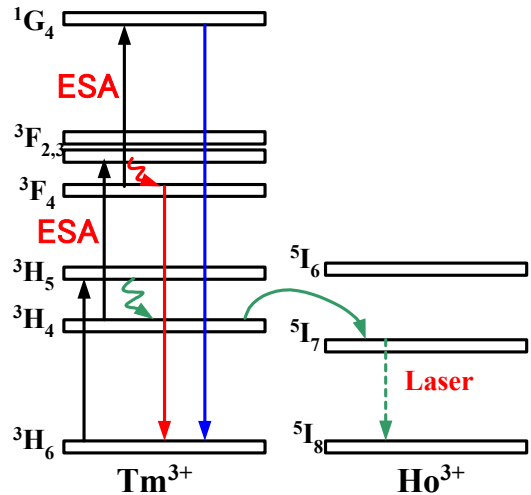


Fig.1 励起状態吸収(ESA)

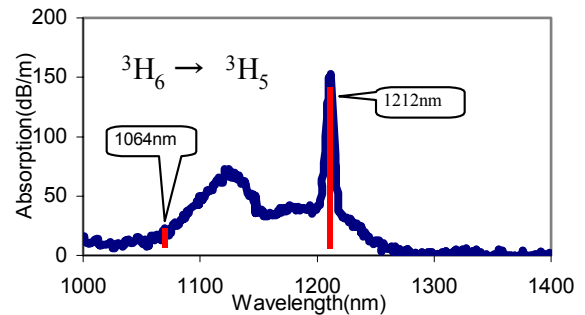


Fig.2 Tm-Ho 添加石英ファイバーの吸収スペクトル

2.2 Tm-Ho 励起用ラマンファイバーレーザー

Tm-Hoファイバーを励起するためのラマンファイバーレーザーの構成はFig.3のようになっている。

最大約8WのCW、Yb添加ダブルクラッドファイバーレーザーで1kmのシングルモードファイバー(Corning. Inc., HI-1060)を励起しラ

マン散乱を発生させる。溶融石英のラマン利得は 440cm^{-1} にピークを持つため、 1064nm で励起したときに、ストークス光のピークは 1120nm に現れる。この 1120nm 光に対して高反射率のFBGで閉じ込めることにより誘導ラマン散乱を起し、 1064nm から 1120nm へと波長変換をする。さらに 1120nm 光から 1180nm 光を発生させ、この波長に関しても同様に高反射率のFBGを用いて誘導ラマン散乱を起す。そしてさらに 1180nm 光から 1212nm 光を発生させる。この発生させた 1212nm 光に関して高反射率と15%の反射率のFBGによって共振器をくみ3次ストークスラマンファイバーレーザーを発振させた。この3次ストークス光(1212nm)は 8W 励起時に、最大 3.5W の出力を得ることができた。 1064nm の残余励起光は励起状態吸収を起し励起の効率を低くしてしまうので、WDMカップラーを用い 1064nm の光を取り除いた。こうして得られた3次ストークスラマンファイバーレーザーをTm-Hoファイバーの励起光源とした。

