

株式会社フジクラ 光エレクトロニクス研究所 和田 朗



Distributed Erbium-Doped Optical Fibers

Akira Wada

FUJIKURA Ltd., Opto-electronics Laboratory

Abstract

Loss compensation characteristics and noise performance of distributed erbium-doped optical fibers are simulated using two-level rate equations. Distributed erbium-doped optical fibers are fabricated based on the simulation results, and 36.8 km long loss compensated, concatenated optical fibers is experimentally demonstrated with a pump power of 66 mW at 1.48 μm . The traveling signal

が報告されている⁹⁾。分布 Er ドープファイバでは、Er ドープ時に混入する不純物や製法上の問題で通常の伝送用ファイバに比べると固有損失はやや高く、その値は製法によっても異なってくるので、損失補償長や必要な Er ドープ濃度を精度良く見積るためには固有損失として実際の分布 Er ドープファイバで得られた値を用いてシミュレーションする必要がある。

分布型 EDFA の雑音指数に関しては、EDFA と伝送ファイバからなるユニットを多段接続した場合と分布型 EDFA とが理論的に比較検討されている¹⁰⁻¹²⁾。多段接続型ではユニット内でファイバを先に配置するか、EDFA を先にするかで結果は大きく異なってくるが、分布型 EDFA の雑音指数はこれらの中間になることが理論的に示され、実験的にも確認されている⁹⁾。測定された分布型 EDFA の雑音指数は 1.48 μm 励起にもかかわらず、完全な反転状態を仮定した計算値とよく一致することが報告されている⁹⁾。

本研究では、まず実験的に求められた分布 Er ドープファイバの固有損失、その他のパラメータを用いて、2 準位のレート方程式¹³⁾により分布型 EDFA の数値シミュレーションを行ない、与えられた励起パワー、ファイバ伝搬中の信号光強度変化において予想される損失補償長、適性 Er ドープ濃度などの損失補償特性および雑音特性について検討した。次に、このシミュレーション結果に基づいて分布 Er ドープ光ファイバを試作して、損失特性、雑音特性を評価した。本研究の結果として、66 mW の双方向励起において、伝搬信号光の強度変化を 1 dB 程度に抑えて 73.6 km のファイバ固有損失を補償した分布型 EDFA¹⁰⁾ を実現した。

2. 理論

数 10 km におよぶ分布型 EDFA では光ファイバのもつ固有損失による励起光の減衰が無視できなくなる。固有損失による励起光の減衰分は増幅に寄与しないので、限られた励起パワーで、できるだけ長距離の無損失ファイバを達成するためには、ファイバ固有損失が最も少ない励起波長である 1.48 μm 帯を励起波長として用いるのが適当

である。そこで以下では励起波長として 1.48 μm を仮定して、2 準位のレート方程式により解析を行なう。

損失補償を目的とした分布型 EDFA では実質利得が殆どないので、EDFA 内で発生する自然放出光が増幅されることにより EDFA の飽和は考慮しなくても良い。そこで解析には信号光と励起光だけを考慮した簡単なレート方程式で十分である。

励起光パワーを $P_p(z)$ 、信号光パワーを $P_s(z)$ とするとファイバの固有損失を考慮した 2 準位のレート方程式は、

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = [\xi_p \rho (\gamma_2(z) \sigma_{pe} - \gamma_1(z) \sigma_{pa}) - \alpha_{pi}] P_p(z) \quad (1a)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [\xi_s \rho (\gamma_2(z) \sigma_{se} - \gamma_1(z) \sigma_{sa}) - \alpha_{si}] P_s(z) \quad (1b)$$

