

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：32706

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22419

研究課題名(和文)光ファイバ給電・無線伝送用光増幅技術の研究開発

研究課題名(英文)Optical amplification technology for radio-over-fiber transmission with optical power supply

研究代表者

小野 浩孝(Ono, Hiroataka)

湘南工科大学・工学部・准教授

研究者番号：00522343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバ給電・無線伝送の長延化に必要となる光増幅器として、ダブルクラッド・エルビウム添加ファイバ(DC-EDF)を用いたクラッド励起エルビウム添加ファイバ増幅器について調べた。励起光として給電光パワーの一部を利用することを検討し、シミュレーションにより最適な給電光(励起光)波長は1480 nm帯であることを明らかにするとともに、実験によりシミュレーション結果の妥当性を示した。また、DC-EDFのコア半径、内側クラッド半径、比屈折率差の各パラメータは、いずれも設定可能な範囲で最大値を取ることが、給電光の伝搬および効率的な光増幅に有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、光ファイバ給電・無線伝送における伝送距離長延化に必要となる光増幅技術を実現することを目的として、信号光、励起光、給電光の各波長、および増幅用光ファイバの構造の最適値を明確化した。これらの技術課題はこれまで実施されておらず、本研究により新たな光増幅技術を確立した点が学術的意義といえる。本研究の成果により光ファイバ給電・無線伝送において制御局と基地局間の長延化が可能となることにより、制御局と基地局の距離制限が大幅に緩和されることに加え、距離制限の緩和によるネットワークの柔軟な運用が可能となる効果も期待でき、現代社会を支える情報インフラの高度化に貢献できる点が社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：We have studied a cladding-pumped erbium-doped fiber amplifier using a double-clad erbium-doped fiber (DC-EDF) as an optical amplifier required for the extension of a radio on fiber wireless service network that employs power over fiber. We investigated using a portion of the delivered light power as the pump light for the amplifier. We have shown that the optimum feed light, pump light, wavelength is in the 1480 nm band by simulation, and validated the simulation results experimentally. We have also revealed that that it is effective for the propagation of feed light and efficient optical amplification to take the maximum values of each parameter of the core radius, inner clad radius, and specific refractive index difference of DC-EDF within the settable range.

研究分野：通信工学

キーワード：光ファイバ給電器 無線伝送 光中継 エルビウム添加ファイバ増幅

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信システム以降（ポスト5G）やIoT普及のインフラ技術研究の中で、アンテナ基地局を簡易化して敷設・運用コストを抑えるとともに、災害時においても安定した基地局運用を行うために、光ファイバ無線伝送と光ファイバによる基地局への電力供給を簡易に行える光ファイバ給電・無線伝送の研究が進められている。

これまでの光ファイバ給電・無線伝送は制御局とアンテナ基地局間が比較的近い短距離システムを想定したものであった。一方、基地局の数が膨大になると制御局は収容容量を超えてしまうことにより最近接の制御局への収容ができずに遠方の制御局への収容となり、制御局と基地局の距離が長延化することにより光中継が必要となる。光ファイバ給電・無線伝送では伝送用の光ファイバとしてダブルクラッド光ファイバを使用し、1本の光ファイバで信号光と給電光を同時に伝送する。信号光の光中継には光増幅器、特に、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）が利用されるが、従来光ファイバ通信に使用されてきたEDFAの増幅用光ファイバはシングルクラッド構造であるため、給電光を伝搬させることができない。そのため、光給電を可能とするダブルクラッド構造の増幅用光ファイバを用いたEDFAが必要となる。EDFAには、増幅できる信号光波長帯や、増幅用光ファイバを励起するための励起光波長帯がそれぞれ複数あるため、ダブルクラッド構造の増幅用光ファイバを用いるクラッド励起EDFA（CP-EDFA）において、電力効率の高い光増幅と光給電を可能とする最適な信号波長帯と励起光波長帯の組み合わせ、およびコア半径、クラッド半径などのダブルクラッド構造パラメータを明らかにすることが重要である。さらに、給電光波長を励起光波長帯に一致させ、給電光の一部をCP-EDFAの励起に利用するような光中継形態を取り得るかどうかは、制御局と基地局の間にあって電力供給がない場所に設置され、CP-EDFAへの励起光を制御局から伝送させることになる光ファイバ給電・無線伝送における光中継では、制御局に設置する光源が給電光のみでよいか、あるいは給電光と励起光の両方が必要となるかで、システム全体の構成に影響を与える。

