

# 方向性結合器を用いたファイバーアレイレーザーの特性

電子物性工学専攻

植田研究室

齊藤 智春

## 1 はじめに

複数のレーザー出力を結合し1つの高出力ビームを得る。この様なビームの加算について様々な研究が行われている。その中の一つに波長の近いビームを光学系を使用して重ね合わせるという方法がある。これにより高出力ビームが得られ、励起用光源や工業用レーザーなどに使われている。しかしこの方法はインコヒーレント結合であり、出力は高くなる反面スペクトル輝度は低下してしまい、用途の幅を狭めてしまう結果となる。コヒーレント加算を行えばこの問題は生じないのだが固体レーザーやLDで実現するのはモードマッチングなどの面から困難である。そこで我々はファイバーレーザーを方向性結合器で結合する事によりコヒーレントアレイを形成することが出来ると考え本研究を行った。[1]

本実験は2つの等価なファイバーレーザーを作成し、3dBの方向性結合器を用いて結合し測定を行った。ファイバーレーザーには、発振波長が光通信で使用されている為、光ファイバーコンポーネントの入手が容易である事とラマンファイバーレーザーを用いることにより高出力の励起用光源を用いる事が出来るのでEr添加ファイバーレーザーを用いた。

## 2 ラマンファイバーレーザー

ラマンファイバーレーザーとは、非線形光学現象である誘導ラマン散乱効果を利用したファイバーレーザーであり、これにより励起光はそれよりも長波長のストークス光にシフトされる。このシフト量はファイバーを構成する媒質に依存する。[2] 図1に今回使用したP添加ファイバーのラマン利得を示す。1330 $\text{cm}^{-1}$ の鋭いピークが $\text{P}_2\text{O}_5$ の成分であり、500 $\text{cm}^{-1}$ 前後のなだらかなピークは $\text{SiO}_2$ の成分によるものである。このようにGe,Siに比べてP成分のシフト量は非常に大きく、より長波長へのシフトを行うことが可能である。

Er添加ファイバーの励起光源として必要な波長は1480nm付近である。これをYb添加ファイバーレーザー(19W@1100nm)を励起として用いるラマンファイバーレーザーで得る為には、1289nmの1次ストークス光、1380nmの2次ストークス光、1484nmの3次ス

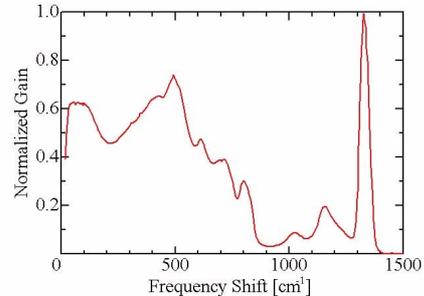


図 1: P 添加ファイバーの利得 [3]

トークス光として得る事が出来る。ここで最初のシフトには1330 $\text{cm}^{-1}$ を用い、それ以降には510 $\text{cm}^{-1}$ を用いている。[5]

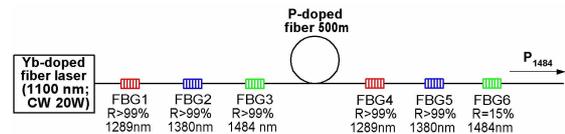


図 2: 3 次ストークスラマンファイバーレーザー

図2にラマンファイバーレーザーの装置図を示す。ここで使用しているFBG(Fiber Bragg Gratings)とは、ファイバーのコア部に一定間隔で屈折率変化を生じさせ特定波長のみに対してミラーとして働く光コンポーネントである。1次ストークス光、2次ストークス光については反射率 $R > 99\%$ のFBGを使用して閉じ込める形で共振器を構成し、3次ストークスは $R > 99\%$ と $R = 15\%$ のFBGで共振器を構成した。使用したP添加ファイバーは500mである。この3次ストークスラマンファイバーレーザーの入出力特性を図3に、最大励起時のスペクトルを図4に示す。

