

世界の情報通信を支える “縁の下の力持ち”光通信

第3回 3M 技術

中沢 正隆

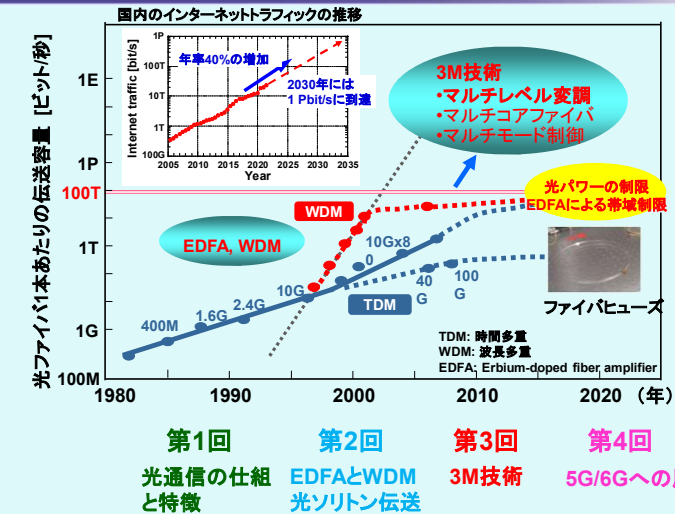
東北大学 電気通信研究機構

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1



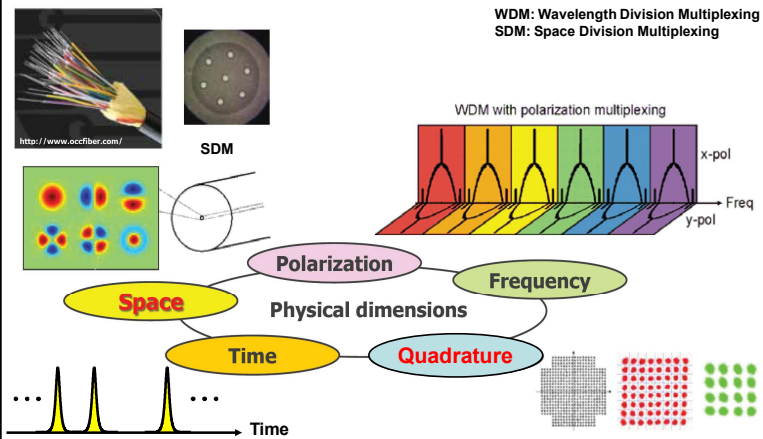
1

光通信インフラの飛躍的な高度化(3M技術)の重要性



2

情報を載せられる物理事象



By courtesy of P. Winzer

3

光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会 (2008)

- 現状の光通信における容量限界を打破するための技術を検討するために、2008年1月に発足
- 20名以上の産学官の研究者の間で、現状技術の限界や萌芽技術の把握、今後の技術課題を検討
- 2008年11月に「光通信インフラの飛躍的な高度化技術に関する国際シンポジウム (EXAT2008)」を開催

EXAT: Extremely Advanced Transmission
(EXAは 10^{18} のこと)

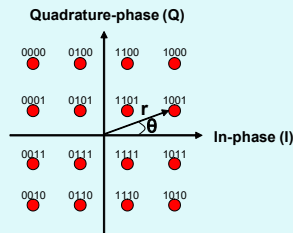


4

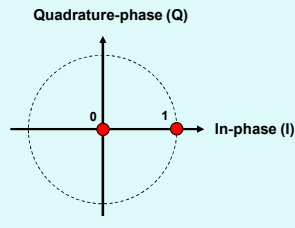
1つ目の“M”:多値変調

Quadrature Amplitude Modulation (QAM):

- Two carriers with the same frequency are amplitude-modulated independently.
- The phases of the two carriers are shifted 90 deg. from each other.
- 2^N QAM processes N bits in a single channel, so it has N times the spectral efficiency of OOK.