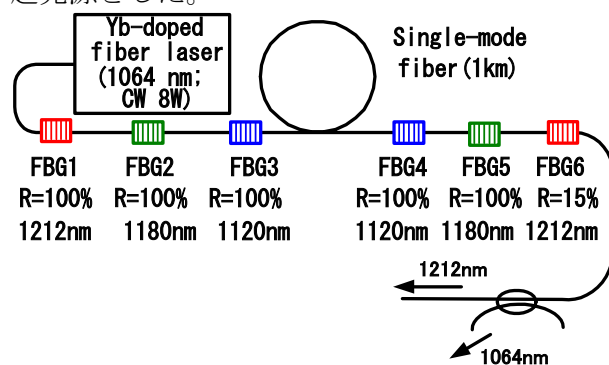


Fig.3 ラマンファイバーレーザー

2.3 Tm-Ho ファイバーレーザー

Tm³⁺やHo³⁺を添加するファイバーのホスト材料としては、主にフッ化物ガラス系のファイバーと、石英ガラス系のファイバーがある。フッ化物ガラスではフォノンエネルギーが $500\sim 600\text{cm}^{-1}$ となっており、石英ガラスのフォノンエネルギー $1000\sim 1150\text{cm}^{-1}$ に比べ小さいために反転分布が作りやすいという特徴がある。しかし、水と反応するなど化学的安定性が低い。また、フッ化物ガラス系のファイバーは石英ガラス系のファイバーとの融着が非常に困難である。これに対して石英ガラス系のファイバーはフォノンエネルギーがフッ化物ガラス系のファイバーに比べやや大きいものの、化学的に安定であり、他の石英ガラス

系のファイバーと融着が比較的容易に低損失で行える。この融着技術を用いることによってFBGやWDMカップラーなど石英ガラスファイバーで作られた機能的な素子を低損失で挿入が可能になる。よって我々はTm-Ho添加石英ガラスファイバー(Tm³⁺:9000ppm-wt, Ho³⁺:1500ppm-wt)を用いた。

Tm-Hoファイバーレーザーの共振器構成をFig.4に示す。前項で紹介したラマンファイバーレーザーを 2030nm で高反射率のFBGに融着しさらにTm-Hoファイバーを融着し、 2030nm のFBGとTm-Hoファイバーの端面のフレネル反射により共振器を構成した。このときTm-Hoファイバーの長さは 40cm から 2m の範囲で変化させた。また、レーザー下準位が基底準位に近い温度の影響による出力の変動があった。この変動を抑えるため氷水中にTm-Hoファイバーを配置することで安定化した。

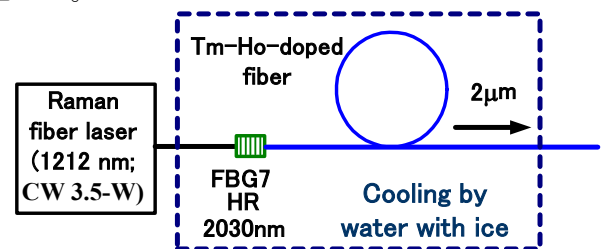


Fig.4 Tm-Hoファイバーレーザー

2.4 Tm-Hoファイバーレーザーの発振実験

前項で紹介したような共振器構成にて発振実験を行った。Tm-Hoファイバー 1m のときに 2030nm の出力が最大 1.07W となり、スロープ効率 34% を得た(Fig.5)。

またTm-Hoファイバーの長さを 40cm から 2m で変化させたときの閾値と出力の変化をFig.6、Fig.7にそれぞれ示す。これらのグラフにおいてはTm-Hoファイバーを氷水中に配置したとき($1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$)、配置していないとき(25°C)の結果をそれぞれ丸印、三角印で示してある。グラフよりTm-Hoのファイバー長を短くすることによって閾値が下がっていることがわかる。Tm³⁺, Ho³⁺の添加量と吸収スペクトルより、Tm-Hoファイバー中における励起光のプロファイルを計算すると励起側 1m でほとんどの励起光が吸収されていることがわかる。つまり、 0.6m よりも長いところでは励起光がなくなり $2\mu\text{m}$ の波長で吸収体となっており、ファイバー長を長くしたときに閾値が上がる原因であると考えられる。また、

ファイバー長が短くなるにつれて出力がゆるやかに増加しているのは閾値が下がっているためである。ファイバー長60cm以上でのスロープ効率はほとんど変化していない。

また、Tm-Hoファイバーが60cmよりも短いところで、出力が極端に落ちているのは利得の大きいTm³⁺における1800nmでの発振がWDMカップラーとの端面とTm-Hoファイバーの端面間で起こり始めてしまっているためである。

