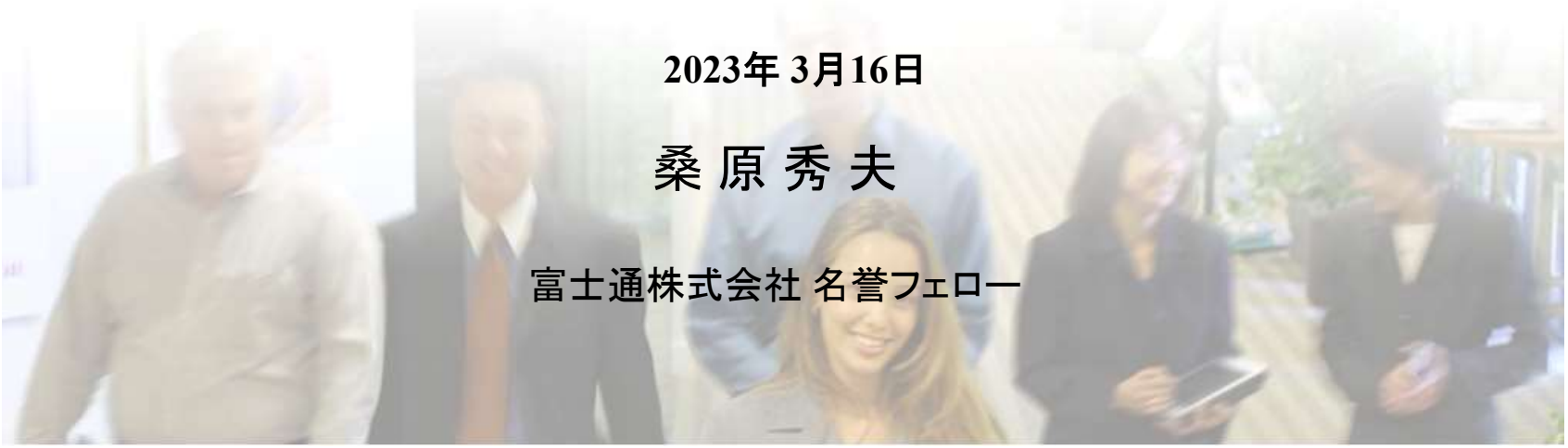
光ファイバ通信の研究開発に携わって

- 初期の研究開発から、波長多重伝送、コヒーレント光通信へ -

(苦労, 失敗, 喜び？)



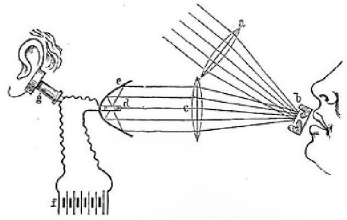
2023年 3月16日

桑 原 秀 夫

富士通株式会社 名誉フェロー

光通信の概略の歴史

紀元前	狼煙　烽火
18世紀	腕木信号　Claude Chappe　(1792)
	船舶の間の手旗信号、投光機による通信　(～1 bit/sec ?)
1870	内部全反射による曲線中の光導波　J. Tyndall
1880	Photophone　太陽光と鏡を使った通信　A.G. Bell　→
	（Bellによる電話の発明の4年後）
1960	ルビーレーザの発振　T. Maiman（Hughes Res.)
1960年代	レンズ列、ガスレンズによる空間伝搬
1963	東工大での実験　（He-Ne Laser＋光ファイバ束+光電管）
1966	Fused Silica Fiberの低損失可能性の示唆　Charles K. Kao他 (STL, UK)
	当時のLossは1000 dB/km　(Dr. Kao: 2009年にノーベル物理学賞）
1970	光ファイバの低損失化　20 dB/km at 630nm　(Corning)
1970	AlGaAs/GaAs DH半導体レーザの室温連続発振　（林他　Bell研究所）
1970年代前半	研究開発がスタート　850nm帯, Multi-Mode Fiber,　Si-PD,　Mbit/s
1980前後	波長が850 nm帯から1300 nm帯へ,　MMF からSMFへ,　Ge-PDへ　TDM
1980年代	コヒーレント光通信の研究　（後に一時停滞）
1989頃	光増幅技術(EDFA)が実用可能レベルに,　1550nm帯での波長分割多重(WDM)が可能に
1996	1.1 Tbit/s 伝送の実現（Fujitsu Lab, OFC1996 PD)
2000頃	光通信は「線」から「面」へNetwork化　(ROADM等)
2005～	コヒーレント＋DSP　による高度な伝送技術,　光周波数帯域の管理・活用
現在	多波長帯WDM、空間分割多重による更なる大容量化、光処理等の研究



（Wikipediaより）

光ファイバ通信との関わり　（学生時代）

FUJITSU

・1972-73 修士課程　光ファイバの方向性結合器の研究（集中型, 分布型）

・光ファイバの入手：①富士通の明石工場, ②胃カメラ
- マルチモードファイバの方向性結合器。 MMFの複雑さ, 理論との整合の難しさ

・SMFはコア径が細すぎて扱えなかった（波長 0.8μm 帯ではコア径は 3-5μm）
胃カメラの光ファイバを熱して引っ張り細くして実験
（あまり細くしすぎると空中に浮いて漂い, 危険）

・光ファイバ内のパワーの分岐やモニターなど基本的な機能

Power Transfer of a Parallel Optical Fiber Directional Coupler

H. KUWAHARA, J. HAMASAKI, AND S. SAITO

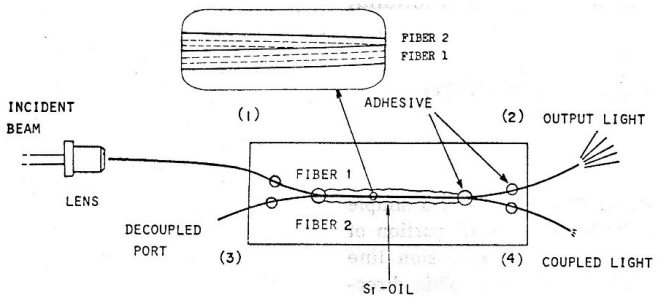


Fig. 1. Directional coupler made up of two parallel fibers.

A Semi-Transparent Mirror-Type Directional Coupler for Optical Fiber Applications

H. KUWAHARA, J. HAMASAKI, AND S. SAITO

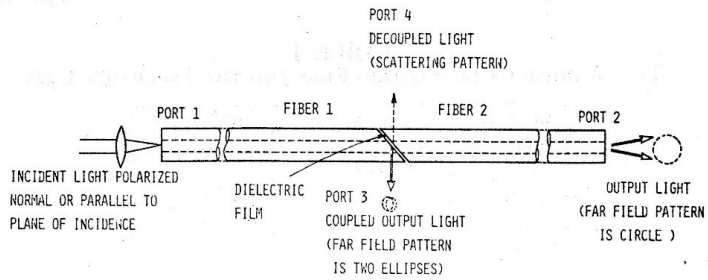


Fig. 1. The directional coupler by dielectric film and its far-field pattern.

（IEEE Transaction on MTT, pp.178-179, pp.179-180, Jan., 1975 ）

光ファイバ通信との関わり　（新入社員のころ）

FUJITSU

・1974 富士通入社 配属先は先行技術研究部（部長　関沢義氏　後に富士通社長に）

- 先行技術研究部では、光通信，Josephson素子，文字認識技術など，黎明期の技術を広くカバー
- 当時の光ファイバ通信は 0.8 μm帯，光源はLED，マルチモードファイバ
- 基本技術がまだ未確立　接続技術としてファイバのコネクタ開発を担当
  （ 細く長い穴を偏芯なく ひたすら機械精度の追及）

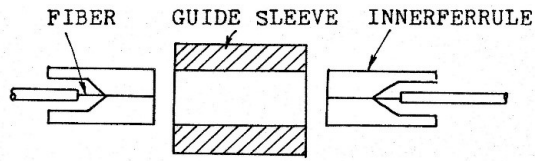


Fig.1 The basic structure of optical fiber connector

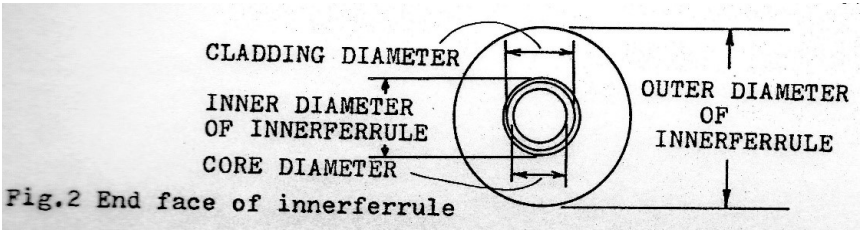


Fig.2 End face of innerferrule

- 光ファイバ通信のシステム研究の主力はTDM（時分割多重）の開発　(電子回路の高速化)
- 高速化の中で、半導体レーザの基本的な周波数特性（IOOC’77），インピーダンス測定などで論文執筆

Measurements of Impedance of DH Semiconductor Lasers

H. KUWAHARA, Y. DAIDO, AND H. FURUTA

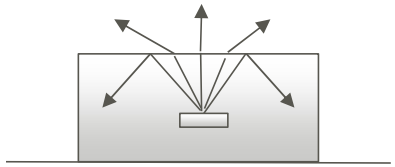
Abstract—Impedance of GaAs-AlGaAs DH lasers were measured to frequency and the bias current. Real parts of the impedance were about 0.7-1.8 Ω and they were almost flat in the frequency range of 0.4-1.9 GHz. Imaginary parts were found to be capacitive and its absolute value increases with frequency.

