

## EDFA のレーザ発振による過渡応答抑制実験

Transitional response suppression experiments  
by EDFA laser lights

白澤祐介\*, 村上泰司\*\*

Yusuke Shirasawa\*, Yasuji Murakami\*\*

## Abstract

In WDM transmission systems used with EDFAs, transitional power changes of residual signal lights take place because of EDFA gain saturation, when the number of signal light wavelengths is changed suddenly. The power changes induce optical transmission property degradations, such as error rate bursts and et al.

This paper reports transitional response control and suppression experiments in EDFA signal lights. The suppression was successfully achieved by using EDFA laser lights. The laser lights are generated in loop cavity, composed by an EDFA, three optical circulators, and a fiber grating.

## 1. はじめに

光ファイバ通信では、一つの端末からの信号が一本の光ファイバを占有することは経済的ではないので、多くの端末からの信号を集めて一本の光ファイバで伝送する。複数の信号を集めて一本の伝送路で送るようにすることを多重化と呼び、多重化する方式の一つに、波長分割多重(WDM: wavelength division multiplexing)方式がある[1]。この WDM 伝送における長距離伝送中継器として、エルビウム添加光ファイバ増幅器(Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier: EDFA)がよく用いられる。

EDFAは、光ファイバのコアに $\text{Er}^{3+}$  (エルビウム) の希土類イオンを添加することにより、このイオンからの固有な遷移での誘導放出を用いた光増幅器である[2]。 $\text{Er}^{3+}$ イオン誘導放出の波長としては $1.53\sim 1.56\ \mu\text{m}$  ( ${}^4\text{I}_{13/2}\sim {}^4\text{I}_{15/2}$ ) の遷移線がよく知られており、この波長帯が光ファイバ通信の最低損失波長域にあるため光通信への応用が積極的に行われている。EDFAは、光を直接増幅できる光増幅器であり、高出力、高利得、広帯域、低挿入損失、偏波無依存などの優れた特性を持つ代表的な光増幅器であり、最も早く実用に供せられた[3]。

WDM 伝送システムで用いられる EDFA において、EDFA への入力信号光波長数が突然変化すると、相互利得飽和により残留信号光出力が過渡的な変化(過渡応答)を起し、伝送特性劣化などを引き起こす原因となる[4]。この光波長変化は、光 add/drop 多重化装置等の

\* 大阪電気通信大学大学院 工学研究科, 現在協和テクノロジーズ株式会社

\*\* 大阪電気通信大学 情報通信工学部 通信工学科

光スイッチによる光パス変更によってもたらされる[5]。また、過渡応答は信号光を add/drop する際に EDFA の利得が変動するのが原因であるため、過渡応答を抑制するには EDFA の利得を一定に保つ必要がある。

過渡応答を抑制する方法には、光によるフィードバックと電気によるフィードバック等の方法がある。一例として、光によるフィードバックは、EDFA 内に信号光とは別ルートでループを作り、そのループにおいて EDFA の利得を用いて発振させ、その発振光を利用して EDFA の利得を一定に保つものである。電気によるフィードバックは、励起光源のパワを制御する制御装置を使用し、EDFA の利得を一定に保つものである[6]。また、電気と光の両方のフィードバックを組み合わせた構成での研究も行われている[7]。

本論文では、光によるフィードバックに着目し、数ある過渡応答抑制方法の中からサーキュレターループレーザ発振(FG タイプ)を用いて、どの程度過渡応答が抑制されるのか検証した。

## 2. 動作原理

### 2.1 過渡応答

WDM 伝送において EDFA による一括増幅を行うと、信号光の add/drop 時に伝送速度の制限や雑音を引き起こす。この現象によって信号光に引き起こされる過渡的な変化を過渡応答と言う。EDFA による増幅前と増幅後のパルス波形での変化を、図 1 に示す。図 1 に示すようにパルス波形の立ち上がり(add)時に過渡応答が見られる。

