



# 伝送路としての光ファイバ ～広帯域化とその技術動向～

Internet Week 2002  
2002年12月19日

岡本 聡

okamoto@exa.onlab.ntt.co.jp  
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation



## 概要

- 第一部
  - DWDMに代表される伝送の広帯域化
  - 光スイッチ技術
- 第二部
  - フォトニックネットワーク技術
- 第三部
  - GMPLSやOIF (Optical Internetworking Forum)の標準化動向

## 研究略歴

- 1988年 NTT入社
  - ATM SW の研究
- 1991年くらい
  - 光ATM SW方式の研究
- 1992年くらいから
  - 光パス網構成法の研究
    - 1995年くらいからITU-TでOTNの標準化作成
    - 1999年くらいからMPLS方式の研究
      - 2000年1月OIFにPhotonic MPLS方式を提案
      - 2000年2月IETFにドラフト提出(draft-kompella-mpls-optical-00.txt)
    - 2000年くらいからHIKARI routerの開発を開始
      - 2001年6月 SuperComm2001 Live Demonstration
- 純粋な光の研究者ではありません m(\_ \_)m

## 第一部Outline

- 光への期待
- 光伝送入門
- 光スイッチのお話

## 光への期待

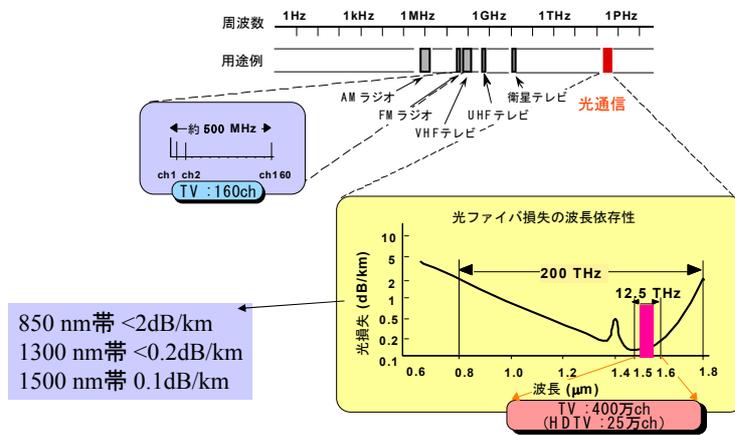
- 帯域は無限
- どこまでも届く(遠くの星から届いている)
- 光速(秒速30万km = 30 cm/ns、光ファイバ中だと20cm/ns)
- 発熱しない
- 小さくなる、軽くなる → 安くなる
- 雷に強い、ノイズに強い
  
- GMPLSで、光を自由自在に操れるようになる。
- 過度な期待はしないでね (^\_^;)

## 光の特徴

- 光速で進む
  - 処理するためには光速を超える必要がある？
- 直進する
  - スイッチするためには曲がって欲しい
- 減衰する
  - 真空中なら。。。。
- 波になったり、粒子になったり
  - 波はなかなか閉じ込められない
  - 電子は、ほとんど粒子性のみ
- 質量が無い
- 電荷が無い

# 光通信の利点

- 広大な帯域が使用可能? -



ファイバ1本100 Tbpsなら、100芯ファイバで10 Pbps!!

# 第一部Outline

- 光への期待
- 光伝送入門
- 光スイッチのお話

## どうやって通信するの？

- 送りたいのは、デジタルデータのビット。つまり“0”か“1”かを判別できればよい。
  - “1”のときには光って、“0”のときには光らない。
    - でも、それじゃタイミングがわからない。ずっと光が来ないと、“0”だから光が無いのか、途中で故障したから光が無いのかもわからない。
  - 光は波なので、波に変調をかける。

## 光伝送システム構成

- 送信器 : 波長1550nm、1300nm、850nm
- 光ファイバ : マルチモード、シングルモード
- 光増幅器 : 実用的なのは1550nm帯域用
- 光フィルタ : マルチモード用はほとんど無い
- 光スイッチ : マルチモード用はほとんど無い
- 光受信器 : モード依存、波長依存は少ない