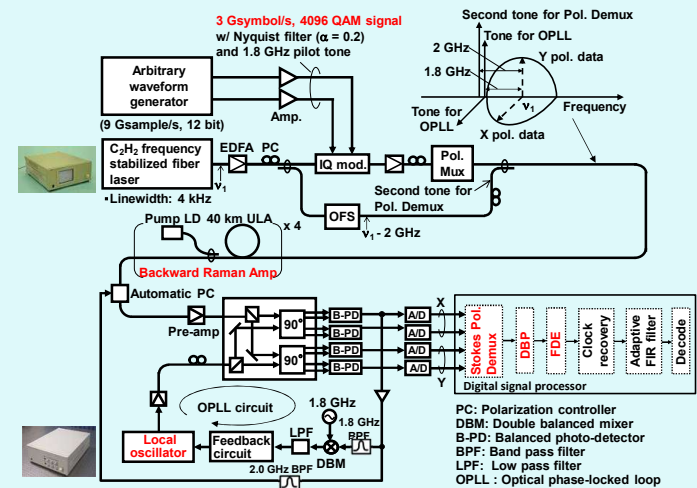
Constellation map for 16 ($=2^4$) QAM



With OOK

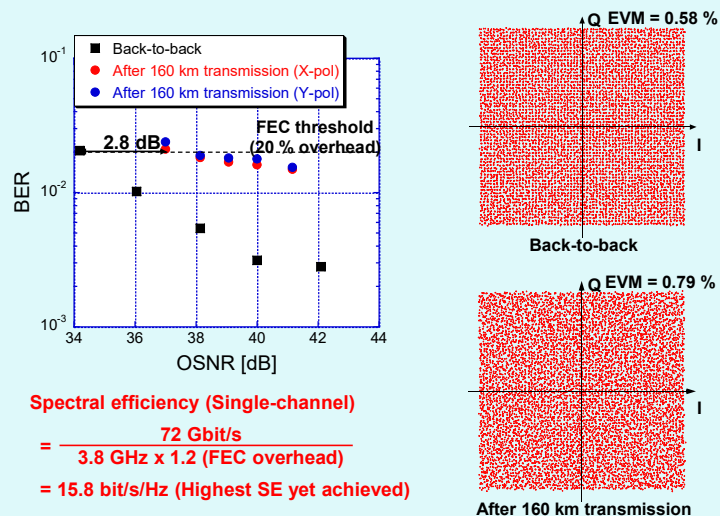
5

偏波多重, 3 Gsymbol/s, 4096 QAM (72 Gbit/s) コヒーレント光伝送システム



6

72 Gbit/s, 4096 QAM伝送の実験結果



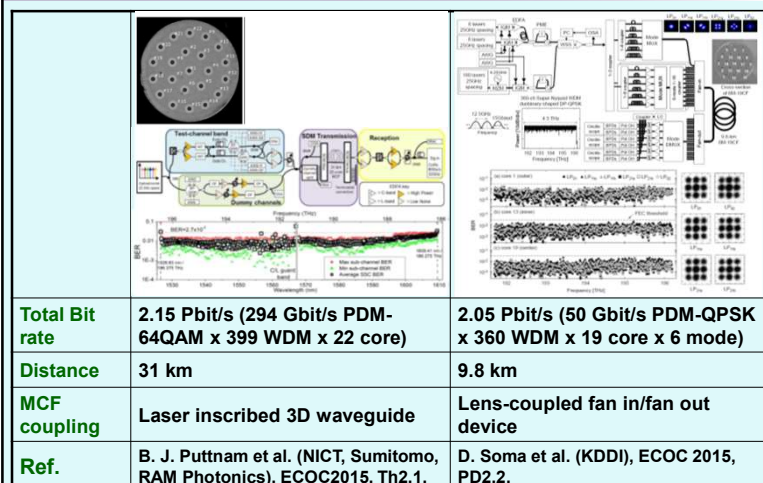
7

2つ目の“M”: マルチコアファイバー

# of cores	19	37	36 (3 modes/core)
Core pitch	39.0 μm (Inner) 37.6 μm (Outer)	29.1 μm	34 μm
Cladding diameter	220 μm	248 μm	306 μm
Loss	0.285 dB/km	0.241~0.291 dB/km	0.242~0.308 dB/km
Aeff	85 μm ²	80.0~81.4 μm ²	74~77 μm ² (LP ₀₁)
Crosstalk	- 57 dB/km	- 50 dB/km	- 39 dB/km
Reference	J. Sakaguchi et al. (NICT, Furukawa, Optoquest, OFS), ECOC2013, Th.1.C.6.	Y. Sasaki et al. (Fujikura, NTT, DTU), OFC2017, Th1H.2.	J. Sakaguchi et al. (NICT, Sumitomo, Optoquest), OFC2015, Th5C.2.