最大励起パワー18.7Wのとき1次、2次、3次ストークス光の最大出力はそれぞれ0.89W,1.27W,4.68Wである。共振器は1次、2次光に対してほぼ100%閉じ込められるように設計をしたのだが、使用したFBGよりも1次、2次光のスペクトル幅が広い為、反射しきれずに漏れている。このため3次ストークスへの変換効率は25%ほどである。しかし一般に使われている1480nm

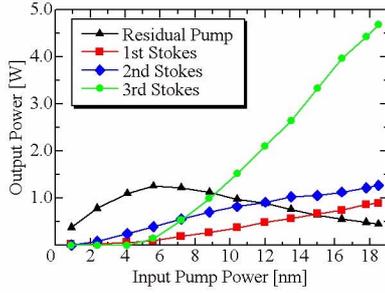


図 3: 入出力パワー特性

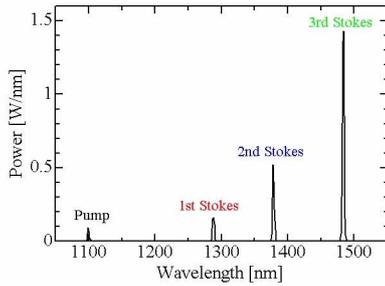


図 4: 出力スペクトル

の LD 出力は 200 ~ 300mW なので、比較すると非常に高出力であり、さらにファイバー出力なので、Er 添加ファイバーとほぼ 100% に近い割合で結合する事が可能である。この事から Er 添加ファイバーレーザーの励起光源として十分な性能を持っている。結果として中心波長 1484.5nm、半値全幅 2.5nm、出力 4.68W、光変換効率 25% のラマンファイバーレーザーを製作できた。

### 3 Er 添加ファイバーレーザー

#### 3.1 モデリング

Er 添加ファイバーレーザーを作成するにあたって、最適なファイバー長を算出する為モデリングを行った。Er のエネルギー準位は 3 準位であるが、1480nm から 1550nm への緩和時間が数十  $\mu$ s なのに対してレーザー遷移の上順位の蛍光寿命が 10ms と非常に長いので 2 順位レーザーとして考える事が出来る。2 順位レーザーのレート方程式を次式に表す。

$$N_2 = \frac{W_{Pe} + W_{Le}}{W_{Pa} + W_{Pe} + W_{La} + W_{Le} + \frac{1}{\tau}} N \quad (1)$$

$$W_{Pa} = \Gamma_P \frac{\sigma_{Pa} P_P}{h\nu_P A}, W_{Pe} = \Gamma_P \frac{\sigma_{Pe} P_P}{h\nu_P A} \quad (2)$$

$$W_{La} = \Gamma_L \frac{\sigma_{La}(P_L^+ + P_L^-)}{h\nu_L A}, W_{Le} = \Gamma_L \frac{\sigma_{Le}(P_L^+ + P_L^-)}{h\nu_L A} \quad (3)$$

$$\frac{dP_P}{dz} = -\Gamma_P \sigma_{Pa}(N - N_2) - \sigma_{Pe} N_2 P_P - l_P P_P \quad (4)$$

$$\frac{dP_L^\pm}{dz} = \pm \Gamma_L \sigma_{Le} N_2 - \sigma_{La}(N - N_2) P_L^\pm - l_L P_L^\pm \quad (5)$$

$P_P$ : ポンプ光のパワー、 $P_L^+, P_L^-$ : 順方向、逆方向レーザー光のパワー

$\sigma_{Pa}, \sigma_{La}$ : 励起光、レーザー光の吸収断面積

$\sigma_{Pe}, \sigma_{Le}$ : 励起光、レーザー光の誘導放出断面積

$N$ : 全イオン数、 $N_1$ : 基底順位のイオン数、 $N_2$ : 上順位のイオン数

$\Gamma_P, \Gamma_L$ : 励起光、レーザー光のコアに占める割合、 $\tau$ : 蛍光寿命

$l_P, l_L$ : 励起光、レーザー光のファイバー損失

$\nu_P, \nu_L$ : 励起光、レーザー光の周波数、 $A$ : コアの断面積、 $h$  プランク定数

式 (4) は励起光のパワーの変化を表した式で、 $\sigma_{Pa}$  の項は励起光が吸収されイオンが上順位に励起される過程を表し、 $\sigma_{Pe}$  の項は励起光により誘導放出が生じイオンが基底順位に移る過程である。式 (5) はレーザー光のパワーの変化を表したものである。 $\sigma_{La}$  がレーザー光の吸収を表し、 $\sigma_{Le}$  がレーザー光の誘導放出を表して