2. 研究の目的

上述の背景に鑑み、光ファイバ給電・無線伝送光中継用CP-EDFAに関して、①信号波長帯と励起光波長帯の最適な組み合わせは何か、②給電光の一部をCP-EDFAの励起光として利用できるか、③光増幅と光給電の電力効率の高いダブルクラッド構造パラメータは何か、が研究課題となる。

そこで本研究では、電力効率の観点からCP-EDFAについて、(1)信号光、励起光、給電光の各波長の最適化、および給電光の励起光利用の検討、(2)増幅用のダブルクラッドファイバ構造の最適化、(3)実験による最適パラメータの実証、を行うことにより光ファイバ給電・無線伝送の光中継に適したCP-EDFAを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 信号光、励起光、給電光の各波長の最適化、および給電光の励起光利用の検討

EDFAには図1のように信号波長帯および励起波長帯が複数ある。本研究では、これらの信号光波長と励起光波長の組み合わせに対し、伝送光ファイバにおける給電光および励起光の減衰、ならびにCP-EDFAにおける給電光の減衰量を考慮するとともに、CP-EDFAの増幅特性（利得・出力・雑音の各特性）のシミュレーションにより得られ

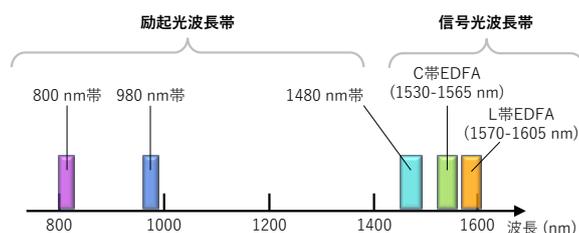


図1 EDFAの信号波長帯および励起波長帯。

る信号光の光中継伝送を可能にする増幅特性とを勘案し、且つ給電光の減衰を最大限抑制して光増幅と給電光の電力効率を最大化する信号光、励起光、給電光の各波長を明らかにする。

(2) 増幅用のダブルクラッドファイバ構造の最適化

CP-EDFAの増幅用ファイバにおいて、信号光が伝搬するコア半径は信号光の増幅特性に影響する。また、クラッド励起の励起方式を採用することにより、内側クラッドを伝搬する給電光を励起光としても利用することができる。その場合は、伝搬する内側クラッド半径は伝送できる給電光パワーに影響するだけでなく、その大きさにより励起光パワー密度が変化するため信号光の増幅特性にも影響を与える。本研究では、CP-EDFAの増幅特性をシミュレーションにより計算することにより、所望の給電光パワーを伝送でき、且つ信号光の光中継伝送を可能にする増幅特性が得られるコア半径およびクラッド半径を明らかにする。

