

第5回光・電子集積技術業績賞(林賞)受賞記念講演

シリコンLSIにおける  
光インターコネクション技術  
に関する先駆的研究

2008年3月27日

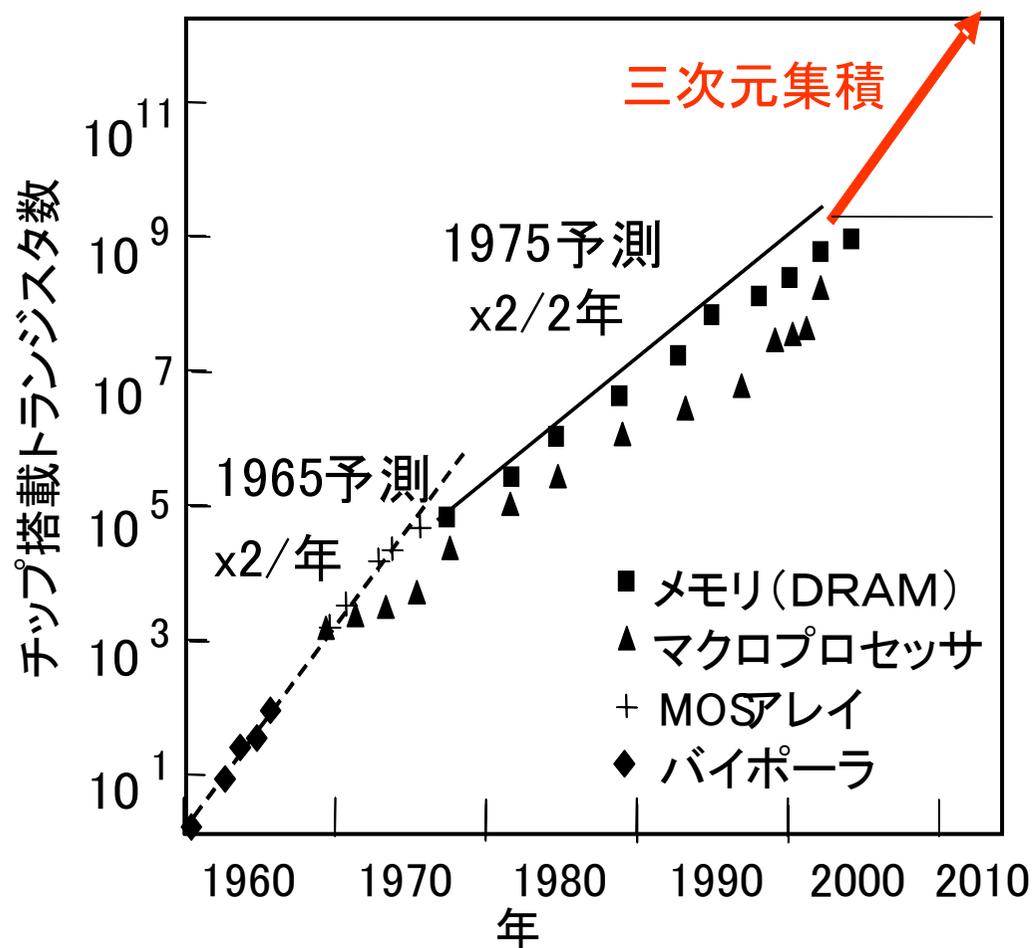
岩田 穆 (広島大学)