（Proceedings of the IEEE, Vol.65, No.9, pp.1412-1414, Sep., 1977 ）

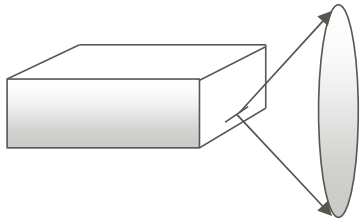
光ファイバ通信との関わり　（一研究員として）

FUJITSU

・光源 (LED, LD) とファイバの結合。
　・ファイバのNA（受光角）が小さいため, 光源の素子との結合効率は非常に低く,
　　送信パワーは 数 μW 程度だった



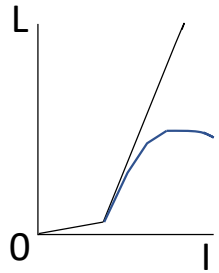
LED（素子内部での反射が大きく、
出射した光も大きく拡がっている。）



半導体レーザ（活性層に垂直な方向に大きく
拡がっており、Far Field Patternは楕円）

・光ファイバ通信システムの開発と光半導体素子開発は, 当時, いわば別の世界
　・光モジュールは間をつなげる役目

・1979-1980　光源の長波長化 (0.8μm帯から1.3μm帯へ) ファイバも MMFからSMFへ
　・光パワーメータの自作: 市販品は受光素子がSiのため, 1.3 μm は受光不可
　　・1.3 μm 帯受光には当時は熱電対型のみ。受光面が小さく奥まっており使用不可
　　・半導体レーザの出射光の拡がり角(FFP)が大きく, 大口径Ge 受光素子を捜す
　・当時の1.3 μm 半導体レーザは熱に弱く、測定中に出力が低下 (I-Lカーブが湾曲) →
　・IR Phosphor（赤外線蛍光板）を用いた真っ暗な暗室での実験



半導体レーザと光ファイバの結合

FUJITSU

・半導体レーザは出射光の拡がり角(FFP)が大きく, SMFへの結合効率が数%と低かった
・種々の結合方法を検討し, ファイバの先をテーパ上に細くし, 先端を半径の小さい半球状のレンズをつけたテーパ先球（TH）ファイバによる結合で約40%の結合効率を達成。
（TH Fiber: Tapered Hemispherical-end Fiber)
・大学院時代のファイバを熱して引っ張り細くした経験が生きた？

・1980年： ECOC'80 (York, England)で初の海外出張。英語での発表。
・ THファイバで半導体レーザからSMFへの結合効率38%を達成。（後日, 40%以上に）
・ ECOC'80 では合わせて2件発表。厳しい社内でのリハーサル。丸暗記。

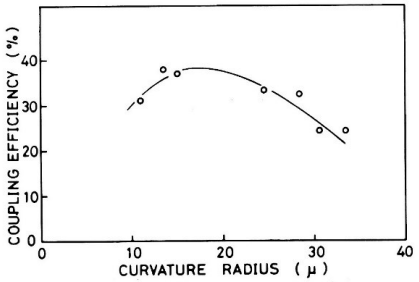


Fig. 1. Coupling efficiency dependence on the curvature radius of the hemispherical end. The same laser is used for all TH fibers. The optimum curvature radius lies in the 15–25-μm range.

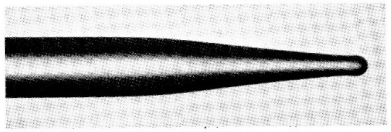


Fig. 2. Tip of a TH fiber (100×); cladding diameter 125 μm; radius of end hemisphere 19 μm.

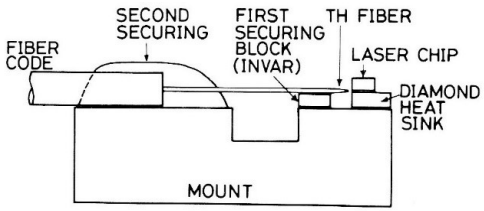


Fig. 6. Schematic view of fastening scheme. First fastener is made of Invar to match the small thermal expansion coefficient of the diamond heat sink. Second fastener is a buffer.

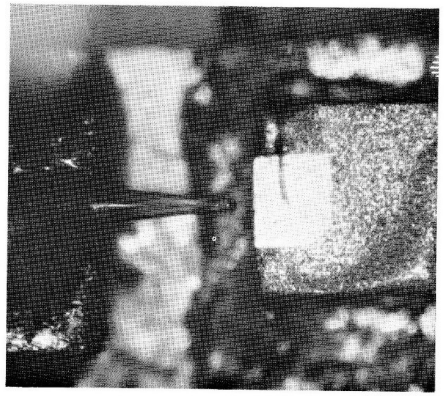
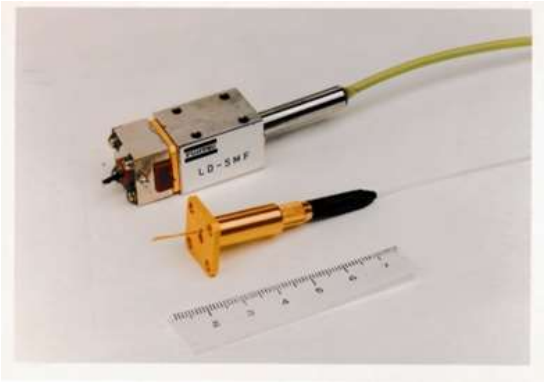


Fig. 7. Magnified view of the coupling section.

(ECOC'80, pp.191-194, 1980)
(Applied Optics, Vol.19, No.15, pp.2578-2583, 1980)
(Applied Optics, Vol.22, No.17, pp.2732-2738, 1983) (反射光)

半導体レーザモジュール（THファイバ結合）

FUJITSU



（1980年頃）

テーパ先球化シングルモードファイバ付き
半導体レーザモジュール

適用例1　400 Mb/sシステム
（左側　中央）

適用例2　海底伝送システム
（ 左端　及び　右端 ）

課題：　1. 経時安定性
　　2. 反射光による半導体レーザの特性変化（雑音増大）

光非相反素子 （反射光による雑音増大への対策）

FUJITSU

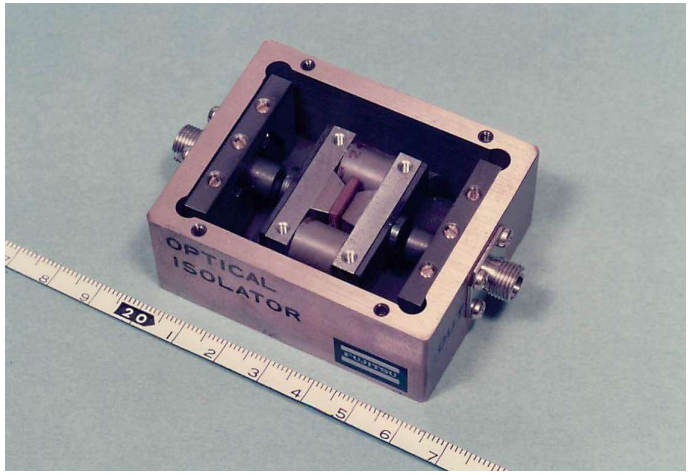
・光アイソレータの開発（磁気光学効果との出会い）

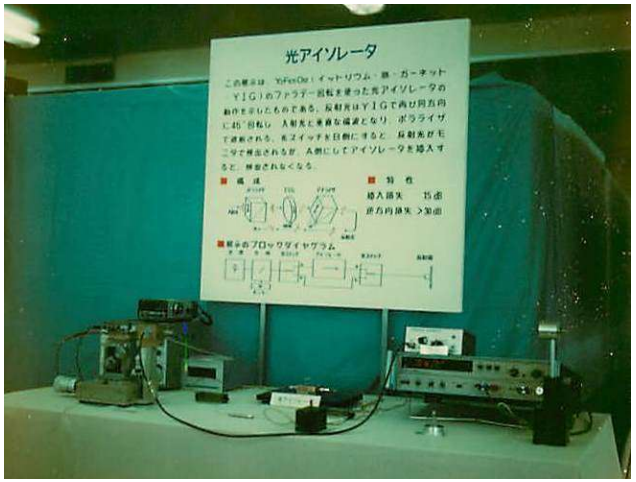
・長波長化に伴い、YIGなどの磁気光学素子が透明領域になった。

・YIGのファラデー効果を利用

・FDK湖西工場に行き、YIGを入手　光学特性の評価測定から始め 光アイソレータを試作 (1978-79)

・富士通研究所10周年展示でデモ





アイソレータ付半導体レーザモジュール

FUJITSU

・半導体レーザの動作が反射光により不安定化 （高い効率結合もアダに）
・半導体レーザのスペクトルがきれいになるほど、干渉による不安定性が増大

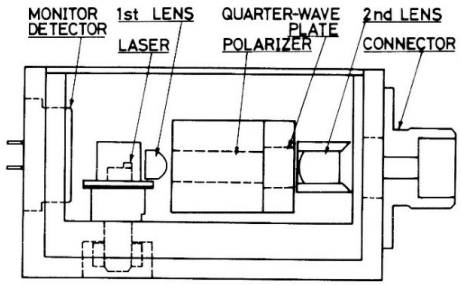


Fig. 4. The structure of the laser-to-fiber coupling module with the optical isolator.

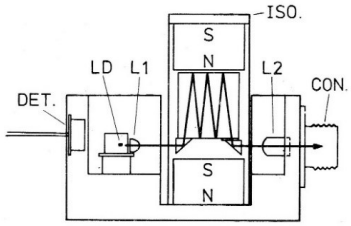
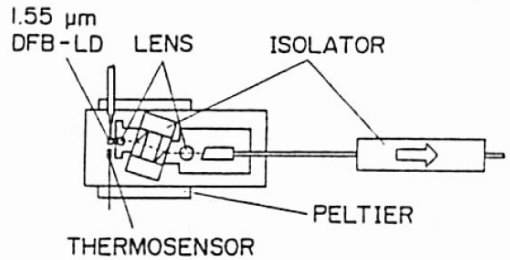


Fig. 6. Configuration of the laser-fiber coupling module. LD, Laser diode, L1; Collimating lens, L2; Focusing lens, ISO; Isolator, CON; Fiber connector, DET; Monitor detector.



・簡易型光アイソレータ付半導体レーザモジュール（偏光板＋λ/4板：ファイバ入射端からの反射を抑止）

(Applied Optics, Vol.19, No.2, pp.319-323, 1980)

・0.8 μm帯アイソレータ付半導体レーザモジュール（ファラデー回転ガラスの回転角が小さいため光路長が長い）

(Optics Communications, Vol.40, No.2, pp.99-104, 1981)

・複合レンズ方式光学系にYIGアイソレータを入れた半導体レーザモジュール

(ECOC'87 pp.349-352, 1987)

アナログ強度変調 （加入者系、CATVに向けて）

FUJITSU

・CATV等に向けた TV映像信号分配のためのアナログ強度変調。（低価格化を目指して）

・ノイズ (S/N), 歪の勉強

・Modal Noise : MMFの接続点などでMode間の結合/干渉で発生し、振動等で雑音発生
(R.E. Epworth, ECOC1978, pp.492-501)

・半導体レーザ (0.8μm帯) のコヒーレンスをいかに「低減」するかを議論

・半導体レーザのコヒーレンスの測定 (Michelson干渉計による)

・非線形歪 (① 接続点の反射で発生 ② PDバイアス回路により発生)

・ファイバコネクタが Physical Contact タイプではなかったため,
フレネル反射が1面で4%, 2面で最大8%（干渉により変化）ある

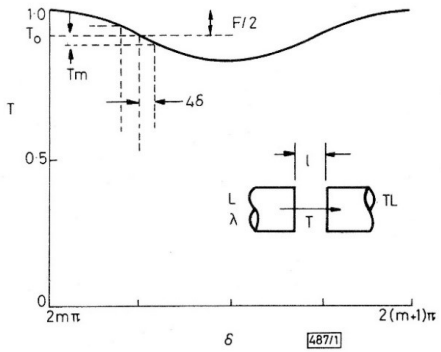


Fig. 1 *Transmissivity of Fabry–Perot resonator constructed of fibre end faces as a function of phase retardation δ*
$R = 0{\cdot}04$