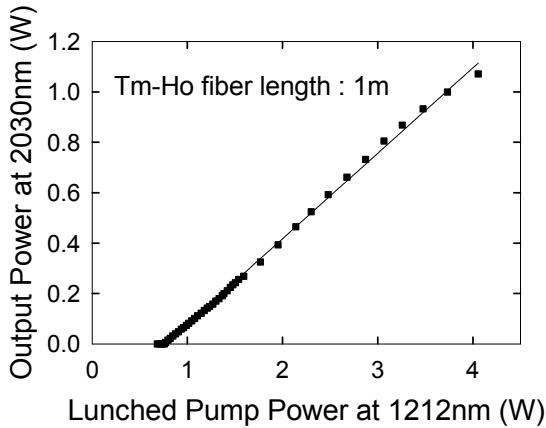


Fig.5 Tm-Hoファイバーレーザーの出力特性

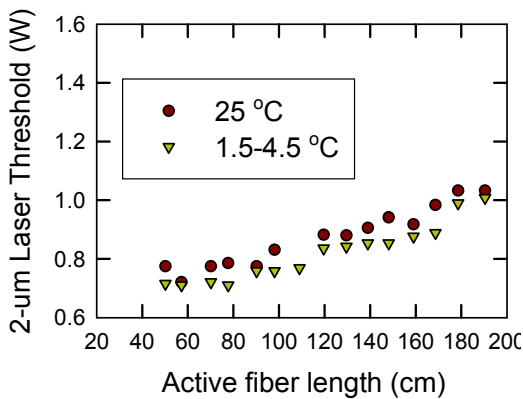


Fig.6 発振閾値のファイバー長依存性

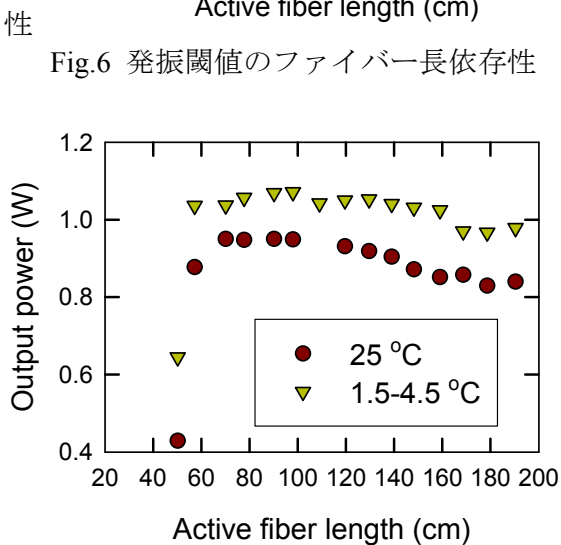


Fig.7 レーザー出力のファイバー長依存性

2.5 双安定性

Tm-Hoファイバーのファイバー長が1mよりも長い場合、励起光強度を高くしていくと閾値付近で急激な立ち上がりが観測された (Fig.8)。逆に励起光強度を下げていく際には閾値が立ち上がりのそれよりも低下した。また、この立ち上がりでの急激な変化はファイバー長を短くするにつれて小さくなり、ファイバーが1m以下では観測できなくなった (Fig.9)。双安定性の原因はレーザー発振が始まるまでTm-Hoファイバーの励起側0.6mよりも先では励起光が届いていないため2μm光を吸収する吸収体になっているが、レーザー発振が始まると吸収体発振したレーザー光によって吸収飽和するために閾値が下がるためではないかと考えられる [9]。

