

高速自動利得制御光増幅器

光電子技術研究所 杉本 亮¹・宮内 秀徳¹・島 研介²・姫野 邦治³・細谷 英行⁴
株式会社トリマティス 堀内 嘉明・田中 祥顕・及川 陽一・志賀 代康・長枝 浩

Ultra-Fast Automatic Gain Controlled Optical Fiber Amplifier

R. Sugimoto, H. Miyauchi, K. Shima, K. Himeno, H. Hosoya,
Y. Horiuchi, Y. Tanaka, Y. Oikawa, N. Shiga, and H. Nagaeda

フォトニックネットワークの発展にともない、入力信号レベルの高速な変化に対応できる自動利得制御光増幅器が求められている。そこで当社では、高速 VOA を用いた自動利得制御光増幅器を開発し、その応答特性を 40 チャンネル入力信号の Add/Drop 動作により評価した。光増幅器の高速応答により、過渡応答特性は Add 動作において収束時間 $3\mu\text{s}$ 以下、利得変動 0.8 dB 以下、Drop 動作においてはそれぞれ $20\mu\text{s}$ 以下、 1.2 dB 以下に抑制されており、良好な応答特性を達成した。

With the growth of photonic networks, high-speed automatic gain-controlled optical fiber amplifiers (AGC-EDFAs) are required to suppress dynamic gain transients caused by the rapid change of input power level to the EDFA. We developed the AGC-EDFA using high-speed VOA and measured its transient performance in a 40-channel add/drop operation. Thanks to its high-speed response, good transient suppressions were obtained: settling time of less than $3\mu\text{s}$ and gain excursion of less than 0.8 dB for the adding condition and settling time of less than $20\mu\text{s}$ and gain excursion of less than 1.2 dB for the dropping condition.

1. ま え が き

近年の情報通信トラフィックの増加にともない、波長多重伝送システムにおいて、伝送路の効率的な運用のために信号を波長単位で制御する Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM) や Optical Cross Connect (OXC) の導入が進められている。このようなフォトニックネットワークにおいては、光信号チャンネルの動的な挿入 (Add) や分岐 (Drop) によって伝送路中の光パワーレベルが高速かつ頻繁に変化する。伝送路中に設置されるエルビウム添加光ファイバ増幅器 (Erbium Doped Fiber Amplifier : EDFA) への入力光パワーレベルが急速に変わると、EDF 内部の反転分布状態が変化するため、Add/Drop されるチャンネル以外の信号チャンネル (残留信号チャンネル) の出力光パワーレベルにオーバーシュートやアンダーシュート等の過渡応答が発生してしまう。このような EDFA の過渡応答による光出力の変動は伝送品質を劣化させるため、こ

れらの変動を抑制する自動利得制御 (Automatic Gain Control : AGC) 技術が必要となる。

EDFA の過渡応答の抑制に有効な方法のひとつとして、励起 LD のフィードフォワード (Feed Forward : FF) 制御があげられる¹⁾²⁾。これは、EDFA の入力光パワーモニタで入力光パワーレベル変化を読み取り、所望の光出力レベルになるように励起光パワーを制御する方法である。この方法は、EDFA 出力光パワーモニタにより励起光パワーを制御するフィードバック (Feed Back : FB) 制御よりも早く励起光パワー制御を開始することができるため、過渡応答を抑制することに適している。しかしながら、入力光パワーレベルの大きく急峻な変化に対しては、FF 制御のみでは EDFA の過渡応答特性を十分に抑制することは難しい。

さらなる自動利得制御技術の高速化を狙い、当社では FF 制御された励起 LD と高速応答可能な可変光減衰器 (Variable Optical Attenuator : VOA) を組み合わせた EDFA を開発している³⁾。本稿では、現在開発中の高速利得制御光増幅器 (Automatic Gain Controlled EDFA : AGC-EDFA) の動作原理とその特性について報告する。

1 光技術研究部

2 光技術研究部グループ長

3 光技術研究部部長

4 光電子技術研究所長

2. 高速自動利得制御光増幅器の動作原理

当社で開発中の高速 AGC-EDFA の回路構成を図1 に示す．高速 AGC-EDFA は FF 制御 EDFA と高速 VOA が連結された構成になっており，AGC-EDFA に入射された光信号は EDF で所望の光パワーレベルまで増幅された後，VOA を通過して出力される．EDF は FF および FB 制御された励起波長 $0.98\mu\text{m}$ の励起 LD により前方励起されており，そのファイバ長は約 10 m である．高速 VOA は光入出力レベルモニタにより利得が一定となるように FB 制御される．