のように表される。ここで係数 $\xi_{p,s} = (r_{Er}/\omega_{p,s})^2$ は Er ドープ領域を通過する励起光、信号光成分を表し、 r_{Er} は Er ドープ領域半径、 $\omega_{p,s}$ はパワースポットサイズである。また、 ρ は Er イオンの濃度、 α_{pa} 、 α_{si} はファイバ固有損失、 σ_{pa} 、 σ_{sa} および σ_{pe} 、 σ_{se} は誘導吸収断面積および誘導放出断面積である。添字 p 、 s はそれぞれ励起光、信号光を表す。 γ_1 、 γ_2 は定常状態での下位準位 ($^4I_{15/2}$)、上位準位 ($^4I_{13/2}$) の占有確率で、

$$\gamma_1(z) = \frac{R_e(z) + W_e(z) + 1/\tau}{R_a(z) + W_a(z) + R_e(z) + W_e(z) + 1/\tau} \quad (2a)$$

$$\gamma_2(z) = \frac{R_a(z) + W_a(z)}{R_a(z) + W_a(z) + R_e(z) + W_e(z) + 1/\tau} \quad (2b)$$

で表される。ここで τ は蛍光寿命、 $R_{a,e}(z)$ 、 $W_{a,e}(z)$ は励起光、信号光の誘導吸収および誘導放出確率で $R_{a,e}(z) = P_p(z) \sigma_{pa,pe} / (\pi \omega_p^2 h \nu_p)$ 、 $W_{a,e}(z) = P_s \sigma_{sa,se} / (\pi \omega_s^2 h \nu_s)$ 、 ν_p 、 ν_s は励起光、信号光の周波数である。1.48 μm 励起では励起光と信号光のモードフィールド径はほぼ等しく $\omega_p \cong \omega_s = \omega$ とおける。励起しきい値を

$$P_{th} = \frac{\pi \omega^2 h \nu_p}{\tau \sigma_{pa} (m_s - m_p)} \quad (3)$$

として、 P_{th} を用いて $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$ を $Q_p(z) = P_p(z)$

$/P_{th}$, $Q_s(z)=[(\sigma_{sa}\nu_p)/(\sigma_{pa}\nu_s)]P_s(z)/P_{th}$ とすると、式(1a), (1b)は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dQ_p(z)}{dz} &= -\left(\frac{Q_s(z)+1}{\varepsilon_p Q_p(z)+\varepsilon_s Q_s(z)+1} u_p+1\right) \\ &\quad \cdot \alpha_{pi} Q_p(z) \\ \frac{dQ_s(z)}{dz} &= \left(\frac{Q_p(z)-1}{\varepsilon_p Q_p(z)+\varepsilon_s Q_s(z)+1} u_s-1\right) \\ &\quad \cdot \alpha_{si} Q_s(z) \end{aligned} \quad (4b)$$

ここで、 $\varepsilon_p=(1+m_p)(m_s-m_p)$, $\varepsilon_s=(1+m_s)/(m_s-m_p)$ は誘導放出、吸収の断面積比 $m_p=\sigma_{pa}/\sigma_{pe}$, $m_s=\sigma_{sa}/\sigma_{se}$ で決まる定数である。また u_p , u_s はErイオンの吸収損失とファイバの固有損失の比で、 $u_p=\alpha_p Er/\alpha_{pi}$, $u_s=\alpha_s Er/\alpha_s$, $\alpha_p Er=\xi\rho\sigma_{pa}$, $\alpha_s Er=\xi\rho\sigma_{sa}$ である。

式(4b)を用いて、入射端においてファイバ固有損失を補償するために必要なErドープ濃度は、

$$\alpha_{ser} = \frac{\varepsilon_p Q_{p,in} + \varepsilon_s Q_{s,in} + 1}{Q_{p,in} - 1} \alpha_{si} \quad (5)$$

と表される。Erドープによる利得は入射端から離れるに従って減少するので式(5)は損失補償ファイバを得るために必要な最低Erドープ濃度を与える。Er濃度をこの値から増加させると、ファイバ上で正味の利得がある領域が増加していく。ファイバを伝搬する信号光は一旦増幅され、式(4b)括弧内が零になる点で最大強度 $P_{s,max}$ に達し、そこから先は減衰して L_0 なる距離において再び入射時の強度にもどる。 L_0 を損失補償長と呼ぶことにする。 L_0 はErドープ濃度の増加とともに長くなるが、それに伴って、伝搬信号光強度の変位 $\Delta P_{s,max}$ も大きくなる。従って、許容できる最大強度偏差を規定すると損失補償できる最大ファイバ長およびその際必要になるErドープ濃度が決まる。

