平成19年度 卒業論文

レーザ共振器損失補償用・短尺高濃度 Er 添加 ファイバ増幅器の製作

学籍番号 0412010

稻富 友一

- 電子工学科 光エレクトロニクス講座
 - 指導教員 上野芳康 准教授
 - 提出日 平成 20 年 2 月 29 日

指導教員印	学科長印

平成 19 年度 卒業論文

レーザ共振器損失補償用・短尺高濃度 Er 添加 ファイバ増幅器の製作

学籍番号 0412010

稻富 友一

電子工学科 光エレクトロニクス講座

指導教員 上野芳康 准教授

概要

光を光で制御する全光通信は、伝送速度が従来のものと比べはるかに上回るため、研究 が盛んに行われている。この全光通信に必要不可欠な光クロックパルスの発生の一つとし て、DISC-Loop 型光クロックパルス発生器がある。本研究ではこの DISC-Loop 型光クロッ クパルス発生器の共振器周波数を高くすることにより、エタロンの透過スペクトルに含ま れる不要なモード成分の数を減らし、発生するパルスの品質向上を試みた。

共振器周波数は共振器長に反比例している。DISC-Loop 型光クロックパルス発生器内に 組み込まれている光ファイバ増幅器が有している長さは2台で17m程度と長いため、短尺 化した光ファイバ増幅器を製作した。これにより、共振器周波数を高くすることが出来た。

光ファイバ増幅器の利得に関して、パルスが発生するためには、発生器内を一周する間 にパルスが受ける素子の損失を上回る利得が必要となってくる。必要な利得は発生させる パルスの繰り返し周波数や構成素子によって変わってくる。今までのファイバ増幅器では 非飽和利得+35dB 程度なので、この値以上を目標とした。測定結果より、製作したファイ バ増幅器の全長と利得はそれぞれ 4.8m、+44.1dB であった。 目次

笛	1	音	序論
77	Т	÷	/] / 日田

第2章 研究	究の背景と目的	2
2.1 光	通信の技術分野	2
2.2 エ	ルビウム添加ファイバ増幅器	4
2.2.1	吸収、自然放出、誘導放出	4
2.2.2	信号増幅	4
2.2.3	基本增幅器構成	8
2.2.4	エルビウム添加濃度	11
2.2.5	雑音指数	12
2.3 DI	ISC-LOOP 型光クロックパルス発生器	15
2.3.1	共振器周波数	15
2.3.2	パルス発生の閾値利得特性	17
2.3.3	シングルモードとマルチモード	17
2.4 研	究の目的	18

第3章 EDFAの製作	19
3.1 構成素子と光ファイバの融着	19
3.2 EDF の長さによる利得比較	23
3.2.1 測定する EDF 長の選定	23
3.2.2 測定構成と結果	25
3.3 励起光の透過量測定	28
3.4 カスケード型双方向励起	32
第4章 製作 EDFA の特性測定	35
4.1 増幅特性評価	35
4.2 雜音計算	39
4.3 パルス発生評価	39
第5章 結論	42

参考	文	献
~ ~		

44

第1章 序論

現在の通信システムにおいて、インターネット環境の発展によって、利用者の増加、ネ ットワーク上のデータ量の急増、また送受信されるデータの容量も増加し続けている。今 現在の光通信システムでは光信号を電気信号に変換し、電気信号で信号処理をする必要が あるため伝送速度に限界がある(~40Gbit/s)。これは、電子が原子に衝突することで起こ る電子のドリフト速度の限界によって生じてしまう。この伝送速度を高めるために電気信 号処理を必要としない光を光で制御する全光通信の研究が行われている。

全光通信において光クロックパルスを発生させる方法の1つに、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier、SOA)を用いた DISC (Delayed-Interference Signal-Wavelength-Converter、遅延干渉波長変換) – Loop型パルス発生器がある。DISC-Loop型パ ルス発生器は安定性、低電力、集積化などの特徴から研究が進められている[1]。本研究は、 パルスの時間的発生の均一化など、パルスの品質を上げるために、パルス発生器の共振器 長に依存している共振器周波数を高くすることを試みた。

第2章 研究の背景と目的

2.1 光通信の技術分野

近年のネットワークでは、インターネット環境の充実により動画などの容量が大きいデ ータが爆発的に増大し続けており、通信ネットワークの大容量化、高速化が必要となって きている。

光通信では波長多重(Wavelength Division Multiplexing, WDM)通信(図 2.1(a))と光時分 割多重(Optical Time Division Multiplexing, OTDM)通信(図 2.1(b))などが研究されている。 WDM 通信とは、一本の光ファイバに一定の波長間隔で分割した複数の波長を多重して通 信を行うものである。この通信では搬送波の波長が異なる必要がある。同一の波長の場合、 通信中にそれぞれのデータが混在してしまう可能性がある。そのため、同一の波長が重な らないようにするために波長変換が必要となってくる。