境界条件を以下の式で表す。

$z=0$  で

$$P_P = P_{P0} \quad (6)$$

$$P_L^+ = 0.04 \times P_L^- \quad (7)$$

$z=L$  で

$$P_L^- = P_L^+ \quad (8)$$

使用する Er 添加ファイバーは、NUFERN 社製の EDF555 である。表 1 の Er 添加ファイバーのパラメータを示す。このパラメータと境界条件よりレート方

表 1: ファイバーパラメータ [5][6]

Fiber Parameter	Value
Fiber Loss $l$ [dB/m]	
@1484nm	0.08
@1557nm	0.08
Core Diameter [ $\mu$ m]	4.6
Fiber Diameter [ $\mu$ m]	125
Cutoff Wavelength [nm]	910
Metastable lifetime $\tau$ [ms]	10
Erbium ions $N$ [ $m^{-3}$ ]	$8.9 \times 10^{24}$
Overlap integral between the optical mode $\Gamma$	
@1484nm	0.57
@1557nm	0.55
Absorption cross section $\sigma_a$ [ $m^2$ ]	
@1484nm	$2.66 \times 10^{-25}$
@1557nm	$2.35 \times 10^{-25}$
Emission cross section $\sigma_e$ [ $m^2$ ]	
@1484nm	$0.95 \times 10^{-25}$
@1557nm	$3.39 \times 10^{-25}$

程式を解く。共振器長を 1 ~ 15m まで変化させ、吸収されず透過してくる励起光とレーザー光のパワー出力特性を図 5 に示す。

このシミュレーション結果からファイバー長が 9m のときに最大出力 1.65W が得られる。しかし出力はファイバー長が 6 ~ 15m にかけてなだらかなピークとなるので、実際に使用するファイバー長は 6m とした。共振器内部の位置に対するパワー特性を図 6 に示す。

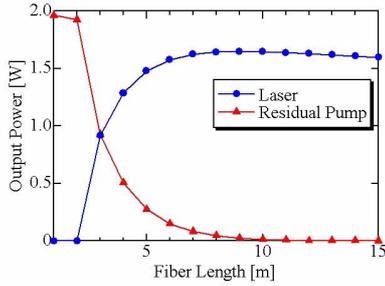


図 5: 出力のファイバー長依存性

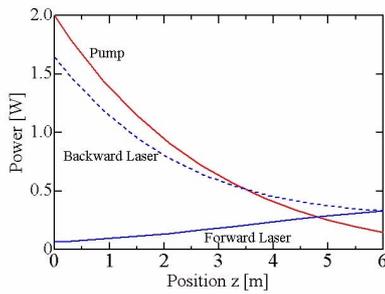


図 6: 共振器内パワーの位置依存性

この図は共振器内部での励起光とレーザー光の振る舞いを表したものである。シュミレーション結果より 1484nm, 2W 励起でレーザー出力 1.58W が得られることが解った。この結果を元にファイバー長を 6m とし Er 添加ファイバーレーザーを作成した。

### 3.2 Er 添加ファイバーレーザー

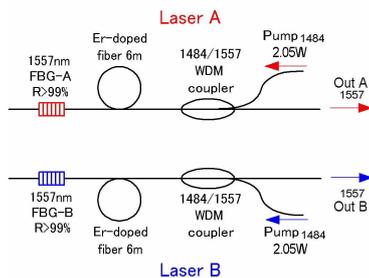


図 7: N=2 Er 添加ファイバーレーザー

図 7 に Er 添加ファイバーレーザーの装置図を示す。励起光にはラマンファイバーレーザーの出力 (4.1W@1484nm) を 3dB 結合器を用いて 2 分岐した 2.05W を使い、WDM 結合器を介して 6m の Er 添加ファイバーに注入した。共振器は FBG-A (R>99%@1556.97nm) と 4% 端面反射で構成し、このレーザーを Laser A とした。WDM 結合器とは選択

