

第10章

光スイッチング技術

2007年7月23日(月)

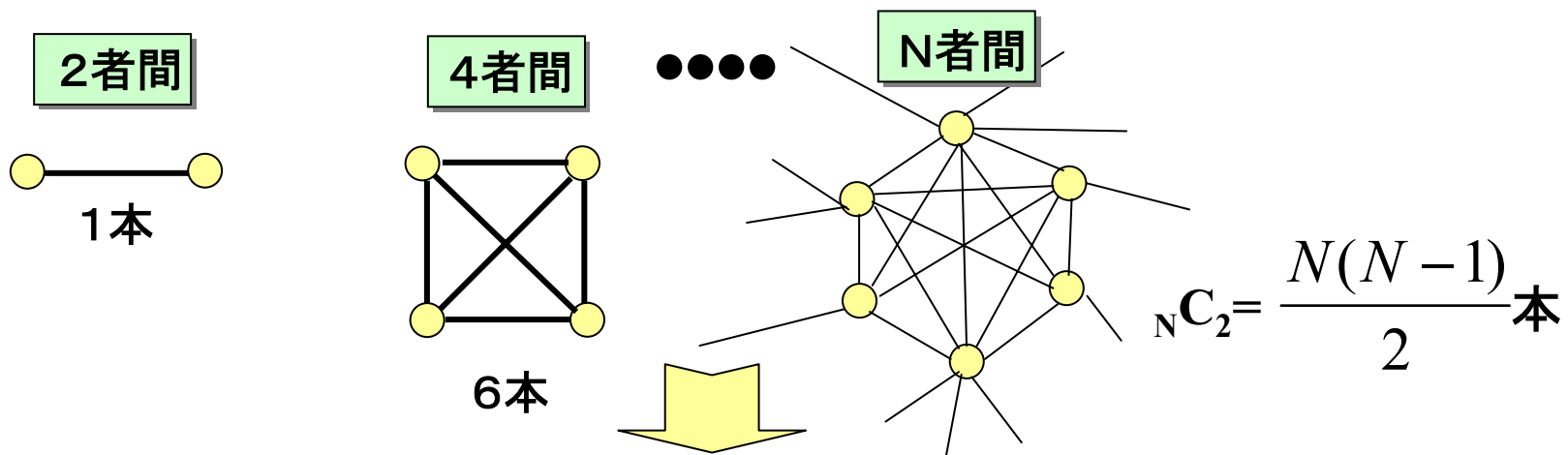
1. (光)スイッチの意義
2. 光スイッチの使用用途
3. 光スイッチの種類と実例
4. ROADMと波長選択スイッチ

2007年度
光通信システム (光)ネットワークにおけるスイッチング機能の必要性

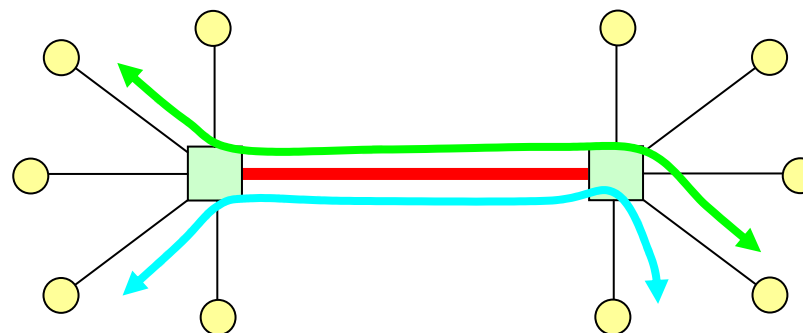
1対1通信から1対多、多対多通信への拡張

スイッチングによる配線・装置の経済的
配置が可能

ユーザ同志をスター配線した場合の通信路の必要数



スイッチング・階層構成の導入

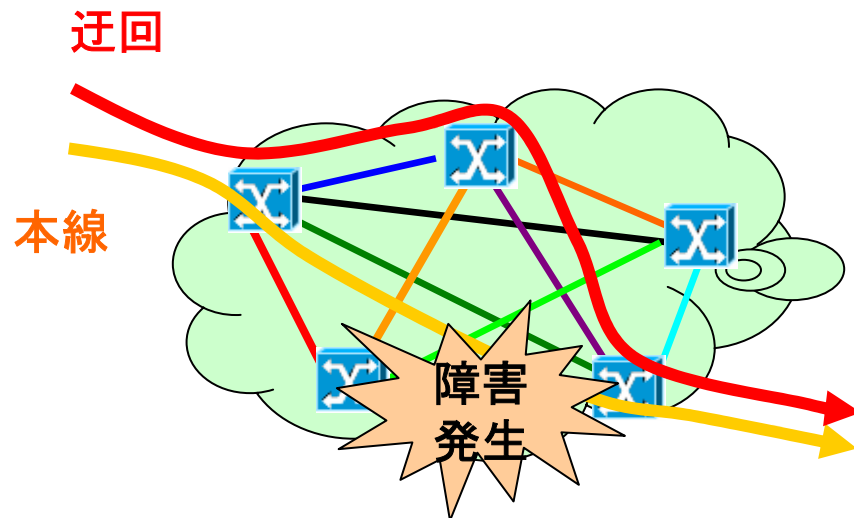


- 通信路の必要数低減
- 装置規模の縮小

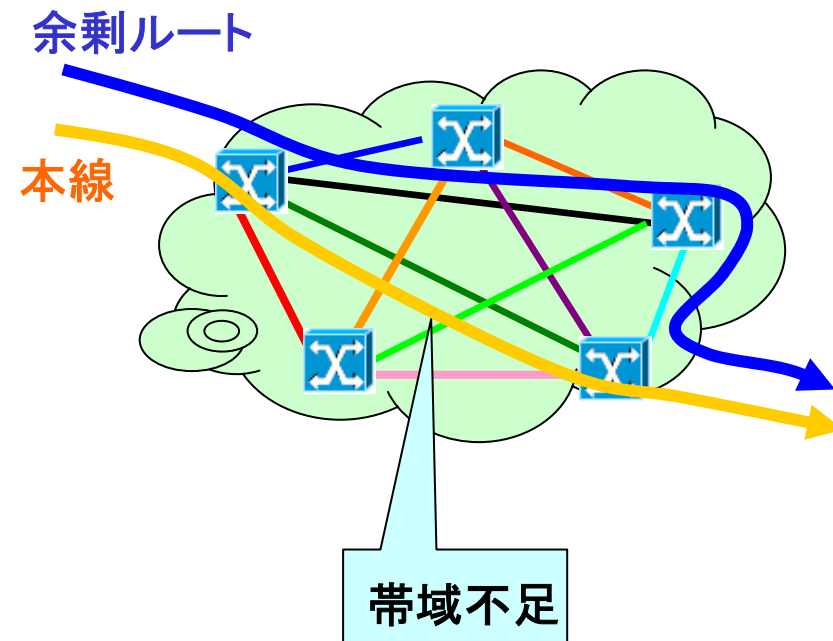
2007年度

光通信システム 相互接続されたWDMネットワークの光パス・スイッチング

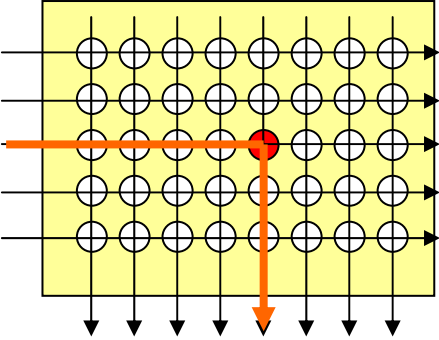
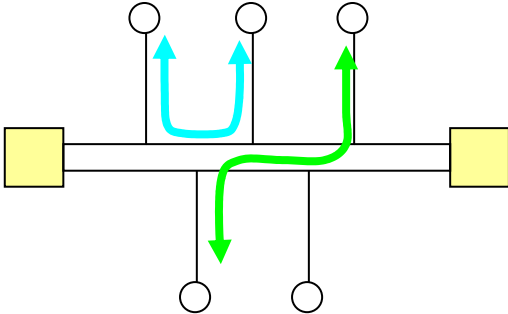
① 障害発生時のルーティング



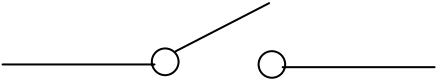
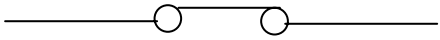
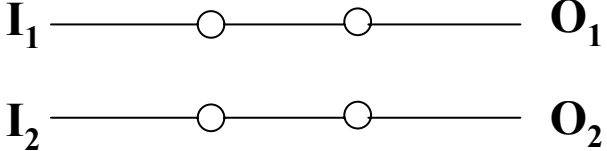
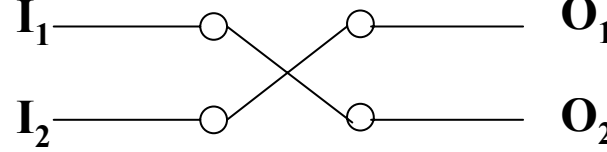
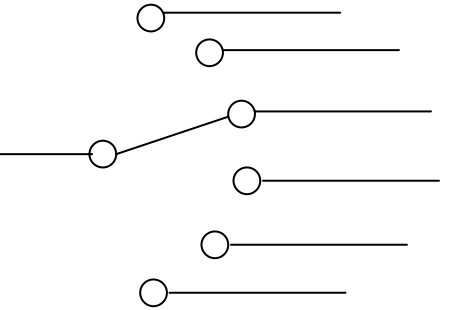
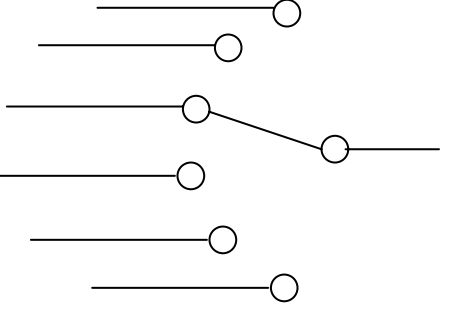
② 帯域不足時の余剰ルートへのルーティング



スイッチング機能の実現方法

スイッチ 形態	媒体専有型スイッチ N×Mマトリクススイッチ 	媒体共有型スイッチ 
交換方式	回線交換方式	パケット交換方式

基本スイッチエレメント

ゲートスイッチ	クロスバー型 スイッチ	多値スイッチ (ロータリスイッチ)
OFF状態  ON状態 	バー状態  クロス状態 	1入力多出力型  多入力1出力型 

多端子スイッチ合成法(1)

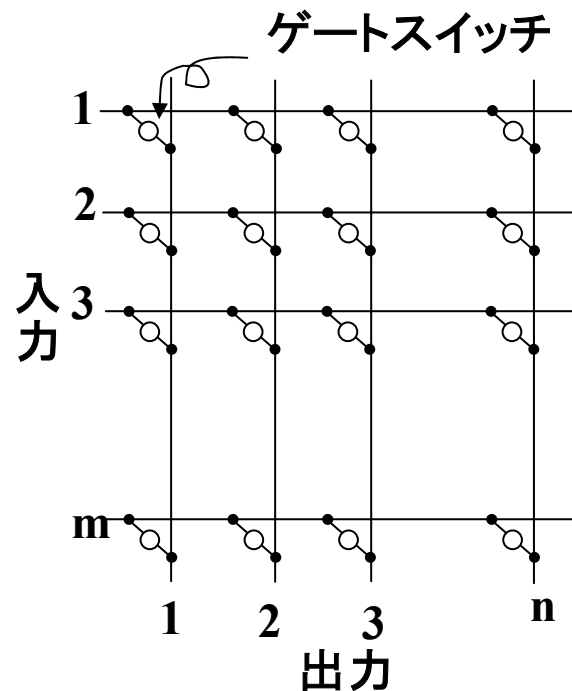
マトリクススイッチ

ゲートスイッチによる構成

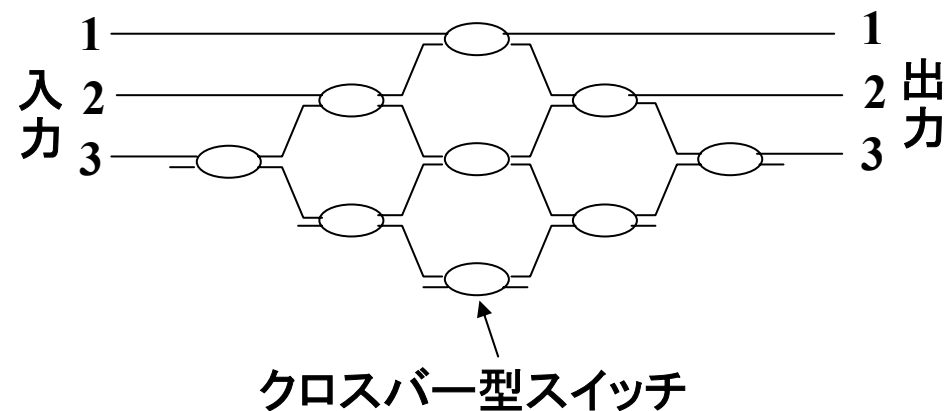
クロスバー型スイッチによる構成

出力線が空き状態であれば任意の入力線と接続可能(完全非閉塞スイッチ)

