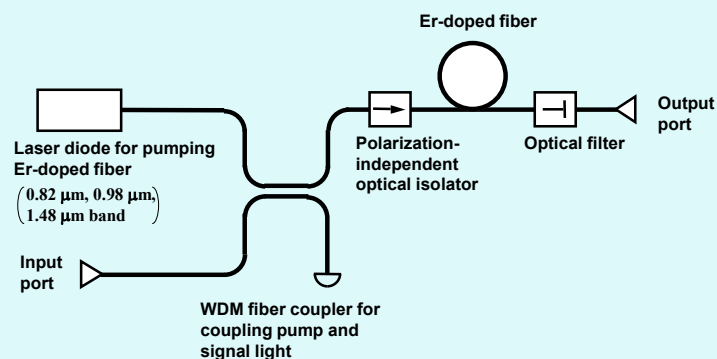


4

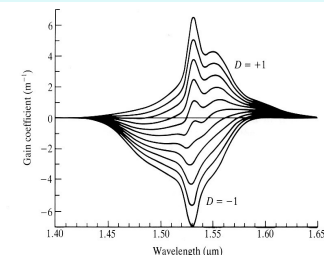
エルビウム添加光ファイバー増幅器 (EDFA)の構成



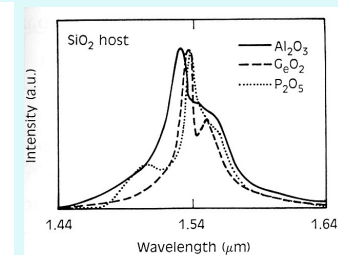
EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier

9

異なった反転分布状態におけるEDFAの利得の波長依存性と共添加特性



From no pumping ($D = -1$) to complete pumping ($D = +1$)

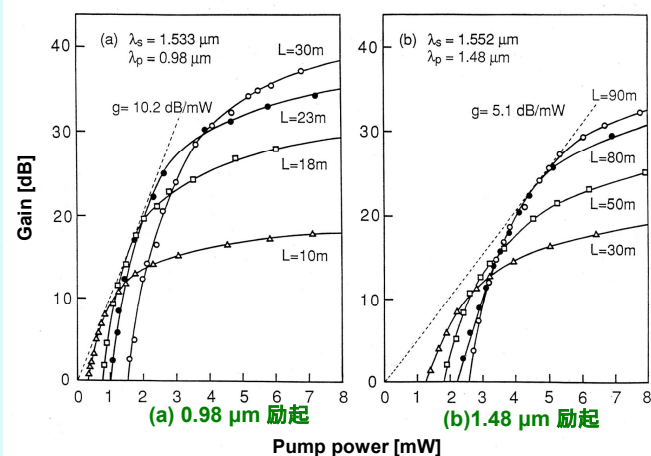


Aluminum co-doping plays an important role in expanding the gain bandwidth, where the Al_2O_3 and Er_2O_3 doping concentrations are almost the same.

10

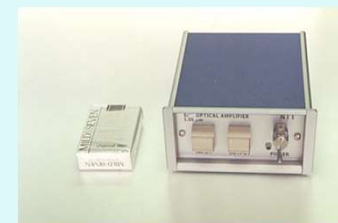
波長0.98 および1.48 μm励起の高効率EDFA

Er^{3+} ion 210 ppm / Al^{3+} ion 500 ppm / Fiber MFD 4.8 μm



11

世界で最初の小型Erbium-doped fiber amplifier (EDFA)



Prototype in 1989

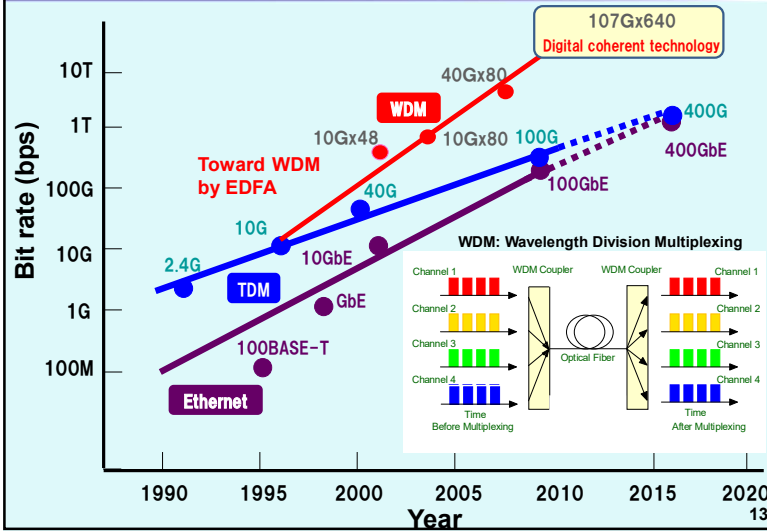
•Paper:
M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Efficient Er^{3+} -doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode," Appl. Phys. Lett., vol. 54, pp. 295-297 (1989).