# 講演内容

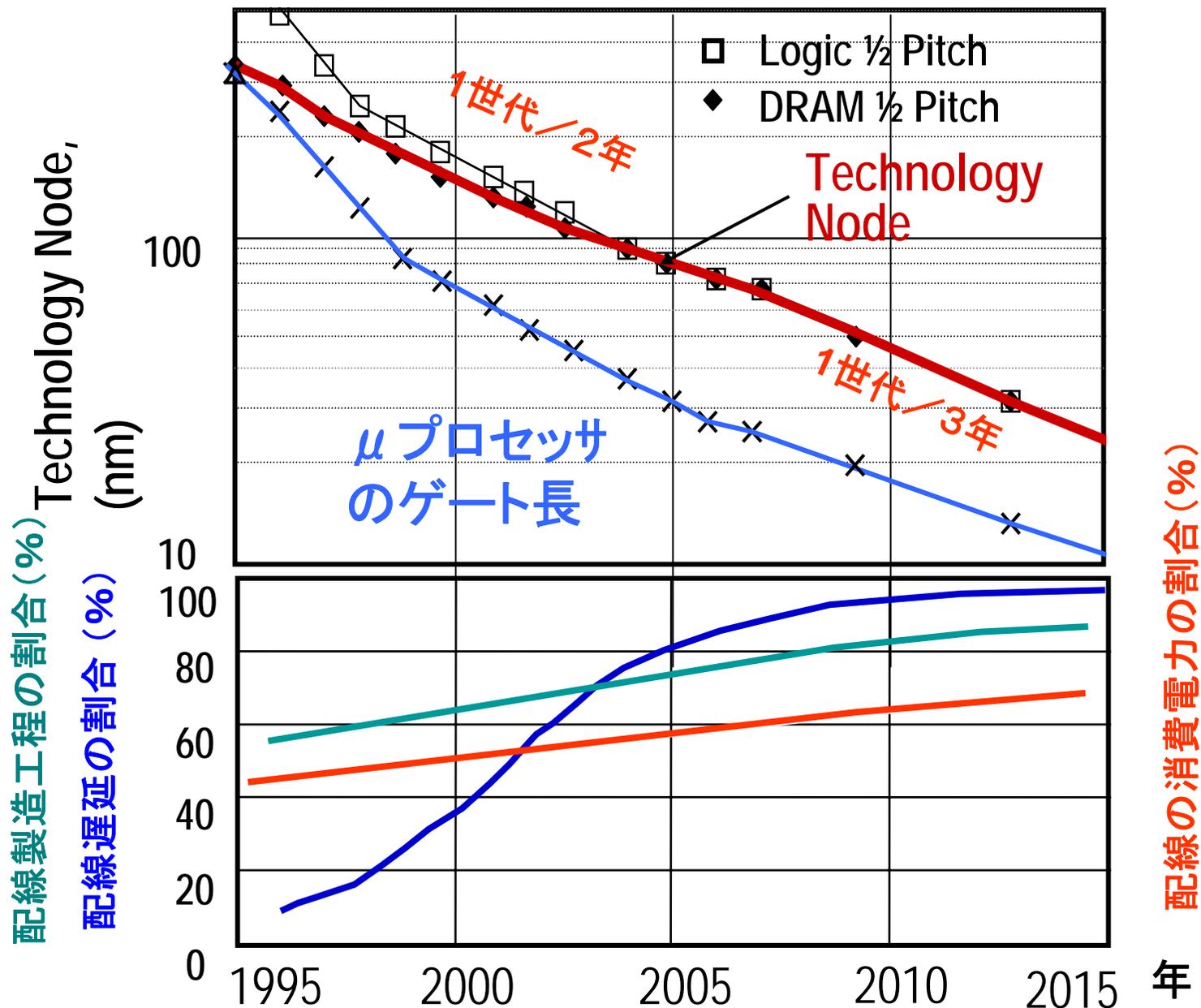
1. VLSI配線の重要性と三次元集積
2. 光の特徴と光電融合集積(UOEIC)
3. 配線の遅延時間と消費電力の比較
4. 光向きのシステム・回路
5. シリコンフォトリック素子の進歩
6. 競合するインタコネクタ技術と複合化
7. むすび