一方 OTDM 通信とは、同じ波長の光信号を時間で分割し多数のチャンネルに割り当てる 方式である。これにより、ファイバあたりの伝送容量を高めることが出来る。

将来のネットワークでは更なるデータ容量の増大が見込まれるため、WDM 通信と OTDM 通信の2つを組み合わせた新たな通信方式が研究されている。



(a)



(b)

図2.1 波長多重通信と時間多重通信の模式図

- (a) 波長多重通信の模式図
- (b) 時間多重通信の模式図

2.2 エルビウム添加ファイバ増幅器

エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier)とは、光ファイバ 中に希土類元素であるエルビウム(Er³⁺)を添加した EDF (Erbium-Doped Fiber)を増幅媒体 に用いたものである。エルビウムは光ファイバの最低損失波長である 1550nm 帯に対応す る遷移を持っていることが特徴である。

光ファイバ通信が単一の波長で行われている場合はもちろん、WDM 通信によって複数 の波長で通信が行われる場合でも、EDFA は光信号を電気信号に変換せずに増幅できるこ とから、長距離の光ファイバ伝送において光増幅器として広く使われている。

2.2.1 吸収、自然放出、誘導放出

光通信に必要な光源のレーザは、単一色(単一波長)であり、指向性があり、光の位相がそ ろっている。レーザとは、「Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation」の頭文 字をとったもので、「放射の誘導放出による光増幅」という意味がある。光増幅を知るに は吸収、自然放出、誘導放出の基本的な現象を理解する必要がある。図 2.2 にそれぞれの 概念図を示した。

吸収とは、基底状態のエネルギー準位(E₁)とそれより上にあるエネルギー準位(E₂)において図 2.2(a)に示すようにある波長 (2 準位間できまる: E₂- E₁=h ν , h:プランク定数、 ν :振動数)の光が入射すると物質中の電子は上位の(高い)エネルギー準位に励起することを言う。

自然放出とは図 2.2(b)のように、励起状態にある原子がある確率(物質で決まる)で、基 底状態になろうとする時にその差のエネルギーを光として放出することを言う。

誘導放出とは、図 2.2(c)のように、励起状態にある原子に、自然放出と同じ波長の光が 入射すると、励起状態の原子が刺激され基底状態に戻る。そのときに入射光と同じ波長、 同じ位相の光が増幅されて放出される。これを誘導放出と言う。

2.2.2 信号增幅

EDFA の増幅方法に関しては、EDF 中の電子を励起光で励起させ、励起電子を下準位より も上準位に多く配置する、反転分布状態にすることにより、誘導放出を可能にする。この 反転分布状態において増幅させたい信号光が通ることで、誘導放出が起こり、信号光は増 幅して出てくる。

エルビウムイオンには図 2.3 に示すように主に 810nm 励起帯、980nm 励起帯、1480nm 励 起帯のエネルギー準位が存在する。励起波長帯に応じて利得効率、出力特性、雑音特性な どが異なる。現在は、980nm 帯での励起において利得が一番大きくなると報告されている ので[2]励起光源は 980nm のレーザが主流になっている。

EDFA の特徴としては

- ・高利得が得られる
- ・飽和出力が高い

- ・広帯域波長での増幅が可能
- ・偏波無依存
- ・低雑音
- ・他のファイバとの接続が容易

などがあげられる。これらの特徴により現在の光ファイバ通信において必要な素子となっている。



図2.2 エネルギー関係図

- (a) 吸収(b) 自然放出(c) 誘導放出



図2.3 エルビウムイオンのエネルギー準位図

2.2.3 基本增幅器構成

EDFA の基本構成には3つの種類がある。それぞれの構成は図 2.4 に示したものである。 構成は、信号光と励起光の伝播方向が同一方向である前方励起系、伝播方向が逆である後 方励起系、励起光を順方向と逆方向の両方から供給する双方向励起系である。全ての基本 構成の特徴として、雑音特性を向上させるために、増幅器の出力端に光バンドパスフィル タが配置されることがある。また、980nm 励起帯を使用する場合、前方励起系において EDF の出力側に設置される WDM カプラ、および後方励起系において EDF の入力側に設置 される WDM カプラを配置しない場合もある。表 2.1 におのおのの特徴を示す[1]。前方励 起系は雑音特性に優れており、後方励起系は出力特性に優れている。双方向励起系は低雑 音と高出力特性の両方を実現するために用いられる。

励起波長帯に関しては、低雑音増幅を目的としている前方励起系では、低雑音励起が実 現できる 980nm 帯、高出力動作を目的とした後方励起系では 1480nm 帯が一般に用いられ る。

