

# Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバにおける $1\mu\text{m}$ 帯寄生発振の抑制

電子工学科 植田研究室 鈴木博之

## 1. 序論

近年、 $1.5\mu\text{m}$  帯の WDM 信号を一括増幅する光ファイバ増幅器として、Er:Yb 共添加光ファイバ増幅器 (EYDFA) が注目されている。これは Yb イオンを添加することによって Er 添加光ファイバの非線形効果を抑制させる事ができるだけでなく、Yb の広い吸収帯を利用し、増感剤として利用できるという利点もある。しかし、Yb から Er へのエネルギー伝達の効率は Er, Yb イオンの配合比やコア材料に大きく依存しており、励起光から信号光への変換効率を向上させるために、コア組成の最適化が不可欠である。さらに EYDF を  $980\text{nm}$  で励起した場合 Er, Yb 間の逆遷移や Yb 準位間での寄生発振など複雑なエネルギー遷移過程を経るため EDF に比べ変換効率の値は低いものとなっている。[1-3]

そこで、本研究では Er:Yb 共添加ファイバにおける Yb 準位間での寄生発振を抑制する事を目的とした。その方法として、フォトニック結晶ファイバの導波特性を用いた。フォトニック結晶ファイバは曲げる事によって生じる曲げ損失が短波長側から現れるという特性があり、これにより Yb イオンにおける  $1\mu\text{m}$  帯の ASE、寄生発振を抑制できるのではないかと考えられる。これが実証され、高い変換効率を得られれば  $1.55\mu\text{m}$  帯の高出力化につながると期待される。

## 2 Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバ

Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバのデータを表 1 に示す。また、このファイバの SEM 画像を図 1 に示す。

表 2.1 Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバ

$\Lambda$	$\Lambda/d$	$NA_{\text{core}}$	$NA_{\text{clad}}$	MFD	$D_{\text{core}}$	$D_{\text{clad}}$	$D_{\text{buffer}}$
$22\mu\text{m}$	0.54	0.04	0.58	$26\mu\text{m}$	$35\mu\text{m}$	$222\mu\text{m}$	$656\mu\text{m}$

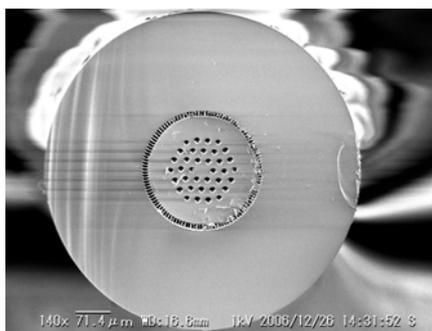


図 2.1 Er:フォトニック結晶ファイバ

本研究では、曲げ損失を測定するにあたってコアを伝搬する光を観測する必要があるが、本研究で用いる Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバは、コアの NA が 0.04、クラッドの NA が 0.58 であるため、コアのみに光を入射させる事が難しい。また、曲げ損失を測定する上で曲げによってコアからクラッドにしみだしたクラッドモードの光を除去する必要がある。

そこで本研究ではエアクラッドの周りのバッファといわれる部分をフッ化水素酸によって溶解させ、インデックスマッチングジェルを塗る事によって、エアクラッドを伝搬した光の全反射条件を崩す事によりコアモードのみを取り出す事を試みた。

## 3 フッ化水素酸によるクラッドモードの除去

### 3.1 フッ化水素酸によるクラッドモードの除去

フッ化水素酸でクラッドの部分溶解させた後クラッドモードの全反射条件が崩れたかどうかを確認するために、図 3.1 に示すように波長  $633\text{nm}$  の赤色の LD を用いフォトニック結晶ファイバを通った光がクラッドモードが除去された部分を通る際に、赤く光り出す事からクラッドモードが除去できたかどうかを確認した。