完全格子型マトリクススイッチ

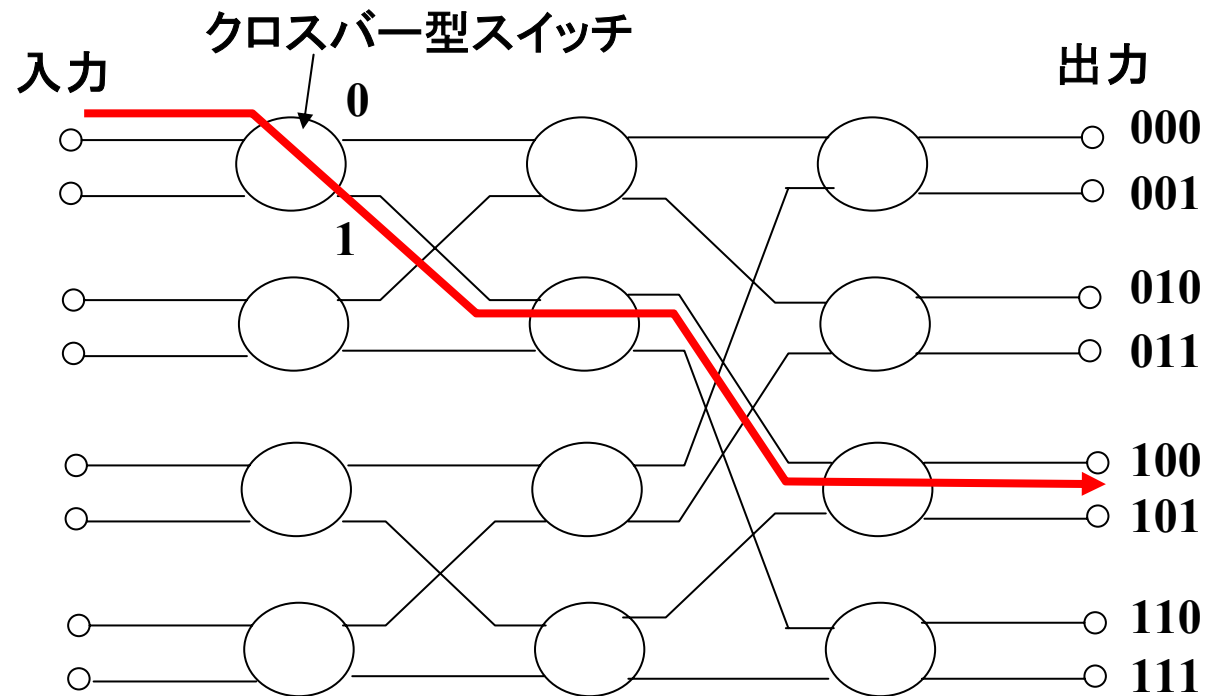


$m \times m$ 完全非閉塞スイッチ



- ・マルチ接続不可
- ・経路による通過スイッチ数の違い

多端子スイッチ合成法 バンヤンスイッチ

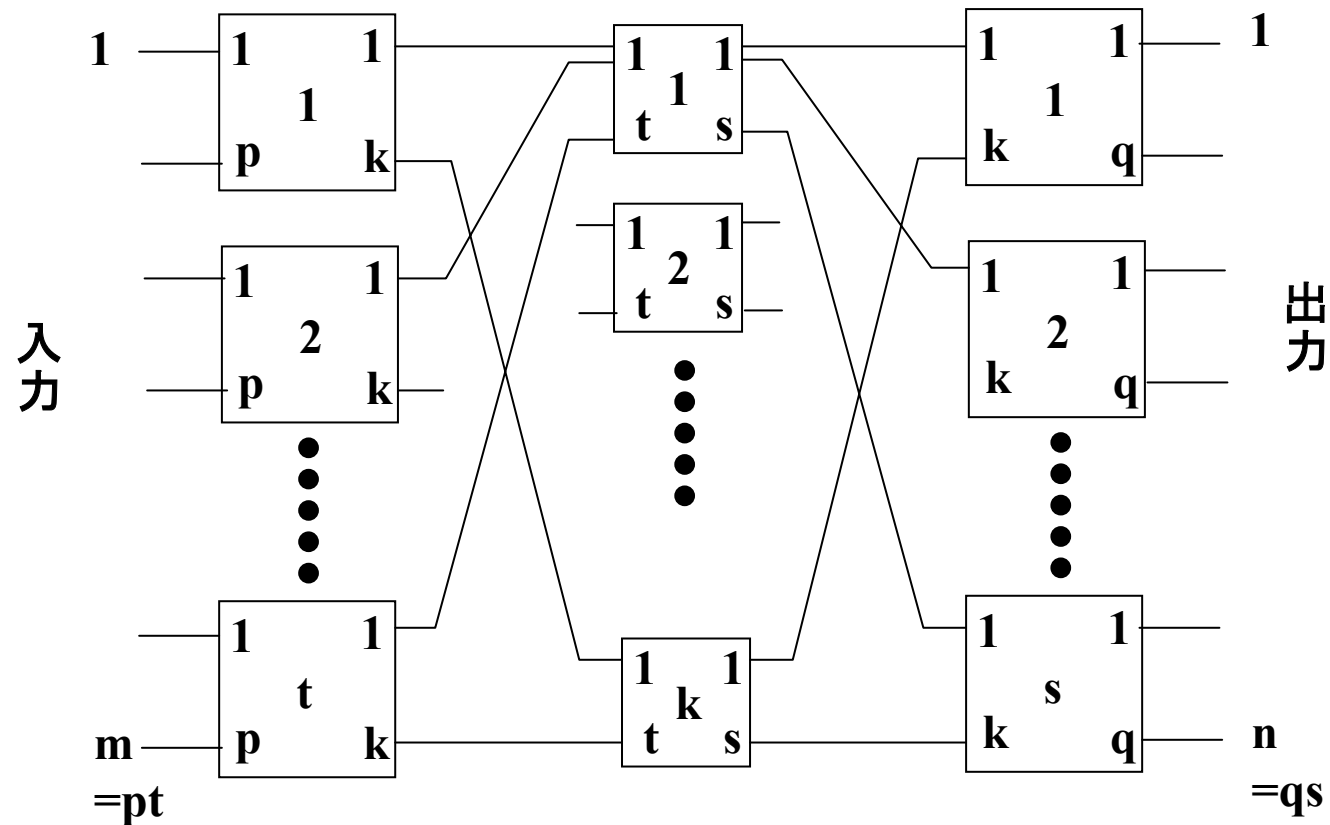


特徴

- 入力信号が行き先情報（ルーティング情報）を持っており、その情報に従ってスイッチを制御（セルフルーティング）
- 内部閉塞型スイッチ
→ 回避方法：出力線番号に応じてスイッチの入力位置を並べ替える（バッチャソーティング網の設置）