また、EDFAの信号利得Gと出力信号光量Pourは以下の式の関係がある。

$$G[dB] = G_{f_{iber}}[dB] - \left(aL_{iso}[dB] + bL_{WDM}[dB] + cL_{BPF}[dB] + dL_{splice}[dB]\right)$$
(2.2.1)

$$P_{OUT}[dBm] = P_{f_{iber-OUT}}[dBm] - \left(aL_{iso}[dB] + bL_{WDM}[dB] + cL_{BPF}[dB] + dL_{splice}[dB]\right)$$
(2.2.2)

 $G_{fiber,} P_{fiber-OUT}$ は EDF 自体の信号利得および出力信号光量、 $L_{iso,} L_{WDM,} L_{BPF}$ はそれぞれ信号 波長におけるアイソレータ、WDM カプラ、および光バンドパスフィルタの挿入損失、 L_{splice} は融着機による接続損失を示している。それぞれの係数 a,b,c,d は自然数であり、使用 した素子の個数が入る。この式より、各構成部品の挿入損失、接続損失は EDFA の信号利 得 G、出力信号光量 P_{OUT} に直接関わってくる大きな要因となる。以上より、高効率、高出 力を有する EDFA を実現するには、高性能な EDF を用いる他に、低損失な構成部品を用い る必要がある。







(b)



(c)

図2.4 基本増幅系

- (a) 前方励起系
- (b) 後方励起系
- (c) 双方向励起系

表2.1 基本増幅系の特徴

増幅系	信号利得	雑音特性	出力特性
前方励起系	0	0	Δ
後方励起系	0	Δ	0
双方向励起系	0	0	Ø

2.2.4 エルビウム添加濃度

エルビウム添加ファイバのエルビウム添加濃度は、EDFA の高性能化を図る上で非常に 重要なパラメータである。

利得を増大させるためにはエルビウムイオンの添加量を増加させる必要がある。また、 添加量を増やすことによりエルビウム添加ファイバ長を短尺化することができる。

しかし、エルビウム添加濃度を高めていくと濃度消光による増幅効率低下を引きおこす。 濃度消光とは、エルビウム添加濃度を増加することによって励起状態にあるエルビウムイ オン同士が近接してしまい、励起エルビウムイオン間の相互作用が起こる可能性が増加す ることである。相互作用が起こることにより、二つの励起状態にあるエルビウムイオンの うち、一方はエネルギー準位の高いほうへ、もう一方は基底準位に遷移しする。これによ って EDFA の利得効率および出力特性を劣化させてしまう[3]。

2.2.5 雑音指数

信号 (Signal)と雑音 (Noise) のパワーの比を信号対雑音比 (S/N比)という。

雑音指数 (Noise Figure, NF)とは入力側の S/N 比に対して、出力側の S/N 比がどれだけ 低下したかで表されており

$$NF[dB] = 10\log\left(\frac{S/N_{input}}{S/N_{output}}\right)$$
(2.2.3)

で定義されている。

光ファイバ増幅器で発生する雑音には

- ・増幅された信号光と自然放出光との間のビート雑音
- ・自然放出光相互間のビート雑音
- ・増幅された信号光のショット雑音

・自然放出光のショット雑音

などが存在する。ビート雑音とショット雑音との大きな違いは、ビート雑音は S/N 比の光 パワーに無関係で一定となることに対して、ショット雑音は S/N 比の光パワーに比例する ことである。

雑音のなかで一番問題となるものが増幅された信号光と自然放出光(Amplified Spontaneous Emission, ASE)との間のビート雑音である。理由は、入力信号光パワーが-30dBm 以上では増幅された信号光と自然放出光との間のビート雑音が主要因となり、それ以下では自然放出光相互間のビート雑音が主要因となる。また、ショット雑音に関してはビート雑音よりも1桁小さい値をとる[4]。自然放出光単独で生ずる雑音は、出力側に帯域通過光フィルタを入れることによって減らすことができる。よって光ファイバ増幅器の雑音は、増幅された信号光と自然放出光との間のビート雑音だけで表すことができる。光スペクトラムアナライザ (Optical Spectrum Analyzer, OSA)を用いて測定するときは、雑音指数 NF は

$$NF[dB] = \frac{P_{ase}}{hG \nu \Delta \nu} \qquad (2.2.4)$$

で表すことができる。それぞれのパラメータは h はプランク定数、G は利得、 ν は信号光 周波数 [Hz]、△ ν は分解能帯域幅 [Hz]を表している。

Gに関しては

$$G = \frac{P_{out} - P_{ase}}{P_{in}} \qquad (2.2.5)$$

で表すことができる。

 P_{out} , P_{in} , P_{ase} の3つに関しては図 2.5 で示した部分の値となる。 $\Delta \nu$ に関しては

$\Delta v[Hz] = 125 \times 10^{-15} \Delta \lambda[m]$ (2.2.6)