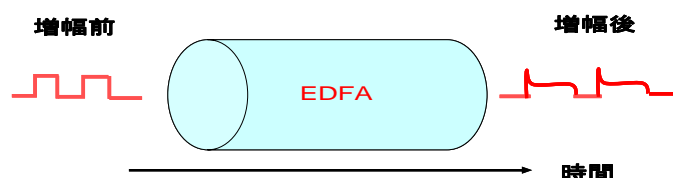


図 1. EDFA の信号光増幅による過渡応答

### 2.2 レーザ発振による過渡応答抑制

実験の動作原理を説明するため、レーザ発振あり、なしの状態遷移図を図 2 に示す。

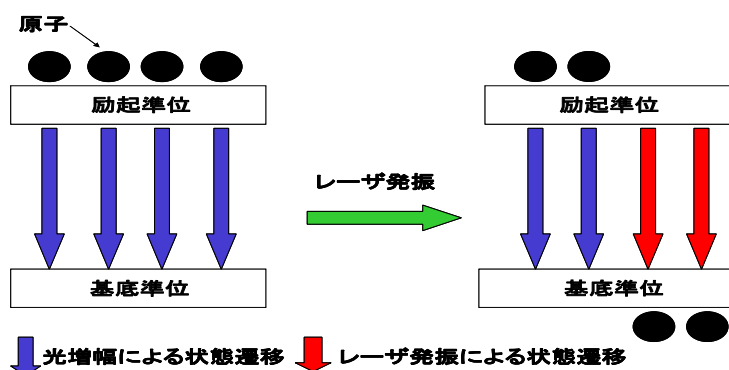


図 2. レーザ発振光あり、なしの状態遷移図

レーザ発振前の状態でかつ光スイッチのスイッチ OFF 時では原子に照射する光がないため、励起準位に大量の原子が蓄積される。この状態でスイッチ ON 時にすると、入力する信号光に誘導され大量の原子が基底準位に急激に遷移し、過渡応答が生じる。そこで、図 2 のレーザ発振後のように、光スイッチ OFF 時においても常に一定の光を照射する状態を作り、励起準位に蓄積される原子の数を減らすことで過渡応答を抑制する。

### 3. 実験内容

#### 3.1 増幅利得

レーザ発振時は励起準位に蓄積される原子数が減るので、増幅利得が下がると予想される。そこで、レーザ発振時の増幅利得を確認し、レーザ発振なしの場合と比較した。信号光パワーは、WDM 伝送ではよく使用される $-10\text{dBm}$  とし、信号光波長は後の実験で使う光フィルタの透過特性を考慮し、 $1535\text{nm}\sim 1565\text{nm}$  とした。EDFA 増幅利得測定接続図を図 3、およびサーキュレーターレーザ発振 (FG タイプ) 時の EDFA 増幅利得測定接続図を図 4 に示す。

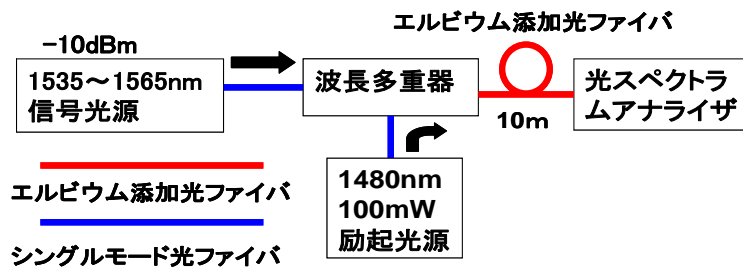


図 3. EDFA 増幅利得測定接続図

図 3 の構成では、波長  $1535\text{nm}\sim 1565\text{nm}$ 、光パワー  $-10\text{dBm}$  の信号光と、波長  $1480\text{nm}$  光パワー  $100\text{mW}$  の励起光を波長多重器で多重化させ、EDF で一括増幅を行い、光スペクトラムアナライザで増幅利得を測定する。レーザ発振がない状態なので、純粋な EDFA の増幅利得を測定している。