# 三次元集積技術の必要性

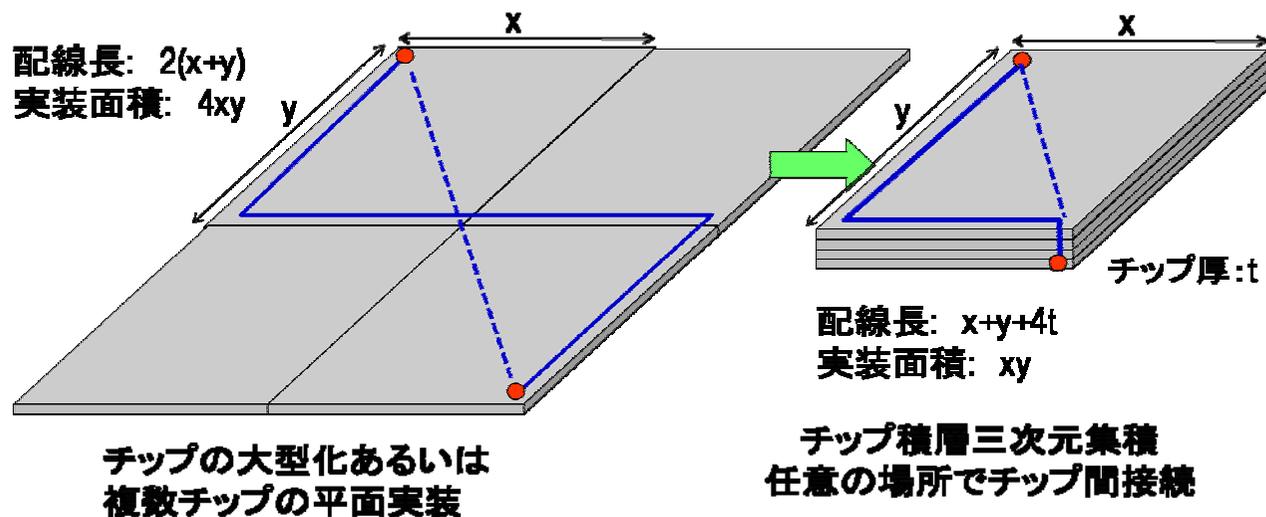
- ・ムーアの法則は集積規模の進展を予測
- ・微細化のみによらない三次元集積技術



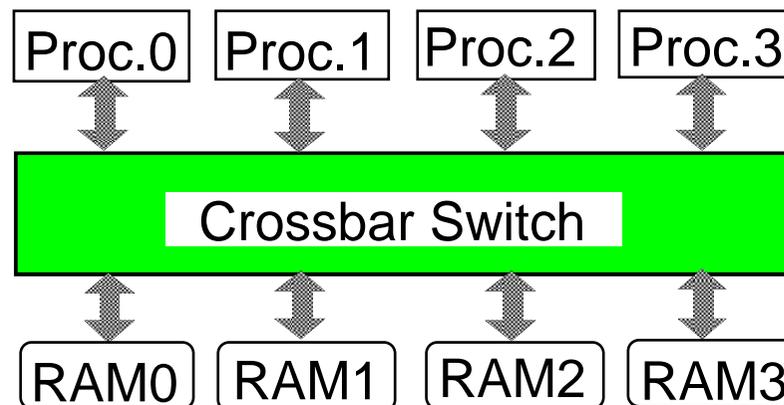
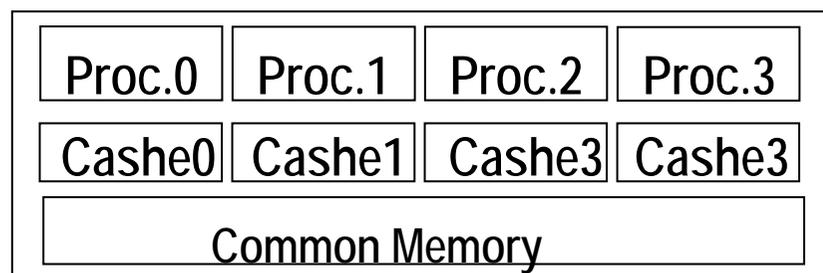
# デバイス微細化と配線重要度の増大