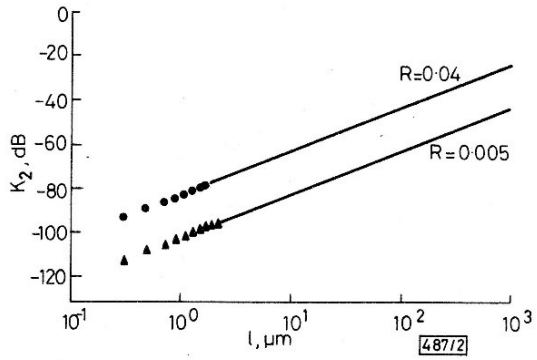


Fig. 2 *Dependence of maximum second-harmonic distortion on end separation*

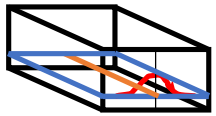
(Electron. Lett., Vol.17, No.18, pp.626-627, 1981)

半導体レーザの雑音評価　（縦モード単一化への動き）

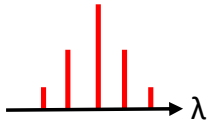
FUJITSU

・半導体レーザの雑音

・横モード：横モードの不安定動作による出力不安定
　・I-Lカーブにkinkが発生
　・横モードを安定化する構造を各社が提案 (富士通はSAS, VSB)



・縦モード：縦多モード発振により、縦モード間で光パワーの競合,
　　モード分配雑音が発生
　・縦モード安定化のため光注入同期の試み
　　(1982, ミュンヘン工科大学から研修生)
　・光注入同期により特性の改善を確認　だが環境変化に対し動作が不安定



・DFB レーザ (λ/4シフト) により単一縦モード化
　・動的単一縦モード発振
　・縦モード単一化とともに, 半導体レーザの雑音が改善

・RIN (相対強度雑音)測定　（当初は定義からの議論　Shot雑音, 熱雑音を差し引く）

・雑音への理解が進み, アナログ強度変調の限界を感じる
　しかし雑音の勉強にはなり、コヒーレント光通信に繋がる

・工学博士　「光ファイバと半導体レーザの結合特性の改善に関する研究」(1984)

INJECTION-LOCKED 1·5 μm InGaAsP/InP LASERS CAPABLE OF 450 Mbit/s TRANSMISSION OVER 106 km

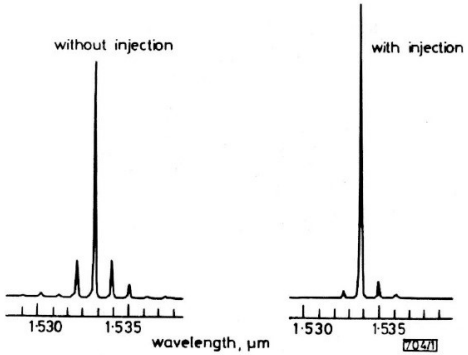


Fig. 1 *Lasing spectra under 450 Mbit/s modulation*

(Electron. Lett., Vol.19 No.14, pp.509-510, 1983)

メタリック伝送とネットワーク寄りの仕事に

FUJITSU

・1984-85 通信処理研究部に移籍　メタリック伝送分野　ISDNの研究に従事 (ISDN Layer 1)

・当初, 異分野で, 言葉が分からず苦労
(後で考えるとほんの隣の研究部に移っただけだった。視野を拡げることができた)
・ICC'85 (Chicago)で発表　(Paper 45.2, pp.1438-1442, 1985)
・Phase Aligned Passive Bus (PAB) Scheme for ISDN User-Network Interface
・Digital Cross Connect Workshop (Calgary, Canada)に出席
・英米人の、少し異なる分野の発表の英語は聞き取れず
・GLOBECOM'87 (京王プラザ)　国際会議の運営に初めて関与
・IEEE Communications Societyとの関わり

・光ピンポン伝送
・上り信号と下り信号を時分割伝送するピンポン伝送
・光の発光素子が受光機能もあることから, 加入者系の1本のファイバの両端に
1つずつの素子による簡易構成での光ピンポン伝送を提案, 実験し, 発表

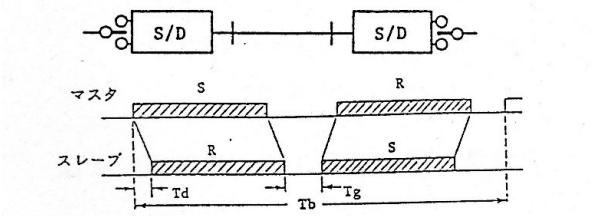


図1　ピンポン伝送の構成とタイムチャート

(IEICE IN研究会　IN84-38, 1984, IN85-104, 1986)
(Int'l Zurich Seminar on Digital Comm. pp.45-52, 1986)

コヒーレント光通信の研究

FUJITSU

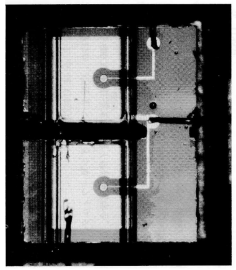
・1986　光システム研究部に戻り, コヒーレント光通信の研究を開始

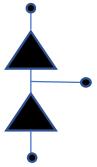
・ 大学や他社研究機関で先行。富士通は後発で後追い。

・ 社内には懐疑的な意見も。まづは、「もの」にして動くこと　実用になることを見せよう。

・ 最も取り組みやすいFSK方式を立ち上げ, 1986秋に富士通の厚木研究所において社内デモ。

・ Local LaserのRIN抑圧のため 2個のPDを集積したTwin-PIN PDを光半導体グループに作ってもらい,　Balanced Receiver構成に(→)





・更に偏波ダイバーシティ構成にした
Dual Balanced Polarization Diversity Receiver (DPR)
を提案し, ECOC'86で発表(PD4個)

NEW RECEIVER DESIGN FOR PRACTICAL COHERENT LIGHTWAVE TRANSMISSION SYSTEM

H.Kuwahara, T.Chikama, C.Ohsawa and T.Kiyonaga

FUJITSU LABORATORIES LTD.
1015 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki, 211, Japan

Abstract
We designed a receiver for use in a practical coherent lig system, especially considering local excess noise and front-end c noise. We also propose a novel receiver scheme combining a dual ba optical receiver with polarization diversity.

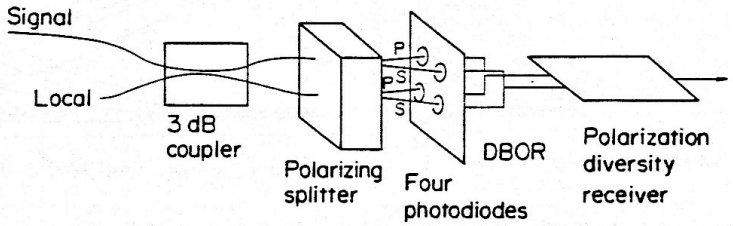
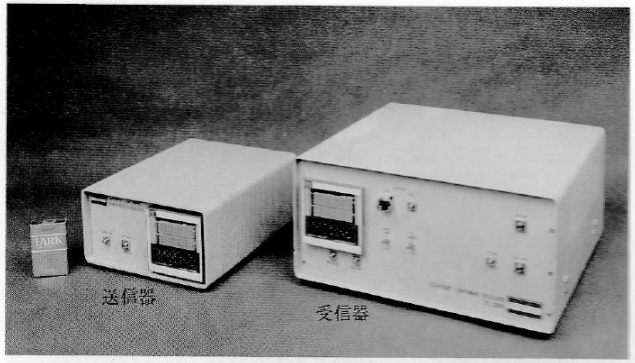


Fig.7 Schematic diagram of Dual balanced Polarization diversity Receiver (DPR).

(ECOC'86 pp.407-410, 1986)

InterOpto’87での動展示

（FSK Heterodyne包絡線検波　600Mb/s 140km）



(「コヒーレント光伝送技術」 FUJITSU Vol.39 No.3)

- **線幅に対する要求が緩いFSK包絡線検波方式**
- **まず、通常の室内環境で送受信装置として動かして見せること**

「光学定盤を初めて離れたコヒーレント伝送」といわれた

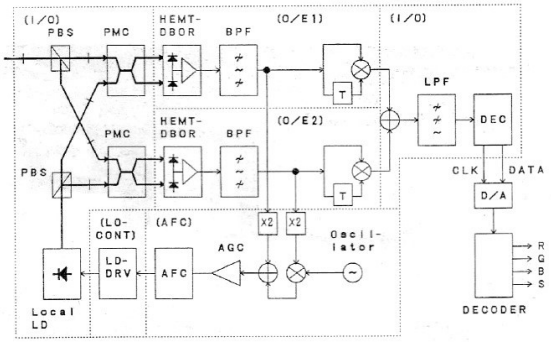
(電子情報通信学会 CS87-26**)**
(ECOC’87 pp.349-352, 1987)

DPSK方式の実現　（富士通総合技術展, InterOpto’88での動展示）

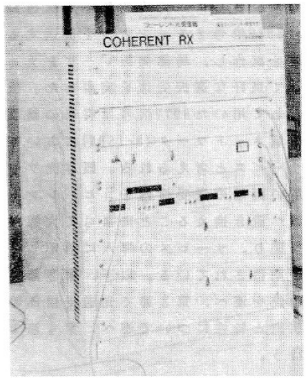
FUJITSU

富士通総合技術展（’88年5月）

（別冊サイエンス　大越孝敬「コヒーレント光通信」p.53, 1988 ）



図－3　受信部の構成と受信器の外観



（近間他, 電子情報通信学会 OCS88-14）

- **DPSK 560Mb/s, 4ch HDTV伝送**
- **DPSK 1.2Gb/s, 201km伝送**
  最小受信レベル -46.9 dBm
- **DPSK実現のため 外部共振器を付けた**
  狭線幅半導体レーザモジュールを開発
  (スペクトル線幅　< 1MHz)

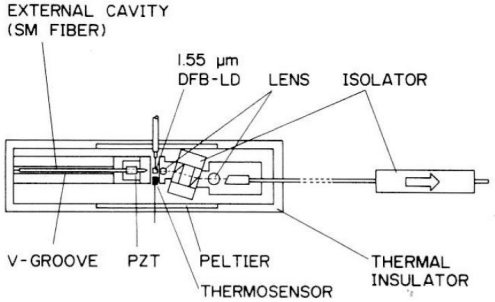


図1　モジュールの構成

（宮田他、電子情報通信学会1987年 部門全国大会318）

- **InterOpto’88（池袋サンシャイン 動展示 ’88年7月）**

(OFC’88, WC2, 1988) , (ECOC88, p.90)
(Electron. Lett., Vol. 24, No.10, p.636, 1988)
(NFOEC’88, New York, 1988)
(電子情報通信学会 OQE88-85)

信号帯域の削減, 位相雑音抑圧, Crosstalk削減等の試み

FUJITSU

・Homodyne Carrier Recoveryの研究

560 Mb/s OPTICAL PSK SYNCHRONOUS DETECTION USING CARRIER RECOVERY AND ITS PHASE NOISE SUPPRESSION EFFECT

S. Watanabe, T. Naito, T. Chikama, and H. Kuwahara

FUJITSU LABORATORIES LTD.

