

# Yb 添加ファイバーを用いた 1178nm におけるレーザー発振の研究

電子工学科 植田研究室 太田 淳

## 1.はじめに

Yb は、量子効率が良い、吸収スペクトルが広く励起用 LD に対する制約が大幅に緩和されるなど、多くの利点を持っていることが分かり、研究が進んできている。しかし、この Yb の長波長領域 (1150nm ~) は、利得が小さくレーザー発振が難しいので、この領域でレーザー発振を実現したという報告は少ない。また、この領域内の 1178nm の 2 倍波である 589nm はナトリウムの D 線と一致し、レーザーガイドスターに利用できる。そこで本研究は、Yb 添加ファイバーを用いて、1178nm においてレーザー発振させることを目的としている。

## 2.Yb について

Yb<sup>3+</sup>イオンは、図 2-1 に示すような <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> しかなく、ほぼ二準位系として考えることができる。そのため、励起波長やレーザー波長における励起状態吸収 (ESA) や、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 間の大きいエネルギーギャップのため、多光子放出による非放射過程が生じない。また、Yb<sup>3+</sup>イオンは Nd<sup>3+</sup>イオン等に比べイオン半径が小さいために、高濃度添加した時に濃度消光が起きない。そのため、高濃度添加することが可能でファイバー長を短くすることができる。Yb<sup>3+</sup>イオンの上準位寿命は 0.95ms 程度と長く、高いエネルギー蓄積効果が期待できる。これらのことから、Yb<sup>3+</sup>イオンの量子欠損が少ないことが分かる。さらに、図 2-2 から分かるように吸収スペクトル幅が広く、励起用 LD に対する制約が大幅に緩和されるという利点もある。以上のことから、Yb<sup>3+</sup>イオンをレーザー媒質として利用することにより、高効率でレーザー発振することが可能である。しかし、Yb<sup>3+</sup>イオンは再吸収があり、この再吸収は励起が弱くなると強くなるので、強励起が必要である。[1]