太平洋横断も可能だけど。。。

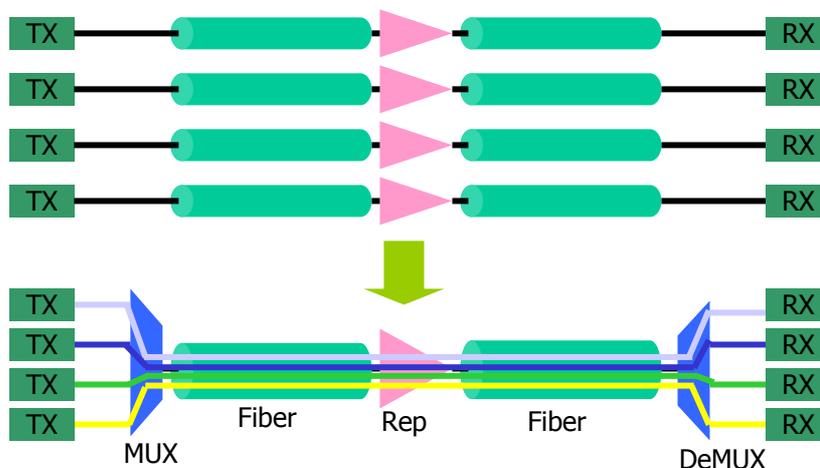
## ルータの光IFの例

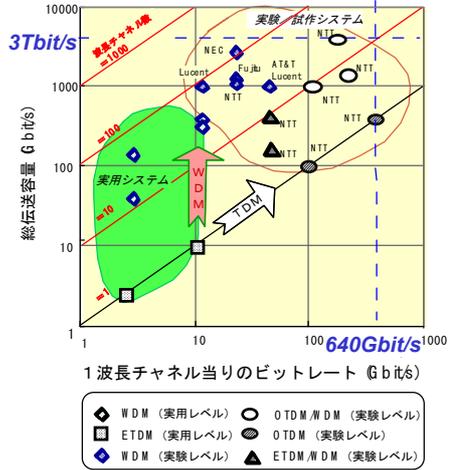
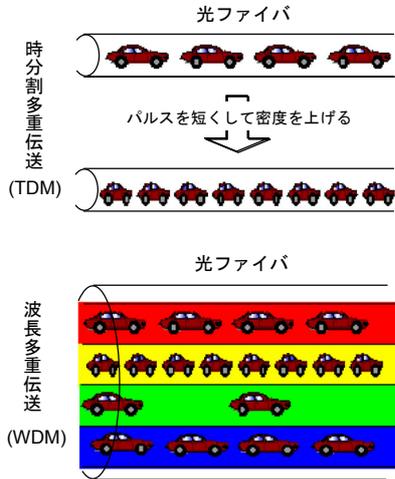
●OC-48/STM-16 (約2.5 Gbit/s)	●GbE (1.25 Gbit/s)
SMIR (15km) 1300nm	LX
TX -5 to 0 dBm	TX -9.5 dBm
RX -18 to 0 dBm	RX -20 dBm
許容損失13 dB	許容損失10.5 dB
SMLR (80km) 1550nm	
TX -2 to +3 dBm	
RX -28 to -9 dBm	
許容損失26 dB	
SMSR (2km) 1300nm	
TX -10 to -3 dBm	
RX -18 to -3 dBm	
許容損失8 dB	
●OC-192/STM-64 (約10.0 Gbit/s)	13dB ~ 1/20
SMLR (80km) 1550nm	26dB ~ 1/400
TX +6 to +8 dBm	
RX -22 to -10 dBm	許容損失28 dB
SMSR2 (20km) 1550nm	
TX -4 to 0 dBm	
RX -14 to -3 dBm	許容損失10 dB