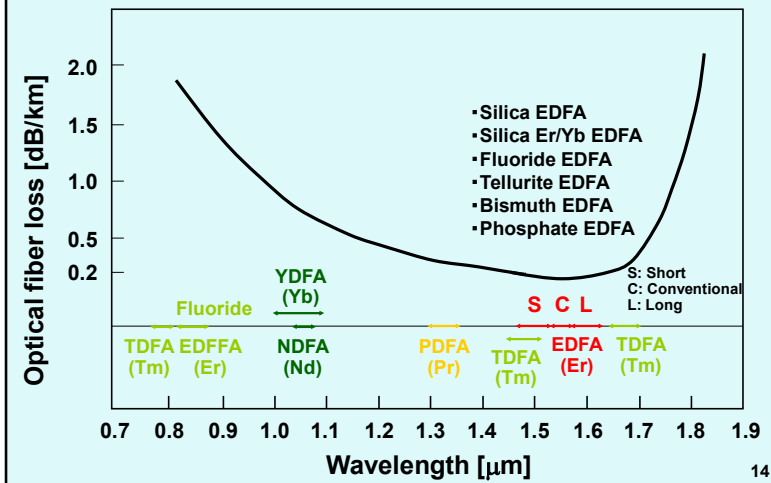
•Patent: JP2128337 "Optical fiber amplifier"

12

光通信システムにおけるEDFAのインパクト-WDMの出現-



その後開発された各種光ファイバー増幅器とその動作波長



光ソリトンの特徴

ソリトンの発見：浅い水の表面を伝わる孤立波の観測

英国人・John Scott-Russell 造船学者・流体力学者

馬に引かれて運河を進んできた船が急に停船した時、船の船先に盛り上っていた水が船から離れて前進し始め、しかも形を変えずに進んだ。



光ソリトンの特徴	信号伝送上の利点
<p>無歪みの信号伝搬（無損失の場合）</p> <p>光ファイバ中の非線形効果によるパルス圧縮と分散によるパルス広がりとのバランスで、波形を変えずに伝搬する。</p> <p>線形信号の場合</p> <p>入射波形 → 出射波形</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 超高速光信号伝送が可能 ・ 光の領域で自動等化
<p>光増幅による波形整形</p> <p>振幅を増幅するだけで、広がったパルスが元の形に戻る。</p> <p>入射波形 → 光損失 → 光増幅 → 再生波形</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電子回路を使用しない全光伝送システムを実現可能 ・ 超高速フォトニックネットワーク/スイッチングへの応用

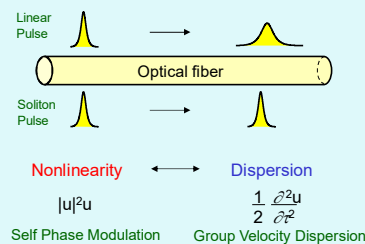
15

海のソリトン



16

光ソリトン (1973)



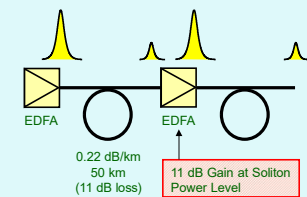
Fiber	Normal Single-Mode Fiber	Dispersion-Shifted Single-Mode Fiber
P _{N=1}	0.35 W	2.5~10 mW
	$\tau=12$ ps $ D =16$ ps/nm/km $n_2=3.2 \times 10^{-16}$ cm ² /W $A=1 \times 10^{-6}$ cm ² $\lambda=1.55$ μ m	$ D =0.4\text{--}1$ ps/nm/km $A=3\text{--}5 \times 10^{-7}$ cm ²

Nonlinear Schrödinger Equation

$$(-i) \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u$$

Soliton Power $P_{N=1}$

$$P_{N=1} = 0.766 \frac{\lambda^3}{\pi c n_2} \frac{|D|}{\tau^2} A$$



A. Hasegawa and F. Tappert, *Appl. Phys. Lett.*, vol.23, pp. 142-144 (1973).

17

世界で最初のソリトン伝送実験 (1990)

IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 2, NO. 3, MARCH 1990

3.2–5 Gb/s, 100 km Error-Free Soliton Transmissions with Erbium Amplifiers and Repeaters

MASATAKA NAKAZAWA, MEMBER, IEEE, KAZUNORI SUZUKI, AND YASUO KIMURA

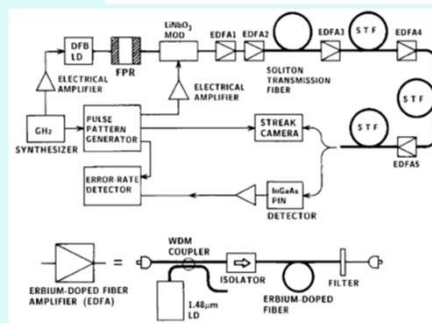


Fig. 1. Experimental setup for soliton transmission with a preemphasis technique using erbium amplifiers and repeaters.