で表すことができる。⊿λは測定した時の OSA 分解能の値である。



(b)

図2.5 雑音計算時のGの読み取り値

- (a) 入力波形
- (b) 出力波形

2.3 DISC-LOOP 型光クロックパルス発生器

DISC-Loop 型パルス発生器は図 2.6 に示した構造である。DISC-Loop は DFB-LD (Distributed Feedback – Laser Diode、分布帰還型半導体レーザ)から連続光を入射させ、 DISC にいれ、DISC の出力をそのまま入力に帰還させることによって、光クロックパルス を発生させるものである。

カルサイトの役割はパルス幅を決めるもので、エタロンは繰り返し周波数を決定するために用いられている構成素子である。

2.3.1 共振器周波数

DISC-Loop はリング状の共振器構造を持っている。出力光が同位相で重なるため共振条件は

$m \lambda = nL$ (2.3.1)

で表すことが出来る。mは任意の自然数、λは光の波長、nは共振器の屈折率、L は共振 器長である。この条件式を光の周波数 f mについて直すと

$$f_m = \frac{mc}{nL} \qquad (2.3.2)$$

となる。 c は光速である。この周波数は f m ずつ等間隔に並んでいる。この周波数間隔 f 0 である fm+1-fm は

$$f_0 = f_{m+1} - f_m = \frac{c}{nL} \qquad (2.3.3)$$

となり、この f₀を共振器周波数と呼ぶ。以上の式からわかるように、 f₀は共振器長で決まってくる。



図2.6 DISC-LOOP型パルス発生器の構成図

2.3.2 パルス発生の閾値利得特性

パルスが発生するには条件がある。それは、パルスがループを 1 周する間の周回利得 Gloop が 0dB 以上となる必要があり、式は

$G_{loop} = T_{DISC} - L_{passive} + G_{EDFA} > 0 \qquad (2.3.4)$

で表される。T_{DISC}は DISC の透過率、L_{passive} は受動素子の損失、G_{EDFA}は EDFA の非飽 和利得をそれぞれ表している。T_{DISC} や L_{passive} は発生させるパルスの周波数や、構成素 子によって値が変わってくる。利得の足りない分は EDFA の非飽和利得によって補ってい る。

2.3.4 シングルモードとマルチモード

DISC-Loopにおいて出力光スペクトルが間隔 f₀ ごとに出てくるが、それぞれのピーク成 分の隣りあった比をサイドモード抑圧比と呼ぶ。サイドモード抑圧比が小さいときはマル チモード発振、大きいときはシングルモード発振と呼んでいる。マルチモード発振の場合 は、パルスが時間的に不均一に発生してしまうなど問題がある。シングルモード発振では パルスは質のよいものが発生する。

2.4 研究の目的

DISC-Loop によって発生するパルスは、共振器周波数間隔で光スペクトルが立ってしま う。発生したパルスのモード成分はエタロンの透過スペクトルで切り取っているが、不要 なモード成分が残っている状態で発生してしまっている。従って、共振器周波数間隔を広 げることにより、シングルモード発振に近づける事ができる。それによって、パルスの発 生間隔を均一化に近づけ、パルス自体の質を上げることが出来る。

2.3.1 節で述べたように、DISC-Loop の共振器周波数は共振器長に依存している。共振器 長を短くすることで、共振器周波数が高くなる。そこで、DISC-Loop の中に入っている EDFA 中の EDF を短尺化することを第一の目標にした。これは、DISC-Loop は全長で 40m 程度、内 EDFA が 17m 程度と構成素子の中で一番長いためである。又利得に関しては、 2.3.2 節より発生器内を一周する間にパルスが受ける素子の損失を上回るため、EDFA の非 飽和利得で損失を補っている。必要な非飽和利得は発生させるパルスの繰り返し周波数や パルス幅によって変わってくる。現在では、繰り返し周波数 10GHz、パルス幅 5ps の場合 は 28dB 前後、同じ繰り返し周波数でパルス幅が 2ps の場合は 36dB 前後が必要となってく る。そこで、非飽和利得を+40dB 以上を第二の目標とした EDFA の製作を本研究の目的と した。

第3章 EDFAの作製

3.1 構成素子と光ファイバの融着

全体の構成素子として使用するのは、1550nm 帯の信号光と 980nm 帯の励起光を合波す る WDM カプラ、1550nm 帯の信号光だけを順方向に伝播させるアイソレータ、EDF とし て Liekki 社製 の Er 110-4/125、励起光源である Bookham 社製 980nm Pump Laser Module で ある。