1300 nm帯 <0.2dB/km  
1500 nm帯 0.1dB/km

## WDM伝送

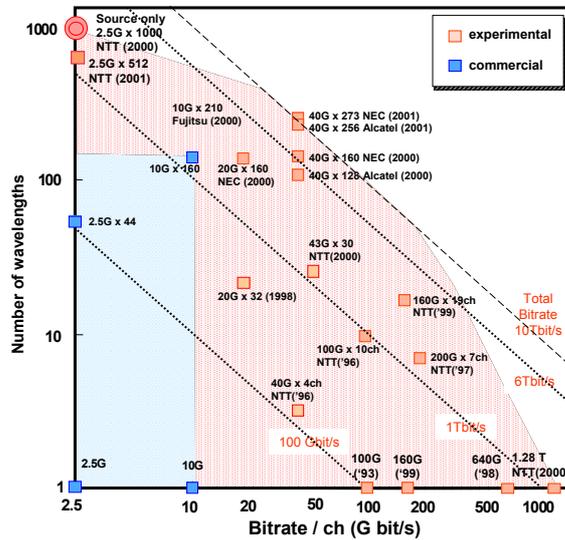
- 波長の異なる複数のチャンネルを1つのファイバに
  - 光の波の性質を利用





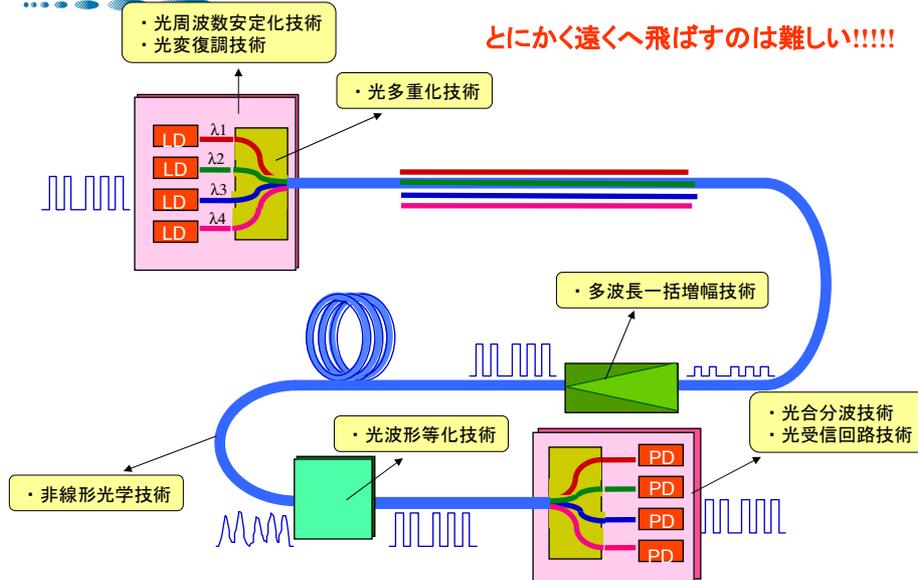
- 1Tbit/s (96年2月OFC)
    - ペル研 (20 G x 50 ch, 55 km NZDSF)
    - 富士通 (20 G x 55 ch, 150 km SMF)
    - NTT (100 G x 10 ch, 40 km DSF)
  - 2.6 Tbit/s (96年9月ECOC)
    - NEC (20 G x 132 ch, 120 km DCF)
      - 0.6 bit/s/Hz
  - 3 Tbit/s (99年3月OFC)
    - NTT (160 G x 19 ch, 40 km DSF)
  - 6.4 Tbit/s (2000年9月ECOC)
    - NEC (40 G x 160 ch, 186 km SMF+RDF)
      - 偏波多重
  - 10.9 Tbit/s (2001年3月OFC)
    - NEC (40 G x 273 ch)
      - C+L+S バンド、偏波多重
      - 0.4 bit/s/Hz
- 単一チャンネル-----
- 400 G-OTDM (96年2月OFC)
    - NTT (400 G x 1 ch, 40 km DSF)
  - 1.28 T-OTDM (2000年9月ECOC)
    - NTT (1280 G x 1 ch, 70 km SMF+RDF)

## 伝送容量の拡大競争 10 Tbit/fiber で収束？



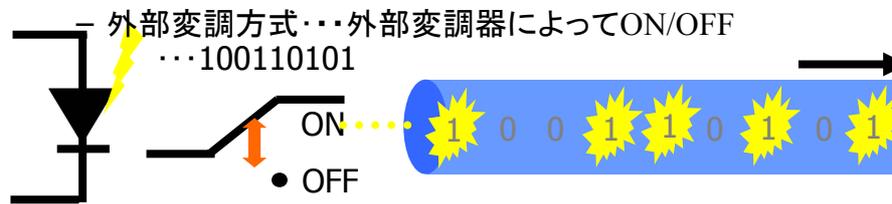
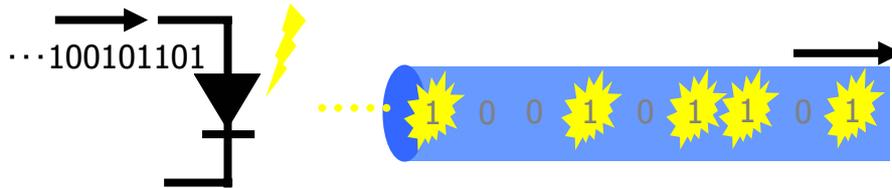
100 Tbit/s は???  
もちろん短距離なら  
できます。

