

ラマンファイバーレーザー励起全ファイバー赤外レーザー  
電子物性工学科 植田研究室 桑山哲朗

1. 背景

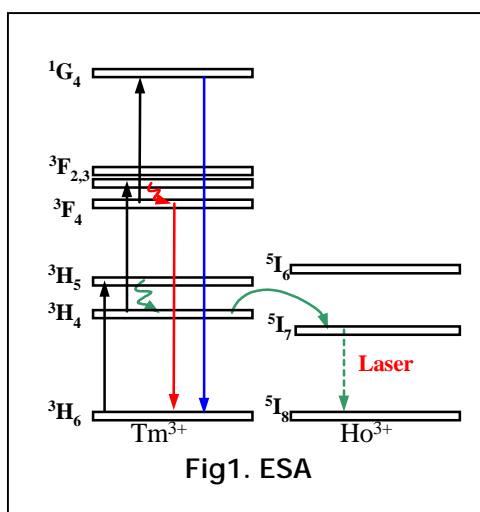
2 $\mu\text{m}$  域のレーザーは他の波長に比べ、目に比較的安全なアイセーフレーザーであり、野外で背景雑音が小さい波長帯、大気の透過率特性がよい、水での吸収があることなどの特性から、レーザーレーダーや、リモートセンシング、医療等への応用がある。2 $\mu\text{m}$  域の波長のレーザーとして、これまで Tm、Ho レーザーが研究されている。我々はこれらの中で、Tm-Ho 添加のファイバーレーザーについて研究を行なった。

2. 実験概要

2.1 ファイバー

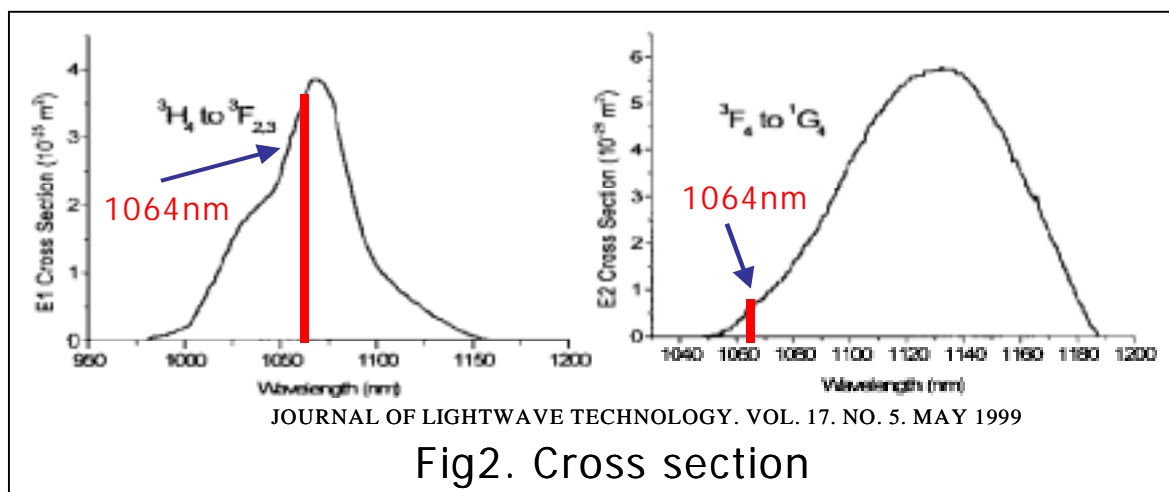
これらのレーザーで Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>を添加するホストのファイバーとして石英ガラスファイバーと、フッ化物ガラスファイバーが主に研究されている。フッ化物ガラスファイバーは、フォノンエネルギーが小さいために反転分布を作り出しやすい。フッ化物ガラスファイバーは石英ファイバーと比べて 2 $\mu\text{m}$  域での損失が少ない。しかし、石英ファイバーとの融着が非常に困難であるためこれら二つのファイバーを用いる場合には自由空間を介さなければならない欠点がある。また、フッ化物ガラスは水に対する化学的安定性が低く、表面での結露や水の付着により変色し光学特性を低下させてしまうことがある。これを克服するため、我々は Tm-Ho 添加石英ファイバーを用いた。石英ファイバーは、耐食性、耐久性に優れているため扱いやすく、また、WDM カップラーや FBG(fiber bragg grating)などのアタッチメントを低損失で融着することが可能である。これらを用いてアライメントフリーな全ファイバーのレーザーを試みた。