多段スイッチ回路網

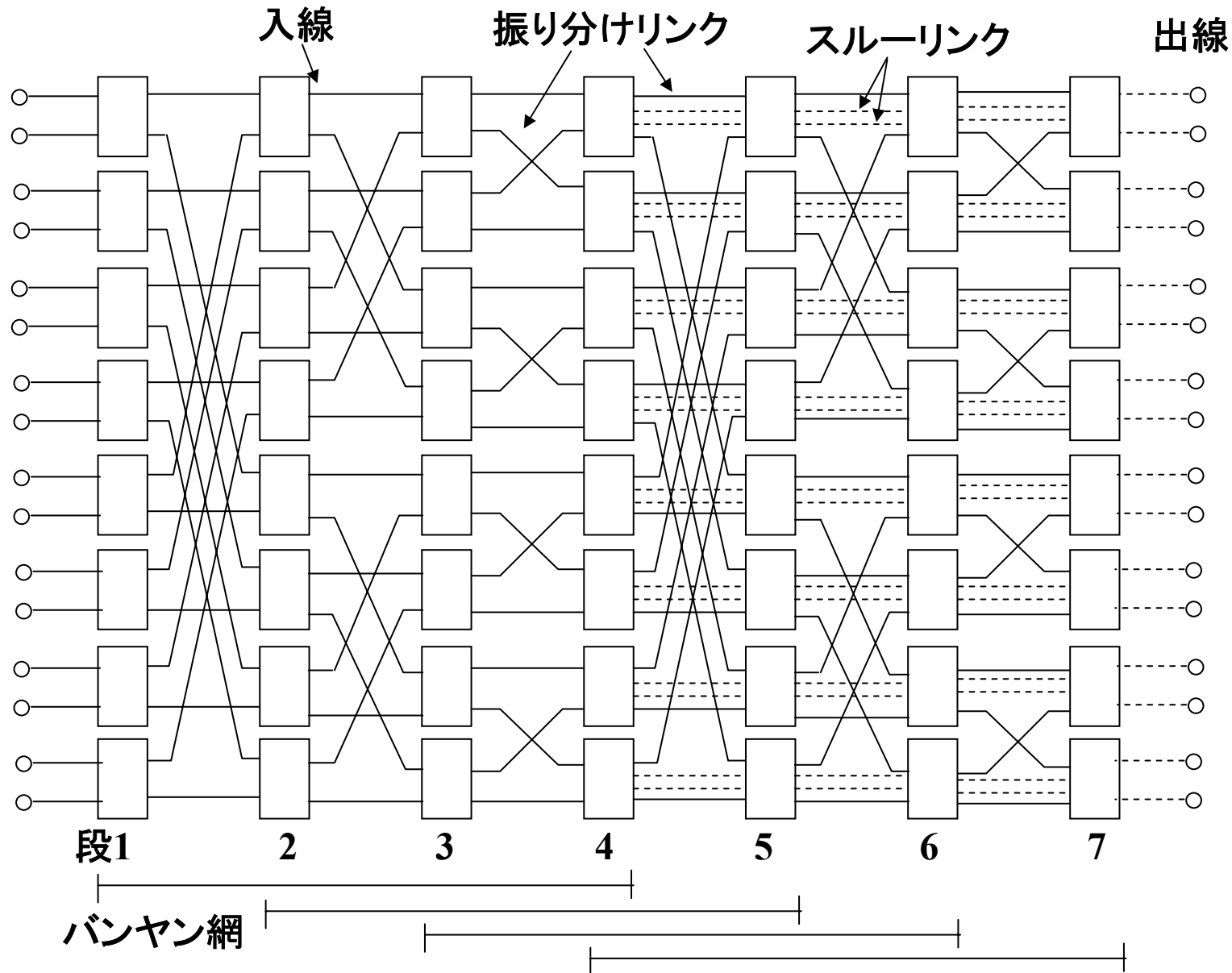
完全格子型マトリクススイッチを用いた多段スイッチ回路網



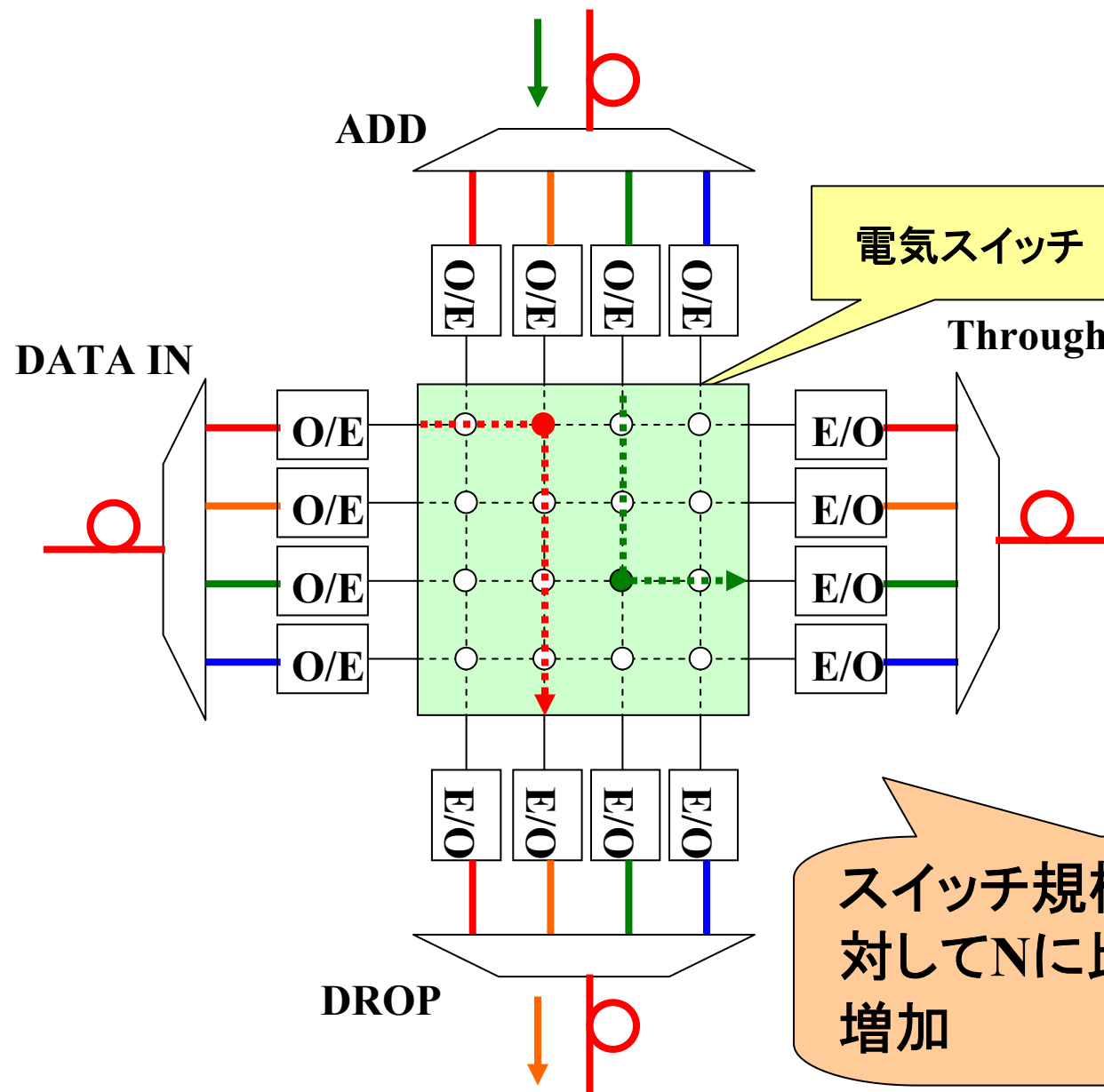
特徴

- $m \times n$ マトリクススイッチより少ない基本スイッチ数で構成可能
- 内部閉塞の発生

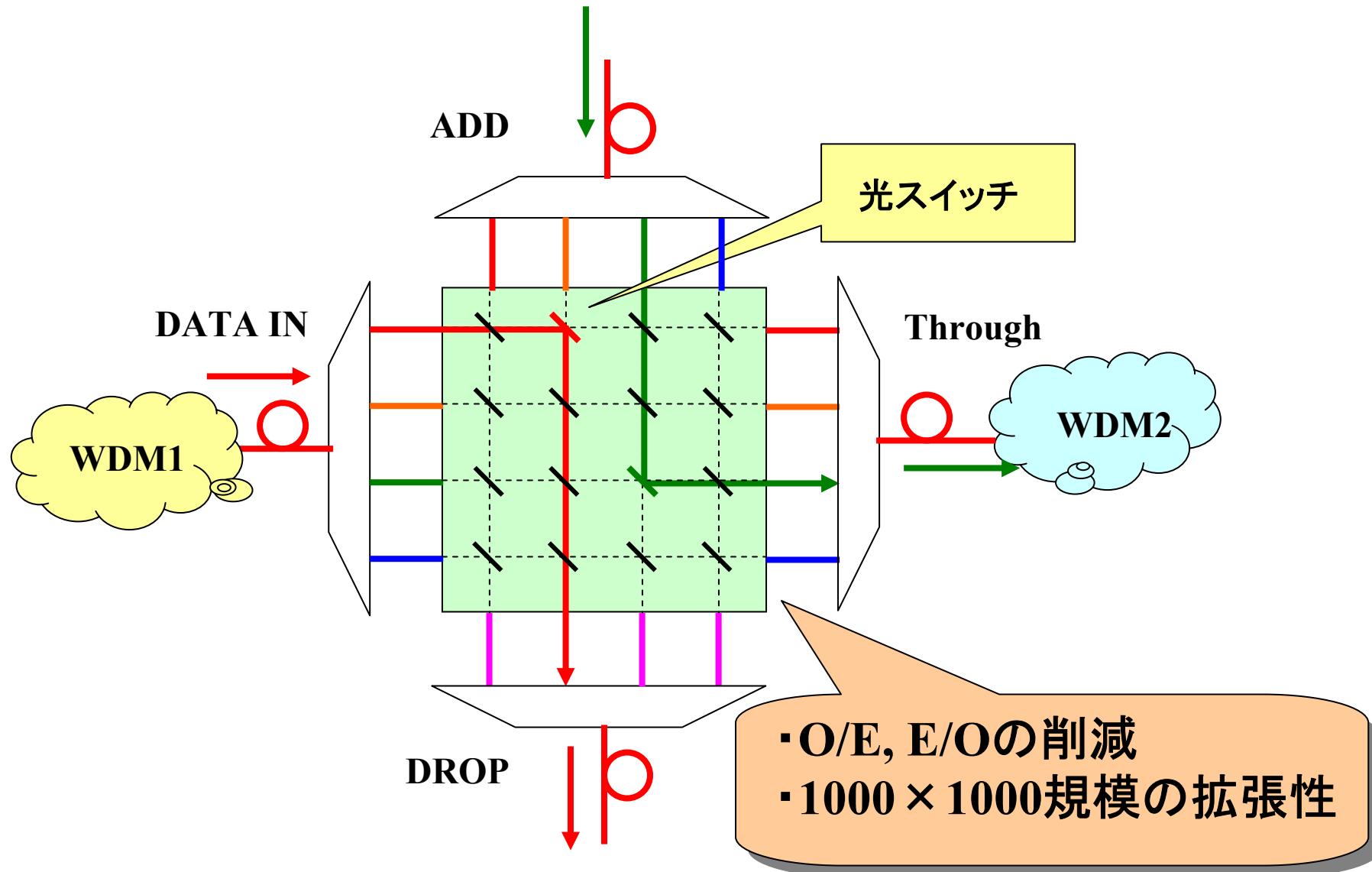
再ルーティング型バンヤン網



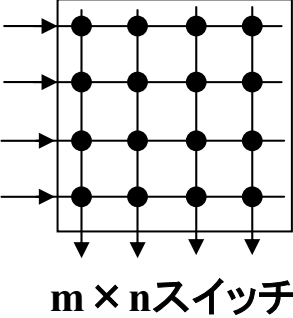
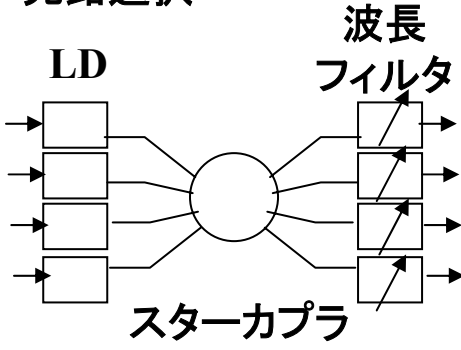
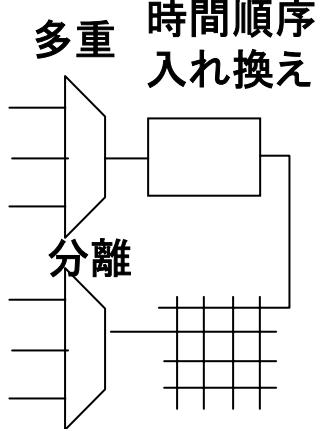
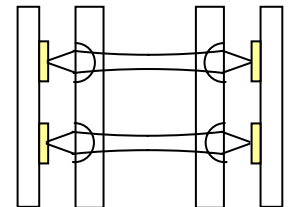
電気スイッチによる構成



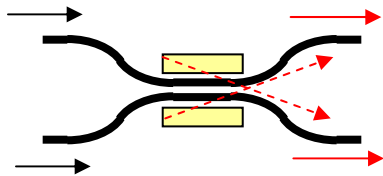
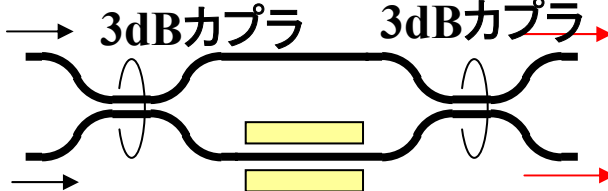
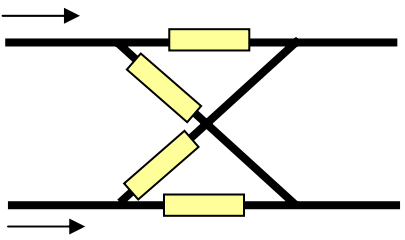
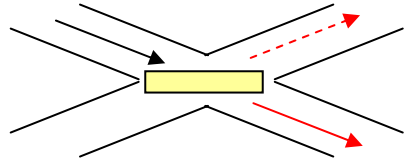
光スイッチによる構成



光スイッチング技術の分類

種類	空間分割型	波長分割多重型	時分割多重型	フリースペース型
構成	空間的に分離された入出力光路を物理的に接続／切り替え  m × nスイッチ	波長合波・分波による光路選択  LD 波長フィルタ スターカップラ	時間軸上の制御 多重 時間順序入れ換え  分離	波長板・偏向素子を用いた光路切り替え LD 光学系 PD 
特徴	アナログ・デジタル・変調方式・変調速度に無依存	光の広帯域性	超短光パルスによる高速化	2次元アレイ化による高密度化
課題	・スイッチ規模大の時スイッチ数増大(N^2) ・曲げ制限	チャンネル間クロストーク	メモリ・バッファの実現	光学部品のサイズアライメント

空間分割型光スイッチの種類

種類	形態	制御要素
方向性結合器型		結合部の屈折率変化
マッハツェンダー干渉計型		結合していない導波路部の屈折率変化
LDゲート型		ゲート部の利得・吸収
全反射型		交差部の屈折率変化 ----- 全反射ミラーの有無

光スイッチの動作に用いられる物理現象

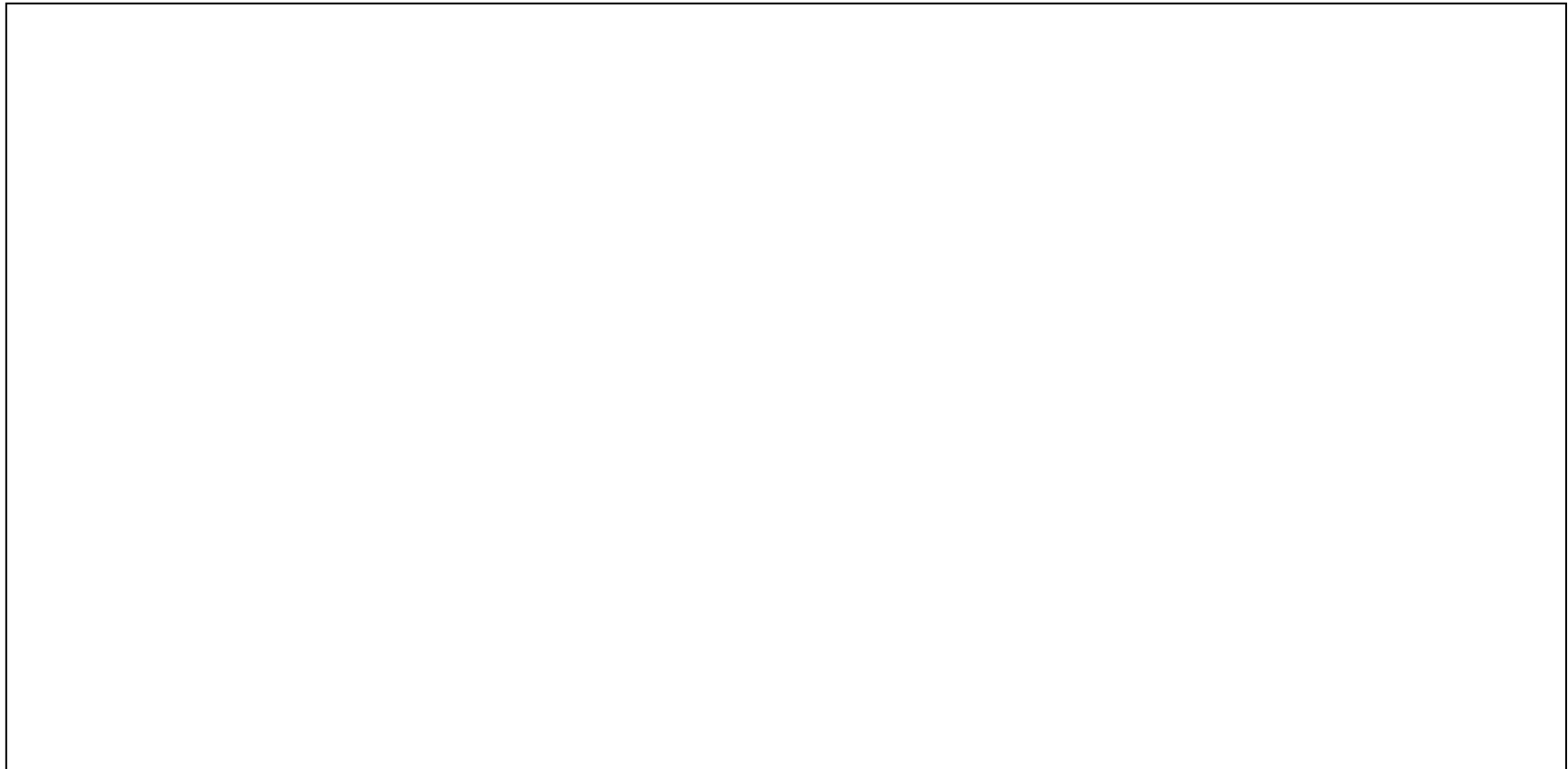
動作原理		材料	動作速度
屈折率変化	熱光学(TO)効果	石英系 ポリマー系	msオーダー
	電気光学(EO)効果 ポッケルス効果: 1次 カー効果: 2次	誘電体: LiNbO_3	psオーダー
	プラズマ効果	半導体: InGaAsP , AlGaAs	nsオーダー
	フ란ツ・ケルディツシュ効果	半導体バルク: InGaAsP , AlGaAs	psオーダー
	量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)	半導体MQW	psオーダー
吸収変化	フ란ツ・ケルディツシュ効果	半導体バルク: InGaAsP , AlGaAs	10ps~ns
	量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)	半導体MQW	10ps~ns
利得変化	誘導放出	半導体	nsオーダー
機械的位置変化	ミラー位置	金属・半導体・オイル	msオーダー