励起光源に関しては電流電圧特性、電流出力特性を測るために、図 3.1 に示す構成を組 み測定した。Detector と Power Meter の間はコネクタ接続ではなくファイバから直接光を飛 ばしている。測定は励起光源と WDM カプラの融着前と融着後の2回行った。励起光源の 最大出力はそれぞれ 250mW と 500mW のものをそれぞれ一つずつ使用した。結果は図 3.2 のようになった。融着前の結果については、仕様書とほぼ同じような結果となった。融着 後は WDM カプラとの接続損失を考慮した場合と妥当な結果となった。

また、励起光源と WDM カプラを融着する理由は、励起光源をハイパワーにしていくと WDM カプラと励起光源をつなぐコネクタが焼ける恐れがあるために、励起光源と WDM カプラを直接融着した。融着機はフジクラ社製の FSM-50S を用いた。

融着を行った際の問題点は図 3.3 のように、融着後に融着機が「気泡である。」と表示 していることである。融着機は接続部の写真を側面から光をあて、ファイバを平面透過し て、コアや外径を観察しており、

・融着接続部の本来、白く見える部分に、黒い像がみえた場合

・接続部で、外径が大きく変動した場合

に、気泡と判断している。図 3.3 には、中央付近の融着部に不連続な黒いスジ(縦線)がでて いるため、これを気泡と判断している。しかし、今回融着したファイバは、偏波保持光フ ァイバ (Polarization Maintaining optical Fiber, PMF)(corning, PM980 PANDA)を使った励起光 源のピッグテールファイバと、シングルモード光ファイバ (Single Mode optical Fiber, SMF) を使った WDM カプラであった。この場合の黒いスジは、PM ファイバにある応力付与部 と SMF のクラッドでの境界面の屈折率差によって発生しているもので、融着機は気泡あり と判断しているがこれは不可避なものである。

しかし、これが実際に気泡であるかどうかを調べるには融着後のプルーフテスト(融着強 度確認のための引張り試験)を行って断線しないことを確認する必要がある。気泡の場合は ファイバ間の結合が弱くなり、プルーフテストによって断線してしまう。断線しなければ 気泡ではないので、使用することに関して問題無く使えた。

今回の融着を行った際の設定は、接続モード MM1、加熱モード 60mm で行った。MM1 モードはマルチモードファイバを融着するモードで、コア径が通常より大きいため融着有 効面積を大きくして、黒いスジを少しでも無くそうとした。





(a) 250mW_SO128668.00(b) 500mW_OC229817.0011



図3.3 スプライス写真

3.2 EDF の長さによる利得比較

3.2.1 測定する EDF 長の選定

EDFA を作るために、まず EDF の特性を知る必要がある。使用する EDF は Liekki 社製 EDF Er 110-4/125 吸収量 @ 980nm 71dB/m の高濃度のものである。各波長ごとの吸収量は 図 3.4 に示したとおりである。ピーク波長の吸収量は 1528.5nm で 110.1dB/m、978.0nm で 67.8dB/m である。EDF の長さは 0.5m,0.7m,0.8m,1.0m,1.5m の 5 種類について利得を測定し た。1.5m に関しては 0.5m と 1.0m をコネクタでつないだもので行った。

高濃度の EDF を使用したため、励起光のパワーが同じであっても、EDF の長さを数十 cm 変えただけで、利得はだいぶ変わると考えた。5 種類の長さを選んだ理由としては、 980nm の吸収量の値から、EDF の長さが 1m の時を中心に切り出した。そこから、一番利 得が出る最適な長さを見つけるために、EDF の長さを先のように変えた。



ピーク波長の吸収量 110.1dB/m @ 1528.5nm 67.8dB/m @ 978.0nm

図3.4 LiekkiEDF Er110-40/125の波長ごとの 吸収量

3.2.2 測定構成と結果

利得を測定する構成図は図 3.5 に示すような、前方励起型で測定した。前方励起型で行った理由は、使用 EDF が高濃度の EDF のため、励起光量が少なくても充分な利得がでると判断したためである。ATT を入れている理由は、入力光を調整するために測定構成に入れている。非飽和特性を測定する時は、入力光を-30dBm 程度の弱い光に設定している。利得飽和を測定する時は、ATT を 0dB から 33dB まで 3dB 刻みで入力光のパワーを変えて測定を行った。OSA の直前に 20dBATT をいれているのは、OSA の最大測定値が+20dB 程度なので測定器を守るために増幅後の光を弱めている。