## 波長多重(WDM)伝送技術



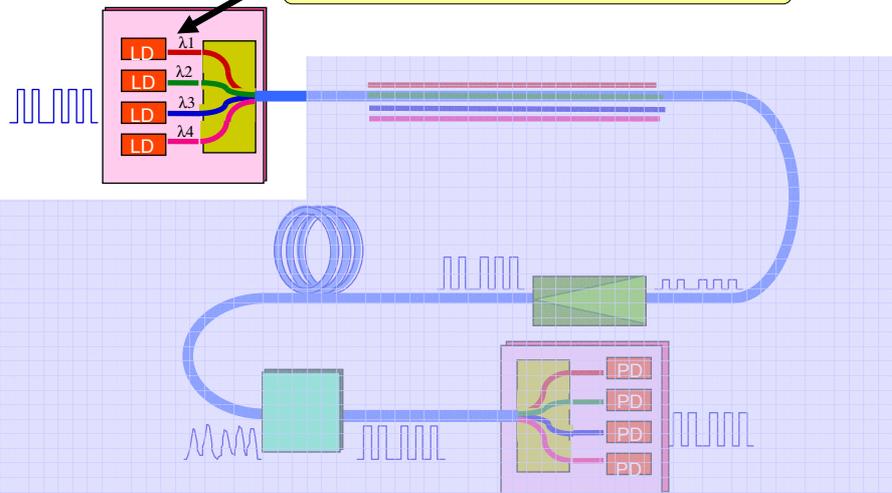
## 送信器

- 電気信号に光信号に変換
  - 光の粒子としての性質を利用、ただし波長は波の性質ですね。
  - 直接変調方式・・・レーザの駆動電流をON/OFF



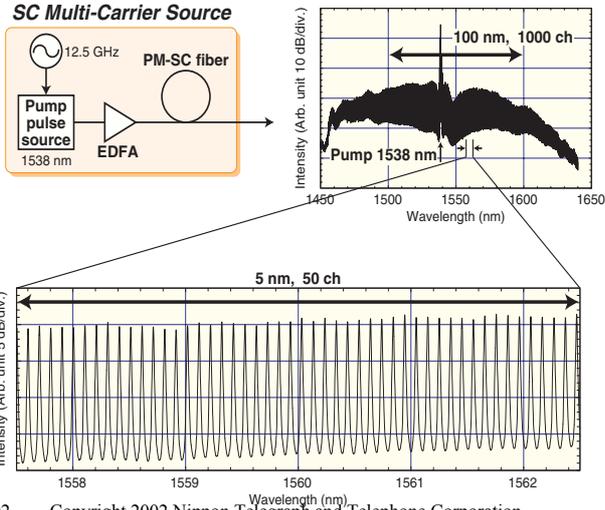
## 波長多重(WDM)伝送技術

波長の数だけ送信器を並べるの？



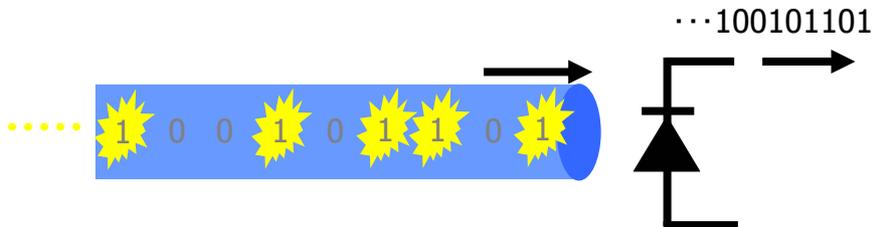
## 1個の光源から1000波長を産む

Super Continuum Multi-Carrier Light Source (NTT)



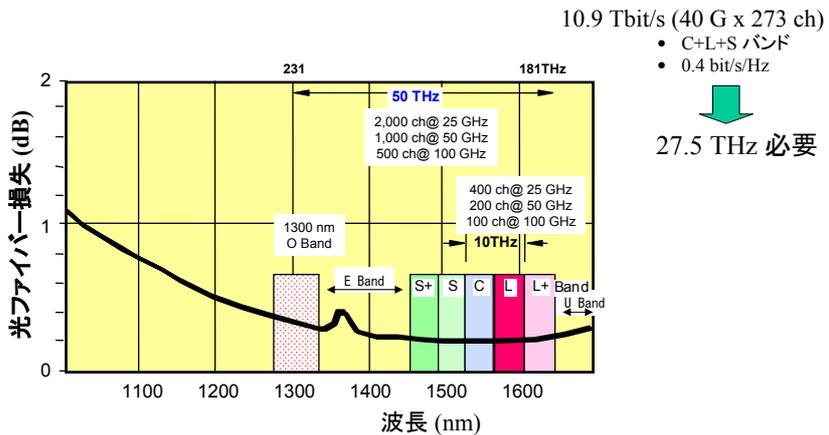
## 受信器

- 光信号を電気信号に変換
  - 光の粒子としての性質を利用
  - 信号速度が高くなると、その分だけ1bitの情報を運ぶ光パワーが少なくなる
    - 信号再生に十分な電流が得られない
    - 高速用受信器ほど受信感度が落ちる