マトリクス光スイッチの特性比較

方式		機関	サイズ	挿入損失	ON/OFF比	備考
半導体	半導体	UCSB	4×4	3dB	33dB	
		U. Bristol	4×4	14dB	50dB	SW 1ns
	SOAゲート	NEC	4×4	9dB	40dB	SW 1ns, PDL 0.5dB
		Alcatel	4×4	0dB	60dB	
誘電体	石英TO型	NTT	16×16	6.6dB	55dB	
	ポリマーTO型	Akzo	8×8	10.7dB	30dB	PDL 0.5dB
		Berlin I.T.	4×4	12.8dB	29dB	
	LiNbO ₃	NEC	8×8	11dB	20dB	PDL 1dB
	液晶	NTT	64×64	9.5dB	26dB	PDL 0.2dB
		CNET	8×8	9dB		SW 3ms, PDL<3dB
機械式	Si-MEMS	Lucent	112×112	7.5±2.5dB		Crosstalk 50dB SW < 10ms
バブル式	Si+オイル	Agilent	32×32	2.5-7.5dB		Crosstalk 50dB SW <10ms

16×16 TO型マトリクススイッチ

**T. Goh, M. Yasu, K. Hattori, A. HImeno, M. Okuno and Y. Ohmori
(NTT), J. Lightwave Technol., Vol.19, No.3, pp.371-389 (2001).**

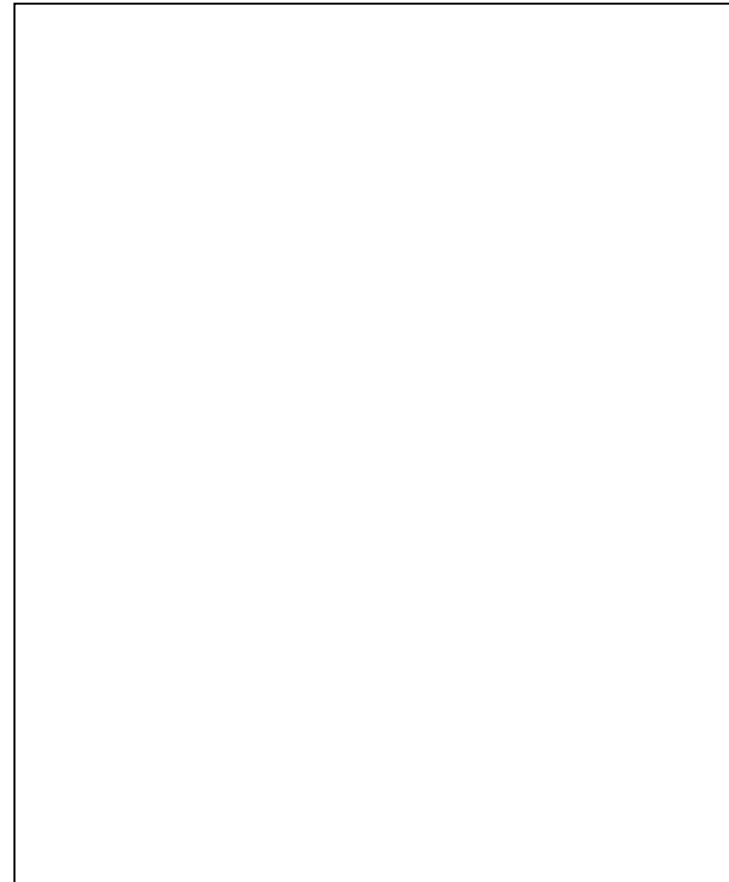


2007年度

反射／透過型光スイッチ 光通信システム (MEMS: Micro-ElectroMechanical System)

IEEE Communication Magazine, vol.40, No.3
(2002) より

D. Hah, S. Huang, H. Nguyen, H. Chang,
And M.C. Wu (UCLA), OFC2002, TuO3.



2007年度
光通信システム

MEMSスイッチによる光路切り替え

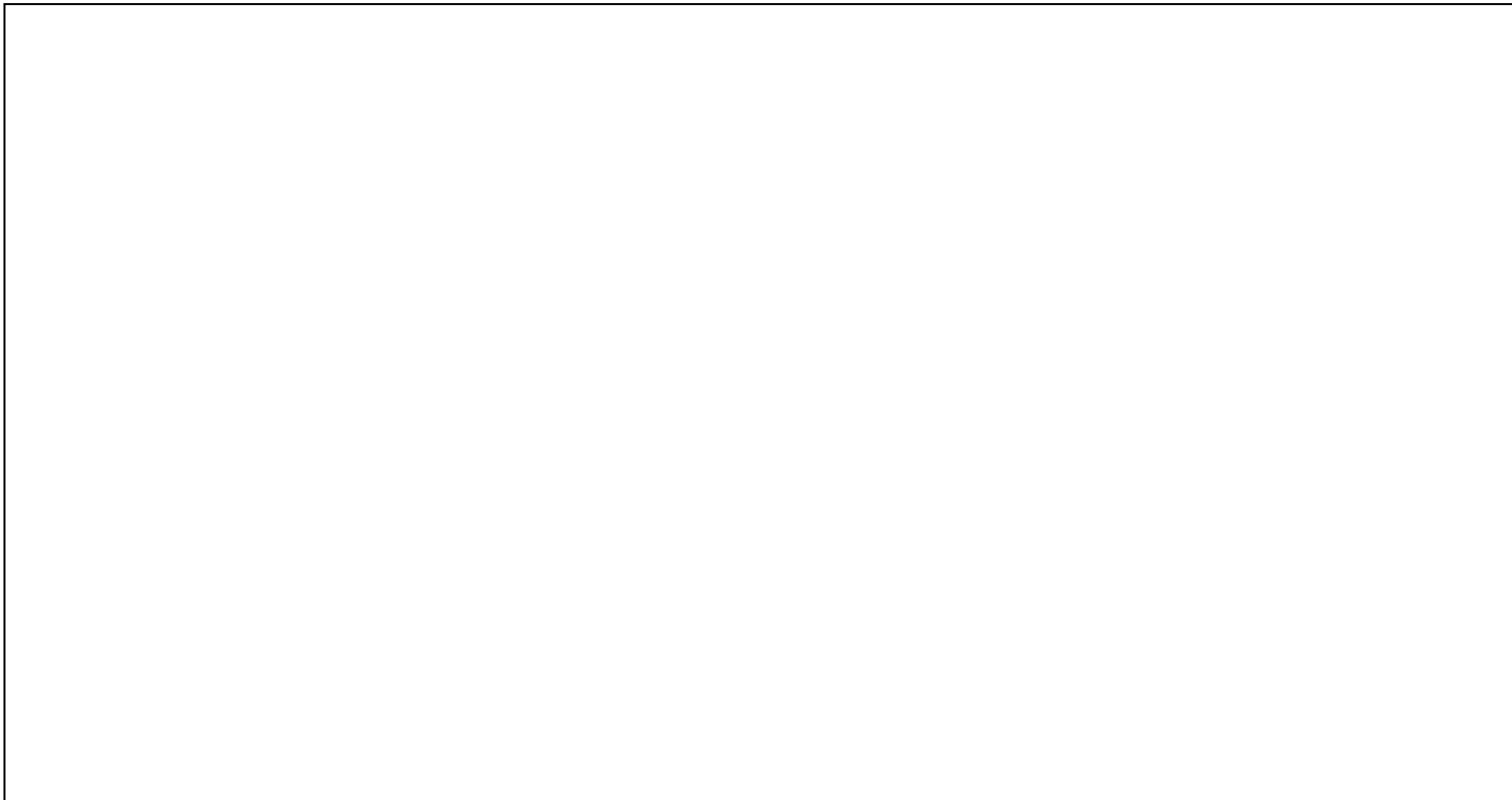
山本, 山口, 竹内, 清水, 日暮, 澤田, 上西, 2003年信学会総合大会, C-3-127.