2.2 励起波長

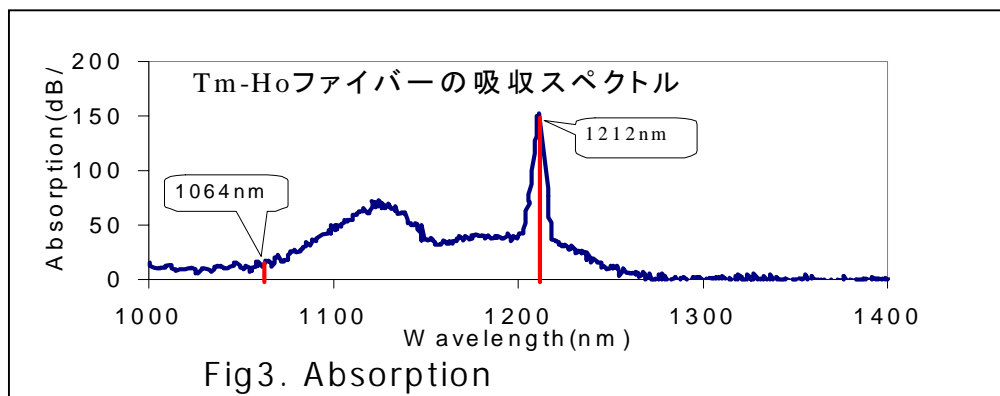


Tm、Tm-Ho 添加ファイバーレーザーの励起光には通常波長 1064nm の Nd:YAG レーザーや、790nm の Ti:sapphire レーザーが用いられてきた。しかし、790nm 励起の場合、1064nm 励起の場合と比べて量子効率が高くない。また、1064nm 励起の場合、励起状態吸収(ESA)が起こる(Fig1. ESA)。我々は Tm<sup>3+</sup> で <sup>3</sup>H<sub>6</sub> の準位から <sup>3</sup>H<sub>4</sub> の準位に励起して、エネルギー移行により Ho<sup>3+</sup> の <sup>5</sup>I<sub>7</sub> に準位励起し、<sup>5</sup>I<sub>7</sub> から <sup>5</sup>I<sub>8</sub> でレーザー発振を得たい。しかし、1064nm の励起光では <sup>3</sup>H<sub>4</sub> の状態から、さらに上の準位の <sup>3</sup>F<sub>4</sub> へ励起されてしまう ESA の効果がある。そして、<sup>3</sup>F<sub>4</sub> が

ら  $^3H_6$  の準位へ落ちることによる発光や、 $^3F_4$  の準位よりさらに上の  $^1G_4$  の準位へ励起され、そこから  $^3H_6$  の準位へ落ちることによる発光があるために  $^3H_4$  の準位の状態が作りにくく、エネルギー移行が起こりにくくなってしまい、励起効率が低くなる。Fig2. は、 $^3H_4$  の準位から  $^3F_4$  の準位へ、 $^3F_4$  の準位から  $^1G_4$  の準位へのそれぞれの吸収断面積である。



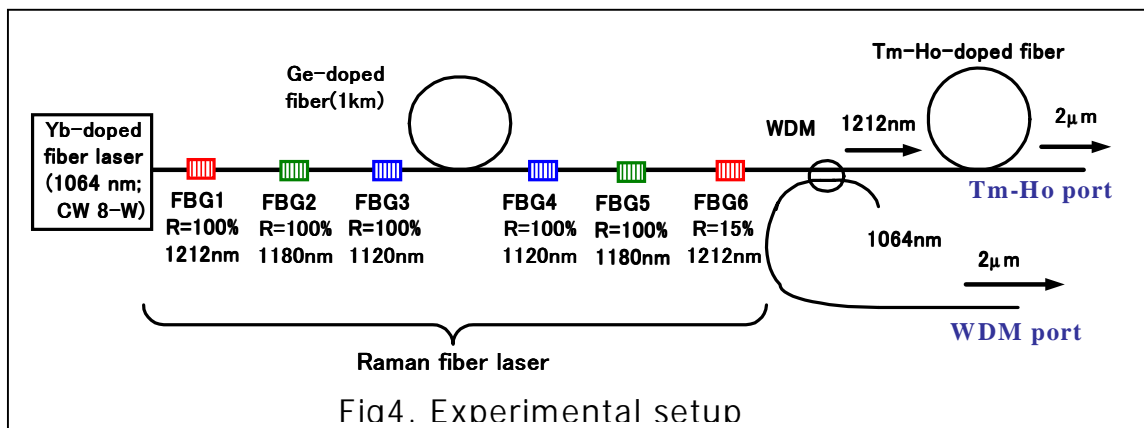
そこで我々は 1212nm の波長での励起を行なった。1212nm の波長は ESA の影響が少ないこと、Fig3. からわかるように吸収のピークがあることから適していると考えた。