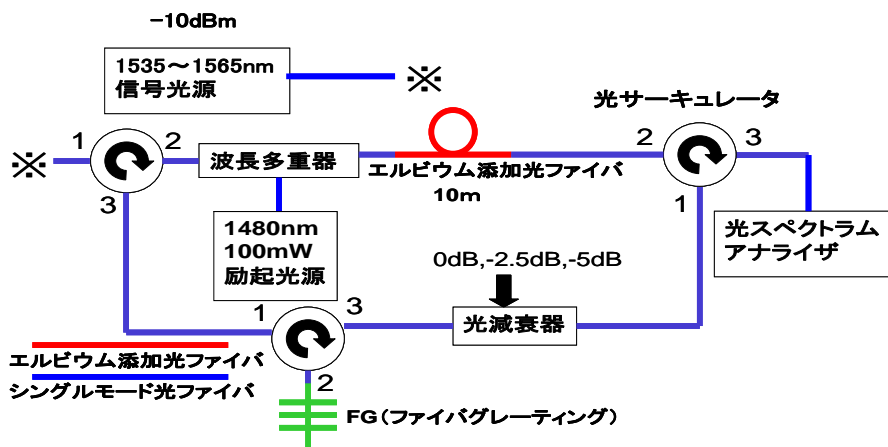


図 4. サーキュレーターレーザ発振 (FG タイプ) 時の EDFA 増幅利得測定接続図

図4の構成では、可変波長信号光を入力する前に、励起光をEDFに流す。EDF内部で増幅された自然放出光(ASE)が両方向に流れ、波長多重器の方向に向かうASEは光サーキュレータを通りファイバグレーティング(FG)に向かう。ポートが3つある光サーキュレータは、1→2, 2→3のみ光を透過する。FGは、波長1550nmのみを反射し、それ以外の波長を透過する特性である。つまり、FGは光フィルタの役目をしている。反射されたASEは、光減衰器と光サーキュレータを通りEDFAに戻る。結果として、図4の構成では、3つの光サーキュレータとFGを用いてループ共振器構造を形成しており、レーザ発振を起こす。この状態で、図3同様にEDFA増幅利得を測定した。光減衰器は、レーザ発振の内部パワを変化させるために用いた。