非飽和利得と利得飽和を測定した結果は図 3.6 のようになった。EDF 長が一番長い 1.5m のときは最大出力パワーが+5.5dBm、非飽和利得が+9.07dB 程度ととても低い値となった。 これ以上 EDF を長くしても、信号光が EDF に吸収されてしまうため、この長さ以下で行う必要があると判断した。

逆に EDF 長が一番短い 0.5m の長さに関しては、最大出力パワーが+14.8dBm、非飽和利 得は+21.3dB であった。この長さでは非飽和利得が低く、この長さ以下ではあまり利得は 期待できないと判断した。

以上より、一番利得が出る最適な EDF の長さは 0.5m~1.5m の間にあると判断できた。

他に測定した他の 3 つの長さについては、非飽和利得の値はほとんど変わらず+28dB 程 度であった。最大出力パワーについては、0.7m が+15.1dBm、0.8m は、+13.9dBm、1.0m は +11.7dBm とややばらつきがあった。この結果から、0.7m から 0.8m あたりが最適な長さで あると考えた。

しかし、0.5m と 1.5m の 2 つと、それ以外の 3 つの長さと比べた場合、利得は大きく増 えたが目標値としていた非飽和利得+40dB とは程遠いので他の構成について考える必要が あった。

非飽和利得を大きくする方法として、今回の実験では前方励起だけで行ったため、エル ビウムを励起させる励起光源のパワーがたりないと推測した。そこで、前方励起型ではな く、後方からも励起光を入れる、双方向励起型の構成を考えた。この方法によって、利得 が大幅に増幅すると考えた。

しかし、この構成では問題となる点があった。それは、EDF の長さが短いために、前方 の励起光源から出る 980nm 光が後方の励起光源へ、逆に後方から出る励起光が前方の励起 光源に、EDF へ吸収されずに入射してしまう可能性である。もし励起光源へ励起光が入射 してしまった場合、励起光源の寿命が短くなる可能性があり、最悪の場合励起光源が壊れ てしまう恐れがある。そのため、励起光が EDF をどの程度吸収されずに透過しているのか を測定する必要があった。



図3.5 前方励起型EDFAによる利得比較



(a)



(b)

図3.6 前方励起EDFAにおけるEDF長 を変えたときの結果

- (a) 非飽和利得特性
- (b) 利得飽和特性

3.3 励起光の透過量測定

EDF を通過する 980nm の励起光透過量を測定した。ここでいう透過量とは、EDF に吸 収されずにそのまま EDF を通り抜けてきたものを指す。測定構成は図 3.7(a)のように組ん だ。1550nm の光が入る場所は完全に塞ぎ、反射もしないようにした。EDF の長さは 0.7m、 0.8m、1.0m、1.5m、の4種類を測定した。

この 4 種類の透過量と比較するものとして、2 つの EDF を用意した。1 つは CorActive 社 製 EDF EMP-980 吸収量 @ 980nm 6dB/m を長さ 17m のものを使用した。これは、現在研究 室にある EDFA の中に、CorActive 社製の同じ EDF を 15m 使用した双方向励起型が存在し ているため、比較の 1 つとして、2m 長いものを使用した[5]。

もう 1 つは、0.8m の EDF を使い、図 3.7(b)のように出力の手前の部分に WDM カプラを いれたものを測定した。最後に WDM カプラを入れることで 980nm の励起光と 1550nm の 信号光を分けることができる。

以上2つの比較対象に関しては980nmの励起光による励起光源への影響は無いため、測定した4種類のEDFの透過量を比べることで、励起光源への安全性を確かめた。

測定した結果は図 3.8 のようになった。それぞれの透過波長のピーク値は表 3.1 にまとめた。

結果から、比較対象となる 2 つの透過ピーク値は共にマイナスと弱い強度であった。そ れでも 2 つのピーク値の差は 16dBm 程開いていた。これより、問題となるのは、 CorActive EDF 17m の透過量と比べたときの Liekki の EDF であった。0.7m、0.8m、1.0m、 の長さのときの透過量は長くなるほど弱くなっていくことが分かる。それでも CorActive EDF 17m の値と比べると、3 つ全ての透過量は上回ってしまう値であった。唯一比較対象 よりも低い値をとっていた 1.5m の EDF に関しては、透過量の影響はまったくないと判断 出来るが、3.2.2 節の利得に関する結果より、あまり利得は増えないと考えられるので無理 だと判断した。

以上より、単純な双方向励起型では励起光源へのダメージを考えるとよくないことが分かった。また、吸収量を抑えるには EDF を 1.5m 近く使用すれば問題ないことが分かった。 そのため利得と透過量の両方を満足する構成を考える必要があった。

28



(a)



(b)