1015, Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki 211, Japan

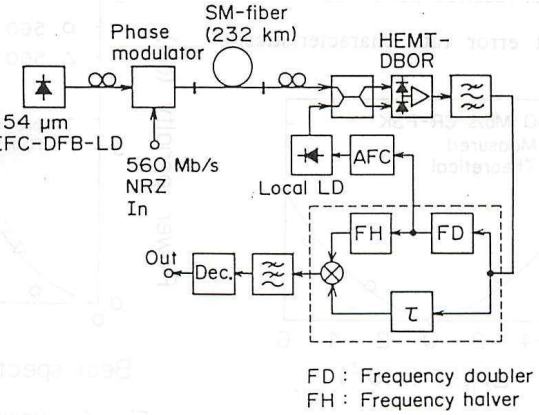


Fig. 1 Configuration of the 560 Mb/s CR-PSK transmission experiment.

(S. Watanabe et al, ECOC89, ThA21-4, 1989)

・Image Rejection Receiverの研究

WIDEBAND OPTICAL IMAGE REJECTION RECEIVER AND ITS CROSSTALK PENALTY

Indexing terms: Optical communications, Optical receivers, Crosstalk

We have demonstrated an optical-frequency image rejection receiver with more than 18 dB suppression over the 1·5–3·0 GHz IF region. The measured crosstalk penalties were less than 1·4 dB in a 2-channel 560 Mbit/s DPSK heterodyne optical communication system.

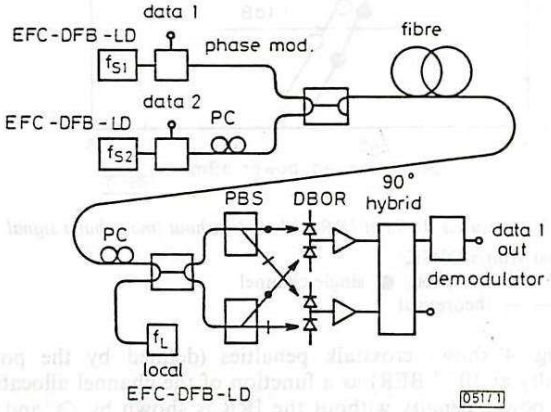


Fig. 1 *Configuration of 2-channel, 560 Mbit/s DPSK heterodyne transmission experiment using IRR*

(T. Naito et al, Electron. Lett., Vol.25, No.14, p.895,1989)

(4th Tirrenia Int'l Workshop on Digital Communications, pp.19-34, 1989) (SPIE Vol.1175 pp.259-270, 1989)
(IEEE JLT, Vol.8, No.3, pp.309- 322, 1990) (IEEE JSAC, Vol.8, No.6, pp.1087- 1094,1990)
(URSI '90 1990) (OECC'90, 13A2-2, 1990) (Direct-Modulation PSK,: SPIE Vol.1372 pp.200-207, 1990)

コヒーレント光通信の研究　　縮小・凍結

FUJITSU

・1990 光産業技術振興協会　櫻井健二郎氏記念賞（社内の峠氏、近間氏とともに受賞）

　・位相変調に関する各種の変復調技術を開発　(T. Chikama et al, IEEE JLT, Vol.8, No.3 pp.309-322, March 1990 等)

・1990 CP-FSK 2.4 Gb/s, 250 km伝送　　(電子情報通信学会 OQE/OCS研究会　OQE90-103, OCS90-42, 1990)

　・Quad-PINの開発、偏波ダイバーシティ+バランス型小型フロントエンドの実現

　・ファイバ分散補償用の高誘電率基板による遅延回路 等

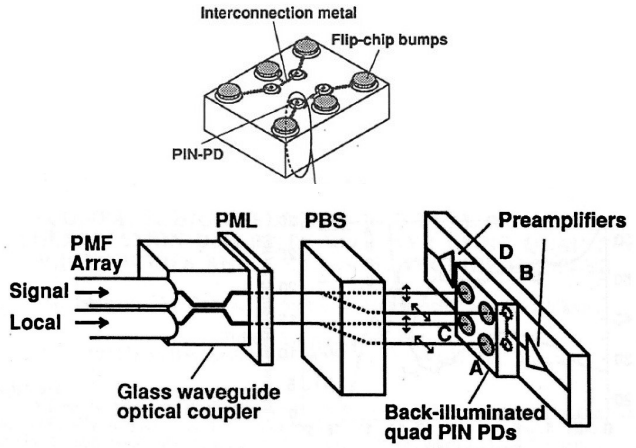


Fig. 1 Dual-balanced polarization diversity receiver

(G. Ishikawa et al, ECOC'91 TuC4-1, 1991)

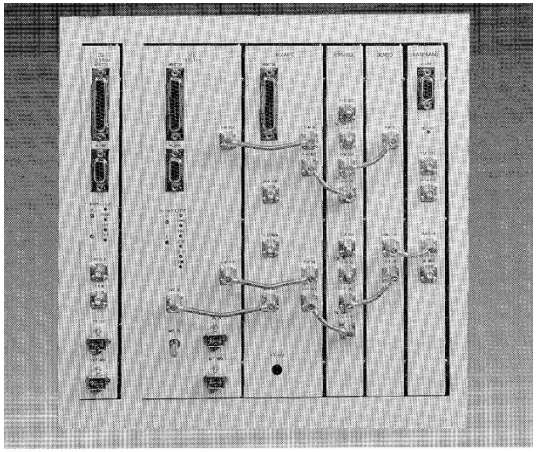


Fig. 17—Prototype system of a 2.4 Gb/s CPFSK transmitter and receiver.

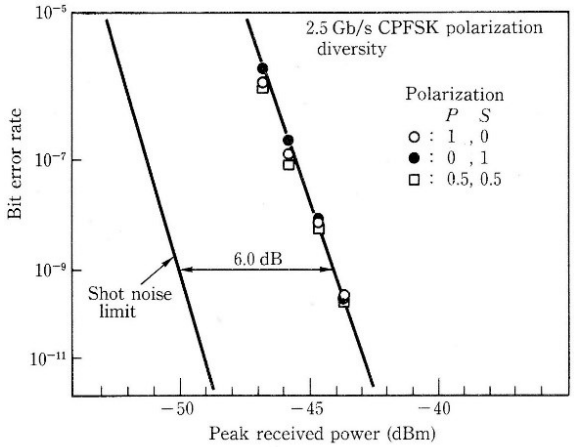


Fig. 18—Bit error rate characteristics of 2.4 Gb/s CPFSK system.

(FSTJ, Vol.28, No.2, pp.216-227, 1992)

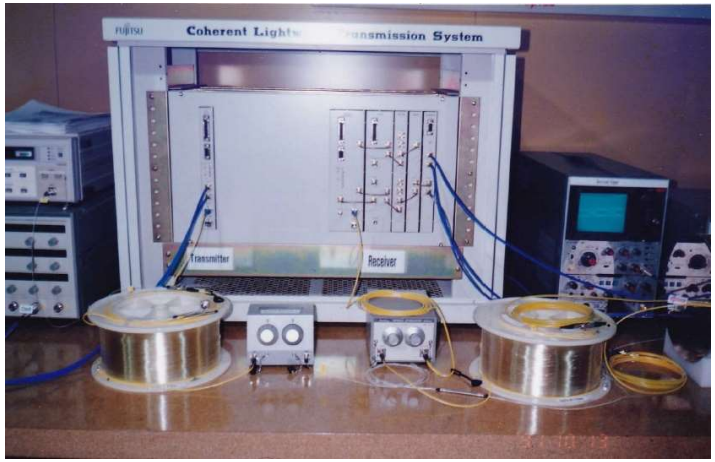
・1993　デンマーク工科大学でコヒーレント光通信分野の博士候補者の論文審査に外部審査員として参加。

・1992-3 コヒーレント光通信の縮小・凍結。　　→ <u>波長多重伝送(WDM)を優先。</u>

Telecom’91 (ジュネーブ)での展示

富士通単独展示館 2Fでの 通信ハイテク展示 （CP-FSK 2.4Gb/s 伝送＋海底用光増幅器の動展示）

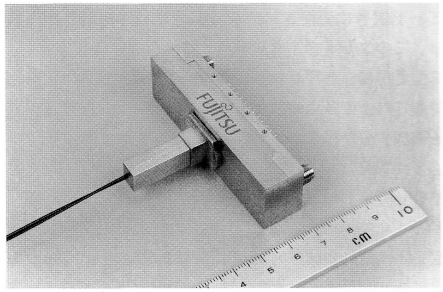
展示全景



CP-FSK 2.4Gb/s 伝送

海底用光増幅器

CP-FSK 光源と受信部



図−6 コヒーレント光通信用バランス型偏波ダイバーシティ受信部（世界最小）

(FUJITSU Vol.43, No.3, 1992)

光増幅，WDM と TDM 10 Gb/s (1987年～90年代前半)

FUJITSU

・光増幅 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) 1.5 μm帯の多波長信号を一括して増幅可能
　・英国Southampton大学へ研究員を派遣留学。古河電工様との共同研究
　・社内でもEDFA試作。濃度消光の課題。 1535nm付近の利得ピーク補償用フィルタ等
　・半導体レーザ励起で14.4dBのGainを実現 (OFC'89 PD6, 1989)
　・励起構成, EDF長の最適化, 低雑音, 高出力化 (OAA'91, 1991) (OAA'92 FB3, 1992)
　・海底の再生中継は光増幅中継に置き換わった (SubOptic 93 S2, pp.43-48, 1993)

・波長多重伝送(WDM)で必要な波長制御技術はコヒーレント光通信での経験が生きた。
　・WDM光周波数標準: 1.56 μm ＋SHG ＋Rb 海底分野は1.56 μmあたりが主流

・TDM 10 Gb/s システムの開発 高速動作する電子回路 (Tr) が無い
　・当時, Si-Bipolarトランジスタが終息へ (メインフレームがCMOSへ)
　・AlGaAs/GaAs HBTの採用も。当時は信頼度が課題
　・測定器もメーカとの共同開発 BER測定器(高価。台数が必要), スペクトルモニター等
　・10Gb/s 送受信部は光学定盤1台分 (外国製広帯域アンプが多用され・・)

・WDM と TDM 10Gb/s システム
　・国内: TDMの流れが強かった。
　・海外: WDMの流れが強かった。

半導体レーザ励起によるエルビウムドープファイバ増幅器の開発

FUJITSU

（古河電工様との共同研究）

14.4-dB Gain of Erbium-Doped Fiber Amplifier

Pumped by 1.49-μm Laser Diode

M. Suyama*, K. Nakamura**, S. Kashiwa** and H. Kuwahara*

FUJITSU LABORATORIES LTD.*, THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.**

*) Optoelectronic Systems Laboratory, FUJITSU LABORATORIES LTD.
1015 Kamikodanaka, Nakahara, Kawasaki 211, JAPAN

**) Yokohama R&D Laboratories, THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.
2-4-3 Okano, Nishi, Yokohama 220, JAPAN