図2 に高速 AGC-EDFA の過渡応答抑制方法を示す．光信号チャンネルの Add/Drop により入力光パワーレベルが急激に変化した場合，FF 制御された励起 LD により EDF 内で発生する残留信号チャンネルの過渡応答特性

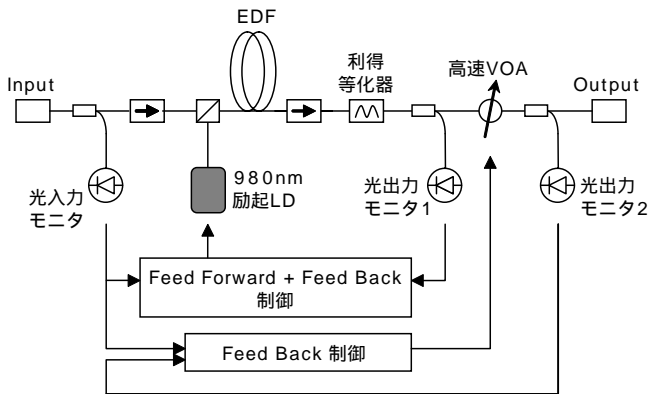


図1 高速 AGC-EDFA の回路構成
Fig. 1. Configuration of Ultra-Fast AGC-EDFA.

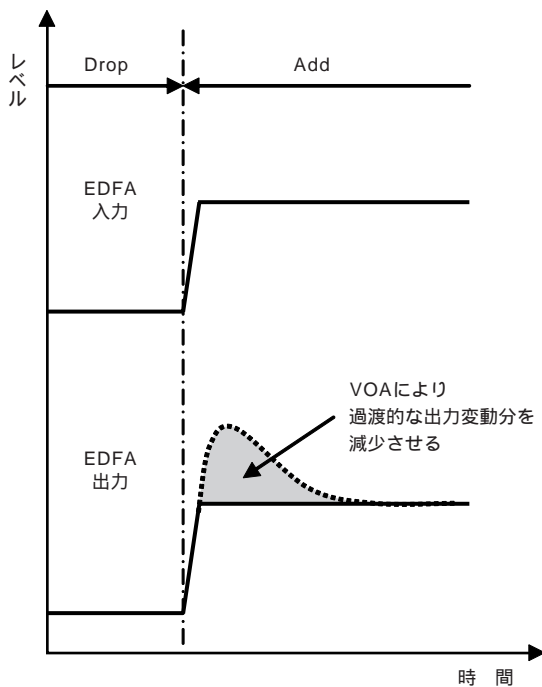


図2 過渡応答抑制方法
Fig. 2. Suppression of transient response.

が抑制されるが，さらに FF 制御のみでは抑制できなかった過渡応答特性を， $1\mu\text{s}$ 以下の応答速度を有する電気光学素子を利用した高速 VOA⁴⁾ で補償することにより，従来にない高速な自動利得制御を実現することができる．

3. 実 験

開発した高速 AGC-EDFA の過渡応答特性を評価するため，入力信号チャンネル Add/Drop 時の残留信号チャンネルの過渡応答特性を 40 チャンネルの信号光源を用いて評価した．評価系を図3 に示す．

多波長光源からの 39 チャンネル信号と波長可変光源からの 1 チャンネル信号を合波して 40 チャンネル信号を構成し，AGC-EDFA に入射した．多波長信号光源からの 39 チャンネル信号を音響光学素子 (Acousto-Optic Modulator: AOM) を用いて 50 Hz で変調することにより 1 チャンネルから 40 チャンネル，あるいは 40 チャンネルから 1 チャンネルの Add/Drop 動作を模擬している．AGC-EDFA に入力する信号パワーは -20 dBm/ch ，設定利得は 15 dB とした．AGC-EDFA に入力された信号チャンネルのうち，波長可変光源からの信号を残留信号チャンネルとして光バンドパスフィルタで取り出し，Add/Drop 時の光出力過渡応答波形を観測した．過渡応答特性を評価するため，観測された過渡応答波形から (1) Gain

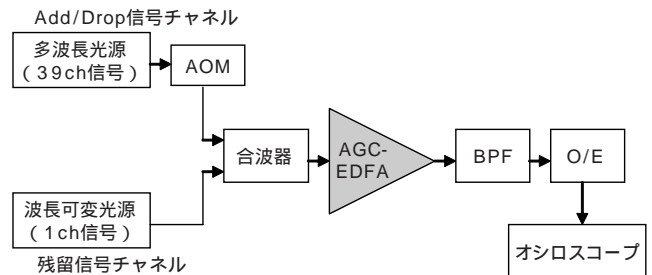


図3 過渡応答特性評価系
Fig. 3. Transient performance measurement system.