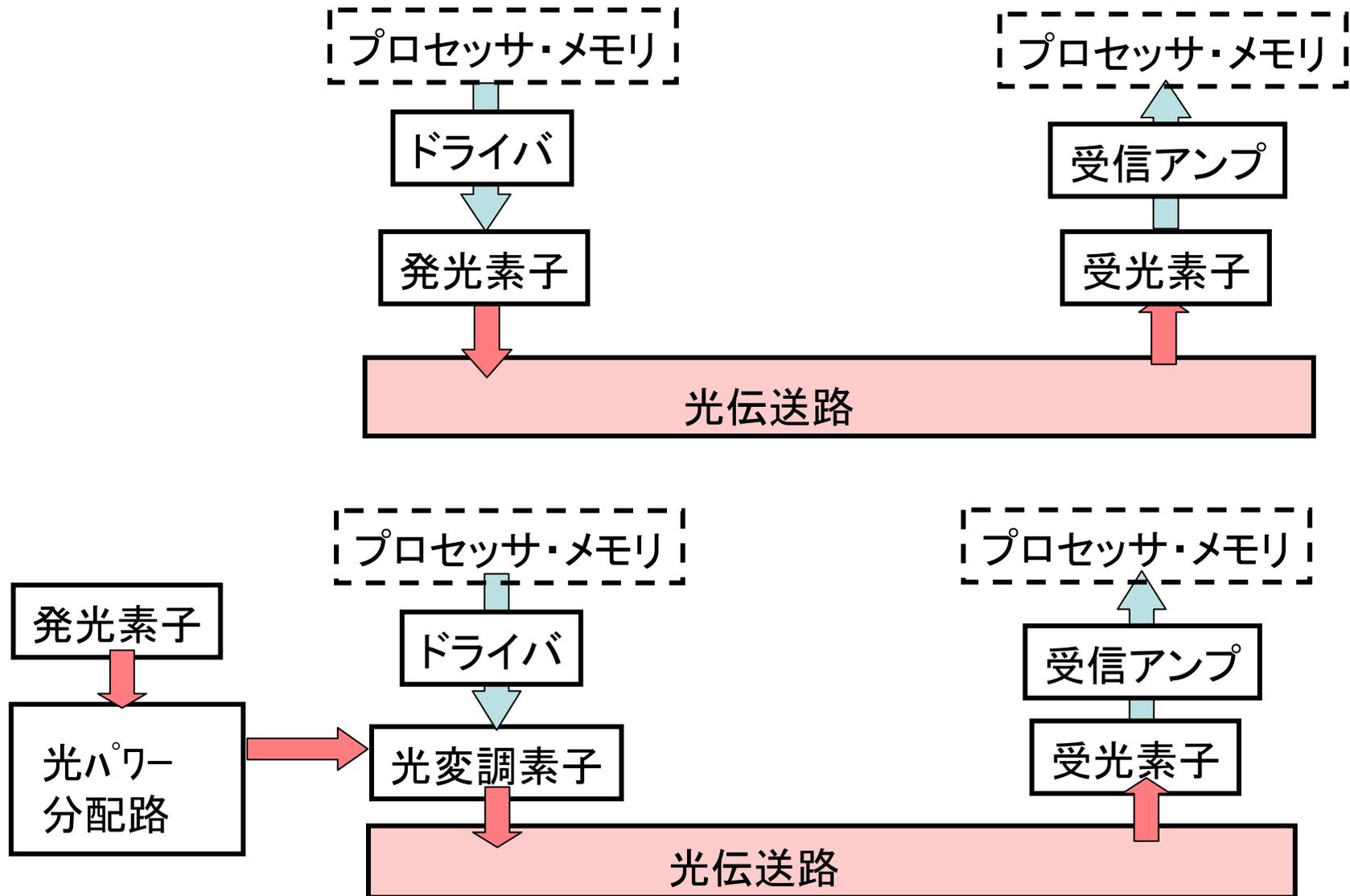
# 三次元集積の効果



## マルチコアプロセッサのメモリ間情報通信



# 光インタコネクションの基本構成



# 光の優秀性 林氏のまとめ

## 光接続と電気接続の情報伝送の比較

### RC線路

- ・Cの充電が必要のため遅い
- ・電荷伝送効率  $C_{\text{det}} / C_{\text{wire}} + C_{\text{det}} \sim 1/100$

### 伝送線路, 光導波路

- ・伝搬速度は電気と光で同じで速い  $C/n$
- ・電気・電波 インピーダンス不整合により反射  
送信器 > 伝送線路, 伝送媒体 > 受信器

### 光インタコネク

- ・インピーダンス不整合の問題がない
- ・電氣的に非接触 三次元集積, 超並列
- ・波長多重が可能

# 光の優秀性 林氏のまとめ

## 半導体Laser の小型化

多層膜高反射ミラー

低しきい値電流化

$\mu$ キャビティで発光効率向上

## Photo Detector の小型化 $C = 10^{-14}F$

光電変換 光子 > 電子ホール対 > FETのゲート電圧

光子数／パルス:  $10^4$

光エネルギー  $1.6 \times 10^{-19} \times 10^4 = 1.6 \times 10^{-15} J = 1.6 \text{ fJ}$