OFC'89 (Houston)
Post-Deadline 6

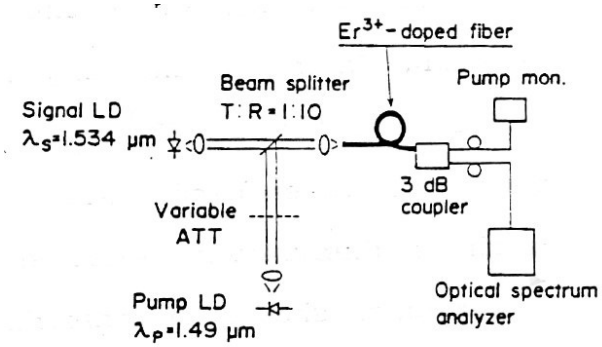


Fig. 2. Experimental setup

Table 1. Characteristics of Er^{3+}-doped fiber

Core diameter	7.5 μm
Cut-off wavelength	1.14 μm
NA	0.12
Loss*(signal / pump)	15.1 / 3 dB/m
Er^{3+} concentration	900 (wt)ppm

* without pump

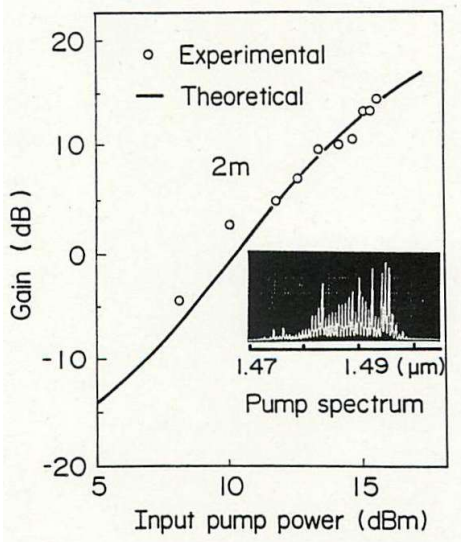
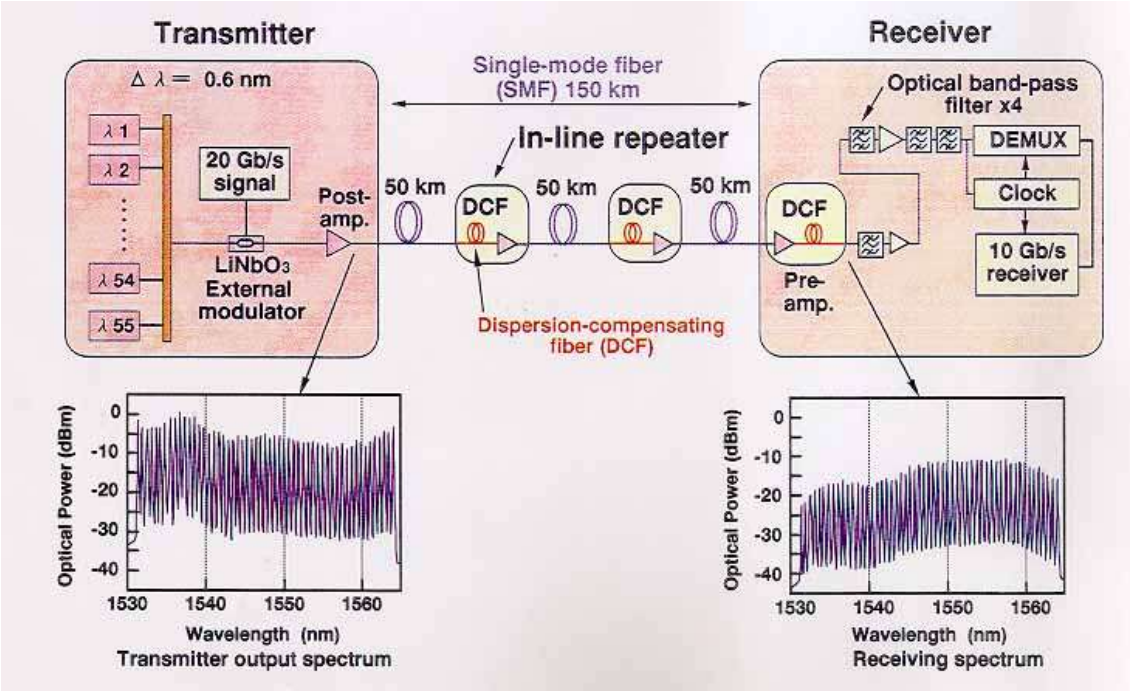


Fig. 3. Gain characteristics

世界初の 1 Tb/sを超える (1.1 Tb/s) 伝送の実現 1996

FUJITSU

1.1 Tb/s Experiment Configuration



(H. Onaka et al; OFC '96 PD, 20Gb/s × 55 waves)

- 1.1 Tb/s (= 20Gb/s × 55波)
- 波長間隔 0.6 nm (75 GHz)
- 150 km 伝送
  - 1.3μm ゼロ分散SMF 50 km × 3 span
  - 分散補償ファイバの挿入
- 1.48μm 半導体レーザ励起EDFA

- 1996年5月 マレーシアマハティール首相へのデモ
  （研究室に 急遽、赤絨毯が敷かれ・・）

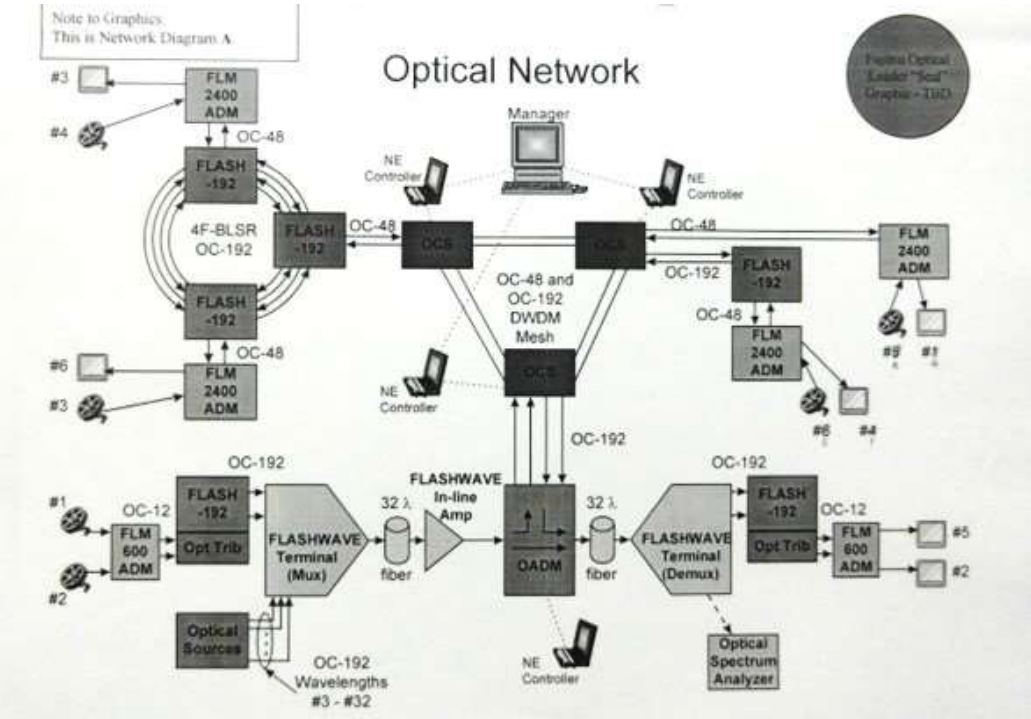
- 1996年3月1日 日本経済新聞とNew York Times に掲載
  1.1 Tb/s : 日本経済新聞
  「 新聞250年分の情報を1秒で」
  New York Times
  「新聞300年分, in the blink of an eye」

- 1998年には Guinness Bookにも掲載

対外的活動, 社外へのアピール (1998, 1999)

FUJITSU

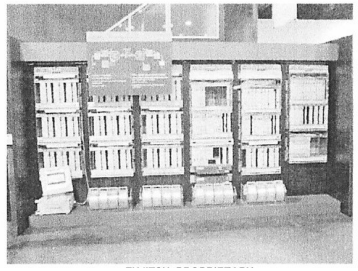
- 欧州通信キャリアの研究所との共同研究
- ICC'98 at Atlanta, Supercomm'98 でOADM, OXCなどを含む Photonic Network Visionを動展示



- 北米通信キャリアへの訪問、技術紹介など

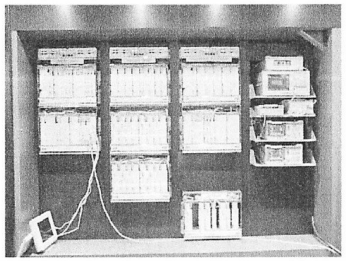
Supercomm'98 FLASHWAVE

(June 9-11, 1998 ; Atlanta)



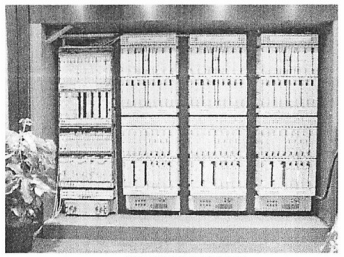
Supercomm'98 OADM

(June 9-11, 1998 ; Atlanta)



Supercomm'98 OXC

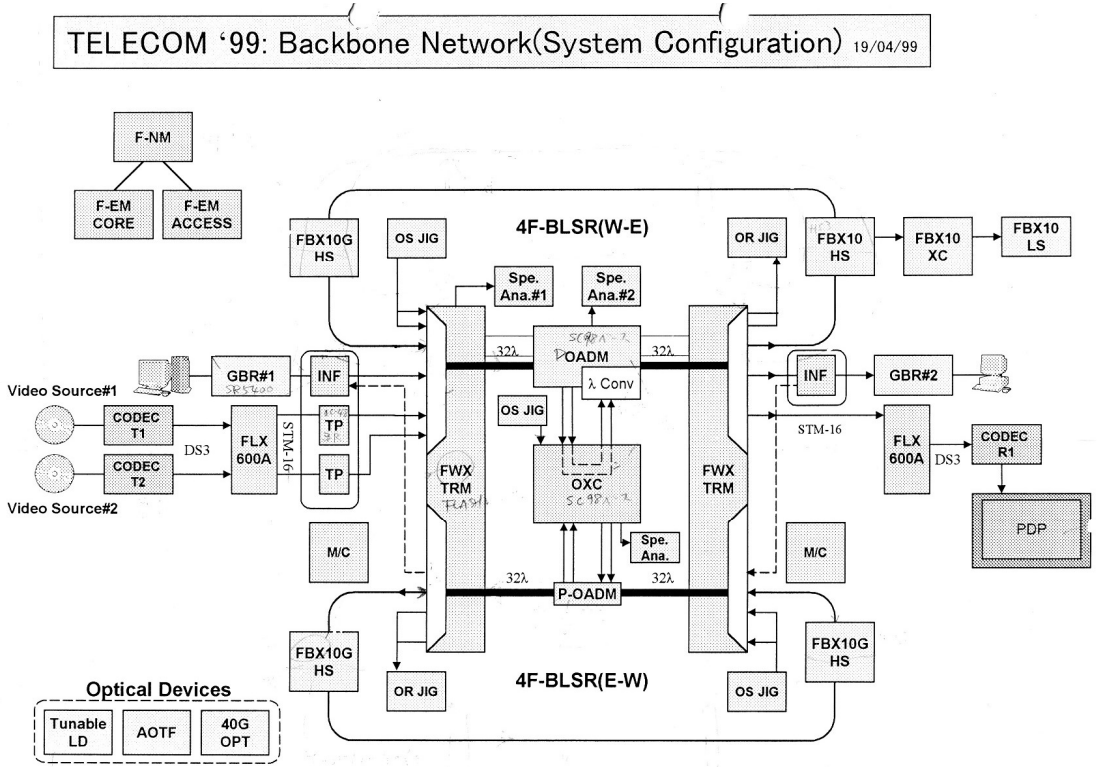
(June 9-11, 1998; Atlanta)