(3) 実験による最適パラメータの実証

ダブルクラッド・エルビウム添加ファイバを用いた EDFA を作製し、シミュレーションによる結果を実験的に検証する。

4. 研究成果

(1) 信号光、励起光、給電光の各波長の最適化、および給電光の励起光利用の検討

CP-EDFA のシミュレーションは、励起光、信号光、自然放出増幅 (ASE) 光の連立伝搬方程式を基本に、それぞれ波長における伝搬損失も考慮したモデルを用いて数値計算により行った。信号光波長帯として C 帯および L 帯の両波長帯について調べた。信号光波長は TWDM-PON の信号光波長を参考に、C 帯および L 帯それぞれ 1530.33~1542.14 nm、および 1596.34~1601.46 nm の 4 チャンネル波長分割多重 (WDM) 信号とした。CP-EDFA 利得条件は、伝送ファイバ入力 0 dBm/ch を仮定し、CP-EDFA 利得 G が伝送ファイバの伝搬損失を完全補償するように設定した。すなわち、1 チャンネルあたりの入力信号光パワーを $P_{in,ch}$ として $G = -P_{in,ch}$ と設定した。励起光パワーは入力信号光パワーに対し所望の利得が得られ、且つ最短波長チャンネル利得と最長波長チャンネル利得が等しくなる、利得の波長依存性が平坦となるように設定した。CP-EDFA に用いる DC-EDF のパラメータは C 帯用、L 帯用 EDF それぞれ、1550 nm におけるモードフィールド直径が 6.1, 5.6 μm 、カットオフ波長が 0.96, 1.39 μm 、1530 nm におけるエルビウムイオンの吸収 9.0, 20.9 dB/m とした。

図 2 (a), (b) にそれぞれ C 帯、L 帯 CP-EDFA において光増幅および伝搬損失により消費される給電光パワーの給電光波長依存性を示す。同図から、信号波長帯が C 帯でも L 帯でも CP-EDFA において励起光として消費される給電光パワーは 1480 nm 帯が最も小さくなること

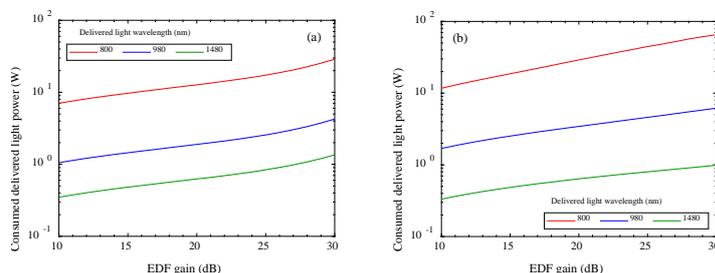


図 2 給電光波長 800, 980, 1480 nm における CP-EDFA 消費給電光パワー。(a) C 帯、(b) L 帯。

1480 nm 帯給電光パワーの消費量は、C 帯において、800 nm 帯の 4.9%, 980 nm 帯の 32.9%、L 帯において 800 nm 帯の 2.5%, 980 nm 帯の 27.0% である。この消費給電光パワーを基に各給電光波長におい

て、必要となる伝送ファイバ入力光パワーを計算した結果を図 3 に示す。800 nm 帯は伝送ファイバ入力光パワーが 10 kW を超え、980 nm 帯も光増幅器の利得が大きくなると 10 kW を超えることになり、実現が難しいと考えられる。一方、1480 nm 帯最適波長では信号波長帯 C 帯では数 10 から数 100 W、L 帯では数 10 W より小さくてすみ、ファイバ入力光パワーは現実的な値となる。したがって、給電光のパワーの一部を CP-EDFA の励起光として利用する観点においても 1480 nm 帯は最適波長帯といえる。

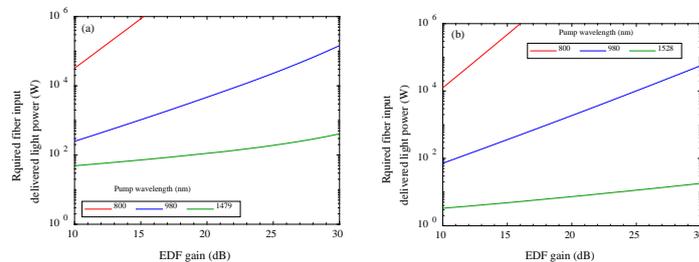


図 3 給電光波長 800, 980, 1480 nm における伝送ファイバ入力光パワー。(a) C 帯、(b) L 帯。

図 4 に給電光波長帯 1480 nm 帯における CP-EDFA 消費給電光パワーの波長依存性を示す。

C 帯 CP-EDFA では給電光波長として 1440~1490 nm の範囲で調べ、利得値に関わらず給電光波長 1479 nm のときに消費される給電光パワーが最小となった。L 帯 CP-EDFA では C 帯よりも信号波長が長波長にあることを考慮し、給電光波長として 1440~1540 nm の範囲で調べ、給電光波長 1528 nm のときに消費される給電光パワーが最小となった。