パルスレート 10G/s 光Power  $1.6 \times 10^{-5} W = 16 \mu W$

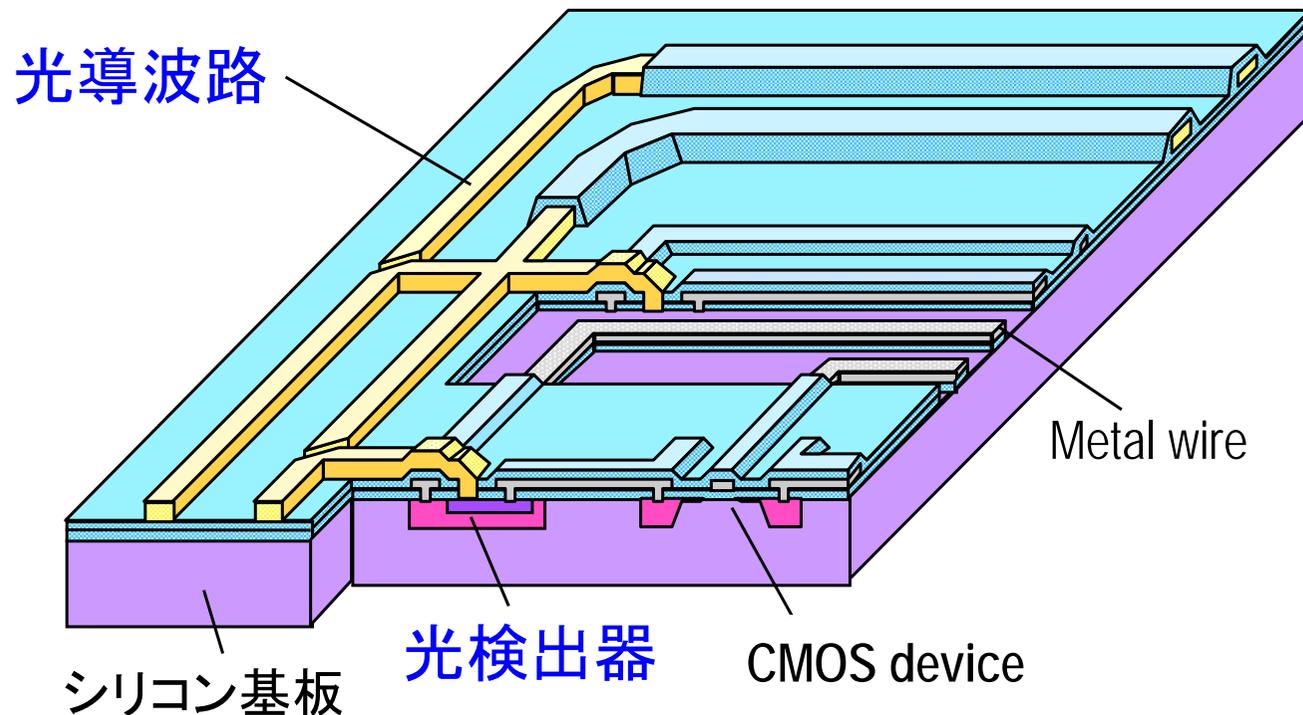
受信電圧  $Q / C = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^4 / 10^{-14} = 0.16 V$