EDFAの雑音指数は、自然放出光間のヒート雑音が無視できる場合には、次式で表すことができる¹⁴⁾。

$$NF(z) = 2F(z) + 1/G(z) \quad (6)$$

ここで G は利得、また F は過剰雑音因子(excess noise factor), n_{sp} は反転分布因子で、それぞれ以下のように表される。

$$F(z) = \int_0^z n_{sp}(z') g(z')/G(z') dz' \quad (7)$$

$$n_{sp}(z) = \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_1/m_s} = \frac{m_s}{m_s - m_p} \frac{Q_p(z) + Q_s(z)}{Q_p(z) - 1} \quad (8)$$

式(4a, b)および(6), (7), (8)から雑音指数を計算することができる。

3. 損失補償特性および雑音指数に関する数値シミュレーション

分布型EDFAで損失補償できるファイバ長はその固有損失に大きく依存する。実際に達成可能な損失補償長および必要なErドープ量を精度良く見積るために以下の計算では10.4 kmの分布型EDFAを試作した結果⁹⁾から得られたファイバ固有損失の値を使用した。また、誘導吸収・放出断面積、蛍光寿命などの値も同ファイバから求められた値を使用した。Fig. 1に10.4 km分布Erドープファイバの全損失スペクトルおよび最小二乗法により分解したファイバ固有損失とEr吸収損失成分のスペクトルを示す。誘導吸収断面積、誘導放出断面積はこの吸収損失スペクトルと短尺ファイバで測定した蛍光スペクトルから

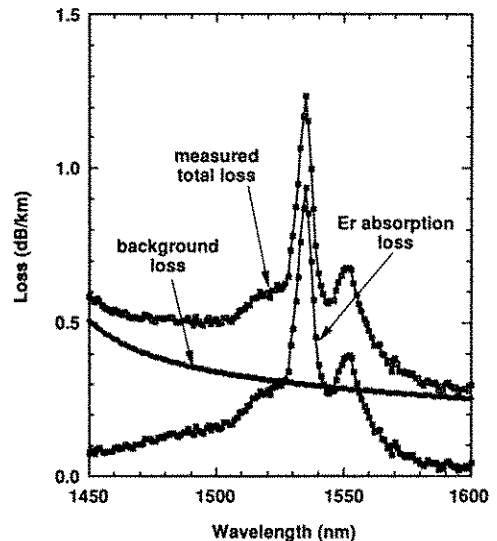


Fig. 1 Total loss spectrum and decomposed fiber intrinsic and Er absorption loss spectra of the distributed Er-doped loss compensation optical fiber

Table 1 Fiber parameters used in numerical calculation

モードフィールド径	$\sqrt{2} \omega$	7.64 μm
Er ドープ半径	r_{Er}	0.70 μm
Er ドープ濃度	ρ	0.71 wt-ppm 5.6×10^{21} ions/ m^3
固有損失	@1480 nm	α_{pi} 0.379 dB/km
	@1535 nm	α_{si} 0.299 dB/km
Er 吸収損失	@1480 nm	α_{pEr} 0.135 dB/km
	@1535 nm	α_{sEr} 0.937 dB/km
誘導吸収断面積	@1480 nm	α_{pa} 0.962×10^{-25} m^2
	@1535 nm	α_{sa} 6.651×10^{-25} m^2
誘導放出断面積	@1480 nm	α_{pe} 0.389×10^{-25} m^2
	@1535 nm	α_{se} 10.05×10^{-25} m^2
蛍光寿命	τ	12.8 msec