可動式ミラーによるスイッチ

『日経エレクトロニクス』(2001年1月29日号)より

日本航空電子のミラー型スイッチ素子



バブル型光スイッチ

Agilentの光スイッチの構成図



2007年度

光通信システム

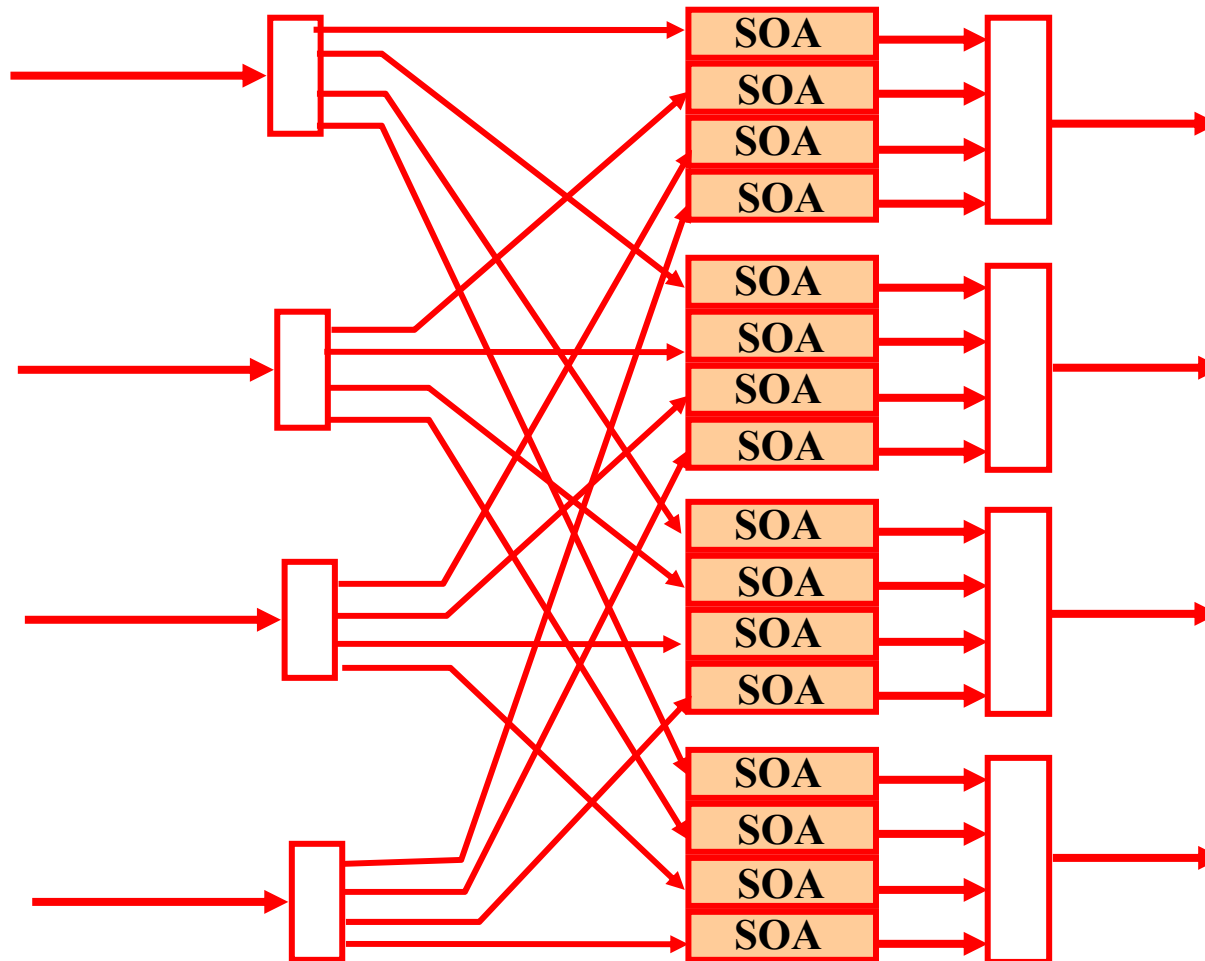
PLZTを用いた波面制御型光スイッチ

A. Sugama, M. Ishii, T. Akahoshi, K. Sato, M. Doi, T. Shiraishi, M. Kato, and H. Onaka,
ECOC2004, Mo4.6.3.



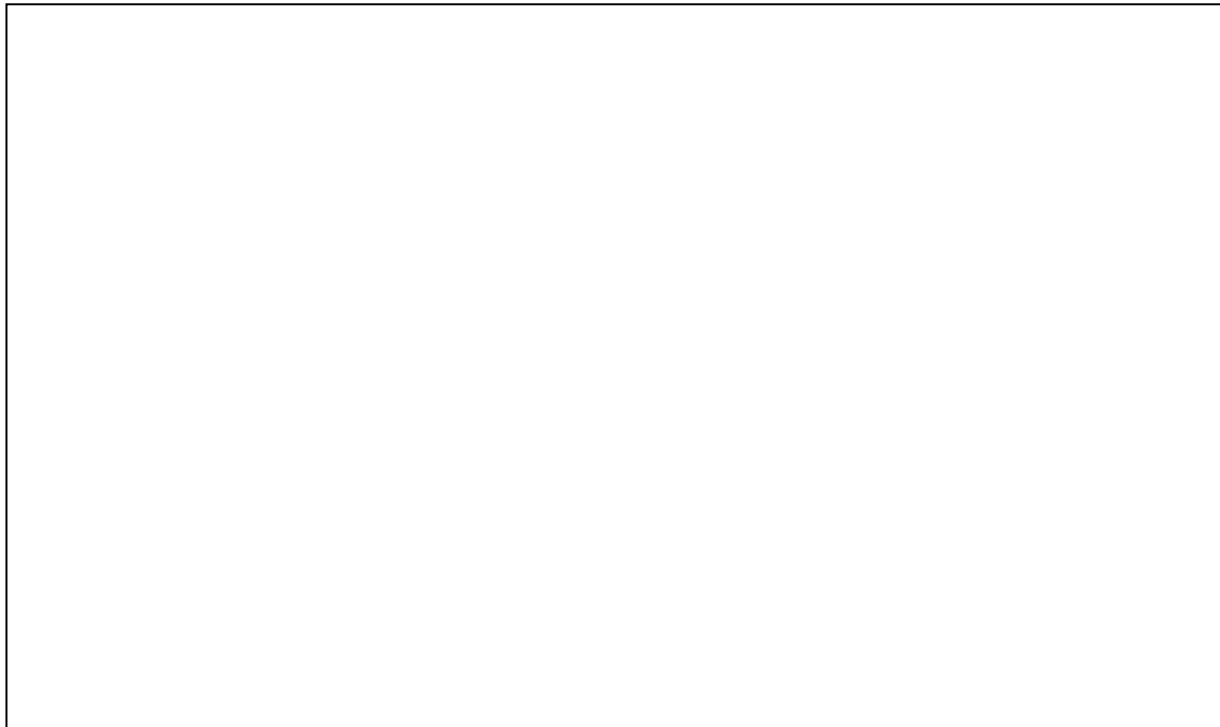
SOAゲートによるブロードキャスト・アンド・セレクト型 光スイッチ

N入力・N出力のN×Nスイッチ → N^2 個のSOAが必要



ハイブリッド集積4×4マトリクススイッチ

J. Sasaki, H. Hatakeyama, T. Tamanuki, S. Kitamura, M. Yamaguchi, N. Kitamura, T. Shimoda, M. Kitamura, T. Kato and M. Itoh (NEC), Electron. Lett., Vol.34, No.10, pp.986-987 (1998).

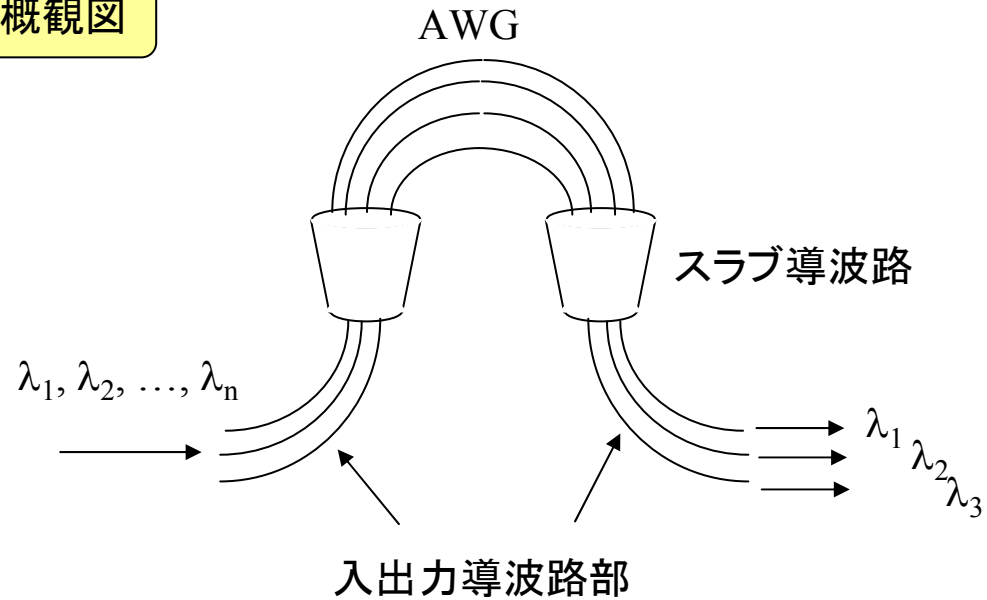


光ファイバー光ファイバ間挿入損失: 11 ± 2 dB
クロストーク: 40 dB以上
偏波依存性: 0.5 dB以下

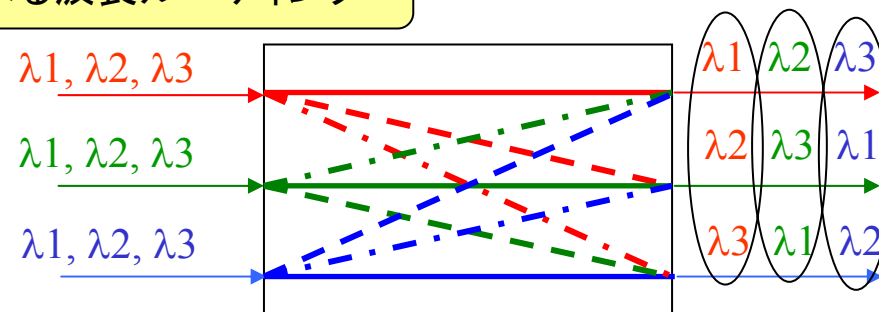


N × N AWGによる波長ルーティング

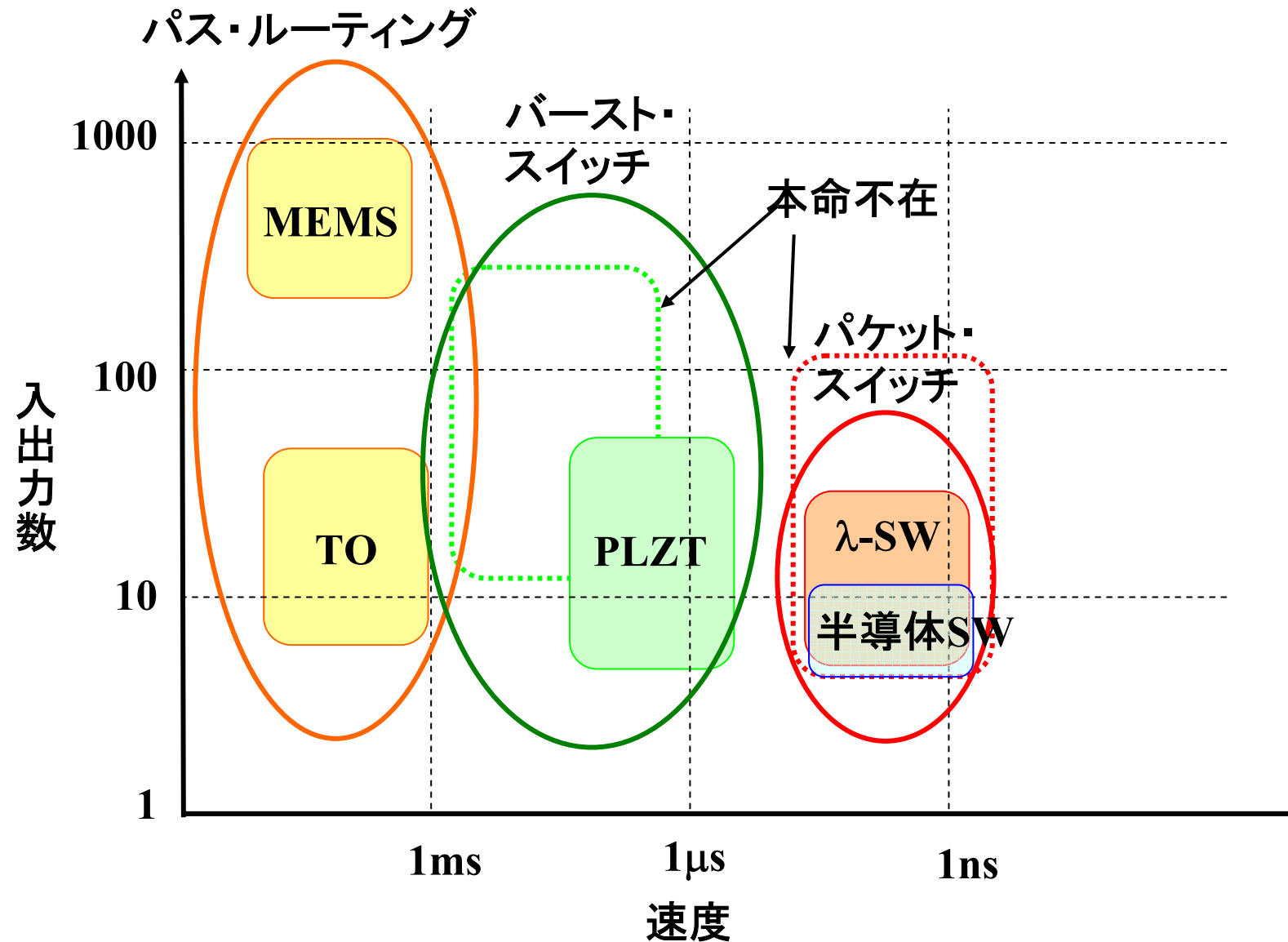
AWG概観図



AWGによる波長ルーティング



各種光スイッチの適応領域



(1) 規模とスイッチ数

$N \times N$ マトリクススイッチではスイッチ規模に対して
 2×2 スイッチ数が N^2 で増加

(2) 素子サイズ

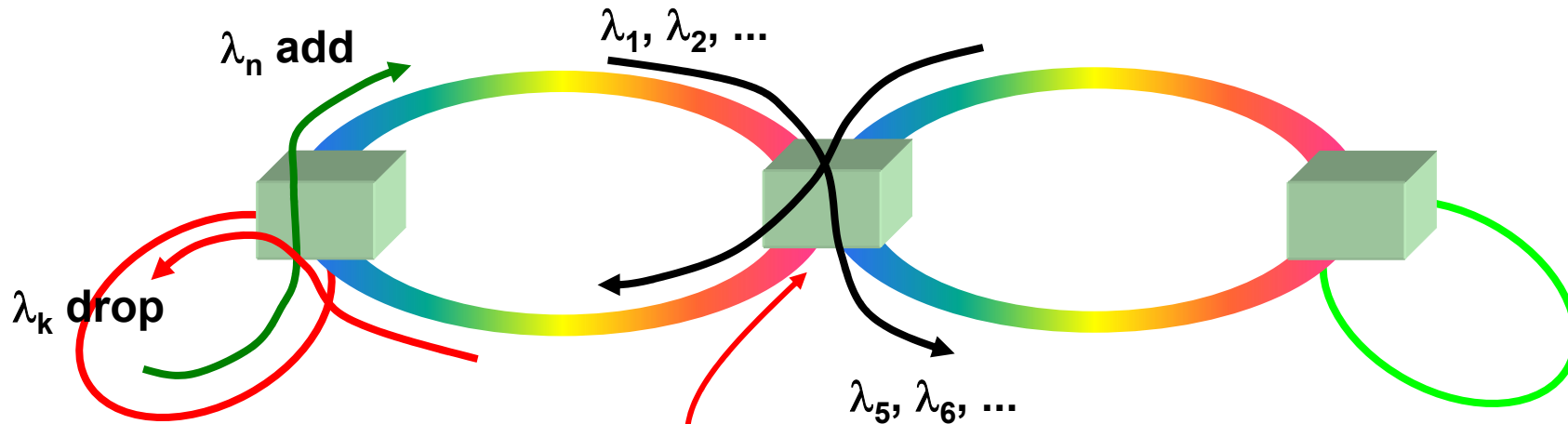
- ・曲率半径による制約
- ・屈折率差／吸収差を大きくするため導波路長増大

ROADMと波長選択スイッチ

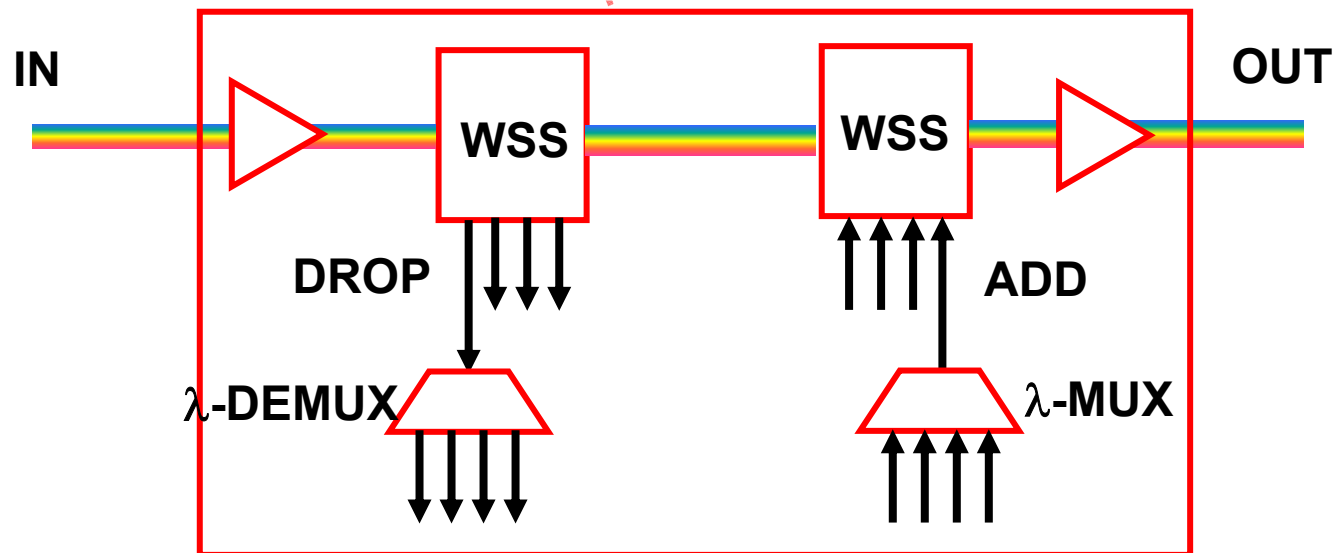
参考文献: 尾中(富士通), NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