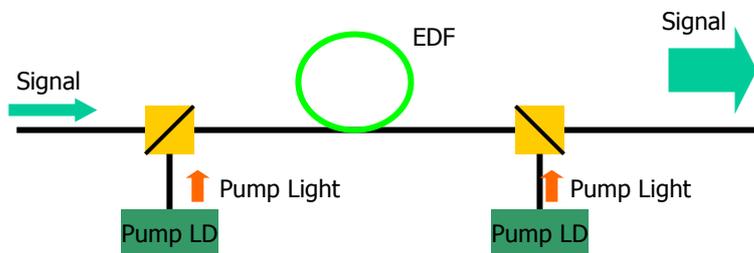
## 光ファイバと波長帯

- C-Band 1550 nm近辺、EDFAの増幅帯域
- L-Band 1580 nm近辺、GS-EDFAの増幅帯域



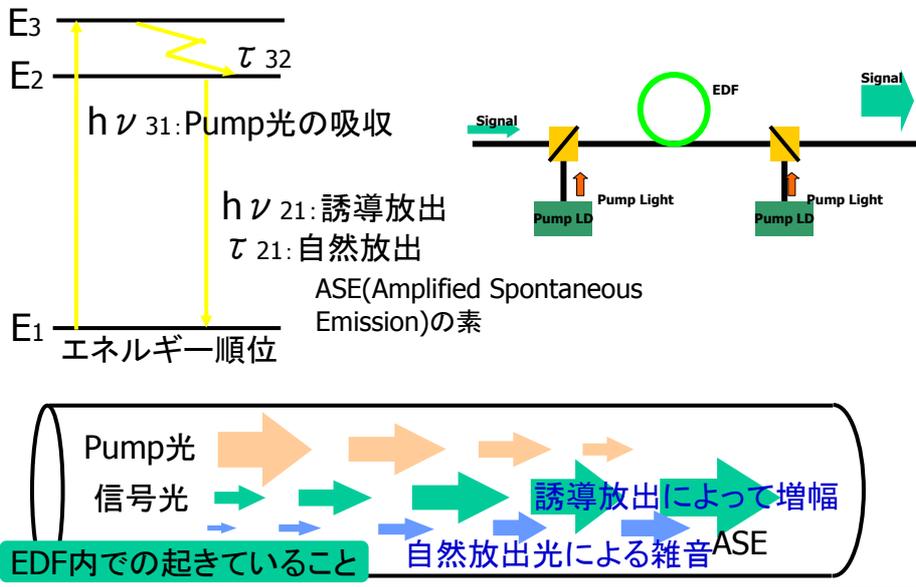
## EDFA

- Erbium Doped Fiber Amplifier
- 最も広く用いられている光増幅器
- 誘導放出を用いて光を増幅
- 増幅すると光SN比は劣化



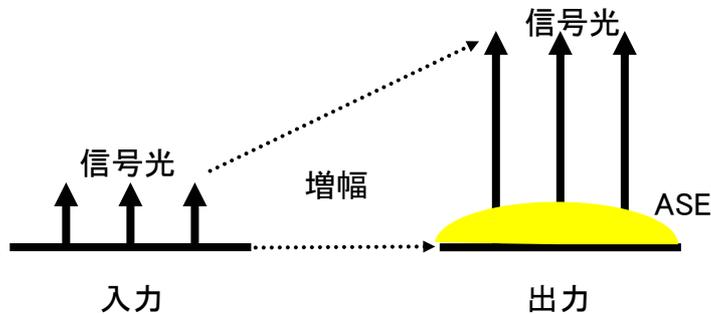
Input Signal Power + Pump LD Power > Output Signal Power