Fuchtbauer-Ladenburg¹⁵⁾ の関係式を使って算出した。これらの値およびその他のファイバパラメータを Table 1 に示す。

Fig. 2 は損失補償ファイバ長 L_0 、励起パワーがしきい値に達するファイバ長 L_{th} 、および信号光強度の最大偏差 $\Delta P_{s,max}$ の Er ドープ濃度による変化を、信号入力パワーが -40 dBm 一定とし、励起パワー 20~80 mW の範囲で計算したものである。計算には式 (4a, b) を使用した。必要な Er 濃度は Er ドープ半径 r_{Er} に依存するので、横軸は信号波長での Er 吸収損失で表してある。Er ドープ濃度が増加すると損失補償ファイバ長 L_0 が増加するが、それに伴って信号光の最大偏差 $\Delta P_{s,max}$ も増加していく。励起パワー 60 mW とした場合、 $\Delta P_{s,max}$ として 1 dB を許容すれば 30 km、3 dB では 40 km の損失補償長が得られることがわかる。信号波長での吸収損失で表したこのときの Er 濃度はそれぞれ 0.52 および 0.68 dB/km である。図中の破線は励起パワーがしきい値パワーとなるファイバ長 L_{th} を表している。 $L_0 > L_{th}$ となる場合には、 L_{th} より先の部分では Er が吸収状態になるので、この領域は通常ファイバで置き換えたほうが損失が少ない。励起パワー 60 mW を例にとると、 $\Delta P_{s,max}$ が 2 dB を越えるような設計で全長を分布 Er ドープファイバとすることは損失補償長の面からは不利である。

次に Fig. 3 に励起パワーを 60 mW 一定として入射信号パワーを -40 dBm~10 dBm の間で変

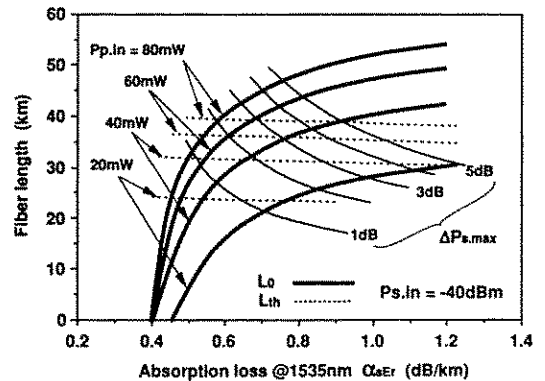


Fig. 2 Er absorption loss dependence of pump threshold lengths [L_{th}], loss compensation lengths [L_0] and maximum signal intensity deviations [$\Delta P_{s,max}$] of the distributed Er-doped loss-compensation-optical-fiber. (constant signal power and different pump powers)

化させた場合の計算結果を示す。一定の損失補償長を得るための Er 吸収損失は、入射信号パワーの増加とともに急激に増加する。小信号時に $\Delta P_{s,max} = 1 \sim 2$ dB になるように設計された分布 Er ドープファイバは入射信号光パワーが -20 dBm を越えると損失補償長が低下し始め、0 dBm あ

で半減、10 dBm 時には殆ど損失補償ができなくなる。従って、0 dBm を越える入射信号光に対しては入射信号光強度に合わせた設計が必要であ

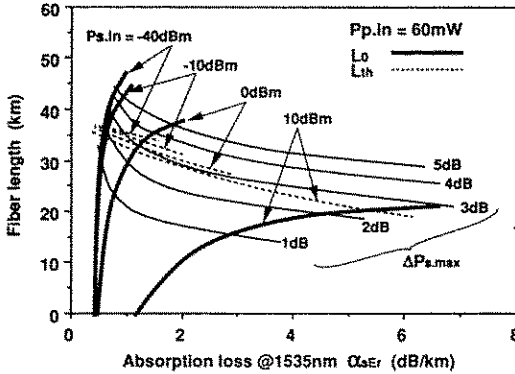


Fig. 3 Er absorption loss dependence of pump threshold lengths [L_{th}], loss compensation lengths [L_0] and maximum signal intensity deviations [$\Delta P_{s,max}$] of the distributed Er-doped loss-compensation-optical-fiber. (constant pump power and different signal powers)