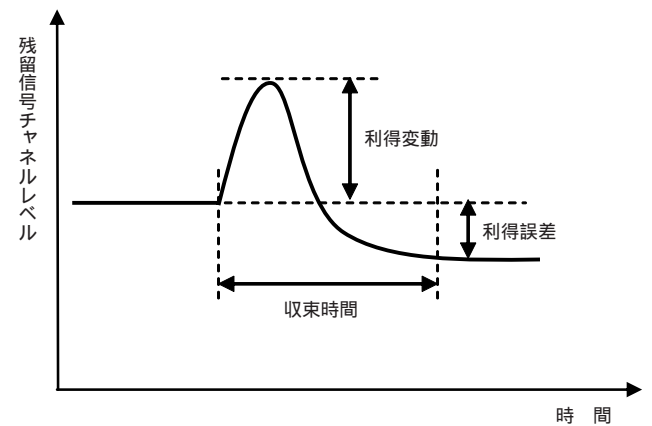


図4 過渡応答パラメータの説明
Fig. 4. Transient parameter.

Excursion(利得変動), (2) Settling Time(収束時間), (3) Gain Error(利得誤差)を求めた(図4 参照).

残留信号チャンネル波長を1530.33 nm から1561.42 nm の間で変化させ, 過渡応答特性の波長依存性について評価した. さらに, FF 制御 EDFA 出力端と高速 VOA 出力端の過渡応答波形をそれぞれ観測し, 両者を比較することで, 高速 VOA の効果についても検討した.

4. 実験結果

Add/Drop 動作条件において観測された FF 制御 EDFA 出力端と高速 VOA 出力端の代表的な過渡応答

波形を図5, 図6にそれぞれ示す. 過渡応答波形は残留信号チャンネルの波長によってそれぞれ異なるが, いずれの波長においても高速 VOA によりその応答波形が変化している様子がわかる. 特に Drop 動作時においては, FF 制御 EDFA 出力端での利得が非常に緩やかに変化しているのに対し, 高速 VOA 出力端では非常に短時間で定常状態に収束していることがわかる. 両者の過渡応答特性を比較するため, これらの応答波形から Gain Excursion, Settling Time, Gain Error をそれぞれ算出した.

図7に残留信号チャンネル波長に対する Gain Excursion をプロットした結果を示す. 信号波長1530.33nm から1561.42nm において FF 制御 EDFA 出力端での最大 Gain Excursion は Add 動作時で0.8dB, Drop 動作時

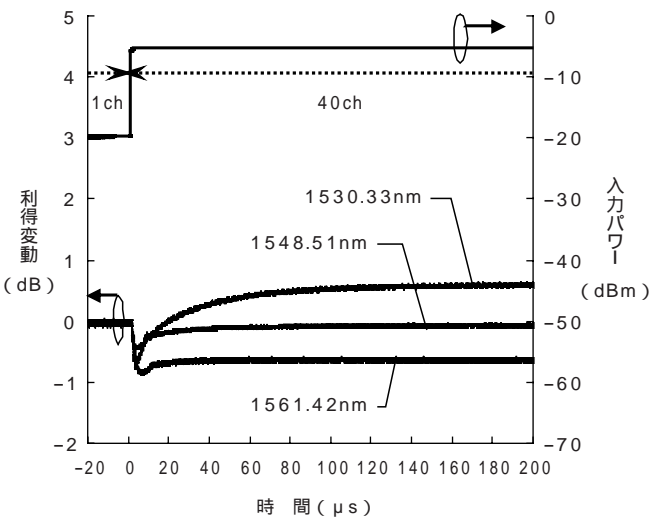


図5(a) Feed forward 制御 EDFA 出力端の過渡応答波形 (Add 動作時)

Fig. 5(a). Transient performance at feed forward controlled EDFA output for the adding condition.