## EDFAによる光増幅の原理



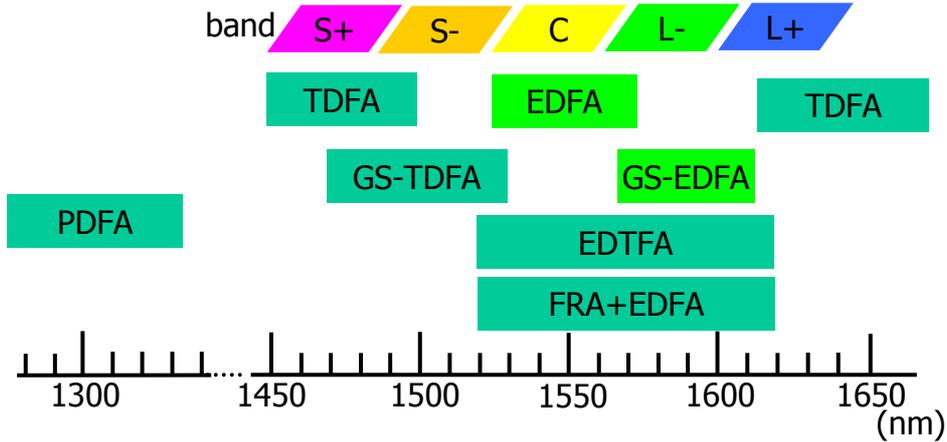
## ASE雑音

- 光増幅器による雑音。
- 自然放出光が蓄積したもの。
- 原理的に光SNは3dB劣化してしまう。



## 各種波長帯向けのアンプ

- 色々な元素をファイバに添加して探索した結果？
- 複数の光増幅器を組み合わせ使用。



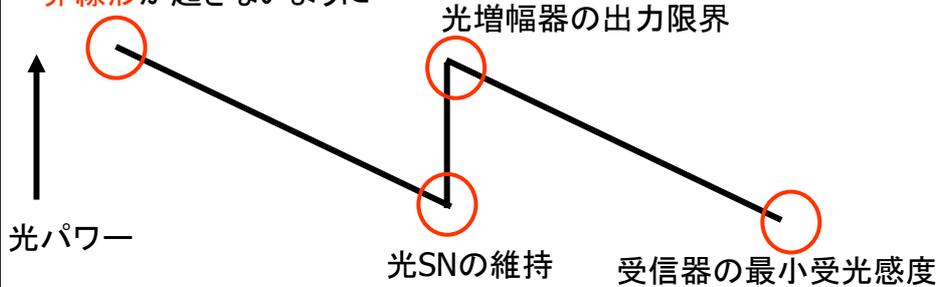
## 太平洋を横断するには

- 伝送路設計 -

- レベルダイアグラム設計、光ファイバ分散値の管理が重要

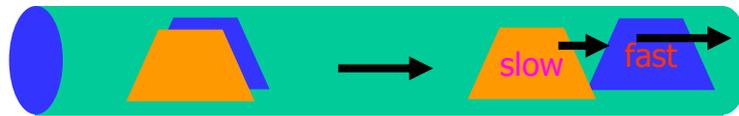


非線形が起きないように...



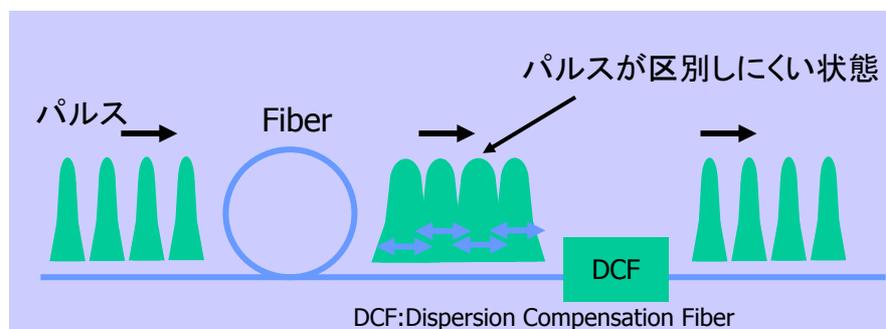
## 光ファイバの分散

- 波長によって光ファイバ中での光の速さが異なること。
  - 色の異なるパルスは伝播速度が異なる。
  - 1パルス中で波長が一様でないパルスは波形が変化する。
    - 高速パルスは、広い周波数スペクトルを持つ。



## 分散補償

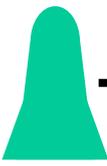
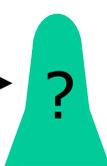
- 光パルスがファイバ中を伝播する際に、分散によってパルス幅が広がるのが、伝送性能劣化の原因となる。
- 分散を補償する媒質を挿入することにより、分散による劣化を抑えることができる。



## 非線形効果

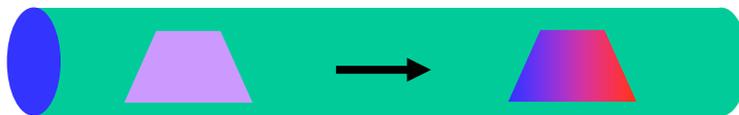
- 強い光がファイバに入射した場合、ファイバの非線形性によって引き起こされる効果。
  - SPM、XPM、FWMがその代表例

弱いパルス  →  影響なし!

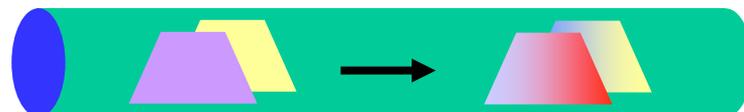
強いパルス  →  どのような影響?