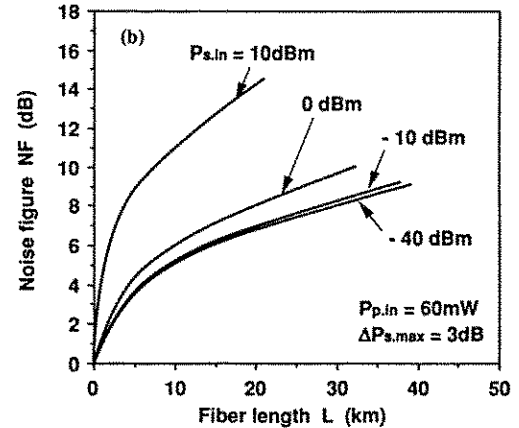
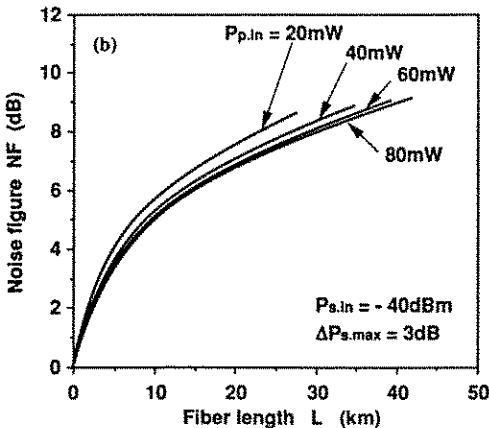
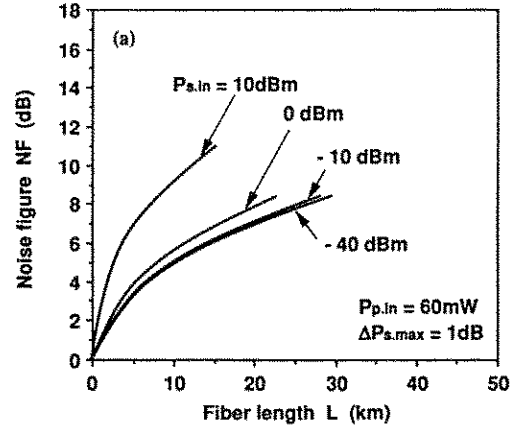
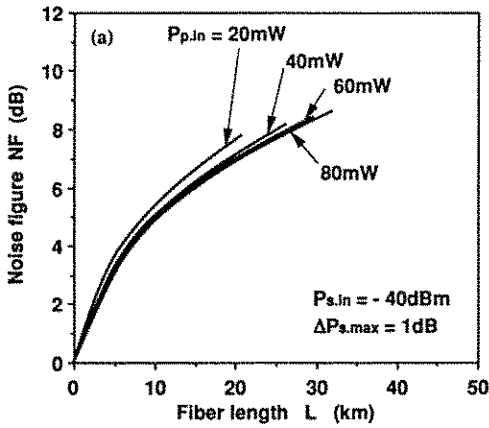


Fig. 4 Length dependence of noise figure for the distributed Er-doped loss-compensation-optical-fiber with constant lengthwise Er distribution. (a) $\Delta P_{s,max} = 1$ dB, (b) $\Delta P_n,max = 3$ dB. (for different input pump powers with constant input signal power)

Fig. 5 Length dependence of noise figure for the distributed Er-doped loss-compensation-optical-fiber with constant lengthwise Er distribution. (a) $\Delta P_{s,max} = 1$ dB, (b) $\Delta P_{s,max} = 3$ dB. (for different input signal powers with constant input pump power)

る。

Fig. 4, 5は雑音指数の計算結果である。Fig. 4は入射信号光パワー $P_{s,in}$ を -40 dBm一定とし、励起パワー $P_{p,in}$ を $20\sim 80$ mWの範囲で変化させたときの雑音指数のファイバ長依存性で、(a)が $\Delta P_{s,max} = 1$ dBの場合、(b)が 3 dBとした場合である。Erドープ濃度はそれぞれの $P_{p,in}$ において規定の $\Delta P_{s,max}$ となるように調整されている。計算結果の最大長が損失補償ファイバ長 L_0 に対応している。 L_0 は励起パワー $P_{p,in}$ および許容する信号光の最大偏差 $\Delta P_{s,max}$ によって変化するが、今回計算した範囲では、 L_0 付近での雑音指数はおおよそ $8\sim 9$ dBとなる。 $\Delta P_{s,max}$ が大きい程雑音指数は良くなる。文献(8)の雑音指数の測定結果が完全反転状態($n_{sp} = 1$)および $G = 1$ を仮定した計算値と一致しており、本計算結果よりやや良い値を示しているのは、恐らく、このファイバの $\Delta P_{s,max}$ がかなり大きいためであると考えられる。