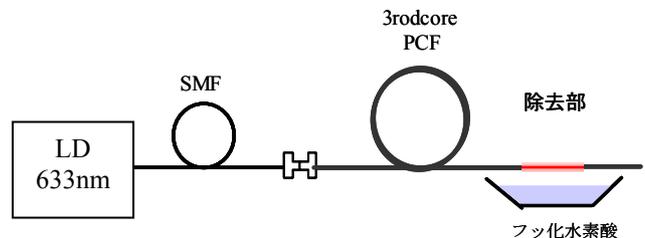


図 3.1 フッ化水素酸によるクラッドモードの除去

### 3.2 クラッドモード除去率の測定

フッ化水素酸によってバッファの部分溶解させどれくらいのクラッドモードが除去できたのかをパワー、CCD 画像のから評価した。測定の装置を図 3.2 に示す。まず、使用する光源として、Er, Yb において吸収の少ない  $1.1\mu\text{m}$  帯の ASE 光源を用いた。そして、中継用のファイバとしてシングルモードファイバを用い、それと PCF のクラッドに光を均一に入射させるために用いる  $100\text{m}$  のマルチモードファイバを融着させた。次に、マルチモードファイバと PCF とを顕微鏡によって端面と端面を確認しながら近づけ光を入射させるブツカップルという方法を用いて結合させた。次に PCF の出口側に設置したクラッドモードの除去部分にインデックスマッチ

ングジェルを塗りクラッドモードをできる限り取り除いた。そして、CCD、パワーメータによってそれぞれ観測した。また、除去する前とを比較するために除去部分の約 10cm 手前側を切り、同様に CCD、パワーメータによって観測した。その結果、パワーによる評価では、43.34mW の入力に対し、除去後が 64μW となり、約 28dB のクラッドモード除去率となった。また、CCD 画像でもクラッドモードの除去が確認された。その様子を図 3.3 に示す。

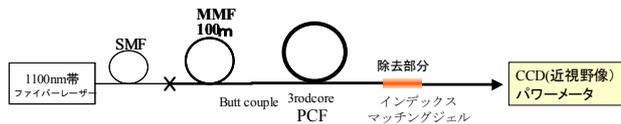


図 3.2 クラッドモード除去率の測定

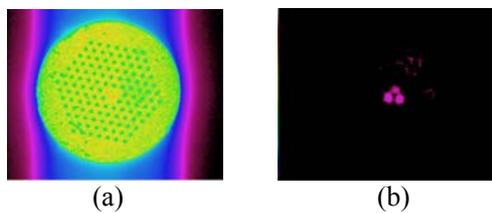


図 3.3 クラッドモードの除去 (CCD 画像)  
(a)除去前、(b)除去後

## 4 フォトニック結晶ファイバの曲げ損失

### 4.1 理論

従来ファイバにおいてはファイバを数 cm 曲げると長波長側から曲げ損失が発生することが広く知られている。損失は、曲げにより屈折率分布がゆがみ横モードの電場がクラッドモードに大きくしみ出し、クラッドへの放射モードになることにより発生する。すなわちコアとクラッドの屈折率差が小さくなる (NA が小さくなる) と曲げ損失が大きくなる。フォトニック結晶ファイバの場合には、長波長では通常のファイバと同じように曲げ損失が発生するが、もう一つ重要なことは短波長においても同様に曲げ損失が発生することである。フォトニック結晶ファイバの波長が短い場合と長い場合におけるフィールド分布の違いを図 4.1 に示す。

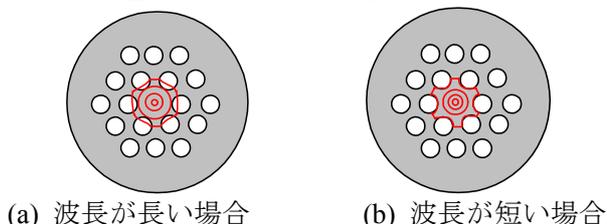


図 4.1 フォトニック結晶ファイバのフィールド分布

波長が長い場合、空孔などの構造が波長よりも短くなるため、光の分布は空孔内にも広がる。それに対し、波長が短い場合には、屈折率の低い空孔領域へ

の分布が小さく、屈折率の高いガラス領域の分布が大きくなるという構造になる。すなわち、横モードがほとんどコアに閉じ込められるようになり、その結果コアと有効クラッドの屈折率差が小さくなるため、NA が非常に小さくなり曲げ損失が発生する。ただし長波長側での損失は通常のファイバに比べ NA が大きいので曲げ損失は小さい。[4]