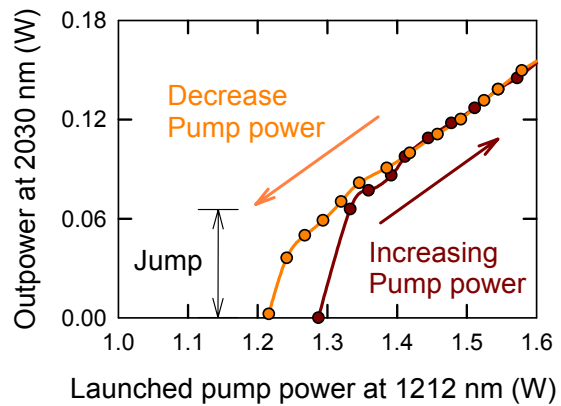


Fig.8 1m以上のファイバー長の場合に見られる閾値近傍における双安定性

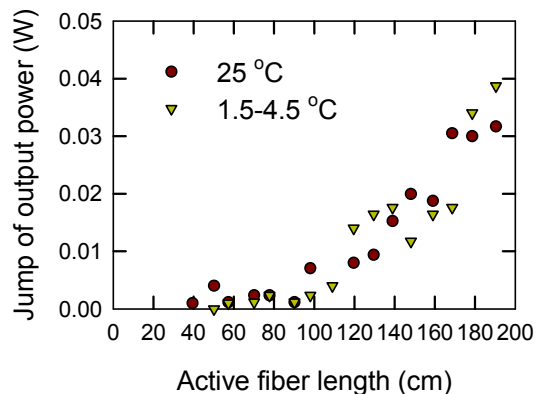


Fig.9 閾値のjump(Fig.8)の長さ依存性

2.6 出力の時間特性

Tm-Hoファイバーレーザーにおける出力の

時間特性を観測したところ、繰り返しとピークパワーの不安定なパルス列見られた (Fig.10)。これは緩和発振によるものと考えられる。パルスの平均的な周期は励起光強度を高くするにつれて短くなる。励起光強度を I 、閾値における励起光強度を I_{th} としたときの比 $r(=I/I_{th})$ と緩和発振の角周波数 ω の関係についてFig.11に示す。Fig.11において丸印は測定データで、実線は次式でフィッティングしたものである[9]。

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{t_c \tau} (r-1) - \left(\frac{r}{2\tau}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{1}{t_c \tau} (r-1)}$$

上式において t_c は共振器内の光子寿命、 τ は上準位寿命である。また、上準位寿命は共振器内の光子寿命よりも十分に長いので $(r-1)/t_c \tau \gg (r/2\tau)^2$ とした。の緩和発振が起こる機構としては、準三準位系による再吸収過程が大きく寄与しているものと考えられる。すなわち、次のようなものを考えている。レーザー発振が起こるとファイバー後端のレーザー上準位分布が減少して、吸収が起こるようになり、発振が止まる。しかし、発振が止まると反転分布が回復し、再びレーザー発振が起こる。この繰り返しにより緩和発振が起こっているのではないだろうか。定量的な検討のために Tm^{3+} と Ho^{3+} の各準位についてのレート方程式を立て、時間応答特性についてシミュレーションを行う必要がある。これらのような繰り返しの不安定な緩和発振を回避するには励起光に変調をかけ、レーザー光をパルス出力にする方法と共振器内のレーザー強度を高くしファイバー全体を強く吸収飽和した状態にする方法の2つが考えられる。