リングネットワークに用いられるROADM

Interconnected Ring Network Topology



ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer



※ WSS : Wavelength Selective Switch

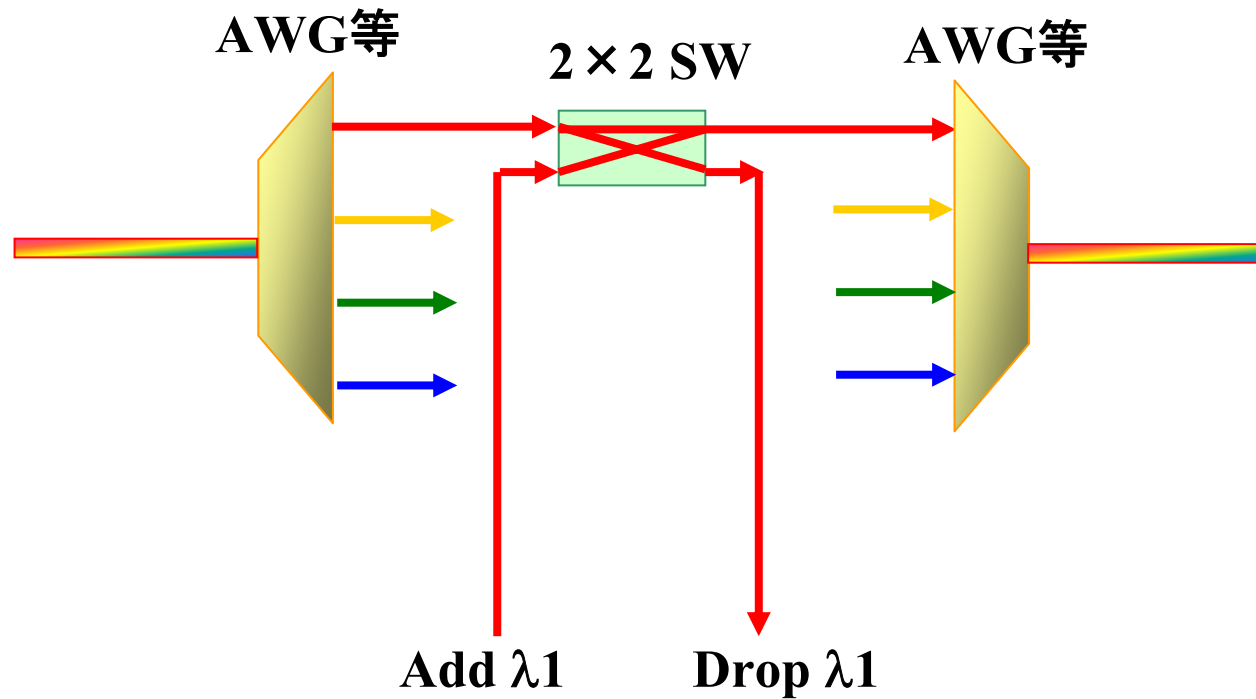
- ネットワーク構築／再構築の自動化（OPEX削減・網構築期間短縮）
- 機器間ファイバコード接続数の削減
- 再生中継無しでのマルチリング接続や多方向波長経路切替
- 円滑なマイグレーションの実現

ROADMノードに求められる機能

- 16ノード以上の多段接続
- Drop & Continue (Multi or Broadcast) 機能
- ROADMからPXC(HUB)へのインサービス拡張性
- 任意ノード間の伝送特性確保
- 任意の波長配置を許容
- 1波 $\longleftrightarrow$ 最大波長間の波長数急変耐力
- プラグ & プレイ操作
- 40G Ready
- ネットワーク設計の簡素化

Reconfigurable OADM (ROADM) (第1世代)

固定波長選択



特徴

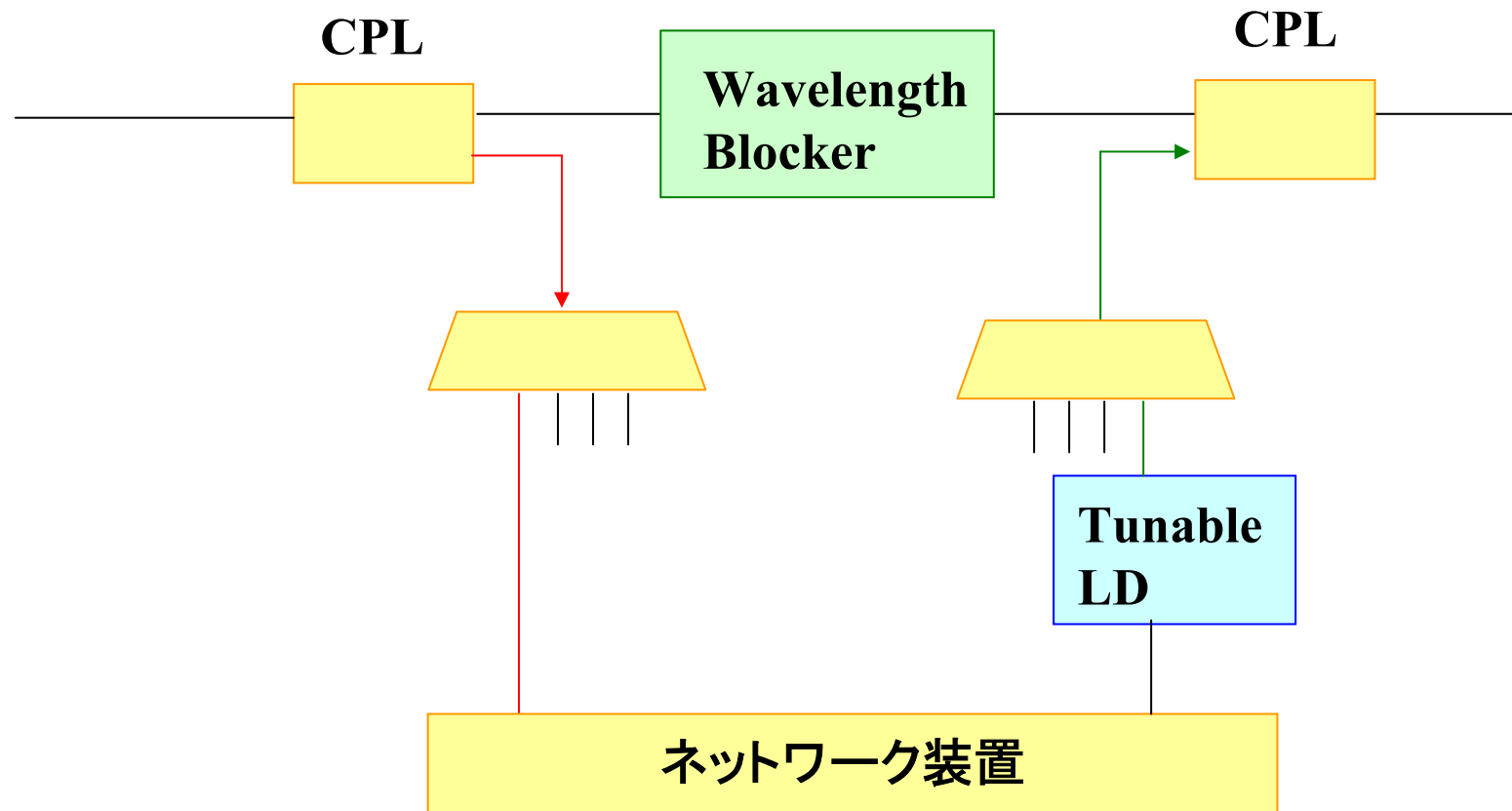
- ・自動調整
- ・規模の拡張性

デメリット

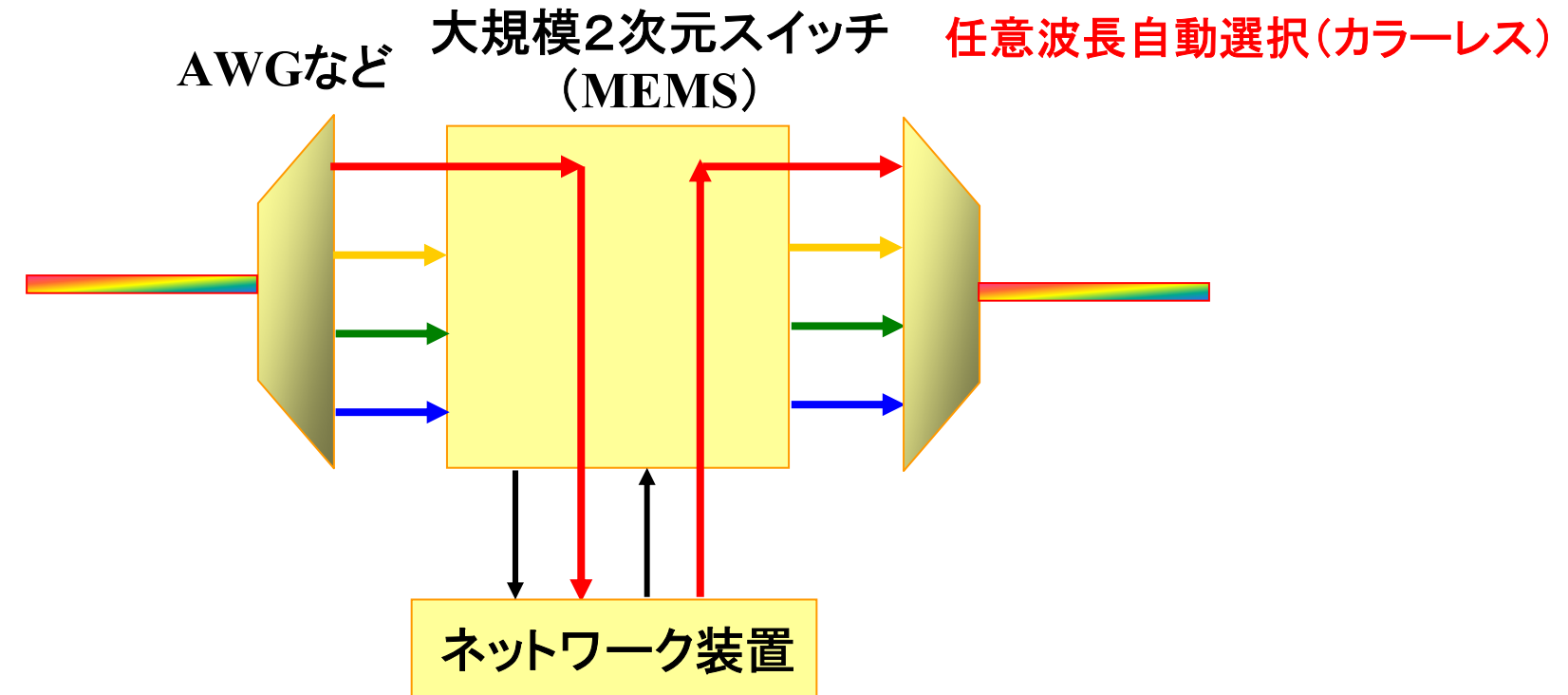
- ・初期コスト代大
- ・損失大

Reconfigurable OADM (ROADM) (Broadcast & Select type) (第2世代)

固定波長選択／任意波長挿入



Reconfigurable OADM (ROADM) (3次元MEMS型)(第3世代)