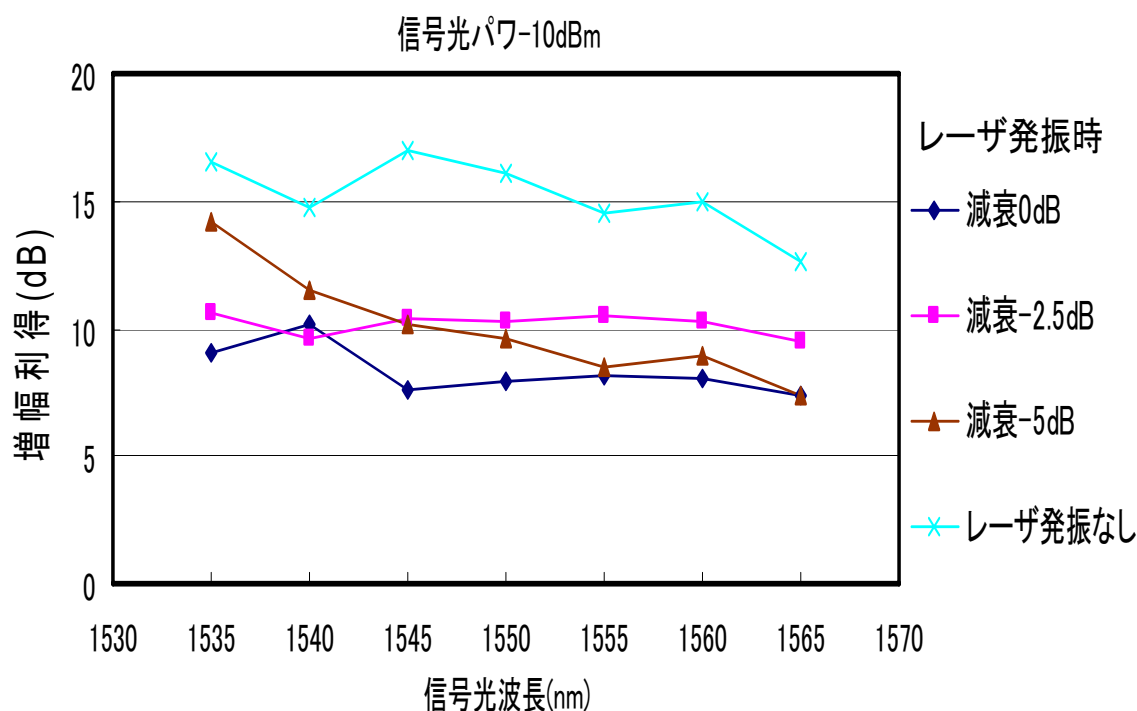


図5. レーザ発振あり, なしのEDFA増幅利得

図5に、レーザ発振あり, なしのEDFA増幅利得の測定結果を示す。レーザ発振時の減衰0, -2.5, -5dBは、レーザ発振の内部パワを変化させるための光減衰器の減衰値である。レーザ発振時の増幅利得では、10dB程度の増幅利得が得られた。レーザ発振なしの場合の15dB程度より増幅利得は下がるが、レーザ発振時でも十分な増幅利得である結果が得られた。

### 3.2 EDFAのレーザ発振による過渡応答抑制方法

図4のEDFAを用いて過渡応答を抑制する。レーザ発振なしの場合の過渡応答とレーザ発振ありの場合の過渡応答を測定し比較した。レーザ発振なし時の過渡応答測定接続図を図6, サークュレータループレーザ発振(FGタイプ)時の過渡応答測定接続図を図7に示した。

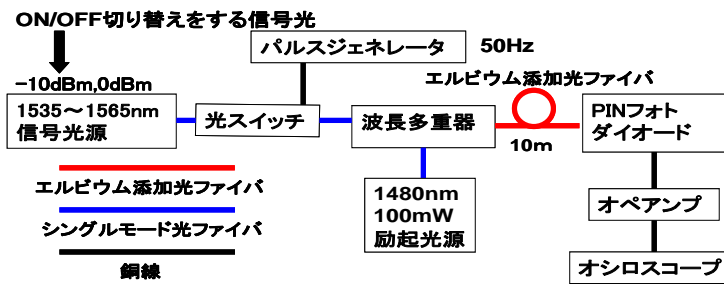


図 6. レーザ発振なし時の過渡応答測定接続図

図 6 の可変波長信号光，波長多重器，励起光源，EDFA による信号光増幅の構成は図 3 と同様である．可変波長信号光をパルスジェネレータで駆動する光スイッチにより ON/OFF 切り替えを行い，信号光 add/drop させている．PIN フォトダイオードで光信号を電気信号に変換し，オペアンプで電気信号を増幅させ，オシロスコープでパルス波形を測定する．

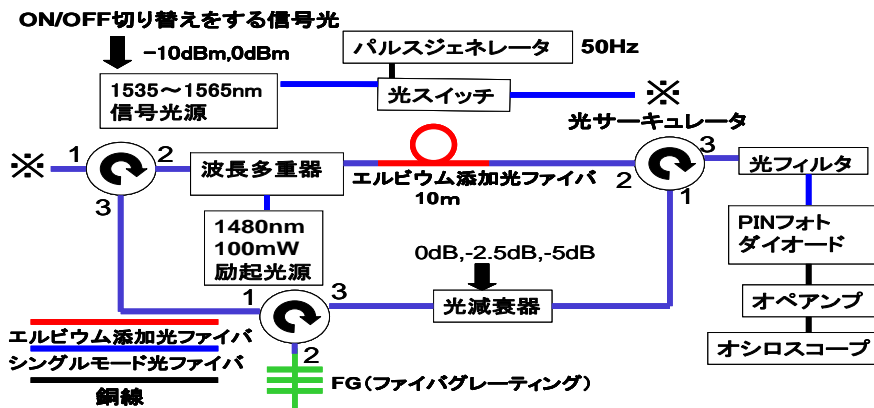


図 7. サーキュレターループレーザー発振(FG タイプ)時の過渡応答測定接続図

図 7 の構成では，図 4 の EDFA を用いている．図 4 との違いは，可変波長信号光をパルスジェネレータで駆動する光スイッチにより ON/OFF 切り替えを行い，信号光 add/drop を模擬している．光フィルタで信号光のみを透過させ，PIN フォトダイオードで受光する．