### 4.2 モデル

通常の光ファイバの曲げ損失の式にフォトニック結晶ファイバ特有のパラメータを代入する事で次の式が得られる。

$$\alpha\Lambda \cong \frac{1}{8\sqrt{6\pi}} \frac{1}{n_s} \frac{\Lambda^2}{A_{eff}} \frac{\lambda}{\Lambda} F \left( \frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 V_{PCF}^3 \right)$$

$$F(x) = x^{-\frac{1}{2}} \exp(-x)$$

ここで、 $\Lambda$ とはフォトニック結晶ファイバの空孔間隔であり、フォトニック結晶ファイバの  $V$  値を  $V_{PCF} = \Lambda\sqrt{\beta^2 - \beta_{cl}^2}$  とした。[5]

本研究で用いる Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失のモデルを図 4.2 に示す。

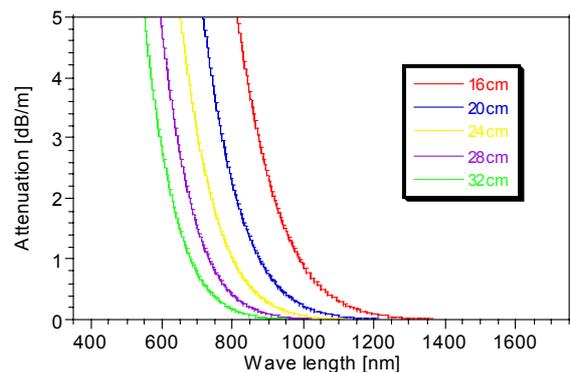


図 4.2 曲げ損失のモデル

図 4.2 の曲げ損失のモデルの結果を見ると、曲げ径を小さくするにつれ、曲げ損失が短波長側から生じている事がわかる。また、この結果では 1μm 帯に損失を与える曲げ径は 16cm である事がわかる。

## 5 曲げ損失の測定

### 5.1 同コア径無添加のフォトニック結晶ファイバの曲げ損失

Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバの曲げ損失を測定する前にコア径、モードフィールド径、NA が酷似した Er、Yb を添加させていないフォトニック結晶ファイバ 9.5m の曲げ損失を白色光の透過させ、曲げ径を 16~32cm に 4cm ごとに換え、測定した。また、直線部分の損失も補正した。その結果を図 5.1 に示す。また曲げ径と巻き数との関係を表 5.1 に示す。この結果から、曲げ径を小さくするにつれ、曲げ損失が短波長側から生じている事がわかる。また、

この結果では  $1\mu\text{m}$  帯に損失を与える曲げ径は 32cm である事がわかる。

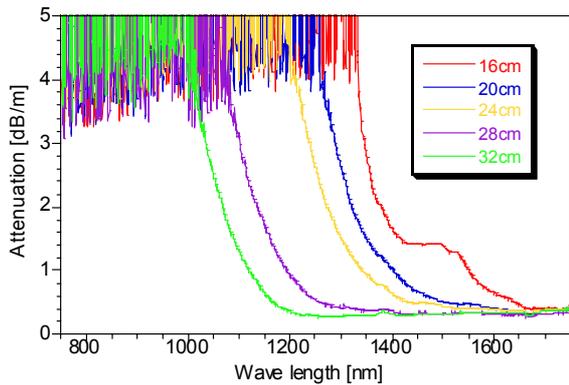


図 5.1 同コア径無添加のフォトニック結晶ファイバの曲げ損失

表 5.1 曲げ径と巻き数の関係

曲げ径 (cm)	16	20	24	28	32
巻き数 (回)	17	14	11	10	8

## 5.2 Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバの曲げ損失

Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバにおいて  $1\mu\text{m}$  帯に損失を与える曲げ径を調べるため図 5.2 に示すような測定装置を組んだ。クラッドモードの除去部分は 2 箇所設け透過スペクトルを測定した。また、曲げ径を 16~32cm に 4cm ごとに測定した。そのときの曲げ径に対する巻き回数を表 5.2 に示す。その結果を図 5.3 に示す。

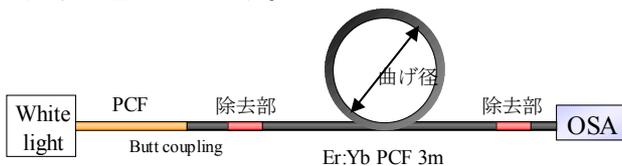


図 5.2 透過スペクトルの測定

表 5.2 曲げ径と巻き数の関係

曲げ径 (cm)	16	20	24	28	32
巻き数 (回)	3	3	2	2	1

この結果を見ると 900~1100nm 帯で Y b の吸収が 1500nm 帯で Er の吸収が生じている。また曲げ径が 20~32cm では透過スペクトルにあまり変化が見られないが曲げ径が 16cm の時には  $1.1\mu\text{m}$  帯付近で他の曲げ径に比べ 7dB ほど曲げ損失が生じている事がわかる。