上記解析結果が示すように、分布型EDFAで得られる雑音指数は長さ $30\sim 40$ km程度の分布型EDFAにおいて $8\sim 9$ dBである。分布型EDFAでは集中増幅型と比較して優れた雑音特性が得られることが指摘されているが^{9,10}、これは伝送ファイバの損失をその後に配置したEDFAで補償したユニットを何段か繰り返して得られる構成の集中増幅型と比較した場合にいえることで、反対にEDFAを先に配置して伝送ファイバの損失分を先に補償しておくユニットを繰返した構成と比較した場合には分布型EDFAの雑音特性の方が劣る⁸。

Fig. 5は $P_{p,in}$ が 60 mW一定で $P_{s,in}$ を -40 dBm ~ 10 dBmの範囲で変化させたときの計算結

果である。前図と同様、(a)が $\Delta P_{s,max} = 1$ dBの場合、(b)が 3 dBとした場合で、Erドープ濃度は規定の $\Delta P_{s,max}$ が得られるように調整されている。 $P_{s,in} < -10$ dBmでは顕著な雑音指数の劣化は見られないが、 0 dBmを越える領域での劣化はかなり大きく、 $P_{s,in} = 10$ dBmにおける雑音指数は、 $\Delta P_{s,max} = 1$ dBで 11 dB、 3 dBで 14 dB以上となる。大信号光入力で運用する分布Erドープファイバを設計するには雑音指数に対して十分な配慮が必要である。

4. 36.8 km および 73.6 km 分布 Er ドープ 損失補償ファイバの実験結果¹⁷⁾

単長 $17\sim 24$ kmの分布Erドープシングルモードファイバ4本をVAD法により試作し、これらを用いて損失補償特性、雑音特性を測定した。Erドープ部には 0.7 および 1.8 重量ppmの2種類の母材を使用した。Erドープ部分の径を調整することにより、吸収損失がほぼ等しくなるようにした。これらのファイバのEr吸収損失、固有損失およびモードフィールド径を表2に示す。その他の構造は前述した 10.4 kmの分布Erドープファイバと同一である。

ファイバ2本を接続した 36.8 km長の分布Erドープファイバと励起光源、合分波器からなるユニットを2つ製作し、このユニットを1つまたは2つ用いて 36.8 kmおよび 73.6 kmの分布Erドープ損失補償ファイバの信号光出力波長スペクトルを測定した。Fig. 6に実験系の構成を示す。

36.8 kmの実験ではユニットAだけをを用いた。励起光源には波長 $1.46\sim 1.49$ μ mの縦多モードレーザダイオードを使用して図の構成で励起を行

Table 2 Parameters of distributed Er-doped fibers

ユニット	ファイバ#	ファイバ長 (km)	Er 吸収損失 @1535 nm (dB/km)	固有損失 @1535 nm (dB/km)	MFD (μ m)
A	#1	19.7	0.56	0.30	7.5
	#2	17.1	0.59	0.29	7.4
	#3	16.5	0.61	0.29	7.4
B	#4	20.3	0.55	0.27	7.5

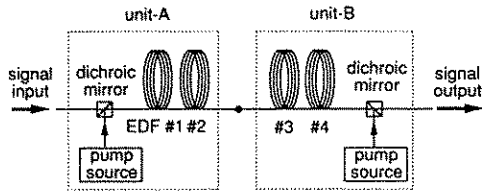


Fig. 6 Experimental Set-up

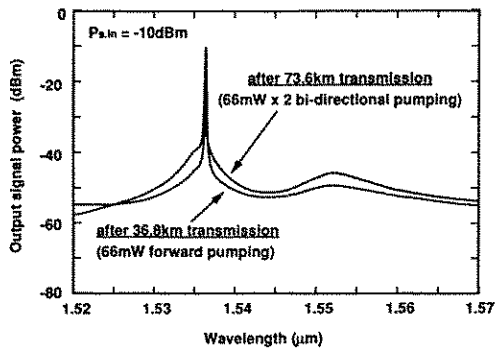


Fig. 7 Output spectra after 36.8 km (unit-A) and 76.8 km (unit-A and B) signal transmission.