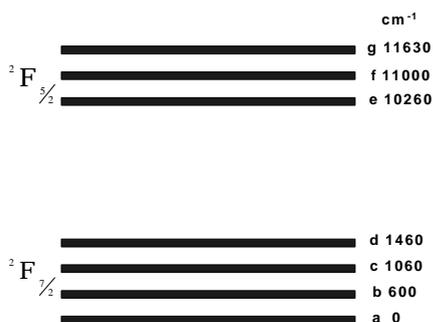


図 2-1 Yb<sup>3+</sup>のエネルギー準位図

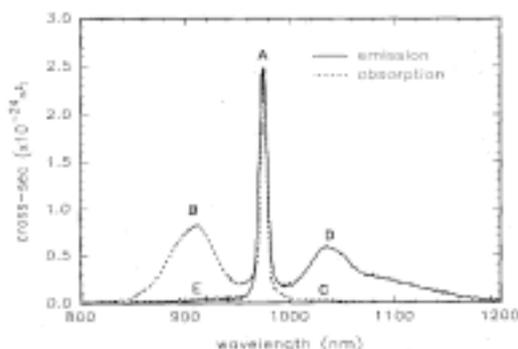


図 2-2 Yb<sup>3+</sup>の吸収、放出断面積

## 3 シミュレーション

本実験をするにあたって、小信号利得シミュレーション、ファイバー最適長シミュレーションを行った。使用する各パラメーターを表 3-1 に示す。

表 3-1 Yb 添加ファイバーの各パラメーター

Parameter	Symbol	Specification	
Yb <sup>3+</sup> イオン濃度	N[m <sup>-3</sup> ]	9.5 × 10 <sup>25</sup>	
コア径	[μm]	5.0	
コア断面積	A <sub>core</sub> [m <sup>2</sup> ]	1.96 × 10 <sup>-11</sup>	
モードフィールド径@1060nm	[μm]	5.5 ± 0.5	
カットオフ波長	[nm]	960 ± 70	
コア開口数		0.15	
クラッド径	[μm]	125 ± 3	
クラッド断面積	A <sub>clad</sub> [m <sup>2</sup> ]	1.12 × 10 <sup>-8</sup>	
クラッド形状		八角形	
クラッド開口数		0.46	
プランク定数	h[J · s]	6.63 × 10 <sup>-34</sup>	
励起光周波数	ν <sub>p</sub> [Hz]	3.08 × 10 <sup>14</sup>	
レーザー光周波数	ν <sub>l</sub> [Hz]	2.55 × 10 <sup>14</sup>	
量子効率	ρ	1.0	
蛍光寿命	[s]	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	
励起光吸収断面積@975nm	a <sub>p</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.5 × 10 <sup>-24</sup>	
レーザー光吸収断面積	@ 1030nm	a <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	4.6 × 10 <sup>-26</sup>
	@ 1090nm	a <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.0 × 10 <sup>-28</sup>
	@ 1120nm	a <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	5.0 × 10 <sup>-29</sup>
	@ 1153.5nm	a <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.0 × 10 <sup>-29</sup>
	@ 1178nm	a <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	1.0 × 10 <sup>-29</sup>
励起光放出断面積@975nm	e <sub>p</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.5 × 10 <sup>-24</sup>	
レーザー光放出断面積	@ 1030nm	e <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	5.5 × 10 <sup>-25</sup>
	@ 1090nm	e <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.7 × 10 <sup>-25</sup>
	@ 1120nm	e <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.0 × 10 <sup>-25</sup>
	@ 1153.5nm	e <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	1.0 × 10 <sup>-25</sup>
	@ 1178nm	e <sub>l</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.0 × 10 <sup>-26</sup>
励起光のコアに占める割合	ρ	1.75 × 10 <sup>-3</sup>	
レーザー光のコアに占める割合	ι	0.75	
励起光ファイバー伝送損失	l <sub>p</sub> [dB/m]	7.2 × 10 <sup>-3</sup>	
レーザー光ファイバー伝送損失	l <sub>l</sub> [dB/m]	7.5 × 10 <sup>-3</sup>	

### 3.1 小信号利得シミュレーション

入射光が弱く、飽和していないときの利得定数を小信号利得定数といい、本研究では、小信号利得についてシミュレーションする。本シミュレーションでは簡単化するために、定常状態で考える。ファイバーのコアの断面積とクラッドの断面積比、励起飽和パワーをそれぞれ

$$x = \frac{A_{\text{core}}}{A_{\text{clad}}}, \quad P_s = \frac{A_{\text{core}} h_p}{(x_{\text{ep}} + x_{\text{ap}})_p}$$

とするとファイバーの長さ  $z$  における励起光パワーは、

$$\ln\left(\frac{P_p(z)}{P_p(0)}\right) + \frac{P_p(z) - P_p(0)}{P_s} = -N x_{\text{ap}} z$$

から導くことができる。吸収パワーを  $P_a = P_p(0) - P_p(l)$

とすると、利得のデシベル表示は

$$G(\text{dB}) = 4.34 \left[ \frac{(x_{\text{ep}} + x_{\text{ap}})_p P_a}{A_{\text{core}} h_p} - N_{\text{al}} l \right]$$

と表すことができ、この式から小信号利得を求める。本シミュレーションでは、波長 1030nm、1090nm、1120nm、1153.5nm、1178nm、入力パワー1W の時のシミュレーションを行う。シミュレーション結果を図 3.1-1 に示す。図 3.1-1 から、波長 1178nm の利得とその他の波長の利得の差は、ファイバー長が 15m のところまで増加していきその後一定になっていることが分かる。よって、ファイバー長が長すぎないほうが 1178nm で発振しやすいと考えられる。

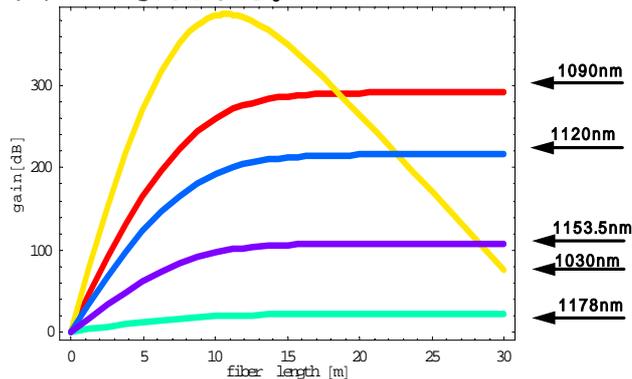


図 3.1-1 ファイバー長 - 利得特性

### 3.2 ファイバー最適長シミュレーション

$\text{Yb}^{3+}$  イオンは 2 準位イオンなので、 $\text{Yb}$  添加ファイバーレーザーは 2 準位レーザーとして考えることができる。そこで、2 準位レーザーのレート方程式を示す。レート方程式を解く際に、各パラメーターは表 3-1 に示した値を使用する。励起光吸収確率を  $a_p$ 、励起光放出確率を  $e_p$ 、レーザー光