### 2.3 実験装置

実際の実験装置を Fig4. に示す。励起用のレーザーとして、最大出力 8.4W 波長 1064nm の Yb 添加ダブルクラッドファイバーレーザーによって 1km の Ge 添加ファイバーを励起してやると、波長 1120nm に一次ストークス光、波長 1180nm に二次ストークス光が現れるので、それぞれストークス光の波長域に FBG を用いて共振器を組んでやり、レーザー発振をさせる。さらに三次ストークス光に関して、波長 1212nm で共振器を組み波長 1212nm のレーザー発振を得る。ここで用いた 1212nm は三次ストークス光のピークではないが、ラマン散乱のストークス光は広帯域に現れるため、波長 1212nm のレーザー発振が可能である。ラマンファイバーレーザーからの出力の残余 1064nm 光による ESA の影響を軽減させるため

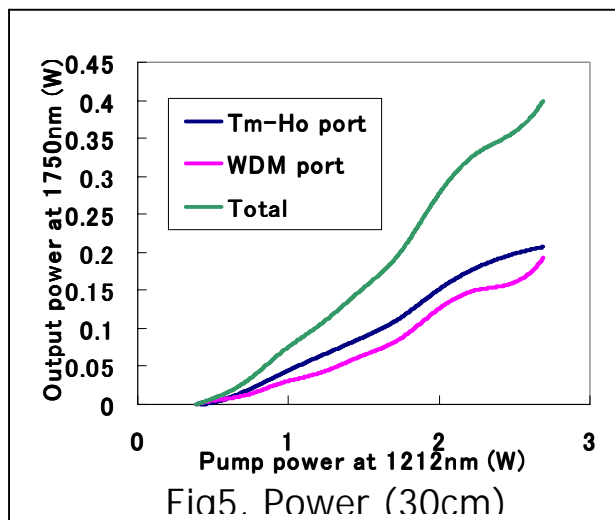
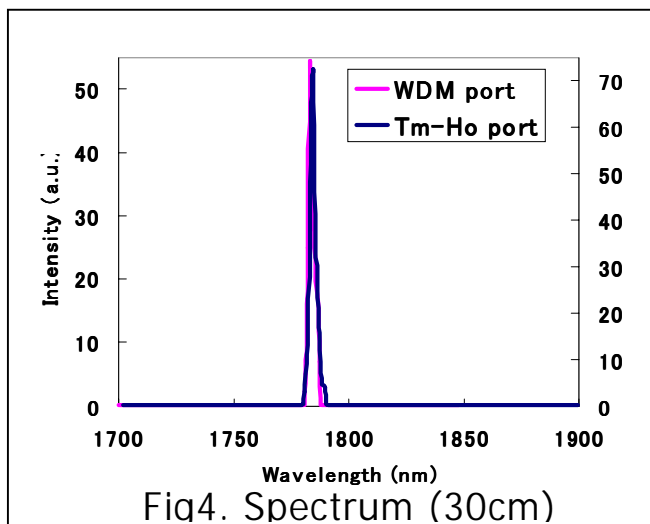
に WDM カップラーを介して Tm-Ho 添加石英ファイバーを融着し、励起した。このとき用いた WDM カップラーは波長 1212nm を透過、波長 1064nm は他ポートへ出力というものを用いた。波長 2 $\mu$ m に関しては、WDM カップラーの特性から他ポートへ出力であると見積もられる。