図3.7 EDFを通過する980nm光の透過量測定 構成図

- (a) 後方WDMカプラなし
- (b) 後方WDMカプラあり



図3.8 EDFを通過する980nm光の結果 250mWで励起

表3.1 励起光透過量のピーク時の値

EDFの種類	EDFの長さ[m]	Intensity [dBm]
Liekki	0.7	12.115
Liekki	0.8	9.182
Liekki	1.0	1.4787
Coractive	17	-8.1716
Liekki WDMカプラあり	0.8	-24.881
Liekki	1.5	-28.417

3.4 カスケード型双方向励起

単純な構成の双方向励起型の EDFA では励起光源への損傷を与えるため、構成上無理と 判断した。そこで、2 つの EDF の間に、信号光である 1550nm の光を一方向に伝送するア イソレータを入れる、カスケード型双方向励起の構成を作った。構成図は図 3.9 の構造を している。点線で囲んだ部分が EDFA となる。特徴としては、励起光である 980nm 光をア イソレータの前後で遮断している。さらに、ASE も前後で遮断しているため、利得が双方 向励起よりも上がる。

使用する EDF の長さに関しては、前方、後方で EDF は分断していると考えることが出 来る。そのため、長さは 3.2 節の結果を参考にして、利得が大きくなる長さを決めた。そ の際行った事は励起量を一番大きくしてパワーメータで測定した。前方 0.8m、後方 1.0m の時は利得 37.4dB、前方 0.8m、後方 1.5m の時は利得 37.3dB、前方 0.7m、後方 0.8m の時 は利得 44.1dB 程度であった。以上から目標値としていた利得+40dB を越えた長さは前方 0.7m、後方 0.8m であったので、この長さを使った。

この長さの組み合わせを使って、先ほど問題となった 980nm の励起光透過量をカスケー ド型双方向励起で測定した。結果は図 3.10 のようになった。透過量ピーク値は-56.8dBm で あり、これは先ほどの比較対象の値と比べて大幅に下がった。これより、980nm の励起光 が励起光源へ与える影響は無くなったと考えられる。

以上よりカスケード型双方向励起では透過量の影響を気にする必要が無くなった。また、 利得に関しても大きく増大することが出来た。



図3.9 カスケード型双方向励起構成図



図3.10 カスケード型双方向励起における透過量

第4章 製作 EDFA の特性測定

製作した EDFA はカスケード型双方向で、短尺するために全てスプライスを行った。完成したものはケース収納をして使いやすくした。完成したものの外観、および内部は図 4.1 である。内部は偏光の影響を防ぐためにテープで動かないように固定した。EDFA の全長は 4.8m となった。

4.1 增幅特性評価

カスケード型双方向励起、前方 EDF 0.7m、後方 EDF 0.8m の時の利得測定を行った。結 果は図 4.2 のようになった。測定は前方の励起パワーを固定して後方の励起パワーを変え て行った。前方励起の電流値を 100mA にした時の非飽和利得は+36.1dB であった。前方励 起の電流値を 200mA にした時の非飽和利得は 43.4dB であった。この前方の励起電流が 200mA の時は、前方励起電流 500mA の非飽和利得+44.1dB とあまり変わらなかった。よっ て、励起パワーは 500~600mW 程で充分な利得を得ることが出来る。

最大出力パワーに関しては、前方、後方の励起電流を変えて測定した。前方励起電流 100mA、後方励起電流 100mAの時は最大出力パワー+3.2dBm、前方励起電流 200mA、後方 励起電流 200mAの時は最大出力パワー+11.8dBm、前方励起電流 500mA、後方励起電流 500mAの時は最大出力パワー+18.0dBm、前方励起電流 500mA、後方励起電流 900mAの時 は最大出力パワー+20.4dBmとなった。

最後に ASE を測定した。測定構成は図 4.3(a)のように行った。測定を行った際の前方、 後方の励起電流値は先ほどの最大出力パワーを測定した時と同じ 4 種類の組み合わせで行 った。測定した ASE の結果は図 4.3(b)のようになった。ASE は 1500nm~1600nm 前後の広 範囲にしっかりと出ていた。これは、EDFA の増幅が 1500nm~1600nm 前後の広範囲で出 来ることを表している。



(a)



(b)

図4.1 完成写真

- 外観写真 内部写真
- (a) (b)



(a)



(b)

図4.2 利得特性

- (a) 非飽和特性
- (b) 利得飽和



4.2 雑音計算

カスケード型双方向励起には雑音劣化を抑える特徴もある。これは、アイソレータの後 方の EDF で発生して、前方の EDF に入射する ASE を除去することにより改善されるもの である [6]。

雑音指数の計算には式 (2.2.4) を使用した。OSA を用いて測定をし、それぞれのパラメー タの値は、信号光波長 λ = 1549.21[nm]より

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{8} [m/s]}{1549 .21 \times 10^{-9} [m]} = 1.94 \times 10^{14} [Hz]$$
(3.4.1)