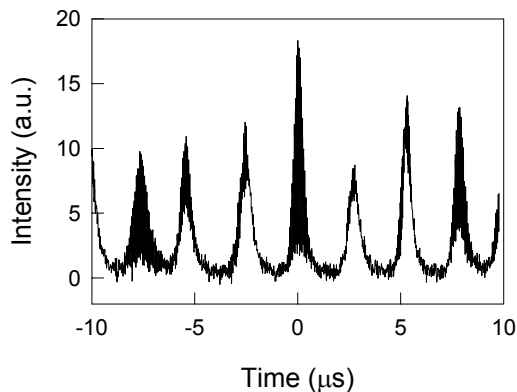


Fig.10 レーザー出力の時間特性

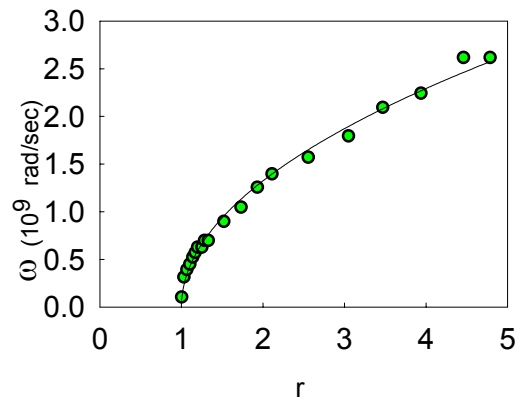


Fig.11 緩和発振の繰り返し角周波数 ω と r の関係

2.7 励起光のパルス化

前項の考えに基づきまずは励起光に緩和周波数に近い変調をかけた。励起光として、波長1180nmのパルスを用意した。用いたパルスは繰り返し83kHz、パルス幅16 μ sである。このパルスの時間波形をFig.12に示す。このとき、2 μ mのレーザー光は繰り返し83kHzで安定なパルスとなった。このときパルス幅は2.2 μ sであった。レーザーの出力パルスは励起パルスと同期し、かつ、励起パルスより短いパルス幅となった。このときのレーザー光の出力波形をFig.13に示す。

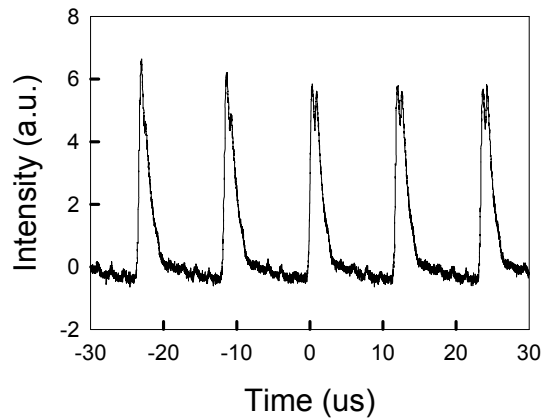


Fig.12 励起光パルス

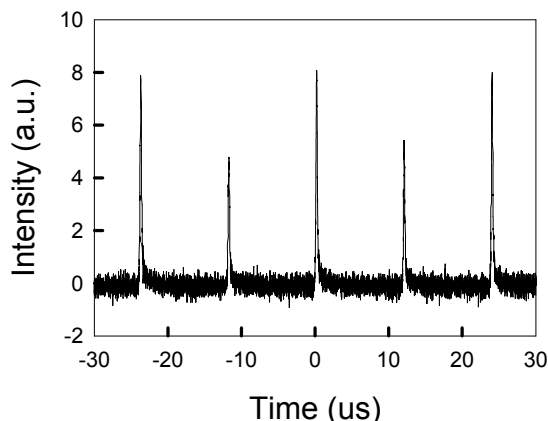


Fig.13 出力パルス

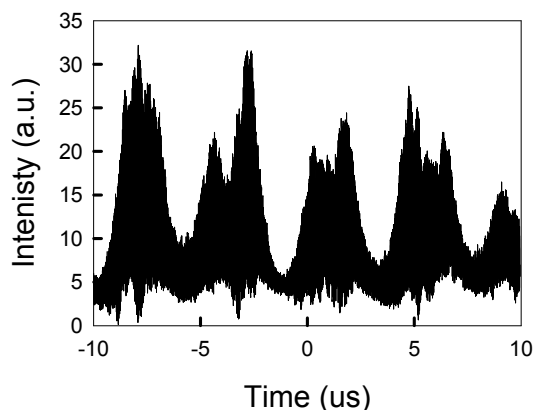


Fig.15 60%の端面鏡を用いたときの出力

2.8 ファイバー端面鏡を用いた発振実験

次に、2.6節で考察したように共振器内のレーザー強度を上げたならば、Tm-Hoファイバー全体にわたって吸収飽和が起りCWで発振することが予測される。そこで、我々はファイバー端面に誘電体多層膜を蒸着してファイバー端面鏡を作り、それをTm-Hoファイバーの出力端面に融着した。これにより高反射率FBGとファイバー端面鏡を共振器とした

Tm-Hoレーザーを構築した(Fig.14)。ファイバー端面鏡は反射率60%のもの、80%のものを用意した。発振実験を行ったところ、反射率60%端面鏡を用いたときには緩和発振によるパルス出力も観測されるものの、若干のCW成分も観測された(Fig.15)。次に80%の端面鏡を用いたところ、完全なCW発振が得られた