## SPMとXPM

- Self Phase Modulation (SPM)
  - パルスがファイバ中を伝播する時、パルスの前方が Red Shift, 後方が Blue Shift する現象。ファイバの分散がある事で波形が歪む

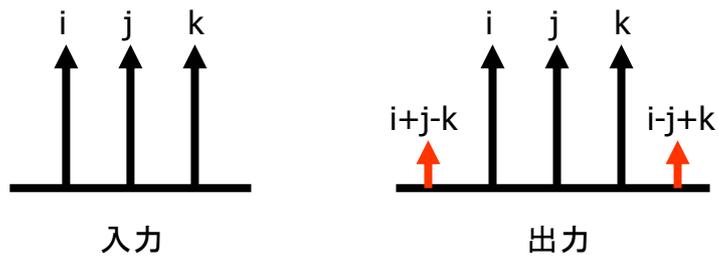


- Cross Phase Modulation (XPM)
  - 波長の異なるパルスが相互作用することで、パルス内で光の周波数が変化する現象



## Four Wave Mixing

- 3つ(もしくは2つ)の入力光によって別の波長の光が生じる現象
  - 波長多重伝送を行う際に、入力パワーを制限する要因となる



## 第一部Outline

- 光への期待
- 光伝送入門
- 光スイッチのお話

## 光スイッチの紹介

- 曲がりたがらない光をどうやって曲げるかが課題
  - カづく
  - 屈折率の違いで曲げ、反射
  - 波の干渉性を利用
  - ...

## 光スイッチの各論・・・分類

Y. Yamabayashi (NEL)

- 空間伝搬型
  - 2Dマイクロミラー型 (OMMIほか)
  - 3Dマイクロミラー型 (Lucentほか)
- 導波路型
  - ファイバ駆動型 (SII, 日立金属)
  - Mach-Zehnder干渉計型
    - 熱光学型 (NEL)
  - バブル型
    - 泡発生型 (Agilent)
    - 泡移動型 [Olive-SW] (NTT/NEL)

## 光スイッチ比較

デジタル

- 平面型スイッチ
  - ファイバ型スイッチ
  - 2D MEMS スイッチ
  - PLC型スイッチ
    - バブル型
    - TO (Thermo-Optic)型

非機械式  
(高信頼)  
高安定動作  
(導波路内閉じこめ)

課題

-低消費電力化  
-高集積化

アナログ

- 空間型スイッチ
  - 3D MEMS スイッチ

課題

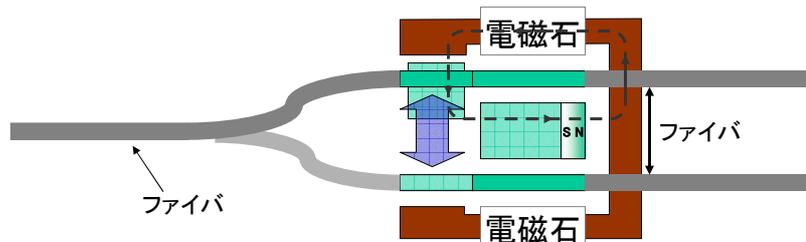
-信頼性  
-制御性

高集積性  
低損失性

MEMS: micro-electromechanical system

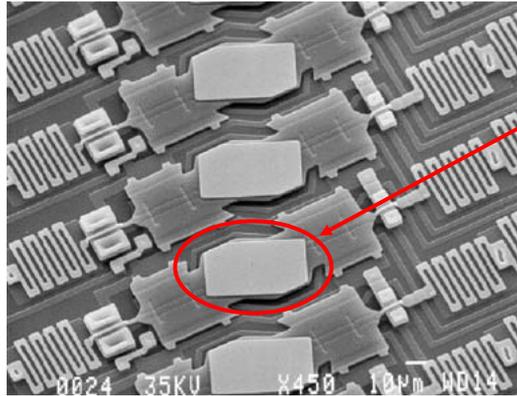
## ファイバ駆動型スイッチ

- 特徴
  - 磁化被覆ファイバを直接駆動するため
    - 高クロストーク (< 60 dB)
    - 低挿入損失 (0.5 dB typ.)
  - 自己保持機能 (電力消費なし)
  - 多ポート化は困難