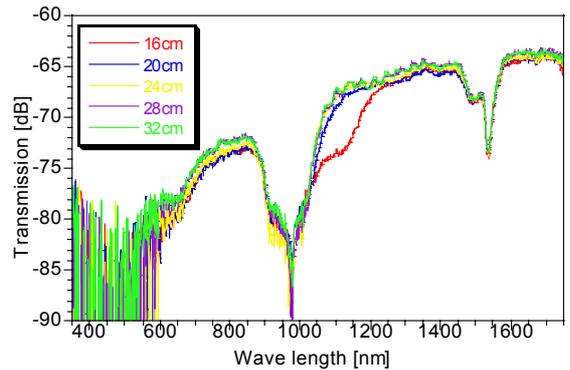


図 5.3 曲げ径と透過スペクトル

この結果から曲げ径を 16cm のする事で  $1\mu\text{m}$  帯に損失を与えることができると考えられる。

## 6 チャープパルス増幅器における $1\mu\text{m}$ 帯寄生発振の抑制

5 において Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバの曲げ径を 16cm にすれば  $1\mu\text{m}$  帯に損失を与える事がわかった。そこで実際に  $1\mu\text{m}$  帯の寄生発振を抑制する事ができるかどうかを確認するために我々の研究室で行われているファイバを用いたチャープパルス増幅器において実験を行った。この研究においても  $1\mu\text{m}$  帯の寄生発振が問題となり励起パワーの増大させるに連れファイバ内でジャイアントパルスを形成しファイバ内に損傷を与える事が問題になっている。そこで本研究では図 6.1 に示すような実験系を組み曲げ径が 32cm の時と 18cm の時との信号光と  $1\text{mm}$  帯の出力特性とスペクトル特性を測定した。ここで曲げ径を 16cm にせず 18cm にしたのは本研究で用いる Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバの径がコーティングの部分を含め  $700\mu\text{m}$  と非常に太いため曲げ径を 16cm にすると折れてしまう可能性があったためである。

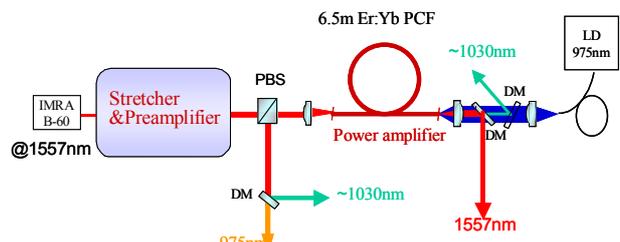


図 6.1 チャープパルス増幅器の実験系

曲げ径が 32cm, 18cm の時の出力特性を図 6.2 に示す。また、曲げ径が 32cm の時のスペクトル特性を図 6.3 に 18cm の時を図 6.4 に示す。

この出力特性の結果を見ると曲げ径が 32cm の時には励起パワーが 15W を過ぎる辺りから  $1\mu\text{m}$  帯の寄生発振が生じている事がわかる。しかし、曲げ径を 18cm にした時には  $1\mu\text{m}$  帯の寄生発振が抑制されている事がわかる。