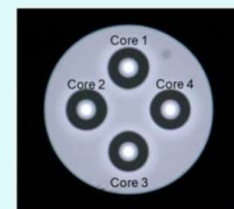
8

マルチコアファイバを用いた空間多重伝送実験

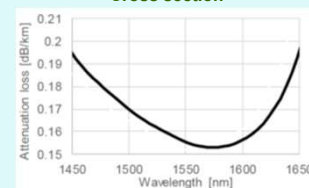


9

非結合型低損失4-コアファイバ(外形125μm)



Cross section



Loss spectrum

Characteristics	Unit	Value
Cladding diameter	μm	125
Coating diameter	μm	245
Core pitch	μm	43.0
Effective area	μm ²	87.1
Cut-off wavelength (22m)	nm	1539
Dispersion	ps/nm/km	22.6
Dispersion slope	ps/nm ² /km	0.06
Attenuation loss	-	-
Core 1	dB/km	0.155
Core 2	dB/km	0.156
Core 3	dB/km	0.157
Core 4	dB/km	0.155
Inter core crosstalk	-	-
Core 1 – Core 2	dB/100km	-63.8
Core 2 – Core 3	dB/100km	-60.7
Core 3 – Core 4	dB/100km	-62.7
Core 4 – Core 1	dB/100km	-61.8

Characteristics of fabricated MCF at 1550 nm

Low loss (0.155 dB/km) and low crosstalk (< - 60 dB/100 km) were achieved with trench-assisted index profile.

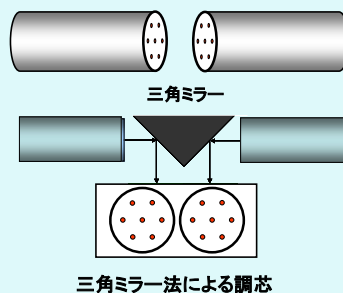
M. Takahashi et al. (Furukawa Electric), ECOC 2020, Th1A-5.

10

マルチコア接続技術(1)

マルチコア融着接続技術

コアの調芯技術として、PANDAファイバ(三角ミラー法、側面観察法)以上に高精度なコアの検知・位置合わせが必要



三角ミラー法による調芯



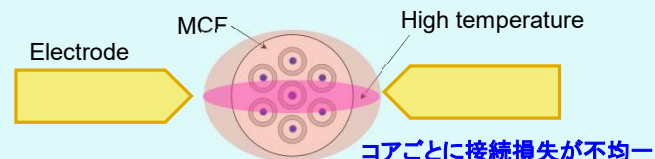
MCF
接続損失
0.1 dB以下

マルチコアファイバ用融着器の一例
吉田ほか、フジクラ技報 120, 12-16 (2011)

11

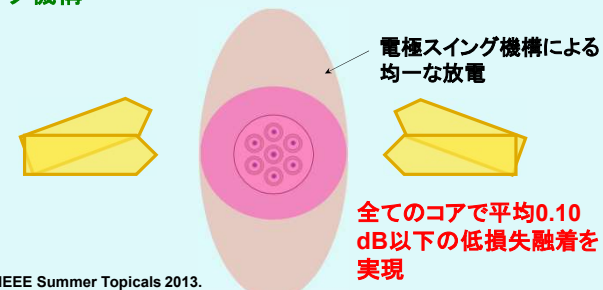
マルチコア接続技術(2)

固定電極



コアごとに接続損失が不均一

電極スイング機構



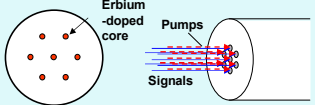
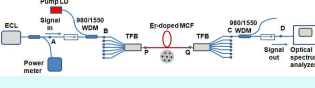
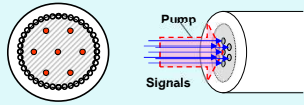
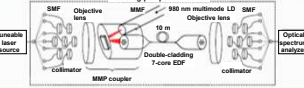
電極スイング機構による
均一な放電