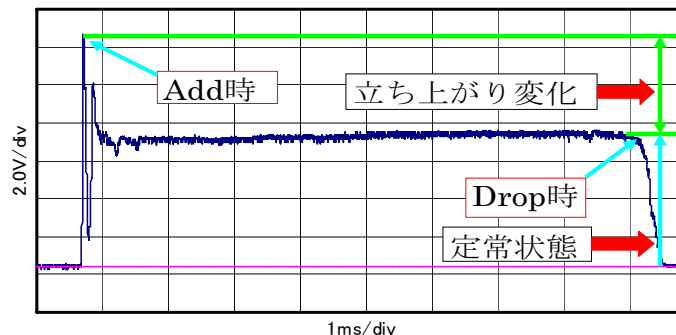


図 8. 信号光の出力波形

図 8 は、図 6 の接続図で測定した信号光の出力波形の例を示す。信号光パワ-10dBm, 波長 1535nm 時で励起光パワを 100mW とした。Add 時の立ち上がりに、変化が大きいいということがわかる。Add 時の大きな変化のあるところを立ち上がり変化、波形の安定しているところを定常状態と呼ぶ。Drop 時は大きな変化はない。本実験では、過渡応答の大きさを比較するため過渡応答率(%)として、次式で計算した。

$$\text{過渡応答率} = \frac{(\text{立ち上がり変化の出力電圧})}{(\text{定常状態の出力電圧})} \times 100$$

図 7 での測定の際、サーキュレータと FG 内でレーザ発振が起こっているか確認するために、レーザ発振時の内部パワを測定した。結果を図 9 に示す。

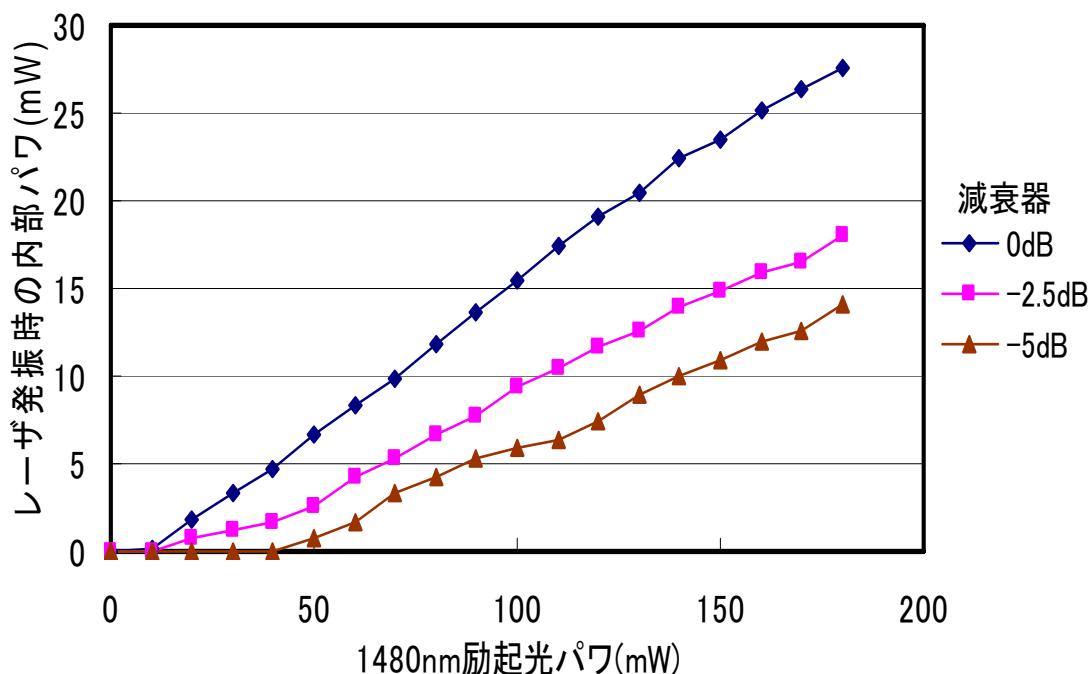


図 9. レーザ発振時の内部パワ

図 9 より、減衰 0, -2.5, -5dB の全ての場合において、励起光パワが低い状態から閾値を超えレーザ発振が起こっていることを確認できた。過渡応答抑制の際には、励起光パワ 100mW を用いた。それぞれのレーザ発振時の内部パワは、16mW (減衰 0dB), 9mW (減衰-2.5dB), 6mW (減衰-5dB) となっている。