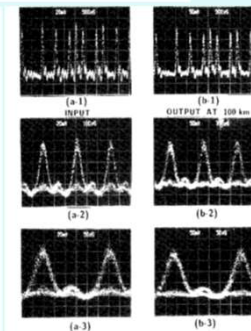


Fig. 6. Digitally coded input and output soliton traces. (a-1) Input soliton; (b-1) Output soliton; (a-2) Pseudorandom input signal, expanded in (a-3); (b-2) Pseudorandom output soliton signal, expanded in (b-3).

18

100 万km光ソリトン伝送実験 (1991)

10Gbit/s SOLITON DATA TRANSMISSION OVER ONE MILLION KILOMETRES

M. NAKAZAWA
E. YAMADA
H. KUBOTA
K. SUZUKI

6th June 1991

NTT Transmission Systems Laboratories
Lightwave Communication Laboratory
Tokai, Ibaraki-Ken 319-11, Japan

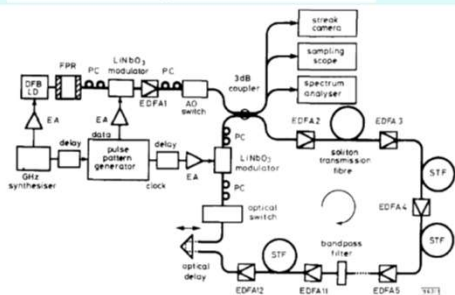


Fig. 1 Experimental setup for circulating coded soliton train in 510 km loop

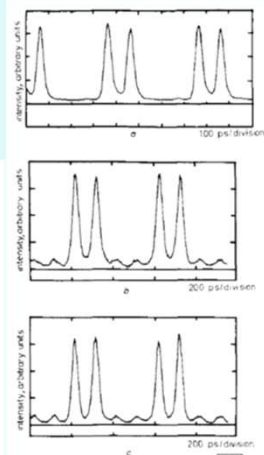


Fig. 2 10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometres

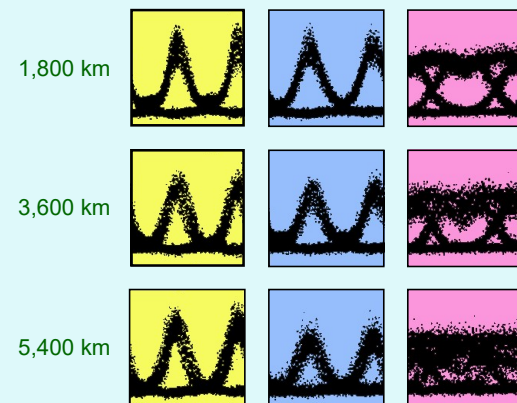
a Soliton waveforms at 500 km with reshaping
b Soliton waveforms over 400 thousand kilometres
c Soliton waveforms over one million kilometres

19

19

アイパターンの比較

Soliton RZ(零分散) NRZ(零分散)



RZ: Return to Zero
NRZ: Non Return to Zero

20

光ソリトン通信の変遷 (1973-2010)

1st generation (Ideal soliton)

- Soliton was simply described by Nonlinear Schrodinger equation with a sech pulse
- Fiber dispersion is anomalous and constant
- Uniform amplitude soliton
- Proposed by Hasegawa and Tappert in 1973 and experimentally observed by Mollenauer

2nd generation (Dynamic soliton)

- Soliton transmission using EDFA (Nakazawa), Dynamic soliton
- Averaged soliton with amplitude and width changes
- Theoretical derivation of guiding center soliton (Hasegawa and Kodama)

3rd generation (Dispersion-managed soliton)

- Proposal for dispersion-compensated soliton (Kubota and Nakazawa)
- Dispersion-allocated soliton (Nakazawa), Dispersion-managed soliton, and another name was a chirped Gaussian pulse with weak nonlinearity (Suzuki, Bergano)
- Stretched pulse mode-locking (Ippen, Haus, Tamura)

This dispersion-managed soliton has been commercially installed not only in Australia (3000 km) but also in transpacific (9000 km) and transatlantic (5500 km) submarine optical transmission systems.

21

まとめ

今日の光通信ではなくてはならないエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA:Erbium-doped Fiber Amplifier)の出現とその原理、更にそれを用いた波長多重伝送技術についてお話した。後半では1990～2010年頃に超高速光通信技術として世界中で研究されたソリトン伝送についてお話した。ソリトンの物理はの今日の光通信を確立するために大きな役割を果たしている。

22