なった。信号光と励起光の合成分波には誘電体多層膜フィルタを用いたカプラを使用した。信号光源には外部共振器付き可変波長 LD 光源を用い、波長は EDFA の最大利得波長に合わせ $1.535 \mu\text{m}$ とした。また、波長スペクトルの測定には光スペクトラムアナライザを使用した。ユニット A を用いた 36.8 km の実験では入射信号光パワー = -10 dBm に対して励起パワーを 66 mW としたときに信号光出力パワーが入射パワーと等しくなった。また、ユニット A, B を図 6 の配置で接続した 73.6 km ファイバでは前後双方向から各々 66 mW で励起したとき出力が入力信号パワーに等しくなった。このときの出力信号波長スペクトルを Fig. 7 に示す。自然放出光雑音レベルから求めた雑音指数は 36.8 km 伝送時が 9.2 dB, 73.6 km 伝送時が 12.1 dB であり前述の数値計算結果とはほぼ一致した。

次に、OTDR を使用して小信号時のファイバ長手方向の信号レベル変化を観測した。使用した OTDR の光源波長が $1.54 \sim 1.55 \mu\text{m}$ で EDFA の最大利得波長からずれていたため、今回使用し

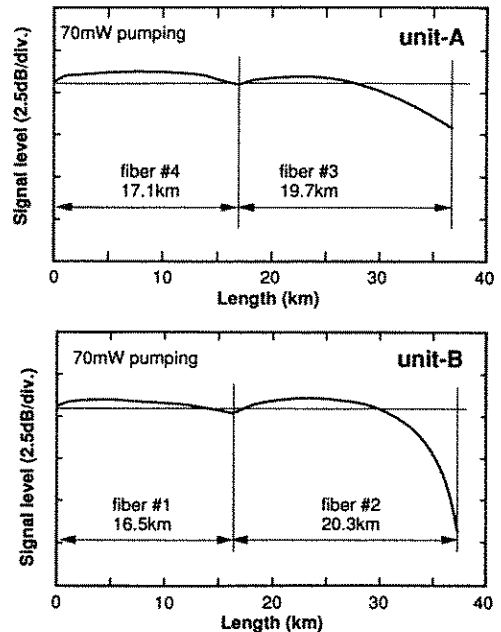


Fig. 8 OTDR observation of signal intensity deviation along the distributed EDFAs

た励起光源出力では 4 本のファイバ全部を接続した状態での観測ができなかった。そこでユニット A, B のそれぞれについて別個に測定をおこなった。Fig. 8 に測定結果を示す。OTDR の光源波長域では利得が十分でないためファイバ終端部付近でレベル低下がみられるが、それでも両グループ共 70 mW 励起において 30 km にわたって信号光レベル変化を 1 dB 以内に保っていることがこの結果からわかる。

5. むすび

伝搬信号光の強度変化を数 dB 程度に抑えながら、光ファイバのもつ固有損失をできるだけ長距離にわたって補償した分布型 EDFA を製作するために、2 準位のレート方程式を用いた損失補償特性の数値シミュレーションを行なった。その結果、固有損失 $0.38 \text{ dB/km}@1.48 \mu\text{m}$, $0.30 \text{ dB/km}@1.535 \mu\text{m}$ を有する分布型 EDFA において、励起パワー 60 mW, 入射信号光 -20 dBm 以下、最大信号光強度変化 $1 \sim 3 \text{ dB}$ としたとき、30 ~ 40 km の損失補償ファイバが実現可能であるこ

とがわかった。また、0 dB を越える入射信号光に対しては、損失補償長が急速に減少するため、小信号用に設計された損失補償ファイバをそのまま使用することは難しく、大信号に対応したEr濃度を有するファイバを必要になることを指摘した。損失補償ファイバの雑音指数を数値シミュレーションにより求め、上記条件の最大損失補償長のファイバに対して雑音指数は8.5~9 dB となることを示した。また、入射信号パワーが0 dBm を越えると雑音指数が急速に劣化することを示した。

シミュレーション結果に基づいてEr濃度を決定した分布Erドープ光ファイバを製作し、ファイバ長36.8 km のファイバが小信号入力において励起パワー66 mW で損失補償されること、このファイバを伝搬する信号光の強度変化が全長を通じて1 dB 程度であることを実験的に確認した。さらに2×66 mW 両方向励起を用いることにより73.6 km 長の損失補償ファイバが実現できることを実験的に示した。試作した損失補償ファイバの雑音指数はシミュレーション結果と良く一致した。