#### 4. 実験結果

図 7 の接続図で測定した、レーザ発振ありの場合の信号光出力波形例を図 10 に示す。励起光パワ 100mW で、入力信号光パワ-20dBm, 波長 1535nm で測定した。図 8 と比較すると、信号光パワが 1/10 に小さくしても、過度応答率は 30% であり、大きく低減している。

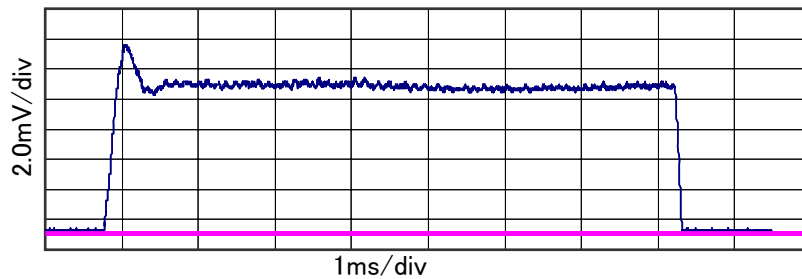


図 10. レーザ発振している場合の信号光出力波形

減衰 0dB で測定したレーザ発振なし、ありの状態での波長別過渡応答特性の結果を、図 11 に示す。信号光パワは、0dBm と-10dBm とした。

レーザ発振なしの場合、信号光パワ-10dBm 波長 1540nm で、過渡応答率 110%に対し、同じ条件でレーザ発振ありとすると、過渡応答率 10%まで低減された。他の波長においても、全体的に約 100%程度低減する。また、レーザ発振なしにおいて 100%未満の過渡応答特性の場合では、レーザ発振ありの状態であるとほぼ 0%まで抑制できる結果が得られた。

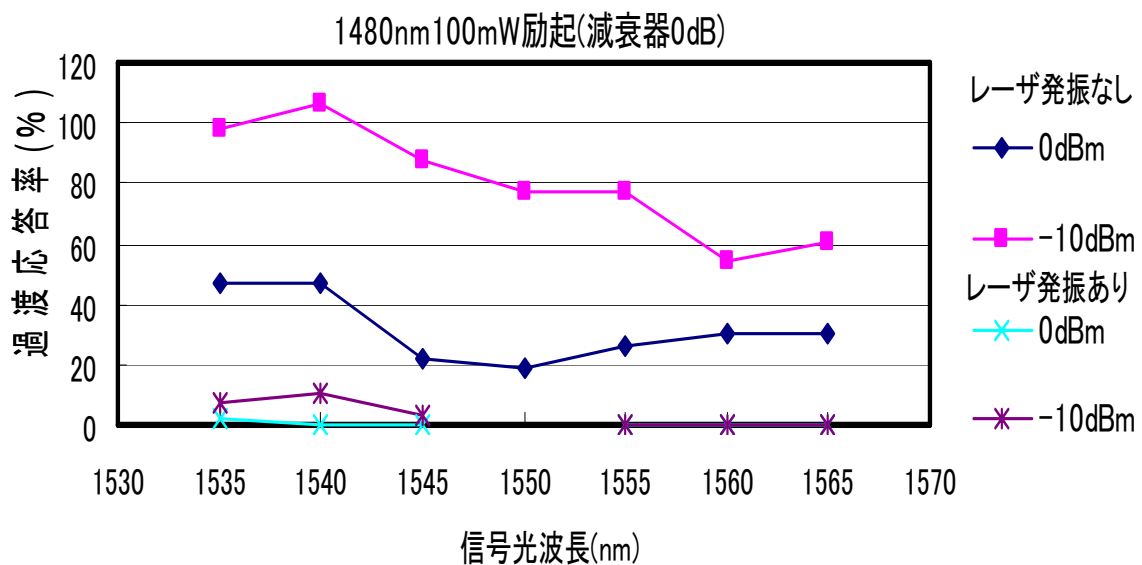


図 11. レーザ発振あり、なしの過渡応答特性比較

図 12 は、レーザ発振光の内部パワを、16mW(減衰 0dB)、9mW(減衰-2.5dB)、6mW(減衰-5dB) に変化させた時の過渡応答特性結果を示す。内部パワを増加することにより、過渡応答抑制効果を増すことができる。減衰-2.5dB と比べて、0dB では、レーザ発振の内部パワが 5mW 増加しており、過渡応答率は約 10%減少した。減衰-5dB と比べて、-2.5dB では、レーザ