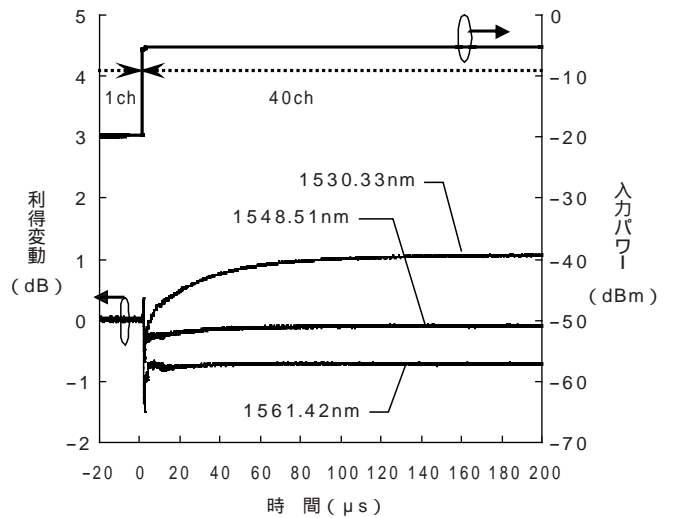


図6(a) 高速 VOA 出力端の過渡応答波形 (Add 動作時)
Fig. 6(a). Transient performance at VOA output for the adding condition.

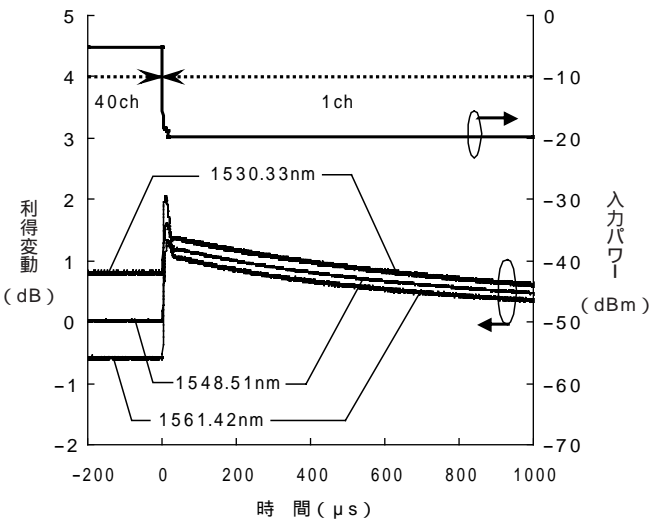


図5(b) Feed forward 制御 EDFA 出力端の過渡応答波形 (Drop 動作時)

Fig. 5(b). Transient performance at feed forward controlled EDFA output for the dropping condition.

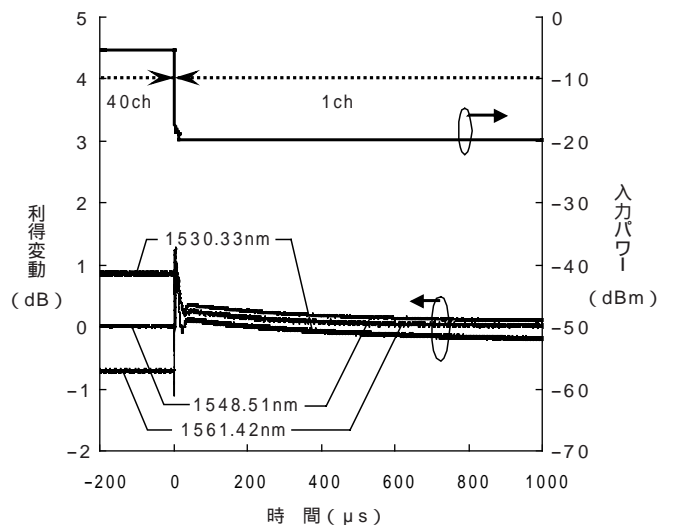


図6(b) 高速 VOA 出力端の過渡応答波形 (Drop 動作時)
Fig. 6(b). Transient performance at VOA output for the dropping condition.