(Fig.16)。Fig.15、Fig.16においては、波形に非常に高速の変調が乗っておりオシロスコープのトレースが太くなっている。Tm-Hoファイバーは1mのものを用いているが、端面鏡とFBGを融着しているため共振器長が非常に長く(2.4m)になっており、共振器の縦モードは非常に密になっている。そのためレーザーはマルチ縦モード発振をしておりそのビート(43MHz)による変調がトレースに乗っている。

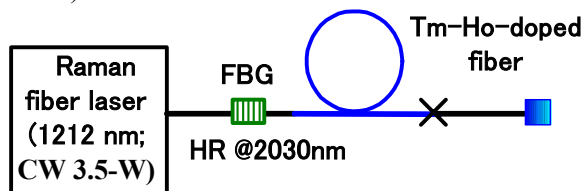


Fig.14 ファイバー端面鏡を用いた共振器構成

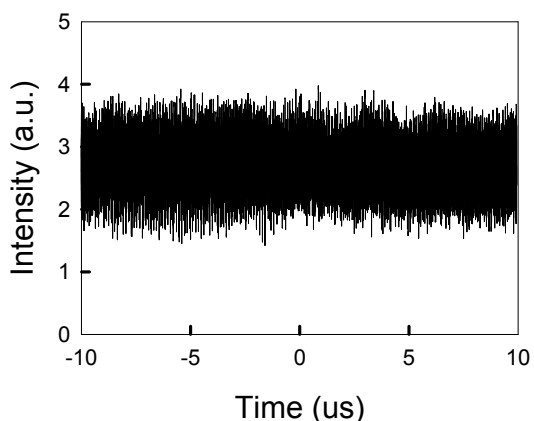


Fig.16 80%の端面鏡を用いたときの出力

2.8 スペクトラルバンド幅の測定

ライダーなどの用途においては、レーザーでスペクトラルバンド幅がどの程度であるかを調べることはとても重要である。そのため、エタロンを用いたスペクトラルバンド幅測定を行いたい。しかし、現状では分解能1.2nm程度の分光器で見ているおり、その分解能以下であることのみしかわかっていない。エタロンを用いてバンド幅測定をするに当たっては、適切なFSR(Free Spectral Range)や、Finesseの選択が必要である。これらをどのように設定するかによって必要とされるミラーの反射率や、共振器長などの条件が変わってくる。そのためにも、今回測定したいスペクトラルバンド幅の目安をつける必要がある。そこでわれわれはバンド幅測定を試みた。測定方法としては、まずマイケルソン干渉計を用い、片方のアーム長を変化させ干渉の鮮明度の減衰よりコヒーレント長を求め、そして求めたコヒーレント長よりスペクトラルバンド幅を求め

ることとした。測定系の実験図をFig.17に示す。今回測定対象としたファイバーレーザーは前節で構築したファイバブラッググレーティングと反射率80%のファイバー端面ミラーを用いたCW発振をしているものを用いた。実験結果をFig.18に示す。縦軸は鮮明度で横軸が、光路差である。これより鮮明度が1/eになるのは0.6mである。バンド幅 Δf は光速をc、コヒーレント長をlとすると、おおよそ以下の式で表される。