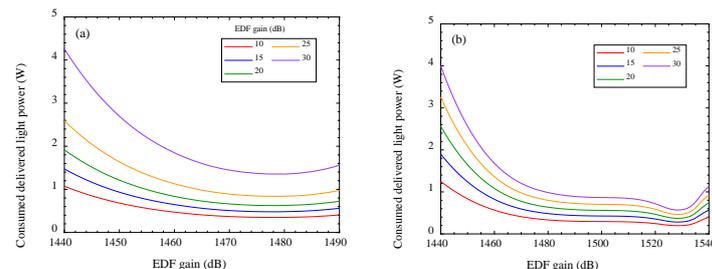


図 4 給電光 1480 nm 帯における CP-EDFA 消費給電光パワーの波長依存性。(a) C 帯、(b) L 帯。

(2) 増幅用のダブルクラッドファイバ構造の最適化

DC-EDF パラメータとして、コア半径、内側クラッド半径、コアと内側クラッドとの比屈折率差 (Δn) の最適値をシミュレーションにより調べた。CP-EDFA シミュレーションは第 2 節と同様に行い、入力信号光パワーは -20 dBm/ch、利得は 20 dB とした。図 5 に光増幅および伝搬損失により消費される給電光パワー(単位 W)の等高線マップを示す。横軸をクラッド半径、縦軸をコア半径とした。C 帯および L 帯共にコア半径が大きくなるほど、また、内側クラッド半径が小さくなるほど消費給電光パワーは小さくなる傾向にある。コア半径が大きくなると消費給電光パワーが小さくなるのは、大きなコア半径ほど光増幅に必要な DC-EDF 長が短くなるためである。内側クラッド半径が小さくなると消費給電光パワーが小さくなるのは、内側クラッド半径が小さい方が小さい励起光パワーで必要な励起光パワー密度が得られるためである。一方、伝送する給電光パワーの観点からは内側クラッド半径は大きい方が有利であるため、内側クラッド半径は消費給電光パワーと伝送給電光パワーとでトレードオフになる。

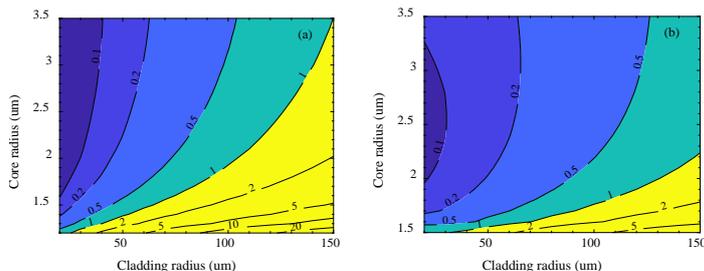


図 5 コア半径およびクラッド半径に対する CP-EDFA 消費給電光パワー(単位 W)の等高線マップ。(a) C 帯、(b) L 帯。

図 6 に、横軸をクラッド半径、縦軸をコア半径とした給電光パワー比の等高線マップを示す。

ここで、給電光パワー比は CP-EDFA 入力給電光パワーに対する CP-EDFA 透過給電光パワーの比である。C 帯および L 帯共にコア半径および内側クラッド半径が大きくなるほど給電光パワー比が大きくなり、給電光の EDFA 透過率が增加する。すなわちコア半径および内側クラッド半径はできるだけ大きいほうがよいことになる。