で1.7dBであった．一方，高速 VOA 出力端での最大 Gain Excursion は Add 動作時で0.7dB，Drop 動作時で1.2dBであり，高速 VOA により Drop 動作時の Gain

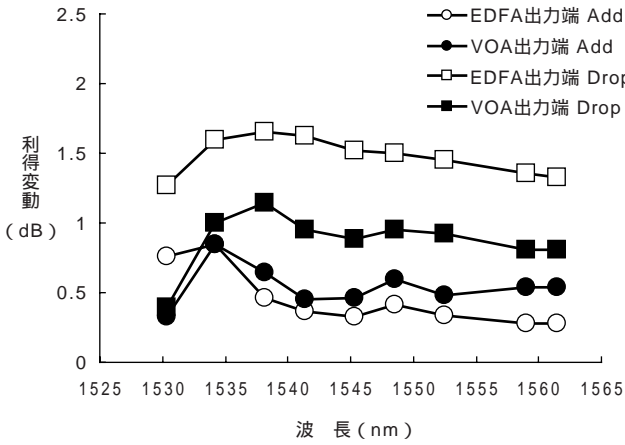


図7 残留信号チャネルの利得変動
Fig. 7. Gain excursion of survival channel.

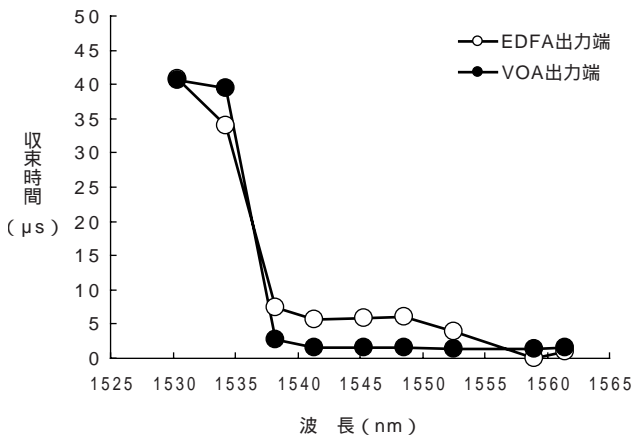


図8(a) 残留信号チャネルの収束時間 (Add 動作時)
Fig. 8 (a). Settling time of survival channel for the adding condition.

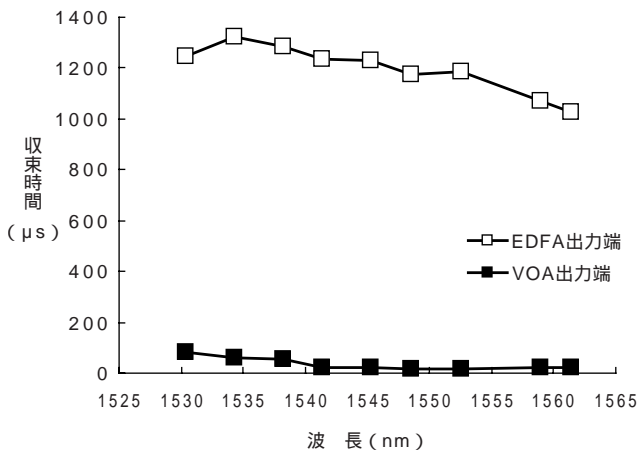


図8(b) 残留信号チャネルの収束時間 (Drop 動作時)
Fig. 8 (b). Settling time of survival channel for the dropping condition.

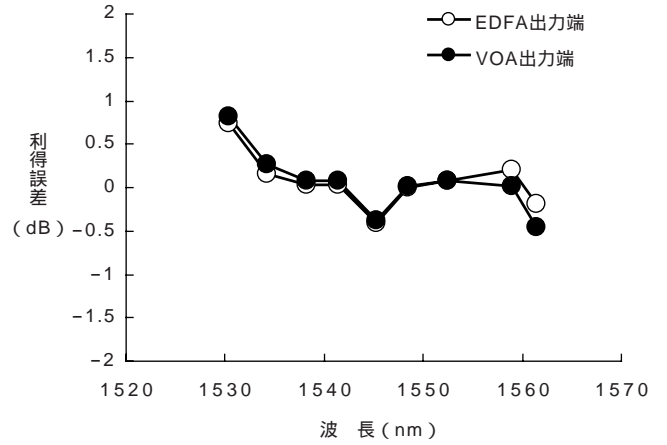


図9 残留信号チャネルの利得誤差
Fig. 9. Gain error of survival channel.