特徴

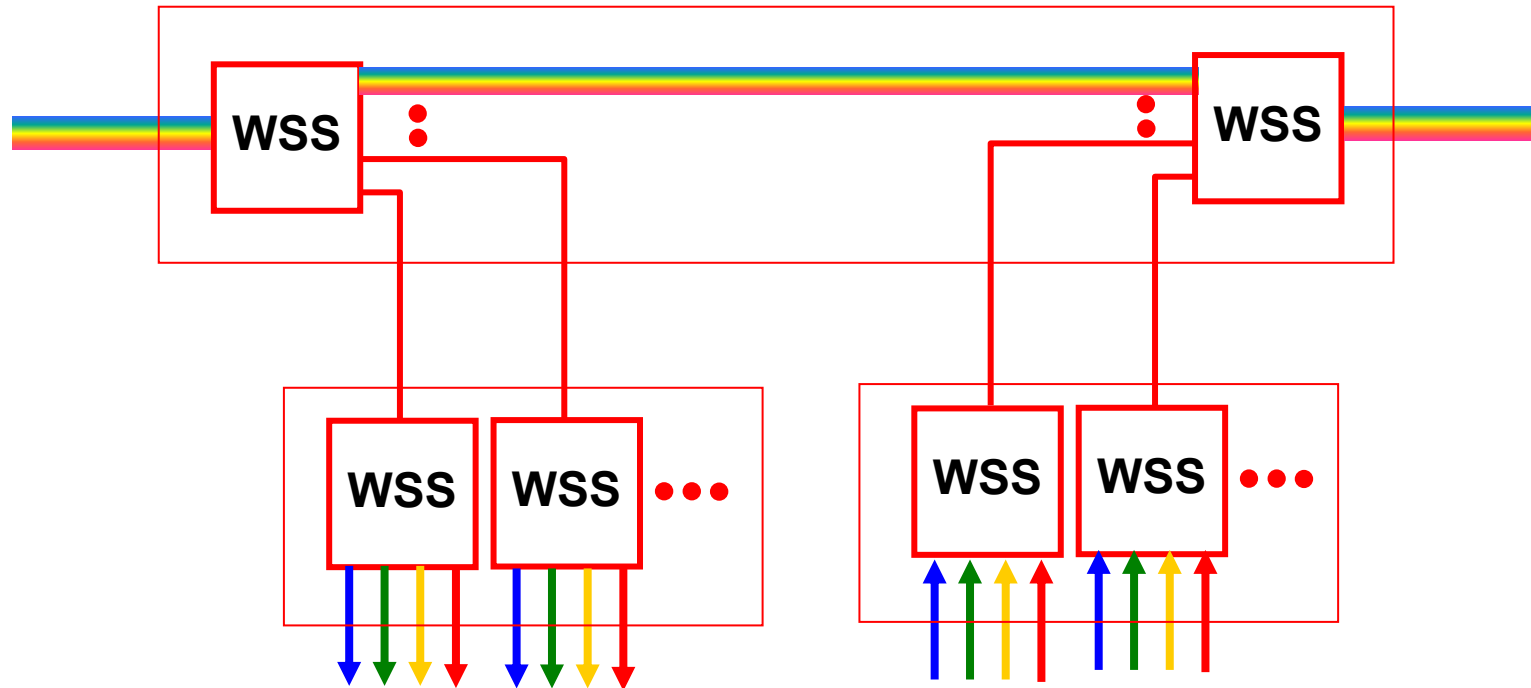
- ・任意のポート間の挿抜が可能
- ・拡張性

デメリット

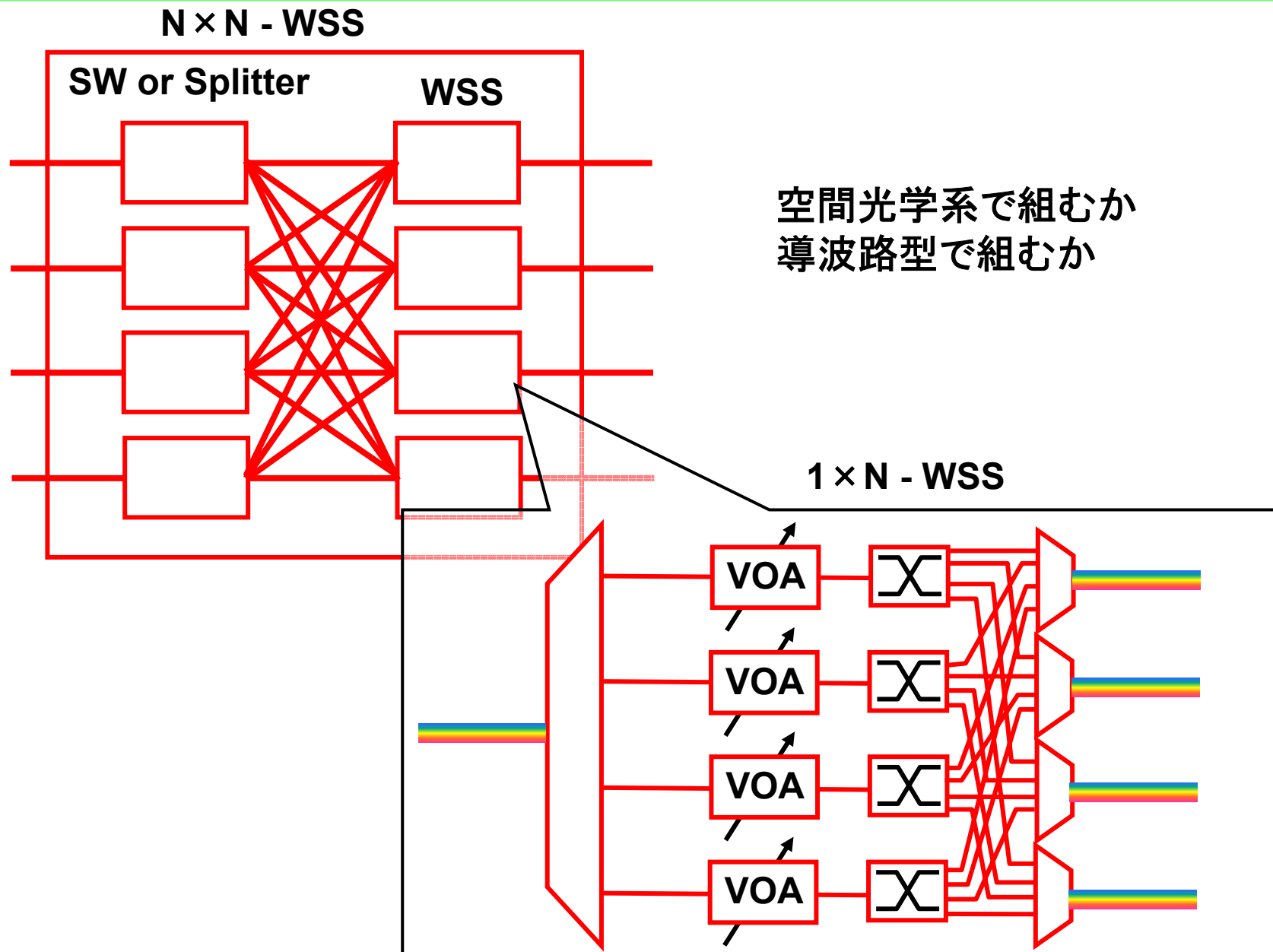
- ・損失大
- ・波長管理が複雑

Reconfigurable OADM (ROADM) (波長選択スイッチ型)(第3世代)

任意波長自動選択(カラーレス)

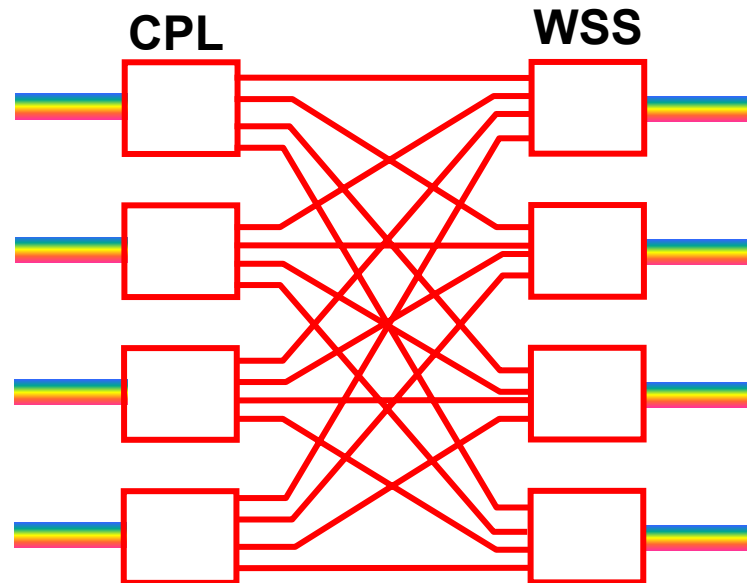


WSSの構成



WSSを用いたPXCの構成

光プラ+WSSタイプ



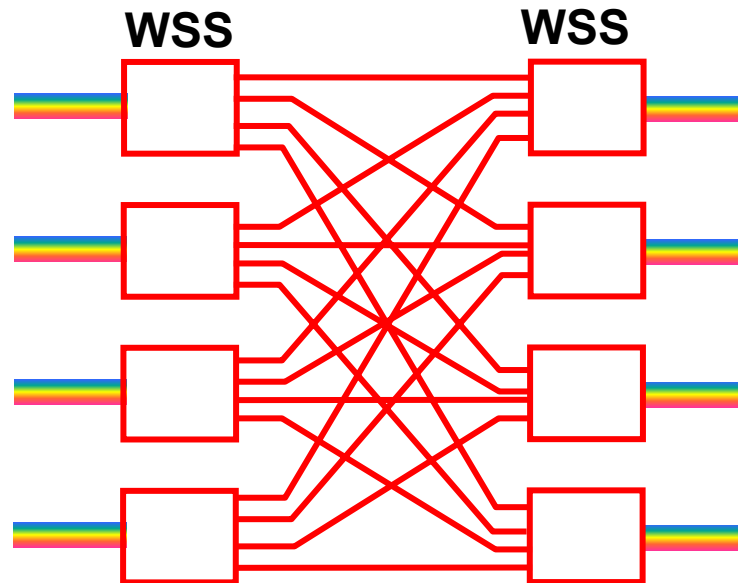
メリット

- 低価格
- Multi/Broadcast機能をサポート

デメリット

- ノード損失大
- クロストーク特性が劣化

フルWSSタイプ



メリット

- 低損失
- クロストーク抑圧が可能

デメリット

- Broadcast/Multi機能の実現できない
- 高コスト

- 任意波長の任意ポートへのスイッチング
- 小型・低損失
- 信号光パワー調整機能 (VOA機能)
- 高い拡張性
- 広帯域かつ平坦な通過帯域

① 導波路(PLC)型WSS利用

T. Goh, et al. (NTT), OTuF3

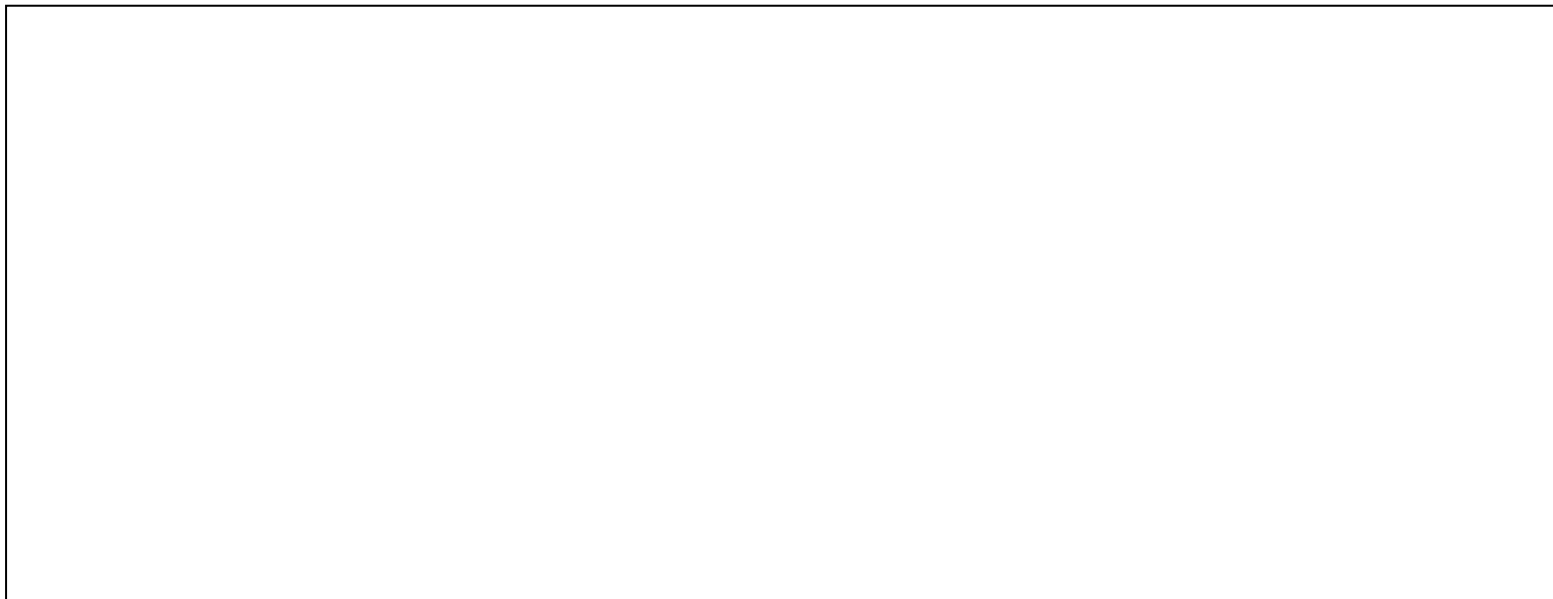
- 4方位ハブ構成(リングNWの相互接続対応)
- モニタPDやVOAの集積化が容易
- 100GHz ch 32波長×4 AWG集積



ROADMの実例(1-2)