雑音による誤り率の考慮が必要

# 光電融合LSI: UOEIC

## Ultra Optoelectronic Integrated Circuit

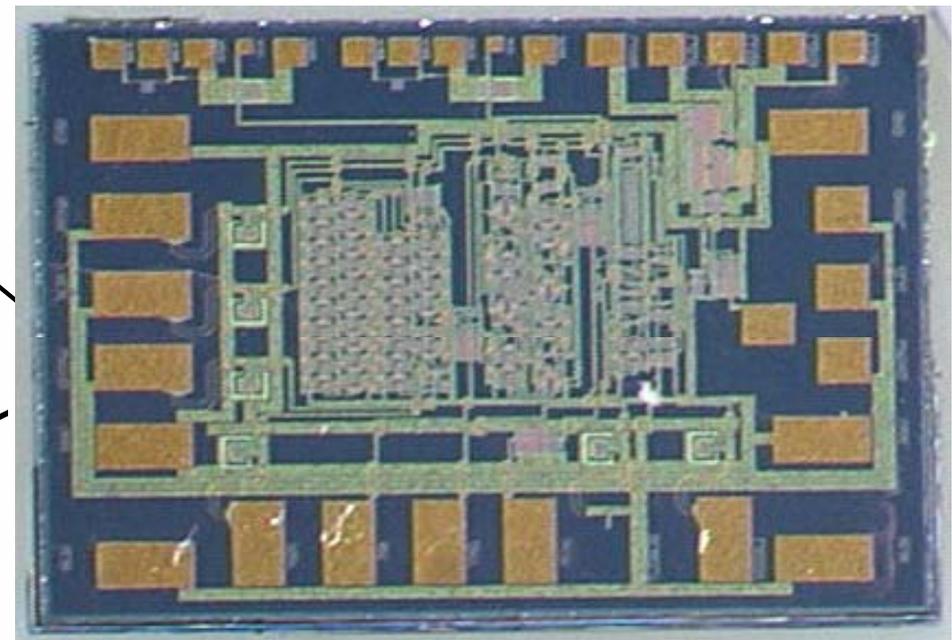
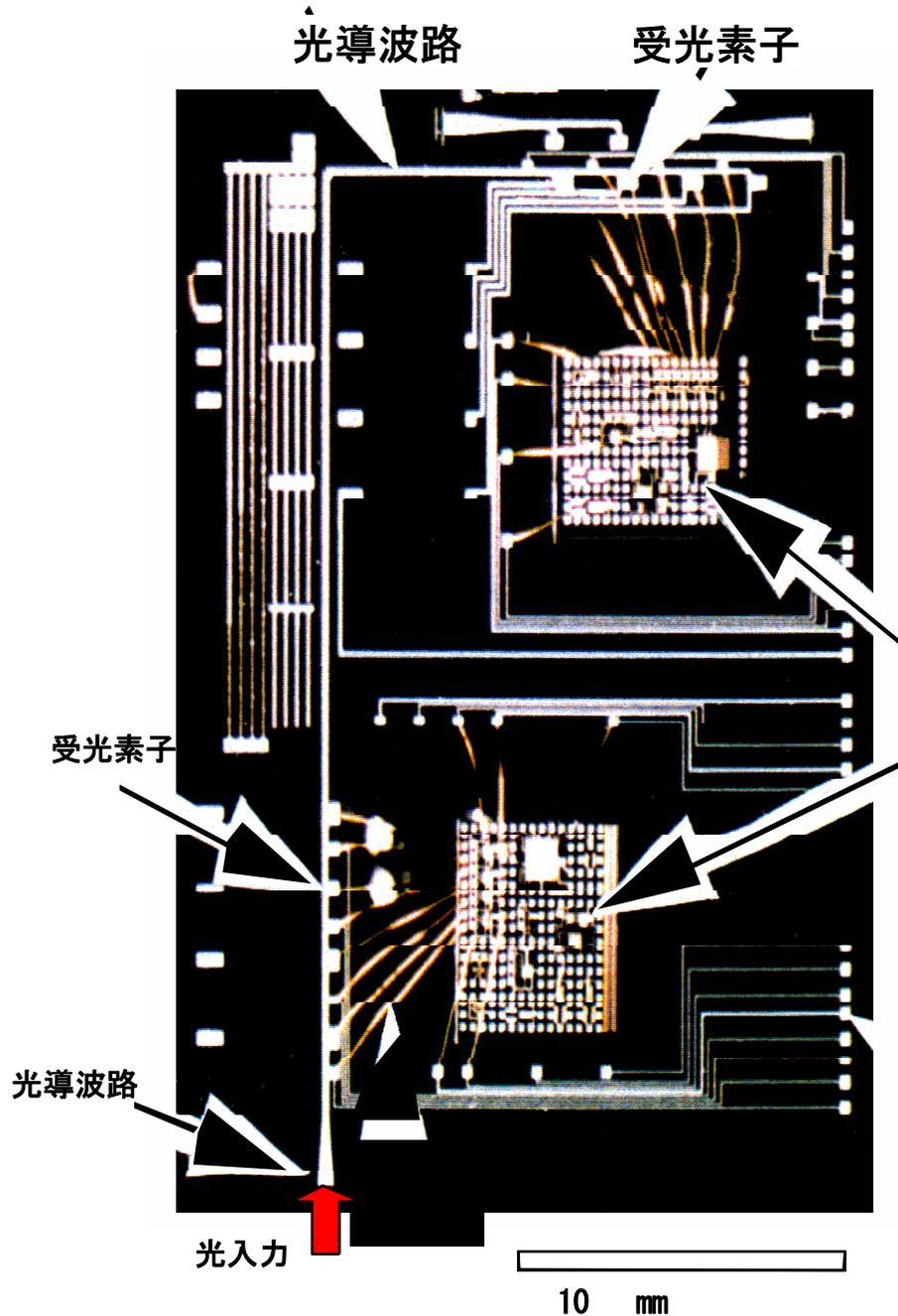
情報転送は光, 演算・記憶は電子 (CMOS)