となる。分解能帯域幅△vは分解能を 0.01[nm]で行ったので

$\Delta \nu[GHz] = 125 \Delta \lambda[nm] = 125 \times 0.01 = 1.25[GHz]$ (3.4.2)

となる。プランク定数 h は h=6.62×10⁻³⁴[J·s]、利得 G に関しては、OSA の値である P_{out}、 P_{ASE}、P_{in} をそれぞれ単位[dBm]→[mW]に変換してから計算をした。雑音指数の結果は図 4.4 のようになった。

これより、入力パワーが強くなると出力の S/N 比が小さくなる。これは、利得が飽和領 域に近づいているために起こる。その結果雑音指数が大きくなる。逆に入力パワーを弱く していくと出力 S/N 比が大きくなる。これは、EDFA によって入力光が増幅されるためで ある。その結果、雑音指数は小さくなる。

また、入力パワーが 0dBm 以下では雑音指数は殆ど横ばい状態になっている。0dBm 以下の雑音指数の平均は 4.2dB であった。この値はかなり低く、低雑音と言える。

4.3 パルス発生評価

製作した EDFA を使い、DISC-Loop 型パルス発生器を用いてパルス発生の評価を行った。 EDFA の非飽和利得は+44dB とし、スペクトル間隔 10GHz、パルス幅 5ps のパルス発生を 行った。発生したパルスは図 4.5 のようになった。図 4.5(b)より自己相関波形の半値幅は 6.2ps であった。図 4.5(c)より発生したパルスのサイドモード抑圧比は 38dB 程度で充分シ ングルモード発振していると判断できる値であった。



図4.4 雑音指数



図4.5 パルス発生

- (a) 光スペクトル
- (b) 自己相関波形
- (c) 実線:パルスのOE変換信号、破線:バックグランド

第5章 結論

EDFA の構成をカスケード型双方向励起にして、全体の長さを 4.8m ほどにすることがで きた。これだけ短い EDF を使うだけで、非飽和利得は+44.1dB、最大出力パワーは +20.4dBm の特性を有していた。雑音指数は計算結果から 4.2dB と低雑音であり、雑音指数 と利得の関係を確認した。低雑音に出来た主な要素は、カスケード型双方向励起の特徴の 1 つである、アイソレータをいれたことにより、ASE を除去できたことである。

また、DISC-Loopの共振器周波数は 7.1[MHz]であり、今までのものより 2[MHz]高い値をとった。

最後に DISC-Loop に EDFA を組み込み、パルス発生を行い、サイドモード抑圧比が良い パルスの確認をした。

謝辞

本研究を進めるに際し、ご指導してくださった上野芳康准教授に深く感謝します。また、 様々な助言や実験の手助けをして下さった院生の中本亮一さん、坂口淳さん、竹内宏幸さ ん、本間正徳さん、西田武洋さんに深く感謝いたします。

改めて、上野研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 鈴木 励,「半導体全光偏光変換を利用した 40GHz モードロックパルス発生の研究」,電気通信大学 修士論文,2006 年 3 月
- [2] 須藤 昭一,「光ファイバと光ファイバ増幅器」,共立出版,2006
- [3]Keiichi Aiso, [Erbium Lanthanum co-doped fiber for L-band amplifier with high efficiency, low non-linearity and low NF] OFC, vol 2, TuA6-1-TuA6-3, 2000
- [4]松本 弘一, 「光測定器ガイド」,オプトロニクス社,2004
- [5] 奥平 将俊,「200GHz 信号用高出力・低分散光増幅器の制作方法の研究,電 気通信大学 卒業論文,2007年3月
- [6]J.H.Povlsen, 「Optimizing gain and noise performance of EDFAs with insertion of a filter or an isolator」 SPIE, Vol.1581, pp.107-113, 1991
- [7] F. A. Flood, 「980-nm Pump-Band Wavelengths for Long-Wavelength-Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers」 IEEE PHOTONICA TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 11, NO. 10, OCTOBER 1999
- [8]R .G .Smart , \lceil An Investigation of the Noise Figure and Conversion Efficiency of 0.98 μ m Pumped Erbium-Doped Fiber Amplifiers Under Saturated Conditions floor IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS , VOL . 4 , NO . 11 , NOVEMBER 1992
- [9]D.M.Baney , 「WDM EDFA gain characterization with a reduced set of saturating channels」 、IEEE, Photonics Tech.Letter, Vol.8, No. 12, PP.1615, 1996
- [10]R.J.Mears, 「Neodymium-doped silica single-mode fiber lasers」 Electron.Letter, vol.16, No. 5, pp. 179-181, 1985