平成27年度研究開発成果概要図(目標・成果と今後の成果展開)

- 1. 研究課題·実施機関·研究開発期間·研究開発予算
 - ◆課題名 : 革新的光通信インフラの研究開発
 - ◆個別課題名 :課題ア マルチコア光増幅技術
 - ◆副題 : マルチコア光増幅の実現技術の確立と国際標準化の推進
 - ◆実施機関
 ・
 :日本電信電話株式会社(代表研究者)、株式会社フジクラ、公立大学法人大阪府立大学、国立大学法人島根大学、学校法人千歳科学技術大学
 - ◆研究開発期間:平成23年度から平成27年度(5年間)
 - ◆研究開発予算:265百万円
- 2. 研究開発の目標

集中型光増幅技術として、「マルチコア分離光増幅技術」、「ファイバー括光増幅技術」、並びに、分布型/遠隔励起型光増幅技術の検討を行い、マルチコア光増 幅の基盤技術を確立する。また、マルチコア光増幅技術の国際標準化に向けた基礎を構築する。

3. 研究開発の成果



高効率ダブルクラッド・マルチコア光増幅器の実証

(日本電信電話、フジクラ、大阪府大、島根大)

クラッド励起によるファイバー括増幅に関して12コア EDFAを作製し、その高効率性を明らかにした。 (1)ダブルクラッド・マルチコアEr/Yb添加ファイバ(図1-1)し試作すると共に、MCFピグテイルをもつ空間結合 型励起/信号コンバイナモジュール(図1-2)を試作し、 それらを接続してクラッド励起により12コアー括増幅を 達成した。

(2) 本光増幅器では、5 m長のダブルクラッド・マルチコ アEr/Yb添加ファイバを用いてC帯増幅(図1-3)を実現 すると共に、高利得係数 7.1-9.6 (dB/W)を確認した (図1-4)。

クラッド励起とコア直接励起の消費電力比較と 12コア光増幅器プロトタイプ

(日本電信電話、大阪府大、フジクラ)

クラッド励起マルチコアEr/Yb添加ファイバ増幅器(MC-EYDFA)の消費電力について、従来のコア直接励起Er添 加ファイバ増幅器(EDFA)をコア数分使用した場合との 比較を行い、その結果を用いて、クラッド励起(一括増 幅)マルチコア光増幅の消費電力削減効果を評価した。 また、12コア光増幅器プロトタイプを作製し、総体積削減 効果を評価した。

- (1)クラッド励起がコア励起より低消費電力となる光増幅 器環境温度と出力パワーの条件があるが、表2-1のように実用条件下において、クラッド励起マルチコア光増 幅の低消費電力性を確認した。
- (2) 図2-2に示すように19インチラックマウントタイプの12 コア光増幅器プロトタイプを作製した。本光増幅器は従 来光増幅器をコア数分(12台)使用した場合と比較して、 総体積を1/8に低減できている。



図1-1 ダブルクラッド・マルチコアEr/Yb添加ファイバ端面



図1-3 光増幅器構成·評価系



図2-1 クラッド励起とコア励起の消費電力比較





図1-2 MCFピグテイル励起/信号コンバイナモジュール構成・外観



表2-1 クラッド励起とコア励起の消費電力比較

環境温度	光増幅器出力	消費電力比
55 °C	─1 dBm以下	2/3
65 °C	+8 dBm以下	2/3
	+4 dBm以下	1/2

12コアEDFA

12コアファイバ伝送実験用・MCF相互接続動態展示 用マルチコア光増幅器の作製

(日本電信電話、フジクラ、大阪府大、島根大、千歳科技大)

- (1) 12コアファイバ伝送実験用光増幅器として、7コアEDF 2本の外 周各6コアを使用したマルチコア光増幅器を作製し、課題ウと連 携して実施した伝送実験へ適用して伝送容量積 1 Eb/s.km超の 達成に貢献した。本マルチコア光増幅のコア平均の利得は 14.2 dB、雑音指数5.2 dB以下である。なお、本マルチコア光増 幅器では、隣接コア間で信号伝搬の向きを反対に設定し、通常 構成のマルチコア光増幅器と比較してコア間クロストークを -45 dBから -53 dBへ低減した。(図3-1, 3-2)
- (2) 課題146との連携で実施した7コアファイバ相互接続実験において、7コア光ファイバ増幅器を作製し動態展示を行った。(図3-3, 3-4)