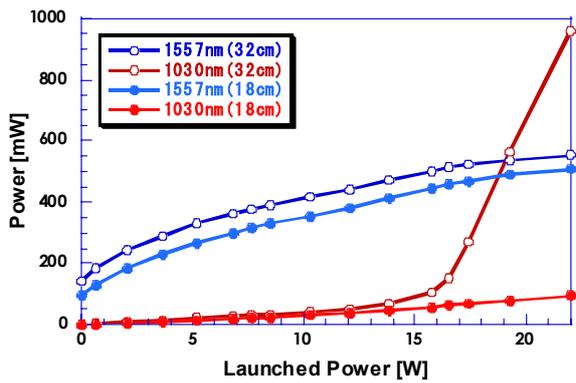


図 6.2 出力特性

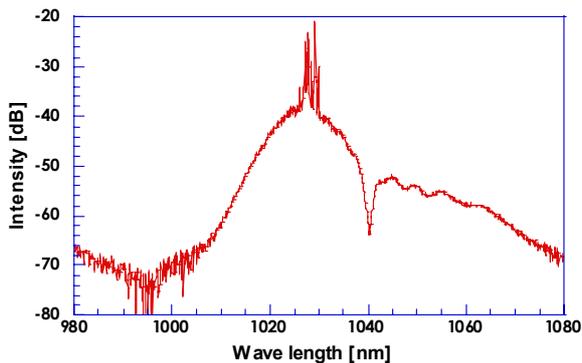


図 6.3 曲げ径 32cm の時のスペクトル特性

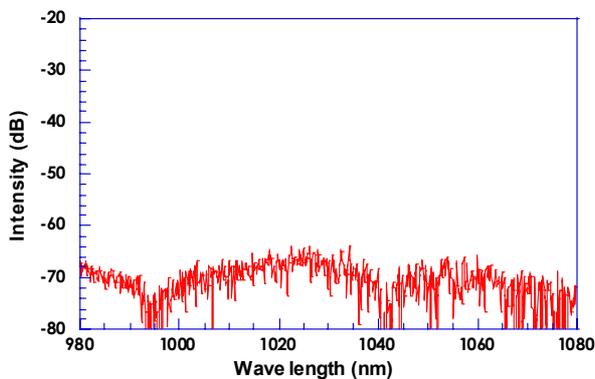


図 6.4 曲げ径 18cm の時のスペクトル特性

また、スペクトル特性を見ると曲げ径が 32cm のときには 1030nm 付近で寄生発振を起こしその周りで ASE が確認できるが、曲げ径を 18cm にした時には、寄生発振は抑制され ASE が残っている程度になっている事がわかる。この結果から曲げ径を 18cm にする事で 1 $\mu$ m 帯の寄生発振を抑制できたといえる。

## 7 結論

まず、フォトニック結晶ファイバの曲げ損失のモデルを立て曲げ径を小さくするにしたがって短波長側から損失が生じ始める事を確認した。Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバにおけるコアモードの光だけを観測し、クラッドにしみ出した光を除去す

るため、フッ化水素酸を用いてエアクラッドのまわりのバッファの部分を溶解させた。その結果クラッドモードを 28dB 除去する事に成功した。続いて、Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバと NA, コア径、モードフィールド径が酷似しており、コアの部分に何も添加していないフォトニック結晶ファイバを用いて曲げ損失の測定実験を行った。その結果、曲げ径を小さくするにつれ曲げ損失が生じる事がわかり 1 $\mu$ m 帯に損失を与え、1.5 $\mu$ m 帯に損失を与えない巻き径は 24cm から 32cm の間である事がわかった。次に Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失の測定を行い、1 $\mu$ m 帯に損失を与えるファイバの巻き径はおおよそ 16cm である事がわかった。以上の結果をふまえて Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバに増幅器として用いた曲げ径を 32cm, 18cm にした時の出力、スペクトル特性を測定した。その結果、曲げ径が 32cm のときには 1 $\mu$ m 帯で寄生発振していたのに対し曲げ径を、18cm にした時には寄生発振が起らなかった。以上の結果から Er:Yb 共添加ファイバにおける 1 $\mu$ m 帯の寄生発振の抑制を実証できた。

## 7 今後の展望

今後の展望として、Er:Yb 共添加フォトニック結晶ファイバの曲げ径を 18cm にした時の曲げ損失の測定をクラッドモードを完全に除去した状態で測定する必要がある。また、Er:Yb の利得と損失の関係を調べるため、利得のモデルを立てる必要がある。

## 参考文献

- [1] G. canat, J.C.MOoller, Y.Jaouen, B.Dussadier Opt. Lett. , Vol.30, No.22 (2005)
- [2] J.K, N.Sahu, Y.Jeong, D.J.Richardson, J.Nilsson, Opt. Communications, 159, Vol.227 (2003)
- [3] P.K.Cheo, G.G.King, Photons Technology Letters , Vol.13, No.3 (2001)
- [4] 川上 彰二郎監修；フォトニック結晶技術とその応用；シーエムシー出版（2002）
- [5] M.D.Nielsen, N.A.Mortensen, M.Albertsen, J.R.Folkenberg, A.Bjarklev, D.Bonacinni, Opt. Express, 1775, Vol.12, No.8 (2004)