波長の合流・分岐を行うファイバー結合器である。同じように FBG-B (R>99%@1557.16nm) を用いてレーザーを組みそれを Laser B とし、それぞれのレーザーについて測定を行った。

入出力パワー特性を図 8、最大出力時のスペクトルを図 9 に示す。最大励起 2.05W の時、Out A 1.36W、Out B 1.47W の出力が得られた。それぞれの出力でアンバランスが生じているが、その原因は使用した WDM 結合器の内部損失が Laser A の方が大きいためである。使用した FBG-A と FBG-B の中心波長が異なるので、出力スペクトルの中心波長も異なっている。中心波長は Laser A で 1556.97nm、Laser B で 1557.16nm であり、半値全幅はそれぞれ 0.1nm で FBG とほぼ同じである。形状としては A の方がやや裾が広い形をしている。

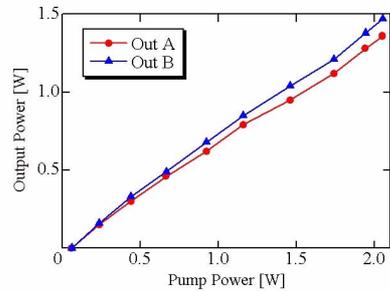


図 8: 入出力パワー特性

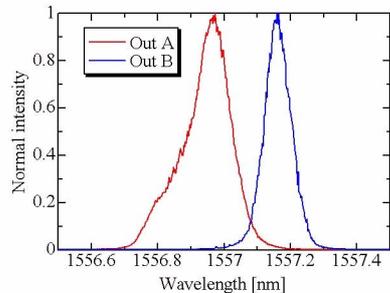


図 9: EDFL のスペクトル

## 4 結合実験

### 4.1 Er 添加ファイバーアレイレーザー

作成した Er 添加ファイバーレーザーを 3dB 結合器を使用して図 10 のように結合し、Er 添加ファイバーレーザーアレイを作成し測定を行った。図 11 に入出力パワー特性、図 12 に正規化したスペクトルを示す。

結合する事により出力は Out A からのほぼ単一出

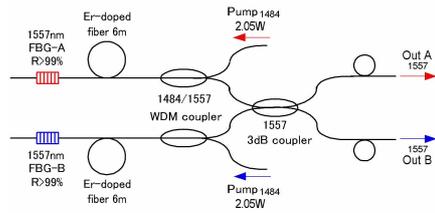


図 10: Er 添加ファイバーアレイレーザー

力に変化し、最大励起 4.1W で Out A 2.54W、Out B 0.17W と Out A は独立状態の出力を足し合わせた値に近い出力が得られている。この状態のスペクトルは Out A、Out B 共に同じ中心波長と形状をしている。独立状態ではスペクトル形状と中心波長は共に同じではない事から、このレーザーはコヒーレントアレイ状態であると考えられる。またこの出力は非常に不安定で、出力端面や出力ポートの状態を変化させる事により出力の値が変化し、場合によって出力が逆転する現象が起こった。

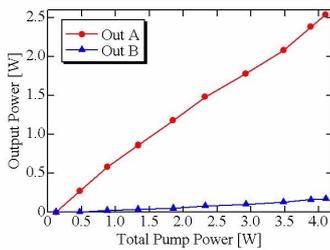


図 11: 入出力パワー特性

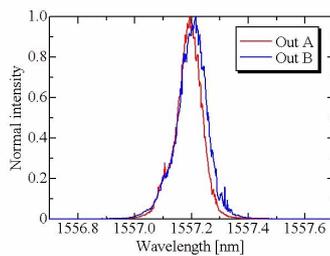


図 12: 出力スペクトル

## 4.2 ブラッグ波長制御

FBG のブラッグ波長を変化させ結合の波長依存性を調べる。ブラッグ波長の制御にはマイクロステージを用い引っ張ることで行った。1 $\mu\text{m}$  の引っ張りに対して 0.014nm のシフトを得る事が可能で、これにより FBG-A と FBG-B が完全に重ならないようにする事が