(日本電信電話、フジクラ、大阪府大)

クラッドを細径化したEDFを作製し、そのバンドルEDFを用いてマオコ ア用光増幅器を試作・評価した。

- (1) クラッド径60 μmのEDFを試作し、EDFの各種特性パラメータを測定 すると共に、利得係数約3.5 dB/m と良好な光増幅特性を確認した (図4-1)。
- (2) 細径EDFバンドルをPLC型WDMカプラアレイを用いて光ファイバ増 幅器を構成し、C帯において平均利得約 23 dB、雑音指数 5.1 dB以 下の7コア用光ファイバ増幅器を作製した(図4-3)。

表4-1 細径EDFのパラメータ

λc (μm)	MFD	(µm)	Cladding dia.	Coating dia. (µm)	
	0.98 μm	1.55 μm	(μm)		
0.92	3.8	6.0	59.9	182	



図3-1 12コアファイバ伝送用光増幅器構成



図3-3 7コアファイバ伝送デモ用光増幅器外観







図4-3 バンドル化細径EDF の利得・NF スペクトル



強度変調光及び電気スペクトラムアナライザを用いた MC-EDFA単一波長を用いたコア間クロストーク測定法

(日本電信電話、大阪府大、フジクラ)

従来の光スペクトラムアナライザを用いたコア間クロストーク測定方法 では単一波長での測定ができない点を解決するために、強度変調光 及び電気スペクトラムアナライザ(ESA)を用いたMC-EDFAのコア間ク ロストーク測定を提案し適用性を確認した。(図8)

- (1) 変調周波数はコア間クロストーク測定値に影響を与えないことを明 らかした。
- (2) 利得一定の場合、コア間クロストークはMC-EDFA出力光パワーに 依存しないことを確認した。



クラッド励起及びコア直接励起のハイブリッド 励起を用いたMC-EDFA利得制御

(日本電信電話、大阪府大、フジクラ、島根大、千歳科技大)

ダブルクラッドMC-EDFを用いたMC-EDFAにおいて、クラッド 励起-コア直接励起のハイブリッド励起を用いたMC-EDFAを提 案し、MC-EDFA利得制御について制御特性を調べた。

- (1) 本MC-EDFAのコンセプトを図9-1に示す。クラッド励起LDは 出カー定で駆動し、コア直接励起LD出力を調整することで光 増幅器利得を一定に制御する。
- (2) 単一EDFハイブリッド励起、及び多段増幅ハイブリッド励起 共に一定の入力信号光パワー以下で利得制御が実現できる ことを確認した(図9-2)。



25

(a)

Cladding Pump Power: 1.27 W



- シングルクラッドおよびダブルクラッド構造のビスマス添加ファ イバを作製し、1.3 μm帯増幅を確認した。
- (1) 1.3 µm帯光増幅器用のシングルクラッドのBi添加光ファイ バをVAD法で作製し、石英ガラスより屈折率の低い材料で コーティングしたダブルクラッドファイバを作製し、従来より OHイオン濃度の低下した光ファイバの作製法を確立し、1.3 µm 帯において利得約8 dBの利得の光増幅動作を確認した (図10-1)。
- (2) 円形ダブルクラッドファイバの利得特性(図10-2)とD型ダブ ルクラッドファイバ(図10-3)利得特性(図10-4)を比較した結 果, D形ダブルクラッドファイバは光ファイバ長に対して飽和 せずにリニアに比例すること、単位距離当たりの利得も向上 していることを明らかにした。
- (3) 従来液浸法でコア作製してきたが本研究では気相成長法 によるBi添加石英プリフォームに成功し、六角形ダブルク ラッドファイバを作製した(図10-5)。
- (2) 808 nm光を第1クラッドへ入射した場合に、図10-6に示す 利得の励起光パワー依存性が得られ、10 dBの利得を確認 した。
- (3) 808 nm光励起法の検討では、①ハーフミラー+レンズ系に よる1300 nm光と808 nm光合波法、②1300 nm光入力ファイ バは六角形ファイバと融着接続し、斜め研磨MMF光ファイバ (70度研磨)による808 nm光斜め外部励起法、③平行で極 近傍接近した1310 nmと808 nmファイバ+レンズ系による合 波法の3方法で検討した。その結果③の方法が、一番励起 効率が優れていることを明らかにした。
- (7)808nmLDコア励起によるBDF+EDFカスケード接続により
 1310nmおよび1490nmの光増幅実験を行い励起方向の違い
 により2.34dB,2.64dBの増幅利得を得た。