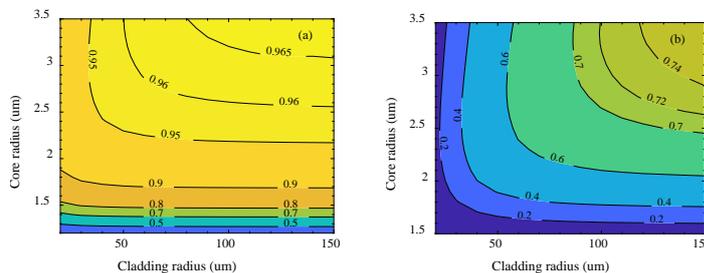


図 6 コア半径およびクラッド半径に対する給電光パワー比の等高線マップ。(a) C 帯、(b) L 帯。

図 7 に、消費給電光パワーの非屈折率差依存性を示す。コア半径は、調べた Δn 範囲内でシングルモード条件となる最大値の $2.7 \mu\text{m}$ 、内側クラッド半径は、標準ファイバの外径 $125 \mu\text{m}$ を考慮して $55 \mu\text{m}$ とした。C 帯および L 帯共に Δn が大きくなるほど給電光パワー比が大きくなる結果が得られた。

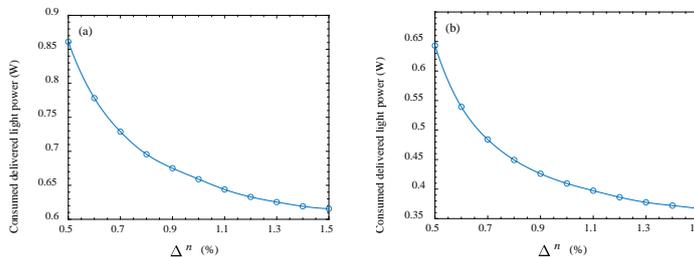


図 7 CP-EDFA 消費給電光パワーの比屈折率差依存性。(a) C 帯、(b) L 帯。

(3) 実験による最適パラメータの実証

図 8 に給電光波長依存性の実験系を示す。本実験では、DC-EDF としてマルチコア DC-EDF を使用し、そのうちのひとつのコアを利用した。また、信号光の光増幅の代わりに各給電光波長を用いたときの DC-EDF からの ASE 出力光パワー密度を、光スペクトラムアナライザを用いて測定した。

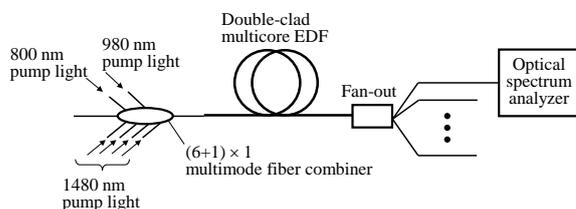


図 8 給電光波長依存性を調べる実験系。

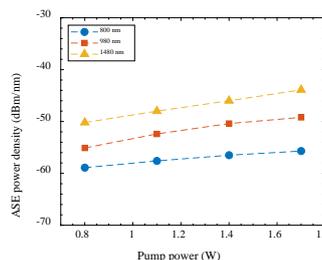


図 9 1550 nm ASE 出力光パワー密度の給電光(励起光)パワー依存性。

DC-EDF への給電光(励起光)入力は(6+1)×1 マルチモードファイバ・コンバイナを使用した。

図 9 に各給電光波長における 1550 nm ASE 出力光パワー密度の給電光(励起光)パワー依存性を示す。信号光、励起光、給電光の各波長の最適化に於けるシミュレーション結果と同様に、給電光波長 1480 nm、980 nm、800 nm の順に増幅効率が大きい結果が得られ、給電光波長帯としては 1480 nm 帯が最適であることが実験的にも裏付けられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小野浩孝
2. 発表標題 クラッド励起エルビウム添加ファイバ増幅器の励起波長依存性
3. 学会等名 応用物理学会 秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Ono and M. Yamada
2. 発表標題 Analysis of pumping wavelength band of cladding-pumped erbium-doped fiber amplifier
3. 学会等名 International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technology (EXAT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野浩孝, 梅原大樹, 山田誠
2. 発表標題 光ファイバ給電・無線伝送用光増幅技術の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 光通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野浩孝, 梅原大樹, 阿部誉也, 山田誠
2. 発表標題 クラッド励起エルビウム添加ファイバ増幅器のファイバパラメータ依存性
3. 学会等名 応用物理学会 春季講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------