## MEMS

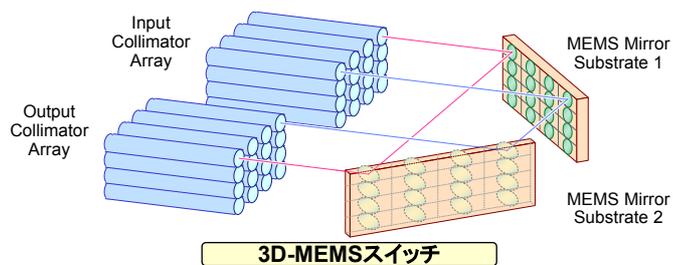
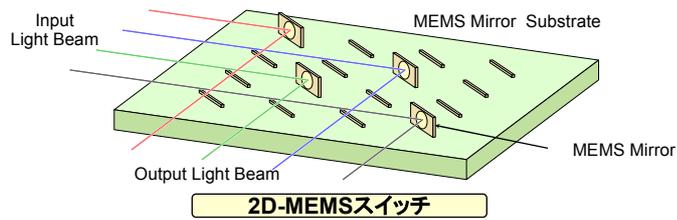
- Micro Electro Mechanical Systemsの略
- 電氣的な力で微小ミラーを動かすことで光の方向を変えることでスイッチする



これがミラー

www.lucent.com  
より

## MEMSスイッチによる 大規模マトリックススイッチ

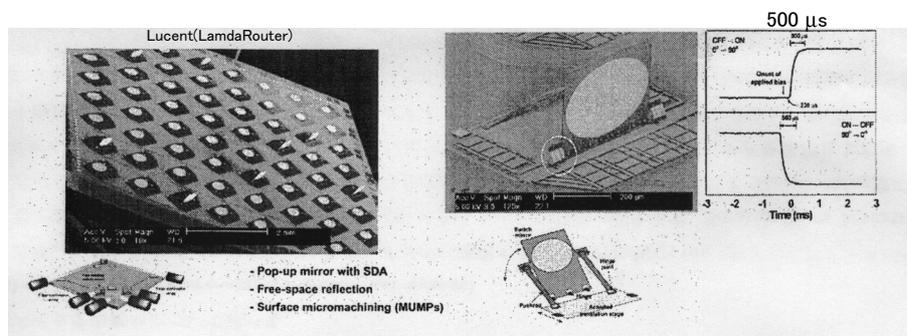


## 2次元MEMSスイッチ

- デジタル動作
- 64×64程度まで(?)
- 高精度の光学系配置実装／製造必須
- 最短光路と最長光路との光路差が大きさを制限する
  - いずれにも最適化できない宿命
- 中規模低コストな光スイッチに好適か

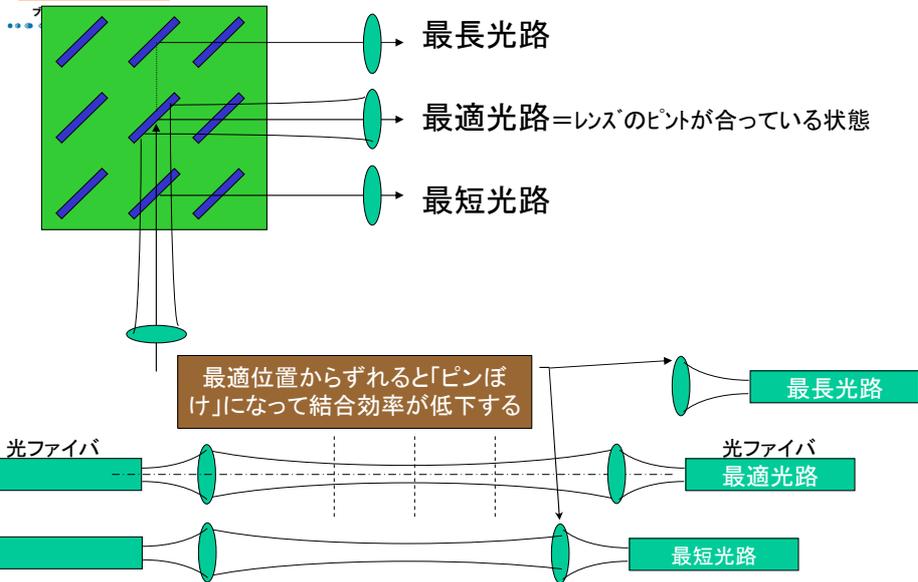
## 2D MEMS スイッチ

- 特徴
  - シリコンプロセスで大量に整列して作成
  - 実装の小型化  ただし、バルク光学系は量産に不向き



L. Y. Lin et al.: "Micromechanical Optical-switching Technologies for WDM Networks,"  
LEOS Summer Topical Meetings, p. 57 (1999)

## レンズ系2DMEMSでのサイズ制限要因



## 3DMEMSスイッチ

- Agere (もとLucent),  $\chi$  ROS (Nortelが閉鎖), Calient, 等
- 2軸回転鏡による空間ビームハンドリング
- 鏡の角度制御に高精度アナログ制御必要
  - プロジェクタ用は、角度が決まっているのでデジタル
- 必要な鏡の数はポート総数に等しいので  
4096 × 4096も可能(?)
- とにかく、制御が難しい!!!