全てのコアで平均0.10
dB以下の低損失融着を
実現

Y. Amma et al., IEEE Summer Topicals 2013.

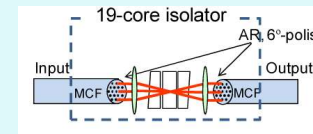
12

マルチコアEDFA

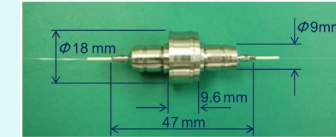
	Individual core pumping	Uniform clad pumping
	 	 
Pump coupling	Tapered fiber bundled coupler	Objective lens coupling
Net gain	23 ~ 27 dB	> 14 dB
Crosstalk	-30.2 ~ -36.6 dB (15 m)	-32.7 ~ -38 dB (10 m)
NF	< 4 dB	< 9 dB
Ref.	K. S. Abedin et al. (OFS), Opt. Express 19 (2011) 16715.	Y. Tsuchida et al. (Furukawa), OFC 2014, Tu2D.1.

13

マルチコアファイバーアイソレーターとマルチコアEDFAの外観



19-core isolator with free-space optics^[1]



NTT

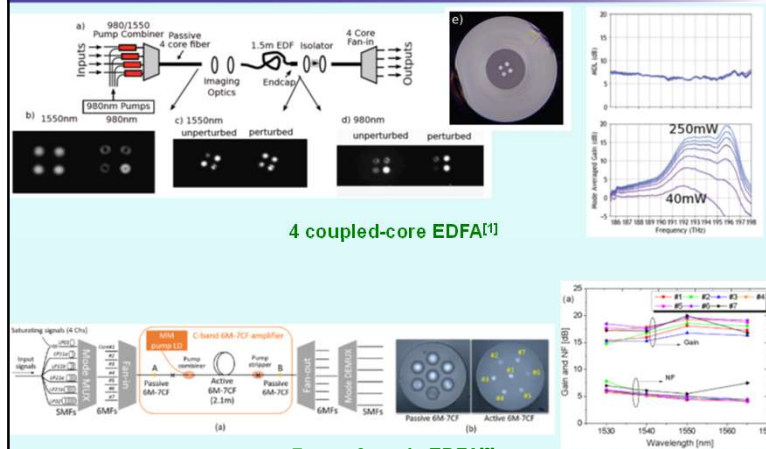


Furukawa

Overviews of multi-core EDFAs

[1] J. Sakaguchi et al. Opt. Express 22, 90-95 (2014). 14

結合型マルチコアEDFAおよびヒューモードマルチコアEDFA



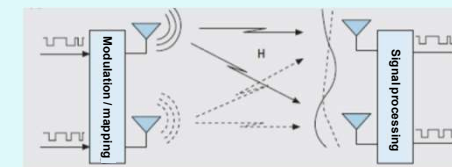
4 coupled-core EDFA^[1]

7-core 6-mode EDFA^[2]

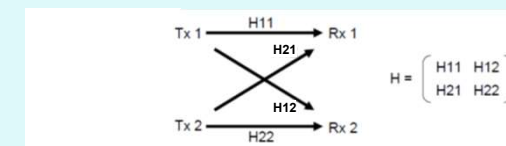
[1] N. K. Fontaine et al., OFC 2017, Th5D.3. [2] S. Jain et al., ECOC 2020, M.2.A.4. 15

3つ目の “M”: マルチモード制御

- In a wireless telephone system, a signal is transmitted through multiple paths between multiple antennas at the transmitter and receiver.
- By representing the multiple paths as a **channel matrix H**, the transmitted channels are separated via signal processing.