Telecom' 99 (Geneva) 動展示と発表

FUJITSU

・Telecom'99で ROADM, OXC を含むPhotonic Network Visionを動展示



ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) ,
OXC (Optical Cross-connect)

・ITU事務総局長に就任された内海義雄氏に関澤会長が説明。
・光ネットワークについては野田聖子 前郵政大臣に桑原から説明。

・Telecom Forumにおける論文発表
"Photonic Network Architecture toward 1000 wavelengths"
（当社のPhotonic Network に対するコンセプト と実現技術を紹介）

Track: Infrastructure Summit INF.5
Titler: **Photonic Network Architecture towards 1000 Wavelengths**

Author: **Hideo Kuwahara, Terumi Chikama, Toshitaka Tsuda and Yukou Mochida**
Affiliation: **Fujitsu Laboratories Ltd.**
Address: 4-1-1 Kamikodanaka Nakahara Kawasaki 211-8588, Japan
Phone: +81-44-754-2643 Fax. +81-44-754-2640
Email: kuwahara@flab.fujitsu.co.jp

Abstract : This paper introduces photonic network architecture towards 1000 wavelengths which will provide a vast increase in capacity and a flexible, expandable, and highly reliable transparent network for the 21st century. First, this paper describes the concept, architecture and development stages of this photonic network. Then, it discusses wavelength division multiplexing technology, optical node technologies such as the optical add-drop multiplexer and optical cross-connect systems, and the new optical components and devices that will support this photonic network.

北米市場の活況，研究部門の新設

THE FNC LEADER

Vol. 6, Issue 4 | A publication of Fujitsu Network Communications, Inc. | November 1999

This newsletter is for internal distribution only.

First-Half Revenue Approaches $1 Billion

On the heels of another record year of revenue growth, Fujitsu Network Communications is showing no sign of slowing. FNC earned a combined $988 million in revenue in the first half of fiscal year 1999, exceeding by 64 percent the $601 million recorded in the first half of fiscal 1998.

"We continue to set new revenue records within our own company, and are doing so at a pace much faster than we anticipated," said President Akira Tokimasa. "This half, we are twice the size that we were two years ago in terms of revenue."

The bulk of FNC's business still comes from [illegible] products, which [illegible] enue for the half, [illegible] the $518 million [illegible] first half.

was by far our top performing customer. Bell Atlantic orders more than doubled from a year ago.

The FLM family of lightwave multiplexers remains at the heart of FNC's transmission business, with revenue from the FLM 2400 ADM increasing 52 percent this half. Meanwhile, the FLASHWAVE™ wavelength division multiplexing system is beginning to have an impact on FNC's success. FLASHWAVE revenue nearly tripled in the past six months.

"Over the next few years, there will be widespread deployment of optical networking systems as

THE FNC LEADER

Vol. 7, Issue 2 | A publication of Fujitsu Network Communications, Inc. | JUNE 2000

This newsletter is for internal distribution only.

We're a $2 Billion Company!

Top-quality products, aggressive selling, and a booming industry combined to make Fujitsu Network Communications a $2 billion company in fiscal 1999 -- a full two years ahead [illegible] schedule. FNC was able to double its revenue in two years, [illegible] $2.18 billion, thanks to a phenomenal 66 percent growth rate in 1999.

Revenue from all our key customers grew strongly last year. Our sales to WorldCom, our largest customer, more than doubled during fiscal 1999. They were up 118 percent, helping to lead us to a fantastic year. Here is the percentage growth in revenue among some of our other key customers:

- Bell Atlantic: up 46%
- SBC: up 36%
- Ameritech: up 36%
- US West: up 68%
- BellSouth: up 62%
- GTE: up 66%

"Every Fujitsu Network Communications employee can be [illegible]oud of this company's performance and their contribution to it during fiscal 1999," said Akira Tokimasa, president and CEO. "We are doing tremendously well in a very competitive industry. We are doing that by providing highly reliable equipment and top-quality support to our customers, at the right price, at the same time that we are helping them plan and grow their networks for the future."

Several customer projects played a big part in increased equipment purchases during fiscal 1999. Even as revenue from WorldCom's local access requirements grew, the most exciting development was that for the first time in five years, we began selling to the long distance side of the company. The long-distance market is a key expansion market for us with our

continued on page 2

- 富士通の伝送部門の北米の子会社
  Fujitsu Network Communications, Inc. (テキサス州ダラス郊外)
- 2000年頃に売上げ が急増し、$2Bを超える勢いに・・
- 研究部門も持つべきという意見が・・
- FNCの中に光通信技術の研究部門を新設

(2000年1月19日　日本経済新聞に掲載)
(Richardson News, March 26-29, 2000 に掲載)

FNC赴任，PNLの立上げ･運営

FUJITSU

- 2000年3月からFujitsu Network Communications, Inc. (Richardson, Texas) に赴任。
- Photonics Networking Laboratory (PNL)の立上げ。 当初、日本からは7名。
- 現地での採用活動を進める。(面接では, 年齢, 宗教などは聞いてはいけない)

- PNLの体制 : 3 グループ:

  ① Network, ② Transmission, ③ 光デバイス評価。Fujitsu Lab Europeからも1名参加。

  (T. Hoshida et al, IEEE JLT, Vol.20, No.12, pp.1989-1996, Dec.2002 等)
- WDM Project: FLASHWAVE OADX

  (10G x 176 波 ＝ 1.76 Tb/s, C＋L band 88 波+88 波)等
- 顧客通信会社との共同研究,
- 光関連ベンチャー企業の評価 (San Jose付近) 等

- 2002年上期は、21人の体制に。 多国籍メンバー。
- ITバブル崩壊とともに, 人員を削減しなければならず, Lay-offする経験も。

光ファイバ通信の研究開発に携わって感じたこと

FUJITSU

・光ファイバ通信には、当初の研究開発から関与する機会を与えられ、幸運だった。
・富士通で優秀な研究者仲間と出会い、一緒に仕事ができ、幸運だった。
・技術の転換点などで、幾度か試練があったが、仲間と一緒に頑張って乗り越えることができた。
・「人材」は重要、「継続は力」と感じた。

・この分野は、諸先輩方の努力により、日本の技術が世界をリードできた数少ない分野と思われ、
また、Globalにビジネス展開ができ、特に北米での赴任経験はその後の考え方に
影響を与える大きな経験であった。

・「日本から世界を見る」 のではなく、「世界から日本を見る」
・視野を拡げると新しいアイデアやヒントが生まれる。

社外での活動 （光ファイバ通信の研究開発に関連して）

FUJITSU

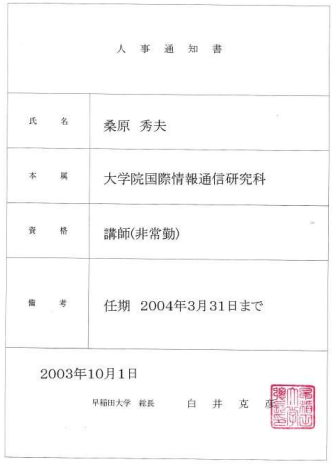
- 電子情報通信学会:
  - 光通信システム(OCS)研究会委員長、 調査理事、 会計理事、 監事, 評議員
  - 副会長 (国際委員会委員長)

- 総務省: SCOPE評価委員
- 総合科学技術会議: 革新的技術推進アドバイザー
- 光産業技術振興協会: 技術戦略策定委員会（ロードマップ委）等

- 早稲田大学 GITI 非常勤講師 (2003-2012)
- 東京医科歯科大学非常勤講師

- MIT Micro-Photonics Center講演, SPIE招待講演
- マレーシア日本国際シンポジウム (MJISAT)
- オランダ Eindhoven工科大学 学外評価委員　等

- 欧州光通信会議 (ECOC)との関わり
- IEEE との関わり



人 事 通 知 書

氏 名	桑原 秀夫
本 属	大学院国際情報通信研究科
資 格	講師(非常勤)
備 考	任期 2004年3月31日まで

2003年10月1日

早稲田大学 総長 白 井 克 彦

MICROPHOTONICS CENTER

Collaboration

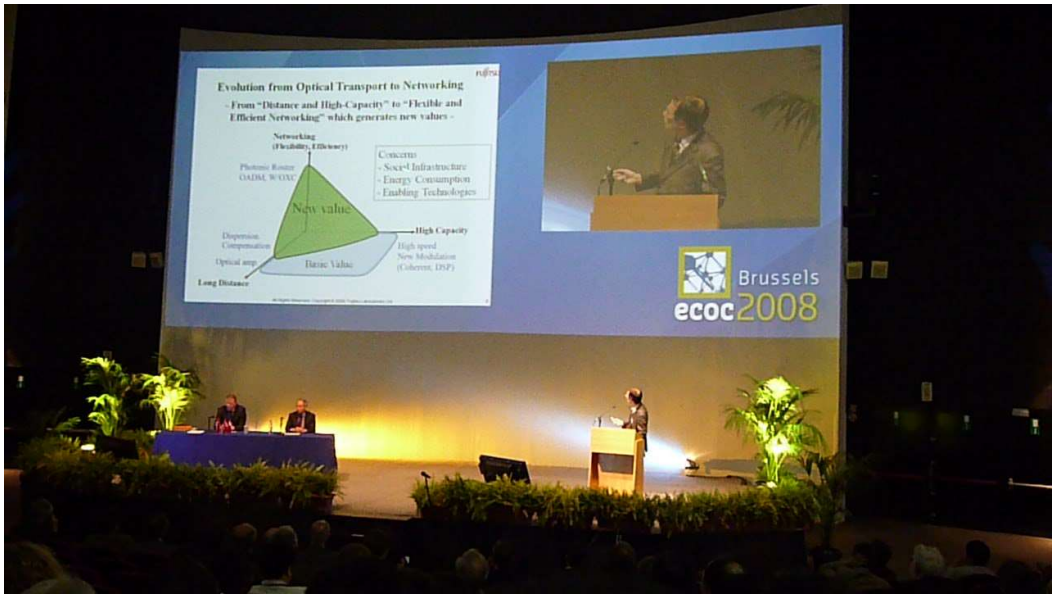
Innovation

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

欧州光通信会議 (ECOC) との関わり

(ECOC: European Conference on Optical Communications)