出来る。[7]

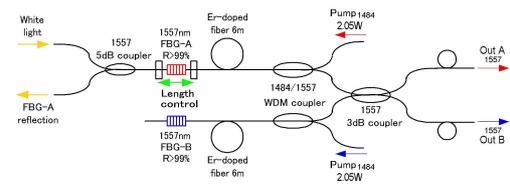


図 13: ブラッグ波長制御を用いた装置図

図 13 に装置図を示す。マイクロステージを 0~90 $\mu\text{m}$  まで動かし各ブラッグ波長において測定を行った。ブラッグ波長は FBG-A に 5dB 結合器を接続し、白色光の反射光を測定することで直接モニターを行った。図 14 に FBG-A と FBG-B のブラッグ波長の差による出力依存特性を示す。図 15 に出力スペクトルを示す。図中の赤、青の点線は FBG-A、FBG-B のブラッグ波長の位置を表している。

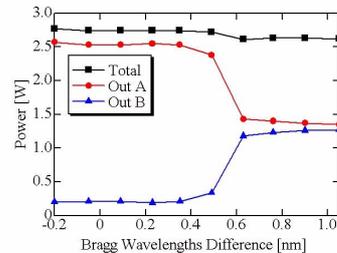


図 14: 出力パワーのブラッグ波長差依存性

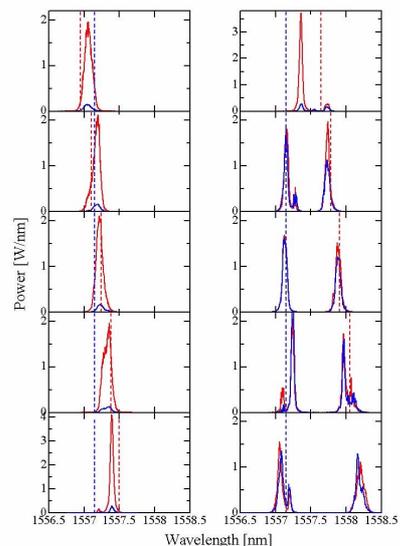


図 15: ブラッグ波長のシフト量に対するスペクトル

波長差が 0.5nm までは、出力パワーに変化は見られずスペクトルも単一で、波長は FBG-A と FBG-B のスペクトルの重なり付近で出力している。しかし、波長

差が 0.6nm に達すると出力は 2 ポートからの出力に分離し、スペクトルも FBG-A、FBG-B を中心とした 2 つのスペクトルに分離をしている。これは 0.5nm を境に FBG の重なりで発振するよりも、各々のブラッグ波長で発振を行う方が閾値が低くなった為、単純に 2 つのレーザーの出力が 3dB 結合器によって分けられ、2 つのポートから出力されていると考えられる。この状態はレーザーが相互に影響を受けていないことからインコヒーレントアレイ状態であると言え、互いに影響を受け中心波長が引き込まれている状態はコヒーレントアレイ状態であると言える。

### 4.3 出力ポートのスイッチング

出力ポートは、端面の状態や出力ポートの状態によりスイッチングする。特に出力ポートのファイバーを曲げることにより出力ポートが変化する。ファイバーを曲げることによって生じる現象には

- 偏波の変化
- ファイバー長の変化
- 損失の変化

が考えられる。偏波による影響をポラライゼーションコントローラを共振器内部または出力ポートに取り付けて偏波依存性を調べた。ポラライゼーションコントローラを使用して測定を行った結果、最大出力は Out A 2.48W, Out B 0.21W、最小出力は Out A 2.05W, Out B 0.63W であった。この事から偏波による影響はあるが、出力ポートのスイッチングを生じさせるほどの影響は無いということが解った。ファイバー長を変化させてもスイッチングは生じないことから、出力ポートの損失が影響していると考えられる。そこで出力ポートに損失を印加し測定を行う。