参考文献

- 1) 木村康郎, 中村正隆: 「光ファイバ増幅器」, オプトロニクス, no.107, pp.47-53 (1990).
- 2) M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, H. Kubota: "Wavelength multiple soliton amplification and transmission with an Er³⁺-doped optical fiber", J. Appl. Phys., vol. 66, no. 7, pp. 2803-2812 (1989).
- 3) M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, "Soliton transmission in a distributed, dispersion-shifted erbium-doped fiber amplifier", Opt. Amplifiers Applications Conf. (Monterey, CA), paper TuA7 (1990).
- 4) J. R. Simson, Hen-Tai Shang, L. F. Mollenauer, N. A. Olsson, P. C. Becker, K. S. Kranz, P. J. Lemaire, M. J. Neubelt: "Performance of a Erbium-doped

dispersion-shifted fiber amplifier", J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 2, pp. 228-233 (1991).

- 5) S. P. Craig-Ryan, B. J. Ainslie, C. A. Millar: "Fabrication of long lengths of low excess loss erbium-doped optical fiber", Electron. Lett., vol. 26, no. 3, pp. 185-186 (1990).
- 6) D. Tanaka, A. Wada, T. Sakai, R. Yamauchi, "Attenuation free, dispersion-shifted fiber doped with distributed erbium", Opt. Amplifiers Applications Conf. (Monterey, CA), paper TuB-4 (1990).
- 7) M. Morisawa, M. Yoshida, H. Ito, T. Gozen, H. Tanaka, M. Yotsuya: "Er³⁺-doped VAD fibers for lumped amplifiers and distributed active transmission lines", Opt. Amplifiers Applications Conf. (Monterey, CA), paper TuB-5 (1990).
- 8) G. R. Walker, D. M. Spirit, D. L. Williams, S. T. Davey: "Noise performance of distributed amplifiers", Electron. Lett. vol. 27, no. 15, pp. 1390-1391 (1991).
- 9) A. Yariv: "Signal-to noise considerations in fiber links with periodic or distributed optical amplification", Optics Lett., vol. 15, no. 19, pp. 1064-1066, 1990.
- 10) C. R. Giles, E. Desurvire: "Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers", J. Lightwave Technol. vol. 9, no. 2, pp. 147-154 (1991).
- 11) 山下真司, 大越孝敬, "光増幅器を用いた光通信システムの解析", 信学技報, OSC90-20, July, 1990.
- 12) E. Desurvire, "Analysis of erbium-doped fiber amplifiers pumped in the ⁴I_{15/2}-⁴I_{13/2} band", Photo. Tech. Lett., vol. 1, no. 10, p. 293, 1989.
- 13) B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, S. T. Davey, J. R. Armitage, C. A. Atkins, R.

Wyatt: "Optical analysis of erbium doped fibers for efficient lasers and amplifiers", Technical Digest, IOOC, Kobe, paper 20A3-2 (1989).

- 14) K. Kikuchi: "Generalized formula for optical-amplifier noise and its application to erbium-doped fiber amplifiers", Electron. Lett., vol. 26, no. 22, pp. 1851-1853, 1990.
- 15) P. H. Sarkies, J. N. Sandoe and Parke, "Variation of Nd^{3+} cross section for stimulated emission with glass composition," J. Phys. D, vol. 4, p. 1642, 1971.
- 16) D. Tanaka, A. Wada, T. Sakai, T.

Nozawa, R. Yamauchi, "73.6 km attenuation free concatenated fibers doped with distributed erbium", Opt. Amplifiers Applications Conf. (Snowmass village, Co), paper ThD-4 (1991).

〔著者紹介〕

和田 朗(わだ あきら)

昭和54年 上智大・理工・物理卒。

昭和57年 同大学修士課程修了。

同 年 藤倉電線株式会社入社。

現 在 同社, 光エレクトロニクス研究所, 光通信研究室勤務。

光ファイバの研究開発に従事。