- **1980年の ECOC (York, England) に初めての参加。その後, 何度か出席, 発表**
- **ECOC: 日本からの投稿数が多い**
- **2007年より ECOC European Management Committee　に参加**
  - **International Advisory Committee の Asia Pacific, 日本代表として**
  - **プログラム委員会の中で日本人の増員を要求（2010まで約8人, 2011から12人, 2014から13人）**
- **ECOC2008の登録料: IEEE, OSAなどとともに, IEICE もMemberとして格安登録料を実現**
- **ECOC2008 (at Brussels)での 基調講演**

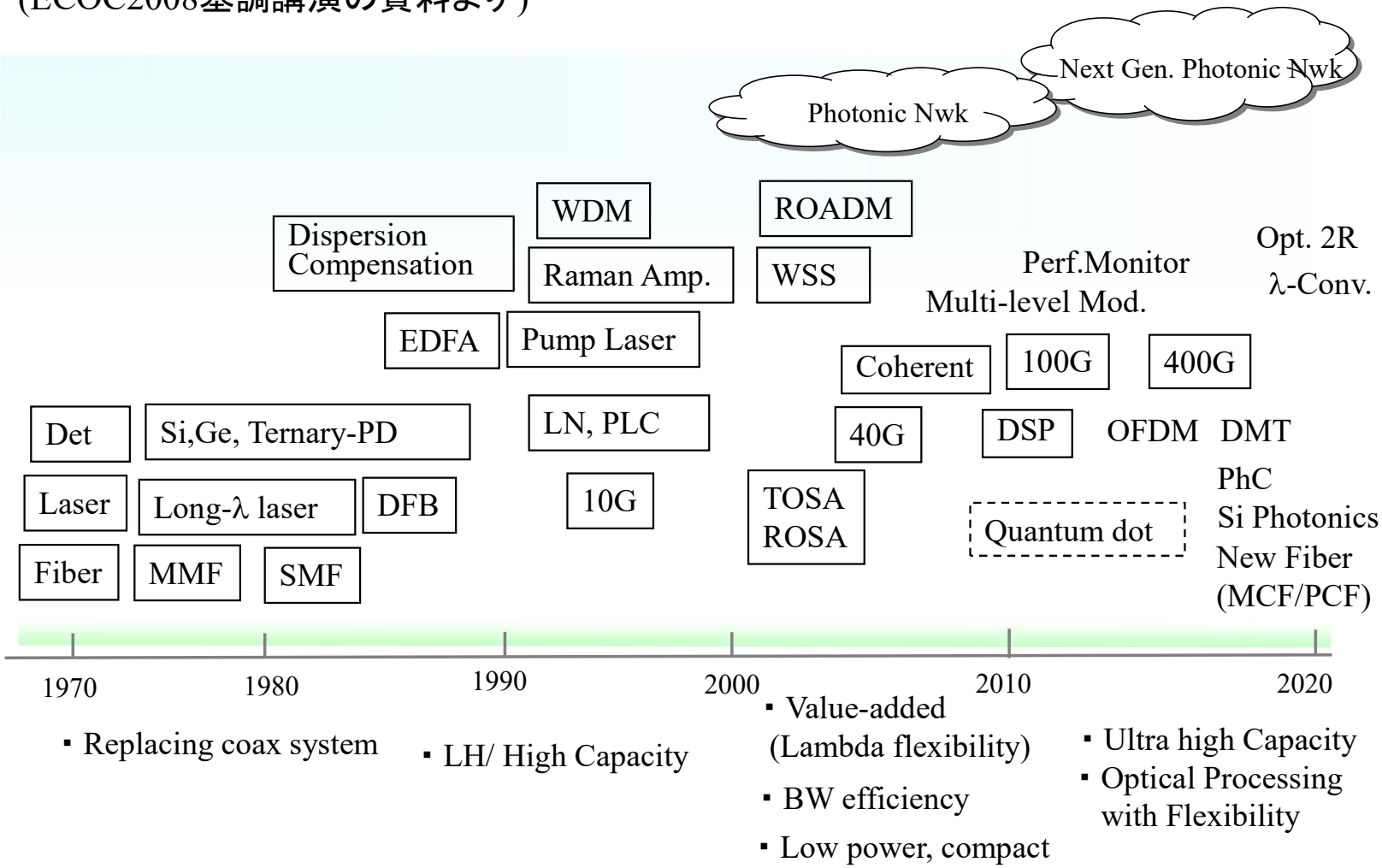


(OSA : Optical Society of America
現在は Optica に改称)

Key Technologies in Optical Communications

FUJITSU

(ECOC2008基調講演の資料より)

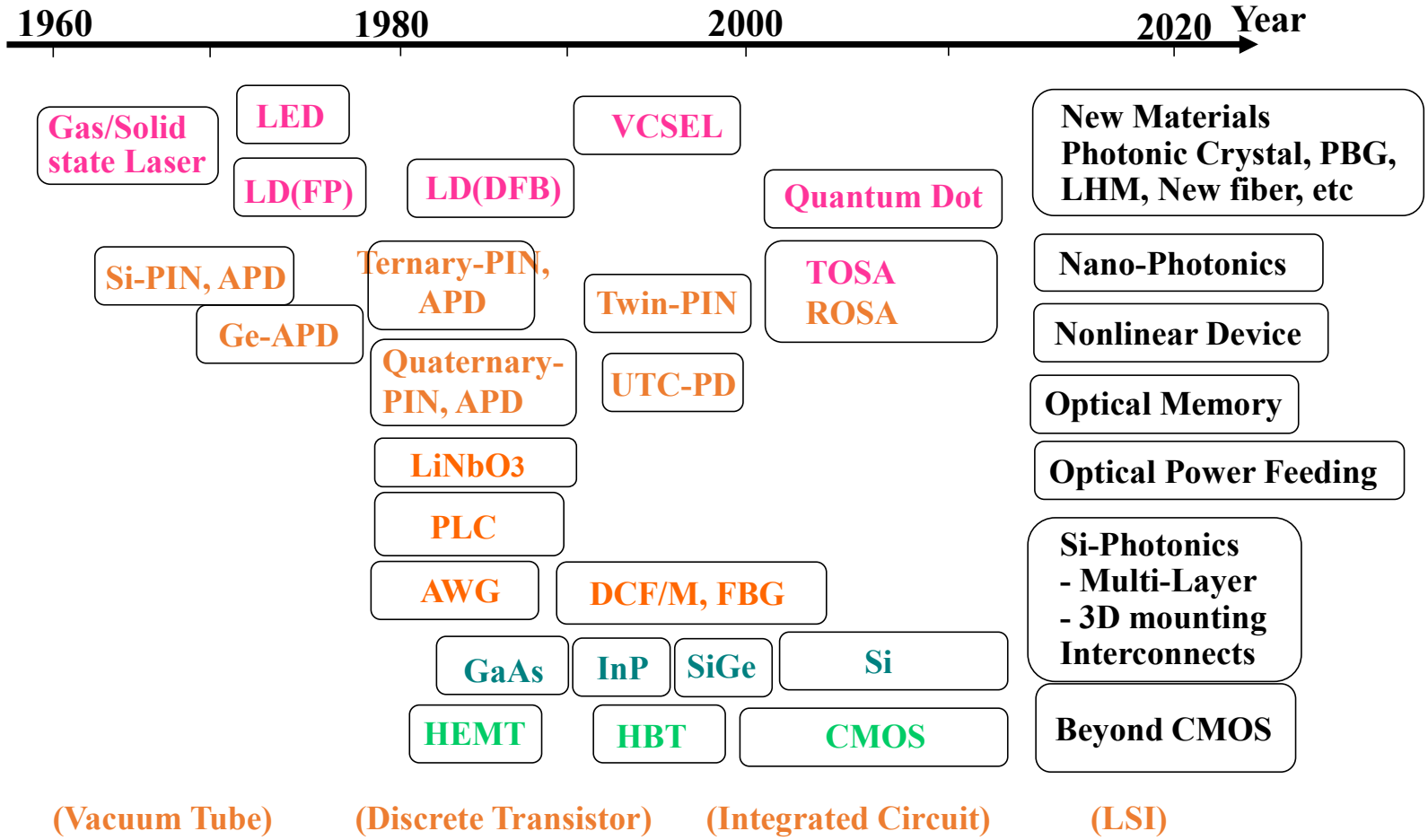


- Replacing coax system
- LH/ High Capacity
- Value-added (Lambda flexibility)
- BW efficiency
- Low power, compact
- Ultra high Capacity
- Optical Processing with Flexibility

Innovation in Device/Component Technologies

FUJITSU

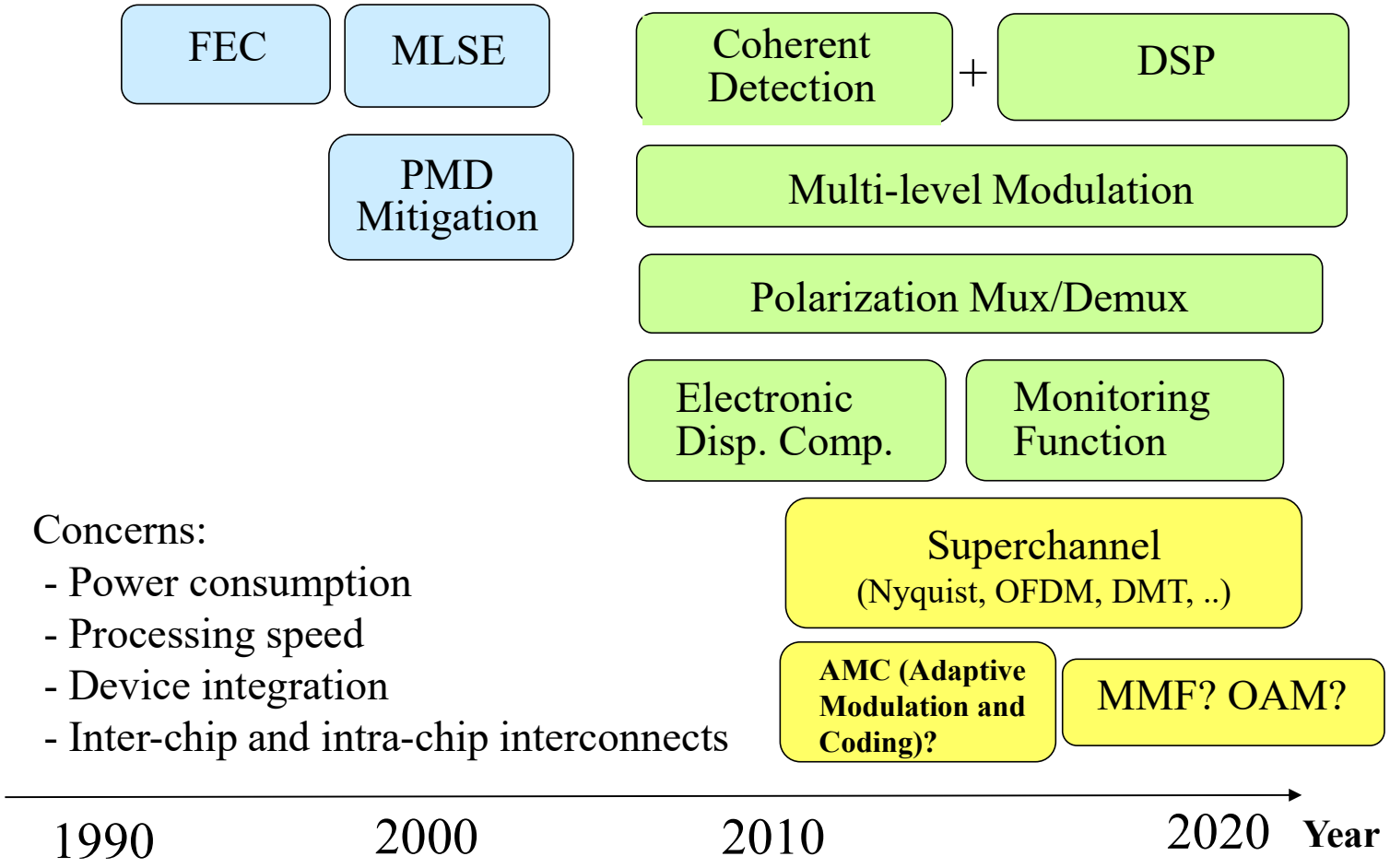
(ECOC2008基調講演の資料より)



Device/component development should be fully linked with system evaluation.