### 3 実験結果

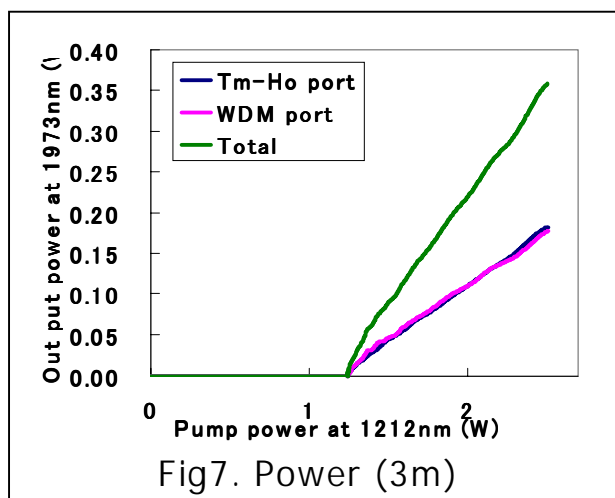
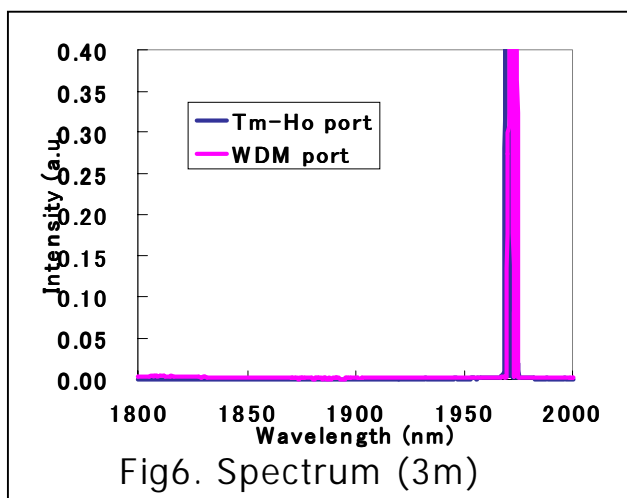
#### 3.1 Tm-Ho ファイバーが 30cm のとき

Fig4. に発振波長のスペクトル、Fig5. に波長 1212nm の励起光に対する Tm-Ho port、WDM port のそれぞれの出力と、合計出力を示す。このとき、波長 1780nm で発振し、スロープ効率 18%、最大出力 400mW を得た。



#### 3.2 Tm-Ho ファイバーが 3m のとき

3.3 Fig6. に発振波長のスペクトル、Fig7. に波長 1212nm の励起光に対する Tm-Ho port、WDM port のそれぞれの出力と、合計出力を示す。このとき、波長 1970nm で発振し、スロープ効率 28%、最大出力 350mW を得た。



#### 4 考察

Tm-Ho 添加ファイバーが 30cm のときの発振波長 1780nm は  $Tm^{3+}$  の発振波長と考えられる。この原因としては、エネルギー移行がうまく行なわれていないことや、WDM カップラーの特性が  $Ho^{3+}$  の発振波長では透過になっており、ラマンファイバーレーザーに戻ってしまっており、端面での共振器が組み立てられていないことなどが考えられる。Tm-Ho 添加ファイバーを 3m にしたときに発振波長が長波長になっていた原因として考えられるのは、ファイバーが長くなったことによって再吸収が増え、 $Tm^{3+}$  の発振波長でのロスが増えたために  $Tm^{3+}$  での発振が止まり、 $Ho^{3+}$  へのエネルギー移行が進んだために  $Ho^{3+}$  での発振が起こったことや、 $Tm^{3+}$  での発振が再吸収によって長波長側に移ったことなどが考えられる。

#### 5 まとめ

$2\mu m$  域でのレーザー発振を得ることができた。このレーザーは全ファイバーのレーザーなのでアライメントをすることなく利用できる。特に、赤外域のレーザーは直接見ることができないため全ファイバーはとても利便性が高いと考えられる。また、ESA を大幅に減らし、高効率の励起をすることができた。

#### 6 今後の予定

WDM カップラーの  $2\mu m$  域での特性は、あくまで見積もっただけのものなので、実際の特性がわかったわけではない。そのため、波長  $2\mu m$  域までスペクトルののびている白色光を用いて WDM カップラーの特性を調べる必要がある。WDM port に  $2\mu m$  の FBG を用いての一方出力や、WDM カップラーとアイソレーターを用いてリング共振器を作り一方発振などを行なう予定です。Tm-Ho 添加ファイバーの長さを変化させていったときの波長や、出力の変化を調べています。また、現在はラマンファイバーレーザーから 1064nm の波長の光がまだ出てきてしまっているので、Ge 添加ファイバーを長くするなどしてラマンファイバーレーザーの最適化等も行ないたい。