吸収確率を  $a_l$ 、レーザー光放出確率を  $e_l$  とするとそれぞれ以下の式で表すことができる。

$$a_p = \frac{a_p P_p}{h_p A}, \quad e_p = \frac{e_p P_p}{h_p A}$$

$$a_l = \frac{a_l (P_l^+ + P_l^-)}{h_l A}, \quad e_l = \frac{e_l (P_l^+ + P_l^-)}{h_l A}$$

よってレート方程式と励起光パワーの変化、レーザー光パワーの変化はそれぞれ以下の式で表すことができる。

$$N_2 = \frac{a_p + a_l}{a_p + e_p + a_l + e_l + 1} N$$

$$\frac{dP_p}{dz} = - \left\{ a_p (N - N_2) - e_p N_2 \right\} P_p - I_p P_p$$

$$\frac{dP_l^\pm}{dz} = \pm \left[ \left\{ e_l N_2 - a_l (N - N_2) \right\} P_l^\pm - I_l P_l^\pm \right]$$

また境界条件は、

$$P_p = P_{p0}, \quad P_l^\pm = 0.04 \times P_l^\mp \quad (z=0 \text{ の時})$$

$$P_l^- = P_l^+ \quad (z=z \text{ の時})$$

となり、この境界条件からレート方程式を解く。入力パワー10W の時のシミュレーション結果を図 3.2-1 に示す。このシミュレーション結果から、1178nm におけるレーザー発振のファイバー最適長は 12m となる。[2]

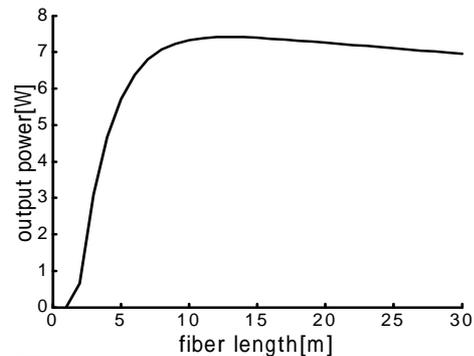


図 3.2-1 ファイバー長 - 出力パワー特性

## 4 実験

### 4.1 実験 1 (片端面 FBG 共振器)

図 4.1-1 に実験装置図を示す。励起光源としてファイバーカップル LD (浜松ホトニクス社製) を使用した。このファイバーカップル LD の特性は、ピーク波長 973.6nm、最大出力パワー 22W である。使用した  $\text{Yb}$  添加ダブルクラッドファイバー ( $\text{Yb-DCF}$ ) (NUFERN 社製 SM-YDF-5/125) の各パラメーターは、表 3-1 に示した。

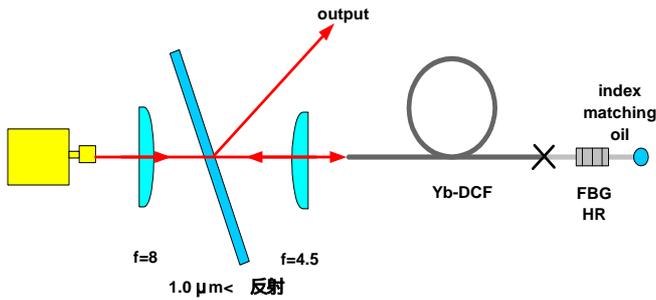


図 4.1-1 実験装置 1 (片端面 FBG 共振器)

図 4.1-1 の実験装置において、Yb-DCF の片端面に FBG (1120nmHR、1153.5nmHR、1178nmHR) を融着した時と、何も融着しない時、それぞれの場合について出射光のスペクトルとパワーを測定した。Yb-DCF との融着損失を測定したところ、約 5%であった。また、FBG を融着した時は、FBG で選択した波長以外の波長が FBG の先の端面でフレネル反射されるのを防ぐために、インデックスマッチングオイルを付けて測定した。以上のことを、Yb-DCF の長さを 30m、9m、4.5m と変えていき、それぞれの場合について測定した。

実験 1 の結果 1178nm においてレーザー発振させることはできなかった。ファイバー長 9m、FBG (1178nm,HR) 融着時のレーザー発振スペクトルを図 4.1-2 に示す。また各ファイバー長、FBG におけるレーザー発振波長を表 4.1-1 に示す。