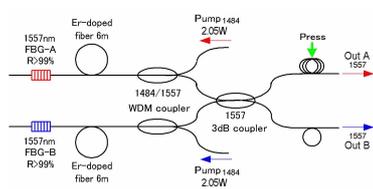


図 16: 損失制御を用いた装置図

図 16 に装置図を示す。ファイバーを円形に束ねて結び、これを固定し楕円状に潰す事により損失を印加した。図 17 に印加損失を増加させた時の出力パワー特性を、図 18 にスペクトルを示す。

損失を徐々に増加させることにより Out A の出力は減少し Out B の出力は増加していくが、0.4dB を境

に急激に出力は移行し損失が 0.5dB に達すると完全に Out B に反転している。スペクトルからも Out A から Out B へ出力が移行していく過程が見られ、この過程の間に結合が解かれる状態がないという事が分かる。最終的には損失が 0.0dB で Out A 2.51W, Out B 0.19W の出力が 8.9dB で Out A 0.06W, Out B 2.52W と損失を加えた方が合計出力の高出力ポートの割合が大きくなっている。

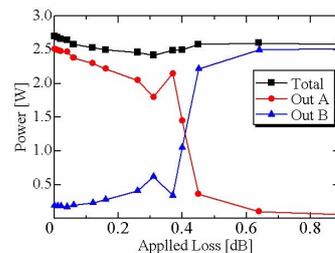


図 17: 出力パワーの印加損失依存性

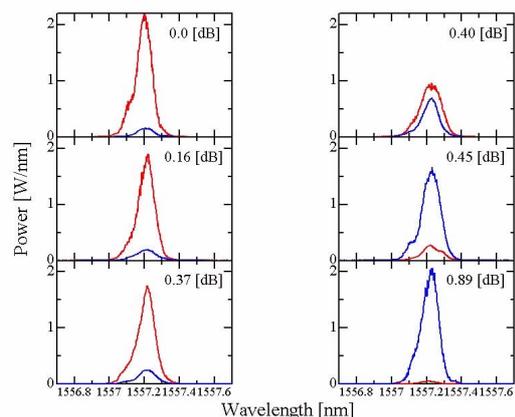


図 18: 印加損失に対するスペクトル

インデクスマッチングオイルを端面に使い、戻り光をほぼ無くすことにより無限の損失を加えてみた。Out A 0.15W, Out B 2.57W の状態でポート A の端面にオイルを使用したところ、Out B の出力は 2.65W に増加した。増加の理由は次のように考えることができる。初期状態は図 19 の上の様に、ほとんどの成分はポート B で発振しているが、一部の成分がポート A で発振を行っている状態であると考えられる。オイルを使用する事により下の図の様にポート A からの戻り光が無くなり、ポート B へ出力される成分が増加する為と考えられる。

以上の結果より低出力ポートの成分は、モードのミスマッチにより高出力ポートへ結合出来ない成分が漏れてきていると考えられる。高出力ポートはポート A、

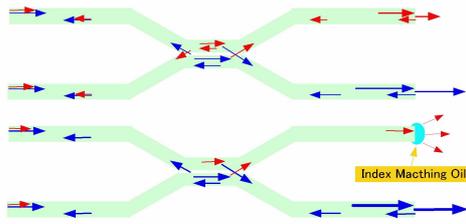


図 19: インデックスマッチングオイルによる影響

ポート B で損失の低い方、すなわち閾値が低い方が発振しており、そのポートに損失を印加して閾値を相手側より高くすると出力はスイッチする。

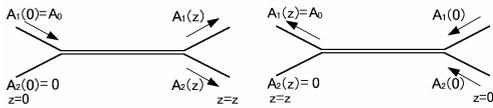


図 20: 方向性結語器

図 20 に 3dB 結合器のイメージ図を示す。図左のように 1 ポートから入力した成分は 2 ポートに  $A_1(z), \theta = 0, A_2(z), \theta = -\frac{\pi}{2}$  という位相関係で分岐される。この成分が反射して右図のように 1 ポートに戻る条件は、結合器の式よりそれぞれの位相の関係が  $A_1(0), \theta = 0, A_2(z), \theta = \frac{\pi}{2}$  の条件で戻ってきたときのみを実現される。大出力ポートのスイッチ出来るということは、共振器自体がこの条件を自動的に満たすと考えられる。