発振の内部パワが 3mW 増加しており，過渡応答率は約 10%～20%減少した．

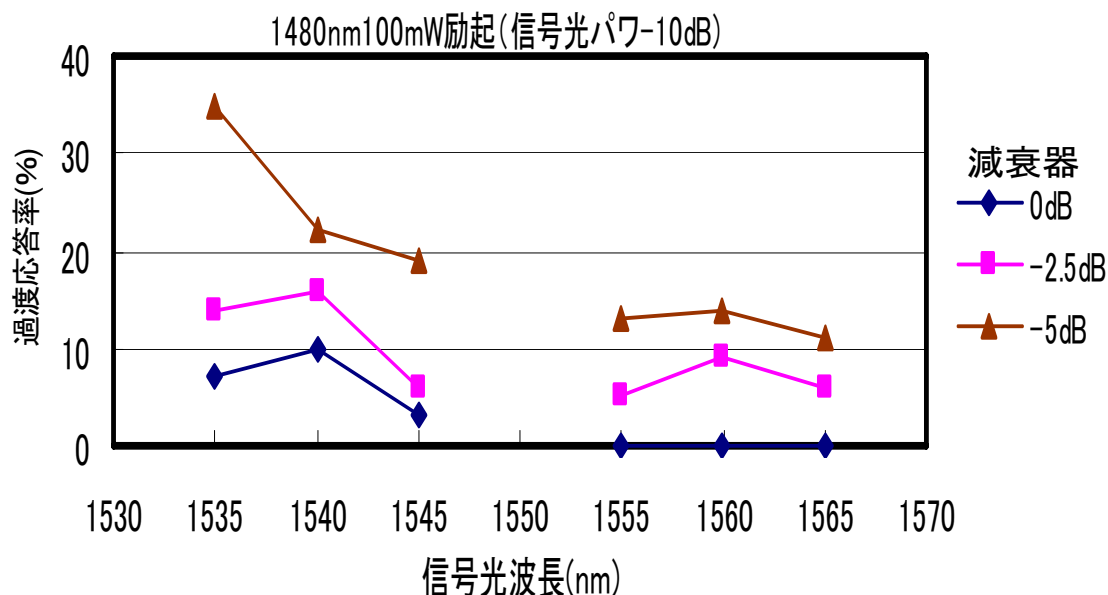


図 12. レーザ発振時のパワ別過渡応答特性

## 5. まとめ

本実験では，信号光波長 1535nm～1565nm の範囲で，サーキュレーターレーザー発振光 (FG タイプ) による過渡応答抑制を行うと，波長全体で約 100%程度過渡応答が低減できた．その条件において，EDFA による増幅利得も約 10dB が得られ，光増幅器として機能していることを確認した．

## 参考文献

- [1] 村上泰司：「入門光ファイバ通信工学」，コロナ社(2005)
- [2] 中川清司，中沢正隆，相田一夫，萩本和男：「光増幅器とその応用」，オーム社(1992)
- [3] 須藤昭一：「エルビウム添加光ファイバ増幅器」，オプトニクス社(2001)
- [4] 中路晴雄，重松昌行，中井賢治，西村正幸：「高速利得一定制御エルビウム添加光ファイバ増幅器の開発」，SEI テクニカルレビュー・第 162 号，p14-19，(2003)
- [5] 石川宏，行松健一：「光スイッチング技術入門」，オーム社(2001)
- [6] 杉本亮，宮内秀徳，島研介，姫野邦治，細谷英行，堀内嘉明，田中祥顕，及川陽一，志賀代康，長枝浩：「高速自動利得制御光増幅器」，第 116 号フジクラ技報，p1-5，(2009 Vol. 1)
- [7] 橋本守，吉田実，澤田久：「WDM 対応雑音光 AGC EDFA の開発」，第 98 号三菱電線工業時報，p29-33，(2001)