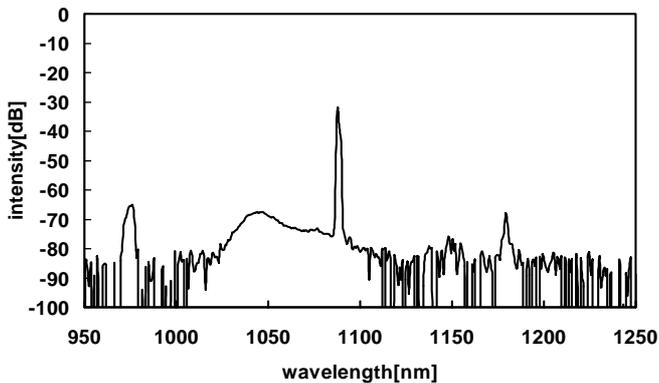


図 4.1-2 レーザー発振スペクトル

表 4.1-1 各ファイバー長、FBG におけるレーザー発振波長

FBG \ ファイバー長	FBG なし	FBG (1120nm)	FBG (1153.5nm)	FBG (1178nm)
4.5m	1060nm ~ 1080nm	1120nm	1040nm ~ 1080nm	1050nm ~ 1080nm
9m	1090nm	1120nm	1080nm	1080nm
30m	1100nm	1120nm	1100nm	1100nm

## 4.2 実験 2 (側面励起両端面 FBG 共振器)

図 4.2-1 に実験装置図を示す。使用した LD は実験 1 と同様で、LD にカップルするファイバーは 100 μm ファイバーを使用した。Yb-DCF は実験 1 と同様である。側面励起するために、マルチモード励起カプラー(OFS 社製)を使用した。FBG (波長 1178nm、HR と 1%OC) を融着し、共振器を構成した。また端面でのフレネル反射を防ぐために、8°カットとインデックスマッチングオイルを使用した。

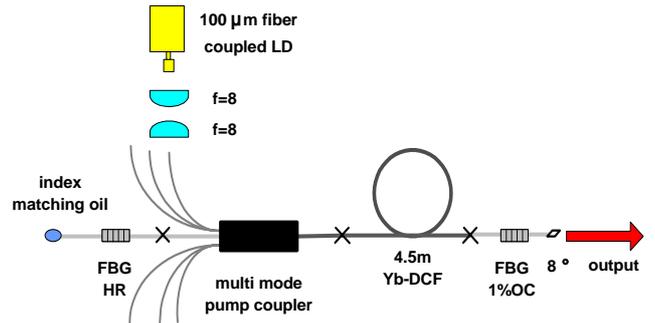


図 4.2-1 実験装置 2 (側面励起両端面 FBG 共振器)

ファイバー長 4.5m、入力パワー 1.04W におけるレーザー発振スペクトルを図 4.2-2 に示す。1178nm でレーザー発振したが、ASE が非常に大きく、ASE よりも光強度が約 10dB 小さい値となった。

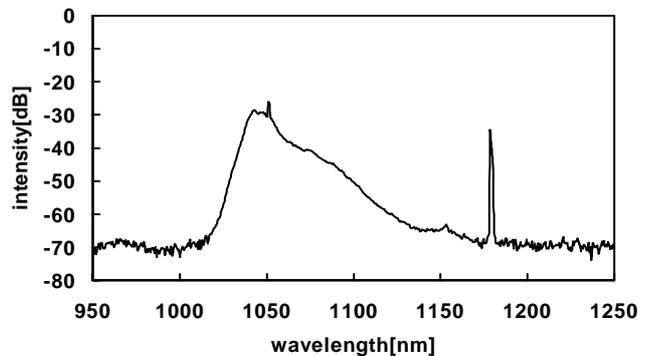


図 4.2-2 レーザー発振スペクトル

## 4.3 実験 3 (両端面 FBG 共振器)

図 4.3-1 に実験装置図を示す。実験装置は、実験 1 と同様である。ここで使用した Yb-DCF は、入射面側に直接 FBG (波長 1178nm、13%OC) が焼き付けてある。FBG (波長 1178nm、HR) を融着し、共振器を構成した。また、端面でのフレネル反射を防ぐために、両端面は 8°カットしてある。

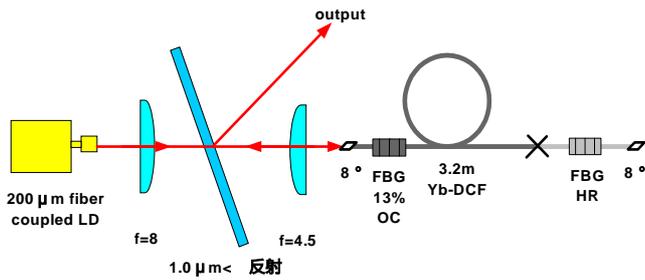


図 4.3-1 実験装置 3 (両端面 FBG 共振器)

ファイバー長 4.5m、入力パワー9.6W の時のレーザー発振スペクトルを図 4.3-2 に示す。1178nm でレーザー発振し、ASE よりも光強度が約 30dB 大きな値となった。またファイバー長 4.5m の時の入力パワー - 出力パワー特性を図 4.3-3 に示す。入力パワー9.6W の時、レーザー出力パワーは 510mW であった。全出力パワーとレーザー出力パワーを比較すると、同程度であることが分かる