#### 4.4 4つのレーザーの結合

同じ構成の 4 つの Er 添加ファイバーレーザーを作成し、それぞれを A,B,C,D とした。励起光はラマンファイバーレーザーの出力 (4.1W@1484nm) を 3dB 結合器を 2 段階に用いて 4 分割し、それぞれ 1W で励起した。最大励起時の出力は、Out A 0.68W, Out B 0.64W, Out C 0.62W, Out D 0.62W である。図 21 に 4 つのレー

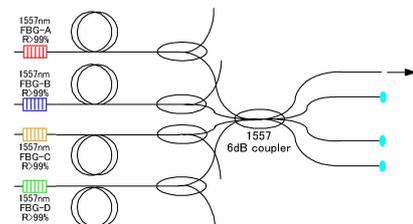


図 21: N=4 Er 添加ファイバーアレイレーザー

ザーを結合したアレイレーザーを示す。レーザーの結合には  $4 \times 4$  の 6dB 結合器を用いて行った。通常状態ではそれぞれのポートの出力は非常に不安定だった為、

3 つの出力端面にインデックスマッチングオイルを使用して 1 つのポートのみを選択した。その結果、単一ポートから 2.45W の出力を得ることが出来た。この様に 4 つのレーザーについても 2 つのレーザーと同様にコヒーレント加算を行うことが出来た。

## 5 結論

Er 添加ファイバーレーザーの励起用のラマンファイバーレーザーのシュミレーションを行い、その結果を元に製作を行い 1484.5nm, 4.68W の励起光源を得る事が出来た。

Er 添加ファイバーレーザーのシュミレーションを行い、その結果を元にレーザーを 2 台製作しそれぞれ 1556.97nm, 1.36W, 1557.16nm, 1.47W の出力を持つファイバーレーザーが得られた。

Er 添加ファイバーレーザーを 3dB 結合器を使用して結合する事により、コヒーレント加算を実現でき単一ポートから出力を得ることが出来た。出力ポートはポートの損失を制御することにより任意に選択することが可能で、出力ポートのスイッチングが行うことが出来る。

共振器を構成している FBG のブラッグ波長を制御することで、コヒーレントアレイ、インコヒーレントアレイ状態の観測を行った。

4 つのレーザーについても結合を行い、2 つの状態と同様の結果を得る事が出来た。

## 参考文献

- [1] V.A.Kozlov, J.Hernández-Cordero, and T.F.M orse, "All-fiber coherent beam combining of fiber lasers", Optics Letters, Vol.24, No.24, (1999), pp1814-1816.
- [2] アグラワール, 『非線形ファイバー光学』, 吉岡書店, (1997).
- [3] Mahendra Prabhu, "RAMAN AND BRILLOUIN/RAMAN FIBER LASER USING PHOSPHOSILICATE FIBER", Ph.D Thesis, The University of Electro Communications, (2000).
- [4] A.BERTONI, "Analysis of the efficiency of a third order cascaded Raman laser operating at the wavelength of 1.24μm", Optical and Quantum Electronics, Vol.29, (1997), pp1047-1058
- [5] C.Randy Giles and Emmanuel Desurvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Journal of Lightwave Technology, Vol.9, No.2, (1991), pp.271-283.
- [6] C.R.Giles, C.A.Burrus, D.J.DiGiovanni, N.K.Dutta, and G.Raybon, "Characterization of Erbium-Doped Fibers and Application to Modeling 980-nm and 1480-nm Pumped Amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.3, No.4, (1991), pp.363-365.
- [7] 宇野 弘幸, 柴野 敦, 小島 章義, 三上 修, "ひずみ制御ファイバグレーティングを用いた光波長スイッチング", 光学, Vol.28, No.5, (1999), pp2 73-277