$$\Delta f \approx \frac{c}{l}$$

これよりバンド幅は500MHz程度であることが推測される。

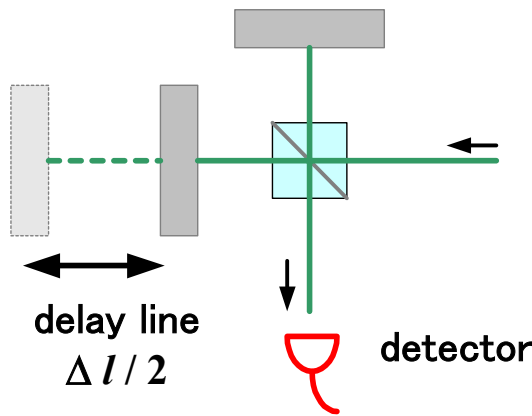


Fig.17 Measurement of Coherent Length

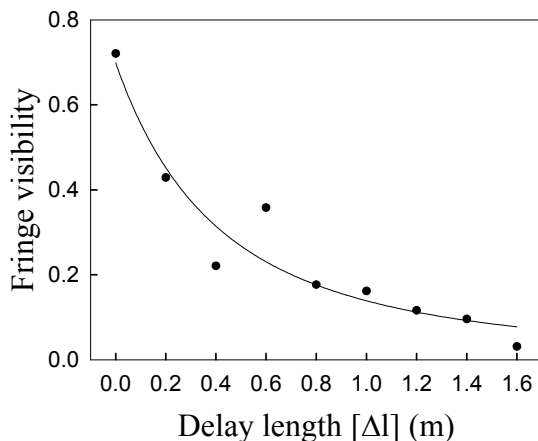


Fig.18 Fringe Visibility as a function of delay length

3.まとめ

励起光としてラマンファイバーレーザーを用い全ファイバー構成のTm-Hoファイバーレーザーの構築した。特に従来の1 μ m帯励起の

Tm-Ho添加石英ファイバーレーザーでは励起状態吸収の影響が非常に強く、効率の高いレーザー発振は得られていなかった。しかし、本研究においては励起光として1212nmを用いることによりスロープ効率34%という、高い効率を得ることができた。また、1Wを超える出力を達成した。出力光は緩和発振をしていたが、励起光を緩和周波数程度の繰り返しのパルスにすることによってレーザー出力を繰り返しの安定なパルスにすることができた。また、出力鏡として80%の反射率をもつファイバー端面ミラーを用いることによってCW出力を得ることができた。今後は双安定性や緩和発振について、イオンペアや過飽和吸収体といった現象を組み込んだモデルを立ててシミュレーションを行い、それぞれの物理現象を定量的に明らかにする必要がある。また、コヒーレント長測定により500MHz程度のバンド幅であろうとめどがつけられたので、次はファブリーペローエタロンを作成し、バンド幅測定を行いたい。

参考文献

- [1] 齊藤英明、土志田実 “アイセーフ・レーザー” レーザー研究 3(2000)25
- [2] Atsushi Taniguchi, Tetsuro Kuwayama, Akira Shirakawa, Mitsuru Musha and Ken-ichi Ueda “1212nm pumping of 2 μ m Tm-Ho-codoped silica fiber laser” Appl.Phys.Lett., Vol. 81,pp3723-3725, 2002
- [3] 桑山哲朗、谷口篤、白川晃、武者満、セルゲイ・バジリエフ、植田憲一 “1.212 μ m励起全ファイバーTm-Hoレーザーの2 μ m発振の特性” レーザー学会第302回研究報告, No.RTM-02-21, pp1-5, 2002
- [4] S. D. Jackson and T. A. King, “CW operation of a 1.064-mm pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser” IEEE J. Quantum Electron. 34, pp. 1578-1587 (1998)
- [5] S. D. Jackson and T. A. King, “Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers” J. Lightwave Technol. 17, pp. 948-956 (1999)
- [6] Christian Ghisler, Willy Luthy, and Heinz P. Weber, “Tuning of Tm³⁺:Ho³⁺:Silica Fiber Laser at 2 μ m” IEEE J. Quantum Electron. 31, pp1877-1879, 1995
- [7] Ch. Ghisler, W. Luthy, H. P. Weber, J. Morel, A. Woodtli, R. Dandliker, V. Neuman, H. Berthou, G. Kotrotsios “A Tm³⁺sensitized Ho³⁺ silica fiber at 2.04 μ m pumped at 809nm” Opt. Commun.vol.109, pp279-281, 1994
- [8] A.E.Siegman “LASERS” Oxford University Press
- [9] Amnon Yariv, “Optical electronics”, fourth edition, Saunders College Publishing