Processing by Electronics in Optical Comm.

(ECOC2008基調講演の資料より)



Concerns:
- Power consumption
- Processing speed
- Device integration
- Inter-chip and intra-chip interconnects

FEC: Forward Error Correction, MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation

Roadmap of Photonic Networking Technology

FUJITSU

(ECOC2008基調講演の資料より)

Flexibility in Wavelength

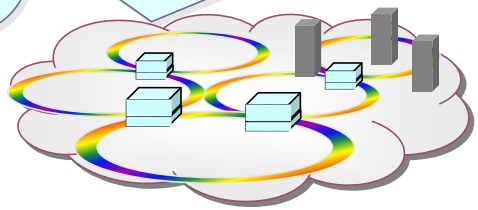
> 10 Tbit/s

1 - 10 Tbit/s

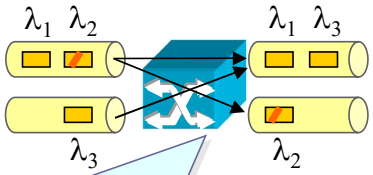
- GMPLS signaling and protection
- WSS (free space)
- Full band tunable LD/ transceiver module
- Variable disp. comp.
- PON (Gb/s)

◆ ROADM
◆ Ring

- Multi-Layer convergence
- WSS (integrated, compact)
- 40G/100G, Coherent
- Quantum dot LD/SOA
- Optical Noise Reduction
- Opt. Interconnection



◆ Hub, WXC
◆ Mesh



- Fast tunable LD/VCSEL
- Si-Photonics, PhC
- λ conversion
- NG PON (10G/WDM/Hybrid)
- Optical buffer/memory
- SDM & Optical Amp
- Opt. power feeding
- Quantum Comm.

◆ Opt. Burst/Packet Routing

- Metro WDM
- FTTX (initial stage)

- FTTX (mass stage)
- IP based network construction

- Mass deployment of converged network (with wireless)

2000 2005 2010 2015 2020

(Broadband) (NGN, Safe and Secure) (Ubiquitous, Comfortable)

IEEEとの関わり

FUJITSU

IEEE Photonics Society (2008年以前はIEEE LEOS。その後, 改称) 関連の活動

・2006-08 IEEE LEOS Board of Governors (会員の選挙で選任)に就任。
Prof. Alan WillnerなどLEOS幹部との活動が始まる。英語での会議への参加。
・2007 OECC/IOOC 2007 (IEEE 技術共催) General Co-Chair. 光通信分野のExecutiveを招聘。
・2008-11 IEEE/OSA CLEO Pacific-Rim 運営委員会 Chair (英語での会議の司会)
・2011 IEEE Photonics Society Japan Chapter, Chair
・2011 IEEE Photonics Society President-Elect (President見習い期間)
・2012-13 IEEE Photonics Society President, IEEE Technical Activities Board Member
・2014- IEEE Photonics Society Past President

IEEE 全般

・2006 IEEE Fellow
・2008-10 IEEE Honorary Membership Committee
・2010-12 IEEE Prize Papers/Scholarship Awards Committee (最優秀学生投稿者の選考)
・2013-15, 2018-21 IEEE Fellow Committee (Fellowの審査・選考 IEEEの全技術分野)
・2013- IEEE Future Directions Committee Industry Advisory Board (技術の将来方向の議論)
・2014 IEEE Industry Engagement Ad-Hoc Committee (企業参加を強化する方策を議論)
・2014-16 IEEE Awards Board Nominations and Appointments Committee (AB Memberの選任)
・2014-16 IEEE Access Editorial Board (新しいOpen Access出版物の開始。技術境界領域の論文等)
・2014- IEEE Japan Council Awards Committee, 2016-2022 Chair of Awards Committee
・2016-18 IEEE Edison Medal Committee (Edison Medalの選考)
・2021-22 IEEE Japan CouncilにおいてIEEE Fellowを目指す人のためのWebinar 講師

Photonics Society の関連学会での表彰式

FUJITSU

John Tyndall Award at OFC2012　Prof. J. Bowers
(IEEE Photonics Society News Vol.26, No.3 p.18, 2012)

Photonics Society members who have been elevated to the grade of IEEE Fellows: (From left to right) Hideo Kuwahara (Photonics Society President), Jianping Yao, Ashok Krishnamoorthy, Yuichi Matsushima, Tetsuya Mizumoto, and Ping-Kong Wai.

IEEE Fellow Recognition at OFC2012
(IEEE Photonics Society News Vol.26, No.3 p.18, 2012)

John Tyndall Award at OFC2013　Prof. J. Coleman
(IEEE Photonics Society News Vol.27, No.3 p.18, 2013)

Photonics Society members who have been elevated to the grade of IEEE Fellows: (From left to right), Guifang Li, William Shieh, Juerg Leuthold, Kazuro Kikuchi, Rene-Jean Essiambre, Takatomo Enoki, and Steve Alexander. Presented by Hideo Kuwahara, Photonics Society President.

IEEE Fellow Recognition at OFC2013
(IEEE Photonics Society News Vol.27, No.3 p.18, 2013)

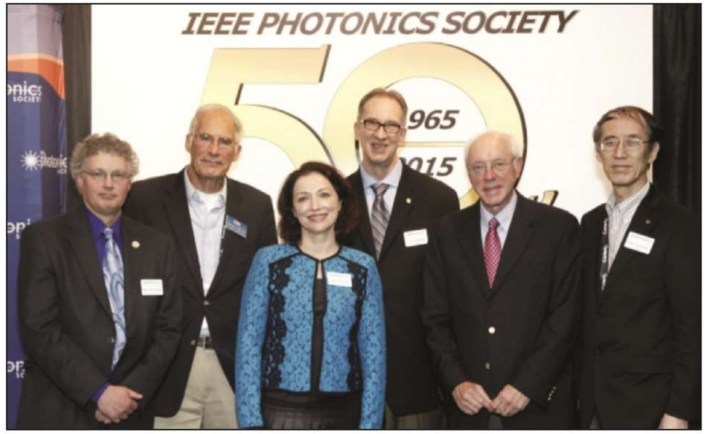
Photonics Society の関連学会での表彰式

FUJITSU

Awards Ceremony at CLEO2013

Young Investigators Award at CLEO2013　Prof. A. Boltasseva
(IEEE Photonics Society News Vol.27, No.6 p.25, 2013)

With Dalma Novak (President 2014-15へ引き継ぎ)
(IEEE Photonics Society News Vol.27, No.6 p.29, 2013)



IEEE Photonics Society 50th Anniversary in 2015
(IEEE Photonics Society News Vol.29, No.3 p.22, 2015)

学会活動でのまとめ （光ファイバ通信の研究開発を通じ）

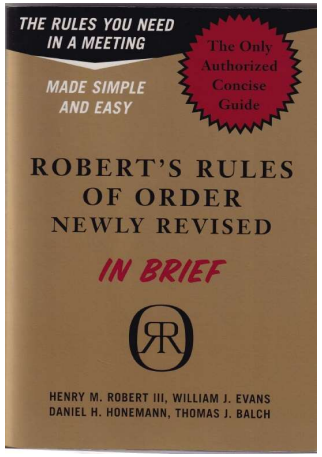
FUJITSU

・R&D活動により、国内外の学会への参加と発表経験、会議運営などに関わることができ、他機関も含めた研究者仲間や諸先輩との人脈を形成でき、幸運でした。

・電子情報通信学会には、学生時代の投稿から始まり、会計理事や監事、副会長など、運営への参加を経験させていただき、終始お世話になりました。ありがとうございます。

・IEEEには、一研究者として、研究成果の論文投稿から関わり始め、国際学会での議論、会議の運営, Societyの運営に参加する機会を得て、いろいろ新しいことを学びました。

- ・多様性への対応, Fairnessの重要性,
- ・人脈形成（Peer）,
- ・議論の進め方（Robert's Rules of Order)



・「日本から世界を見る」 のではなく、「世界から日本を見る」

・視野を拡げると新しいアイデアやヒントが生まれる。

ご清聴ありがとうございました！

IEICE ICT PIONEERS　WEBINARシリーズ【第35弾】
光ファイバ通信の研究開発に携わって
桑原秀夫（富士通株式会社名誉フェロー）

講演中に頂いた質問に対する回答

ビジネスサイド(マーケティングサイド)にこのようにあってほしい、あるいはこうあってもらって助かった、というご示唆があればご教示いただけますと幸いです。

研究は時間がかかることも多く、失敗することも多いですから、やはり、成果をすぐ求めずになるべく長い時間軸で見ていただきたいと思います。
ただ、競争相手がいますので、そういった情報を適宜Inputしていただければ、と思います。

たくさんあると思いますが、研究開発の中で一番楽しかったことは何でしたか？

やはり、研究していたこと、実験していたことがうまく進んだ時でしょうか。
また、いくつかの動展示を研究仲間と立ち上げましたが、全体がうまく動いた時も楽しかったと思います。

世界から日本を見るとのことですが、日本にはここが足りない、ということがあれば教えて頂けると幸いです。

日本の常識と世界の常識は違う、ということがよく言われると思いますが、日本国内で言われている見方を一度、見直してみる、こともいいと思います。
また、一般的にやはり日本人は英語が強くないという点があるかと思います。英語圏では、いろいろな情報が豊富に、
または違う観点から議論されている場合がありますので、英語で見直すと違った面が見えてくることがあるかと思います。