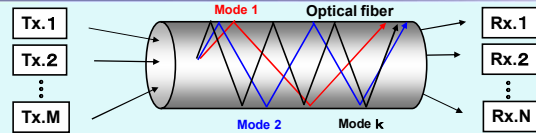
MIMO system



Channel matrix H

16

MIMO を利用したモード多重伝送



(1) SISO (Single Input Single Output) (One Tx, One Rx)

Received signal: $y(t) = \sum_{k=1}^Q h_k x(t) + n(t)$ $x(t)$: Input signal, $n(t)$: Noise, Q : Number of modes

Distortion in mode k : $h_k = a_k K_k e^{j\omega_k \tau_k}$ a_k : Loss of mode k , τ_k : Group delay of mode k
 K_k : Coupling ratio to mode k

(2) MIMO (Multiple Input Multiple Output) (M Tx, N Rx)

Received signal at Rx i : $y_i(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^Q h_{ijk} x_j(t) + n_i(t) = \sum_{j=1}^M H_{ij} x_j(t) + n_i(t)$, $i = 1 \dots N$

h_{ijk} : Distortion when transmitted from Tx j to Rx i via mode k

→ Matrix representation $y(t) = H U x(t) + n(t)$ U : unit matrix, or unitary matrix describing mode multiplexer

Recovery of transmitted signal $x(t)$ from received signal $y(t)$

• Diagonalize H in the form $D = V^\dagger \cdot H \cdot U$ using unitary matrices U , V

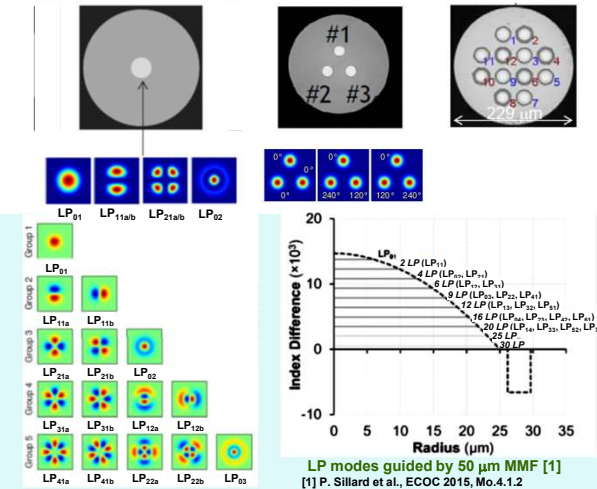
• x can then be obtained by receiving y by multiplying U and V^\dagger to x and y , respectively

$V^\dagger y(t) = V^\dagger H (U x(t)) + V^\dagger n = D x + V^\dagger n$ → Extract x by dividing with diagonal components (no noise enhancement)

17

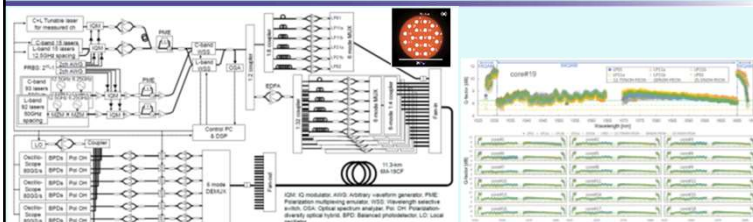
モード多重用 Few-mode fibers

Few-mode fiber (FMF) Coupled-core fiber Multi-core FMF

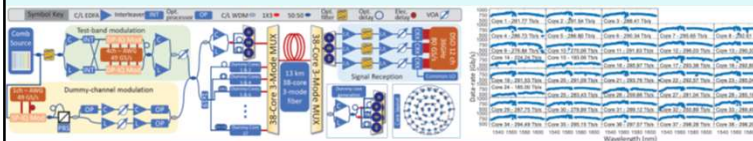


18

10 Pbit/s マルチコア/ヒューモードファイバ伝送実験



① 10.16 Pbit/s (19 core x 6 mode x 739 WDM x 121 Gbit/s) PDM-16/64 QAM transmission over 11.3 km FMF with 12x12 MIMO D. Soma et al., ECOC 2017, PDPA.1



② 10.66 Pbit/s (38 core x 3 modes x 368 WDM x 254 Gbit/s) PDM-64/256 QAM transmission over 13 km MMF with 6x6 MIMO

G. Rademacher et al., OFC 2020, Th3H.1

19

まとめ

今日の情報量の伸びは年率40%以上に上がるが、このことは20年後には今日の約1000倍の伝送容量が必要となることを意味する。そのような情報爆発に備えるために我々が研究開発してきている3M (Multi-level modulation, Multi-core fiber, Multi-mode control)技術についてお話しした。

20