図10-3 D型ダブルクラッドBi添加光ファイバ断面









ん

マルチコア光増幅用ファイバのアプリケーション

(大阪府大、日本電信電話)

C帯とL帯波長域の信号光に対して同時増幅が 可能な並列増幅型ファイバ増幅器の増幅媒体 にマルチコア増幅用ファイバ(バンドル型EDF) を適用することを提案し、増幅特性を確認した。

(1) C帯増幅部ではバンドル型EDF(7本)のうち1
 本のEDFを使用し、L帯増幅部では残り6本の
 EDFを折り返して直列接続して 光アンプを構成した(図11-1)。
 (2)C帯WDM信号及びL帯WDM信号の同時増幅

動作を確認した(図11-2)。



1.7 µm帯Tm-Tb添加ファイバレーザおよび増幅器の実証

(大阪府大、日本電信電話)

当初設定目標を超える技術として、Hollowコアフォトニックバンドギャップ ファイバを用いた長波長帯伝送適用を目標とした、Tm-Tb添加ファイバを 用いた1.7 μm帯ファイバレーザおよび増幅器の検討を実施。

- (1) 1.7 μm帯動作する広帯域波長可変レーザを実証し、可変発振波長 域幅130.4 nm (1635.6 ~ 1766.0 nm)を実現した(図12-1, 12-2)。
- (2) 1.7 μm帯光ファイバ増幅器を世界に先駆けて開発した。実現した特性は、最大信号利得22.5 dB、増幅帯域は31 nm(波長1678 ~1709 nm)である(図12-3, 12-4)。





8

送信系

リング型屈折率分布を有するTwo-LP-Mode EDFを 用いたFM-EDFAの伝送実験への適用

(日本電信電話、フジクラ、大阪府立大学)

C-bandにおいてLP₀₁, LP₁₁の2つのLPモードに対応したTwo-LP-Mode EDFを用いてFM-EDFAを作製し、課題ウと連携してマルチコア・ マルチモード伝送実験へ適用した。

 (1) FM-EDFAの利得は両モードで >18 dB、モード間利得差は1.4 dB が得られ、高利得・低モード間利得差を有するFM-EDFAを実現した。
 (2) FM-EDFAを527 kmの周回伝送実験へ適用し、そのフィージビリ ティを確認した(図15-1)。



1560

1555

リング型屈折率分布を有するマルチコアTwo-LP-Mode EDFの試作

(フジクラ、日本電信電話、大阪府立大学)

C-bandにおいてLP₀₁, LP₁₁の2つのLPモードに対応した7コアのTwo-LP-Mode EDFを試作した。

- (1) 7コアは最密充填配置とし、各コアはモード間利得差を低減するために、リング型屈折率分布とした(図16-1)。
- (2) Erイオンの1530 nm近傍の吸収ピーク値は平均15.2 dB/m、コア間 ばらつき1 dB/mであり、全コアにおいて比較的短尺(10 m未満)で 増幅が可能となる十分な吸収量が得られた(図16-2)。

(3) 全コア・モードの利得およびNFは、利得が19.1-26.8 dB, モード間 利得差1.5-3.6 dB、雑音指数4.0-7.5 dBの特性を確認した(図16-3)。
(4) コア間クロストークは計算により、曲げ半径100 mm以下では-57 dB以下(2コア間)、-49 dB以下(全コア励振時のコア0)が見込ま れ、十分小さいクロストークが得られる設計となっている(図16-4)。