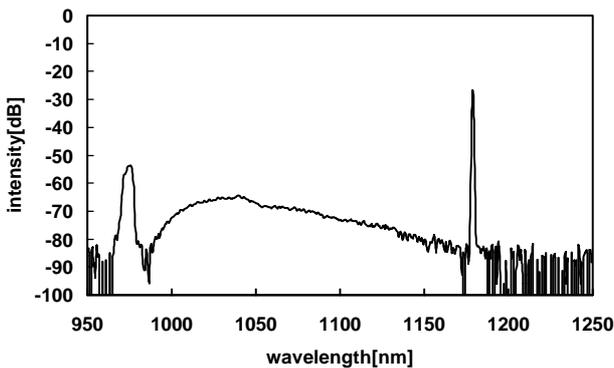


図 4.3-2 レーザー発振スペクトル

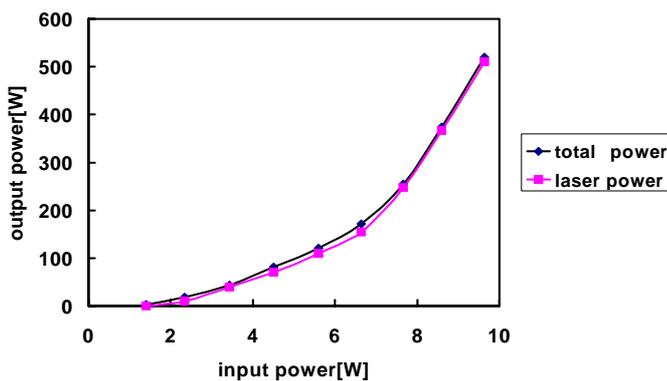


図 4.3-3 入力パワー - 出力パワー特性

## 5. 考察

片端面に FBG を融着した実験 1 (片端面 FBG 共振器) では、1178nm においてレーザー発振することはできなかった。しかし、マルチモード励起カップラーを使用し FBG を両端面につけた実験 2 (側面励起両端面 FBG 共振器) では、1178nm に

おいてレーザー発振することができた。これは、小信号利得シミュレーションで示したように、Yb の長波長領域(1150nm ~)の利得は 1030nm ~ 1100nm の利得に比べて非常に小さいので、共振器の Q 値を高くしないとレーザー発振できないためである。しかし、実験 2 では 1178nm においてレーザー発振したが ASE よりも光強度が小さく、これは融着損失が大きく影響したためであると考えられる。そこで、Yb-DCF と HI1060 ファイバーの融着損失を測定したところ約 5%の融着損失があった。実験 2 では Yb-DCF の両端面を融着しており、実験装置全体で 3ヶ所の融着部分があるので、各融着部分の融着損失を 5%とすると、共振器を 1 往復すると約 26.5%の損失が生じることになる。そこで、実験 3 (両端面 FBG 共振器) で融着損失が小さくなるように直接 FBG を焼き付けた Yb-DCF を使用した時は、ASE よりも 1178nm レーザー発振の方が十分大きな光強度となった。この結果からも、1178nm においてレーザー発振させるためには共振器の Q 値を高くしなければならないことが分かる。ファイバー最適長シミュレーションの結果と実験結果が異なったのは、本シミュレーションは ASE を考慮に入れておらず、ASE の影響が大きかったためであると考えられる。

## 6. 今後の展望

まず、本研究において小信号利得シミュレーション、ファイバー最適長シミュレーションを行ったが、どちらのシミュレーションにおいても ASE を考慮していないので、ASE を考慮したシミュレーションを行う必要がある。また、出力パワーのファイバー長依存性を測定する。1178nm において損失が少なく、ASE にとって損失の大きな共振器を構成し、1178nm で高効率発振させる。この方法の一つとして、普通の FBG よりも回折格子周期が長くある波長のみで透過損失を与える、長周期ファイバークレーティングを使用する方法がある。

## 参考文献

- 1.H.M.Pask,RobertJ.Carman,DavidC.Hanna,AnneC.Tropper, ColinJ.Mackechnie,PaulR.Barber,andJudithM.Dawes, "Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1-1.2μm Region,"IEEE J .Select.Topics Quantum Electron,vol1,pp.2-13, 1995.
- 2.Ido Kelson and Amos Hardy,"Optimization of Strongly Pumped Fiber Lasers,"J.Lightwave Technology,vol.17,pp.891-897,1999.