① 導波路(PLC)型WSS利用

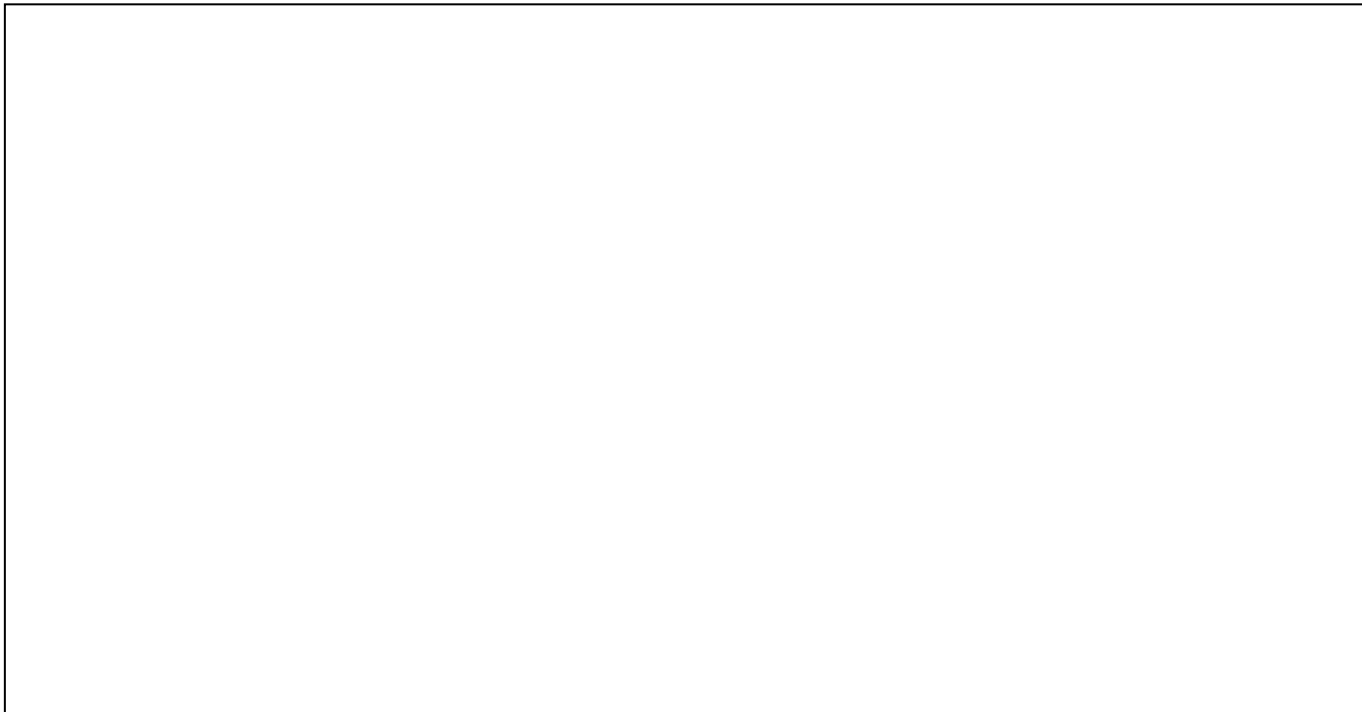
- $(32\lambda, 100\text{GHz ch-AWG}) \times 4 : 51.5 \times 56\text{mm}^2, \Delta=1.5\%$
- $(4 \times 1 \text{ SW, VOA, WINC tap}) \times 32\lambda : 70.5 \times 27\text{mm}^2$
291 MZI, 80mW/MZI, 5.3W total
- モジュール: $220 \times 135 \times 14\text{mm}^3$
- 挿入損失: 10.8dB (express path)



② 液晶型WSS

G. Baxter, et al. (Engana), OTuF2.

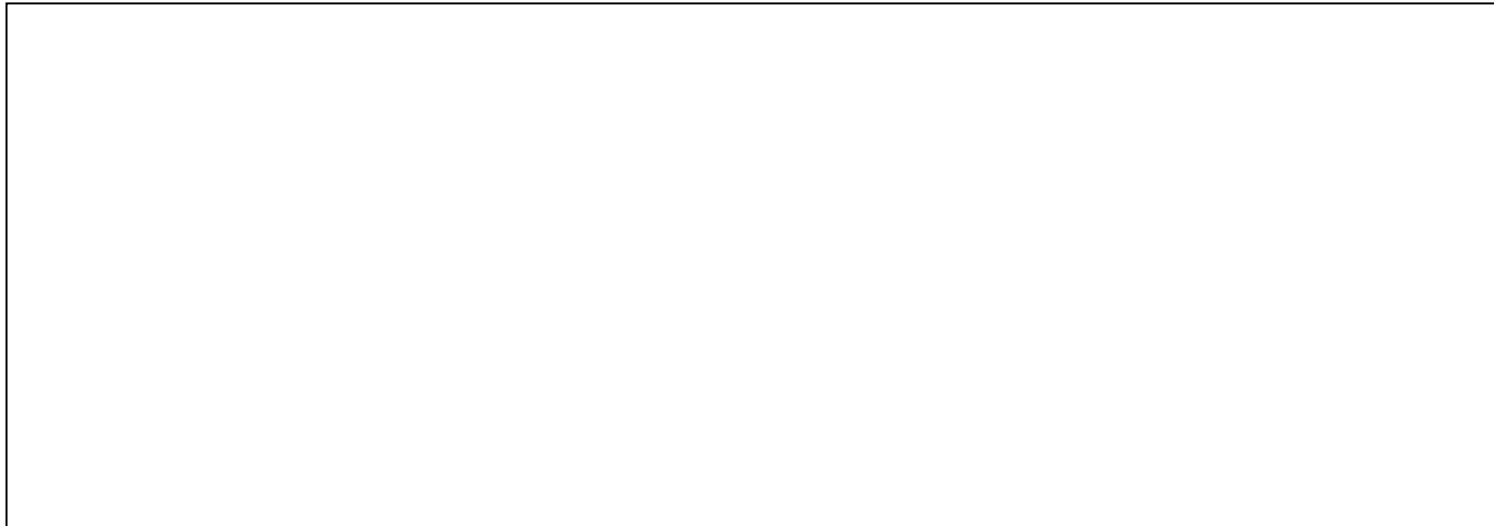
- LCOS (Liquid Crystal on Silicon)による高精度な波面制御
- 民生技術による低コスト化



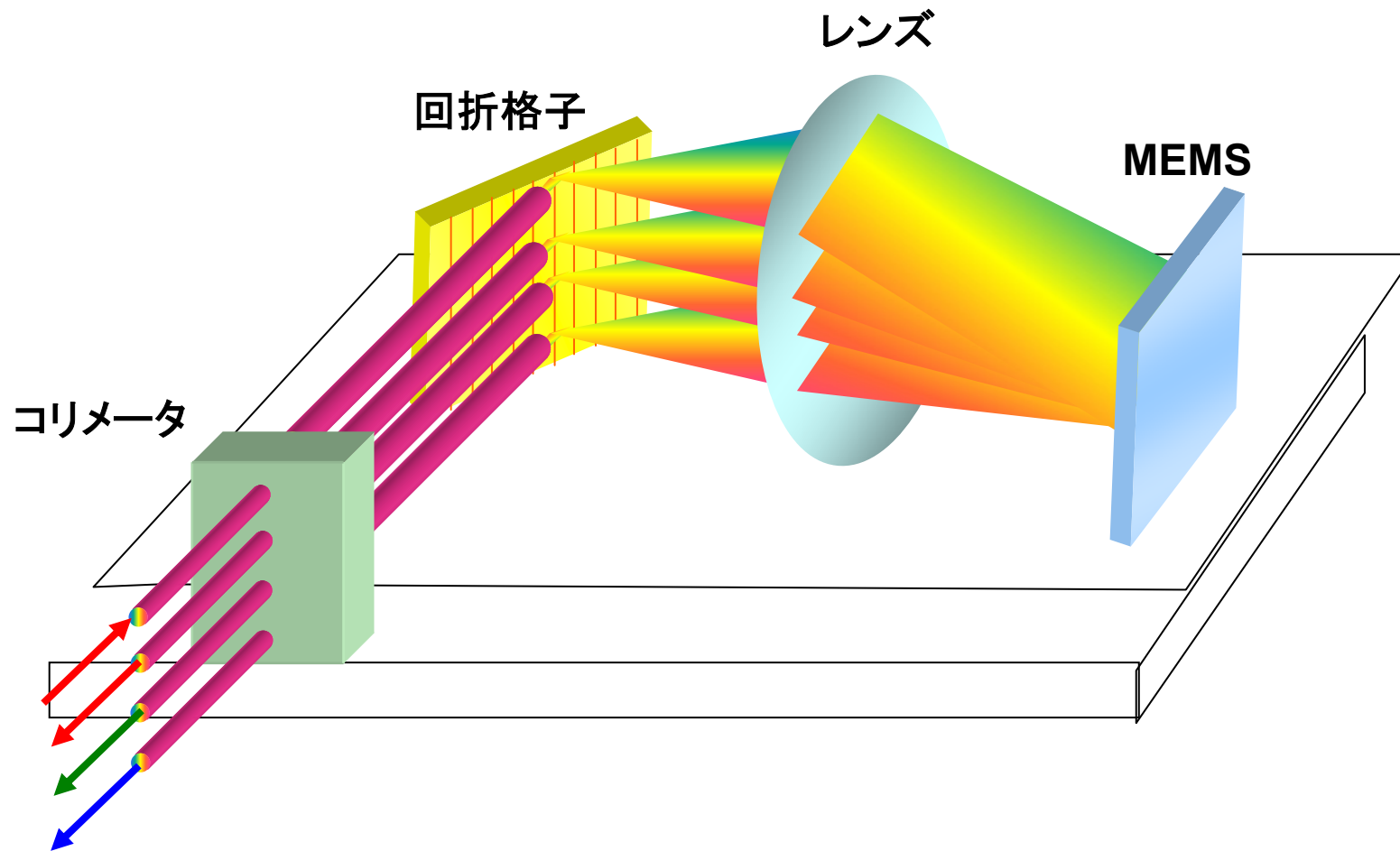
② 液晶型WSS

- 解像度: WUXGAまでがLCOSにて可能
- ソフト制御でフィルタ特性可変
50GHz/100GHz Chの切替

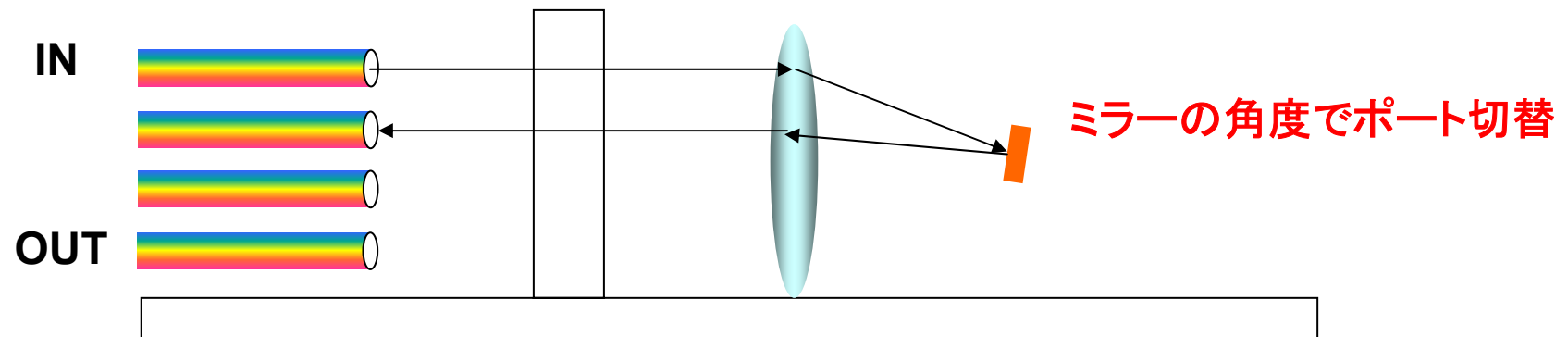
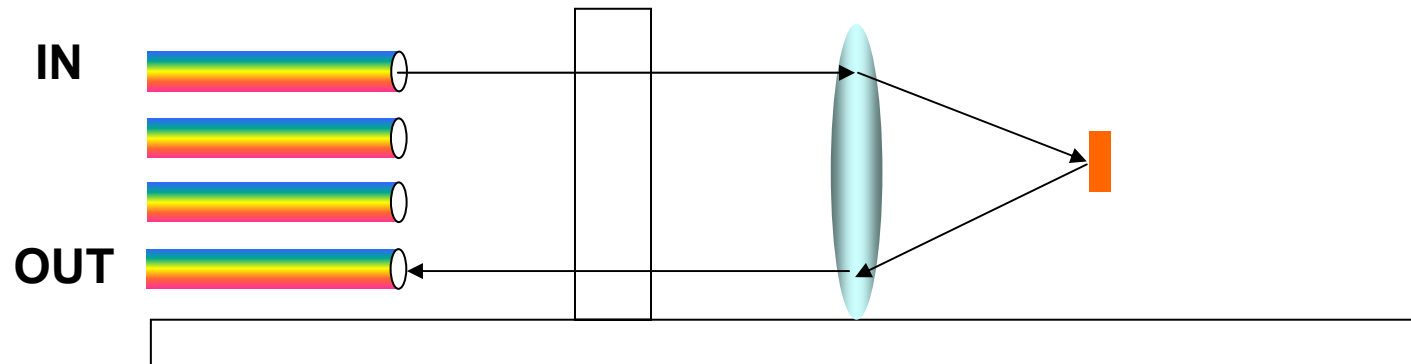
G. Baxter, et al. (Engana), OTuF2.



③ MEMS型WSS



③ MEMS型WSS



③ MEMS型WSS

C.-H. Chi et al.(UC Berkeley), OTuF1.

- Fiber-to-Fiber 損失=24dB
- Xtalk < -25dB
- 1460 – 1580nm
- 速度=0.5ms