Excursion が0.5dB 低減した．この結果から，高速 VOA は Gain Excursion に関して特に Drop 動作時に抑制効果があることがわかった．

次に，残留信号チャネル波長に対する Settling Time をプロットした結果を図8に示す．Add 動作時には，波長1545 nm から1561 nm にわたって，最大 Settling Time が FF 制御 EDFA 出力端では7μs であったのに対し，高速 VOA 出力端では3μs 以下と約 50 % 低減することができた．また Drop 動作時には，最大 Settling Time が FF 制御 EDFA 出力端で約1300 μs であったのに対し，高速 VOA 出力端では20 μs 以下と約98 % 低減することができた．この結果から，FF 制御 EDFA に高速 VOA を組み合わせることにより Settling Time は大幅に改善でき，特に Drop 動作時に大きな効果を発揮することがわかった．

また，Add 動作時には，波長1530 nm 付近の短波長域にて Settling Time が約40μs まで大きくなることがわかった．これはスペクトル・ホール・バーニング (Spectral Hole Burning : SHB) が影響したためと考えられる⁵⁾．

図9に残留信号チャネル波長に対する Gain Error をプロットした結果を示す．Gain Error はすべての信号波長帯域にわたって ±1.0 dB 以下であり，良好な結果を得た．

5. 検 討

このように高速 VOA は特に Drop 動作時の過渡応答特性に抑制効果を発揮することがわかった．この理由は以下のように考えられる．

EDFA の過渡応答特性は EDF の反転分布の応答特性によって決まる．反転分布の応答特性は次式に示される励起準位の実効的な寿命によって支配される⁶⁾．

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_2}{(1 + I / I_s + I_p / I_p^{th})}$$

ここで τ_2 は光が存在しない場合の励起準位の寿命， I は EDF への入射光強度， I_s は飽和入力光強度であり， I_p / I_p^{th} は入射励起強度 I_p を媒質が透明になるしきい値励起強度 I_p^{th} で規格化した量である．この式より EDF への入力光強度および励起強度が小さいほど τ_{eff} は長くなることがわかる．Drop 動作時においては EDF への入射光強度および励起強度が低下するため，Add 動作時と比較すると EDF の応答時間は長くなる．これは EDF 固有の特性であり，励起 LD の FF 制御だけでは抑制することができない．一方，高速 VOA はこの長い応答特性を補償することができるため，高速 VOA は Drop 動作時において特に大きな効果を発揮すると考えられる．

6.むすび

フォトニックネットワークへの適用を目指して，高速自動利得制御光増幅器の開発を行った．FF 制御 EDFA と高速応答可能な VOA を組み合わせることにより，入力信号チャンネルが1チャンネルから40チャンネルに変化する Add 動作において Settling Time が $3 \mu\text{s}$ 以下，Gain Excursion が 0.8 dB 以下，40チャンネルから1チャンネルに変化する Drop 動作において Settling Time が $20 \mu\text{s}$ 以下，Gain Excursion が 1.2 dB 以下という応答特性を達成した．高速 VOA は EDF 特性に由来する Drop 動作時の遅い応答特性を補償することができるため，特に Drop

動作時の応答特性改善に大きな効果を発揮する．

本製品はその速い応答特性から光バーストスイッチング(OBS)や光パケットスイッチング(OPS)など，より高速な応答速度が要求される次世代ネットワークへの適用も期待できる．

参 考 文 献

- 1) Cechan Tian, et al. : " Analysis and Control of Transient Dynamics of EDFA Pumped by 1480- and 980-nm Lasers ", J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 8, pp. 1728-1734, 2003
- 2) Lutz Rapp : " Transient Performance of Erbium-doped Fiber Amplifiers using a New Feedforward Control taking into account Wavelength ", J. Opt. Commun., Vol. 28, pp. 82-90, 2007
- 3) 宮内ほか : 「高速 VOA を備えた AGC 光増幅器の利得過渡応答特性」, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-10-28, 2008
- 4) 志賀ほか : 「電気光学素子を利用した可変光減衰器の開発」, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-34 2004
- 5) MaximBolshtyansky, et al. : " Dynamic Behavior of Spectral Hole Burning in EDFA with 980 nm Pumping ", OMN2, OFC 2007
- 6) E. Desurvire : " Analysis of transient gain saturation and recovery in Erbium-doped fiber amplifiers ", IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 1, No. 8, pp. 196-199, 1989