図16-2 各コアのEr吸収スペクトル

- Core0

----- Core2

- · - Core3

----- Core4

- - - Core6

Core5

受信系

図16-3 利得·雜音指数特性

1535

1540

1545

Wavelength (nm)

30

25

(gp²⁰

H 15

Gain, 10

1525 1530

図16-4 2コア間10-mクロストーク(1565 nm)

2分布型/遠隔励起型光增幅実現技術

MCF分布ラマン増幅

(日本電信電話、フジクラ)

(1) LDを共有する構成のMCF分布ラマン増幅用光源
(図17-1)を作製した。ここの励起光源では、PLC上に
励起光偏波合成用PBC、励起光波長合波用WDM、励
起光/信号光合波用WDMを集積した増幅用複合機能
デバイス(図17-2)を試作し用いた。
(2) 作製したMCF分布ラマン増幅用光源MCFへ適用し
増幅特性を評価して、C帯において5.7 dB以上(コア間
偏差1.4 dB)の分布ラマン利得特性を得た(図17-3)。



MCF遠隔励起増幅実験

(島根大、フジクラ、日本電信電話)

遠隔励起増幅用の7コアMC-EDFの設計・作製を行う と共に、遠隔励起光(1.48 μm帯)と信号光(1.55 μm帯) を合波するPLC型のWDMカプラアレイ(12アレイ)を作 製した。

また、試作したMC-MCFを7コアMCF伝送路へ接続し、 PLC型WDMカプラアレイを用いて遠隔励起増幅実験を 実施し、励起効率改善効果を確認した。



図18-2 遠隔励起用PLC型WDMカプラアレイ チップ外観 図18-3 遠隔励起EDFAと分布ラマン増幅の励起 光パワーに対するOSNR改善量

所要励起光パワーを

約1/4に低減

1500

2分布型/遠隔励起型光増幅実現技術



 $\lambda_{c} = 1570$ nm ~ 1600 nm

Pump LD

図21-1 光増幅特性評価実験構成

 $\lambda_{\rm p} = 1490 \text{nm}$

10

1560

1570

1580 1590

Wavelength [nm] 図21-2 OSNRスペクトル 1610

1600

1600 nmの広い信号光帯域において、OSNR偏差 が 2.1 dB の良好なOSNRスペクトルが得られるこ とを明らかにした. また, 上記帯域内の等価雑音 指数として-0.5 dB以下という良好な値を確認した.

2分布型/遠隔励起型光增幅実現技術





12

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース 報道	展示会	標準化提案	
革新的光通信インフラ の研究開発	21 (7)	7 (3)	6 (2)	118 (17)	0 (0)	11 (3)	4 (0)	
※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。								

(1)

課題ウ受託者と連携して実施したマルチコアファイバを用いた遠隔励起光伝送実験について、遠隔励起増幅技術を担当した。実験結果については、欧州光通信国際会議(ECOC2014, 2014年9月21-25日開催)のポストデッドラインペーパーに採択され、高い評価を得た。

(2)

課題ウ受託者と連携して実施したマルチコア・マルチモードファイバを用いた長距離光中継伝送実験について、光中継用のマルチモード光増幅器を担当した。実験結果については、米国光通信国際会議(OFC2015, 2015年3月23-27日開催)のポストデッドラインペーパーに採択され、高い評価を得た。

(3)

課題ウ受託者と連携して実施した32コアファイバを用いた高密度空間分割多重長距離光中継伝送実験について、光中継用のマルチコアド光増幅器を 担当した。実験結果については、米国光通信国際会議(OFC2016, 2016年3月21-25日開催)のポストデッドラインペーパーに採択され、高い評価を得た。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

<u>技術検討の方向性</u>

- マルチコア光増幅技術の適用領域拡大
- マルチモード光増幅技術との融合

<u>標準化</u>

引き続きIEC会合において定期的に技術動向報告を行い、SDM光増幅技術の標準化活動を主導

<u>製品化及び産業応用</u>

国内外通信関連市場の立ち上がりを考慮し、適切な時期での実用化を促進