# 光電融合集積 プロトタイプ (1995)

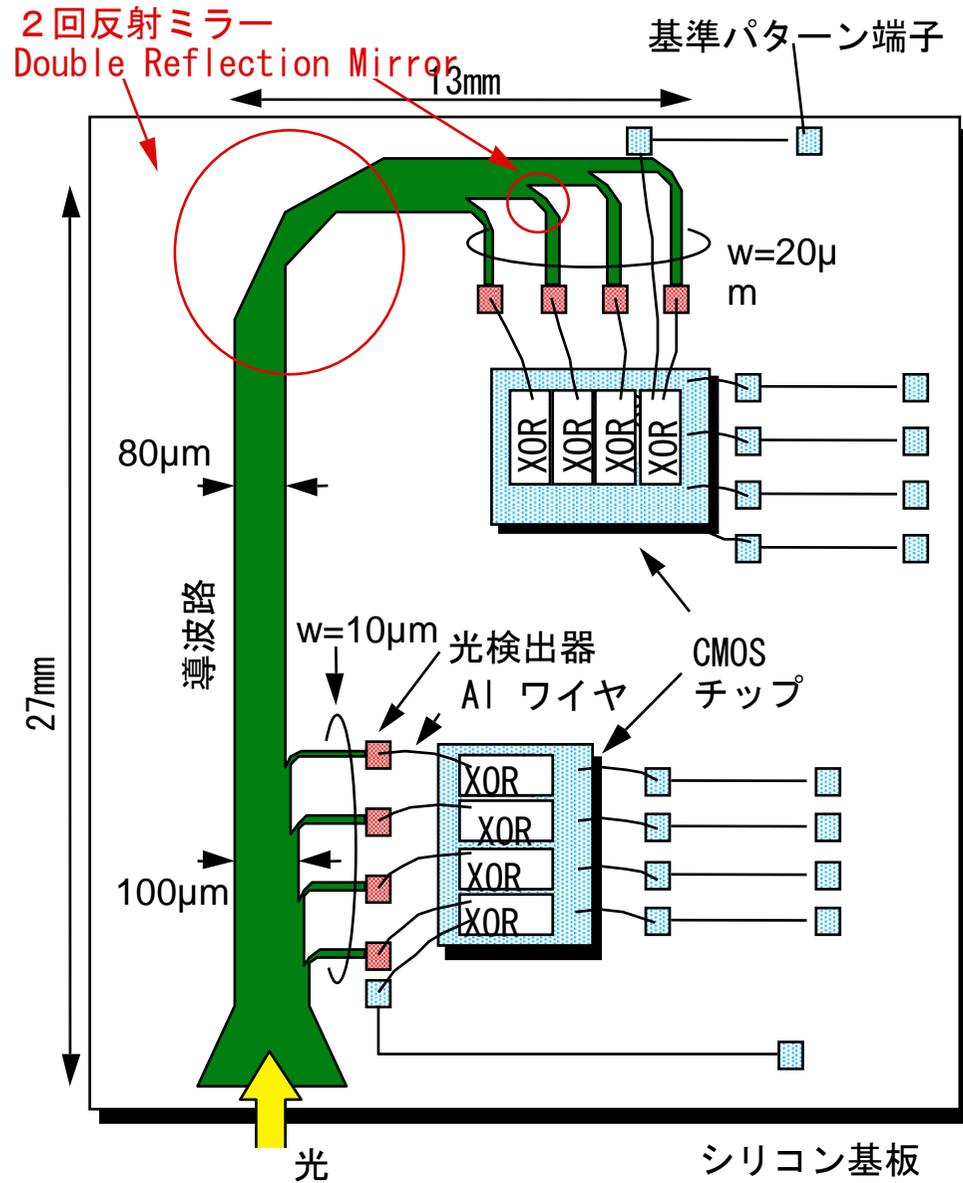
距離演算、最小距離検出回路

2 $\mu$ m CMOS

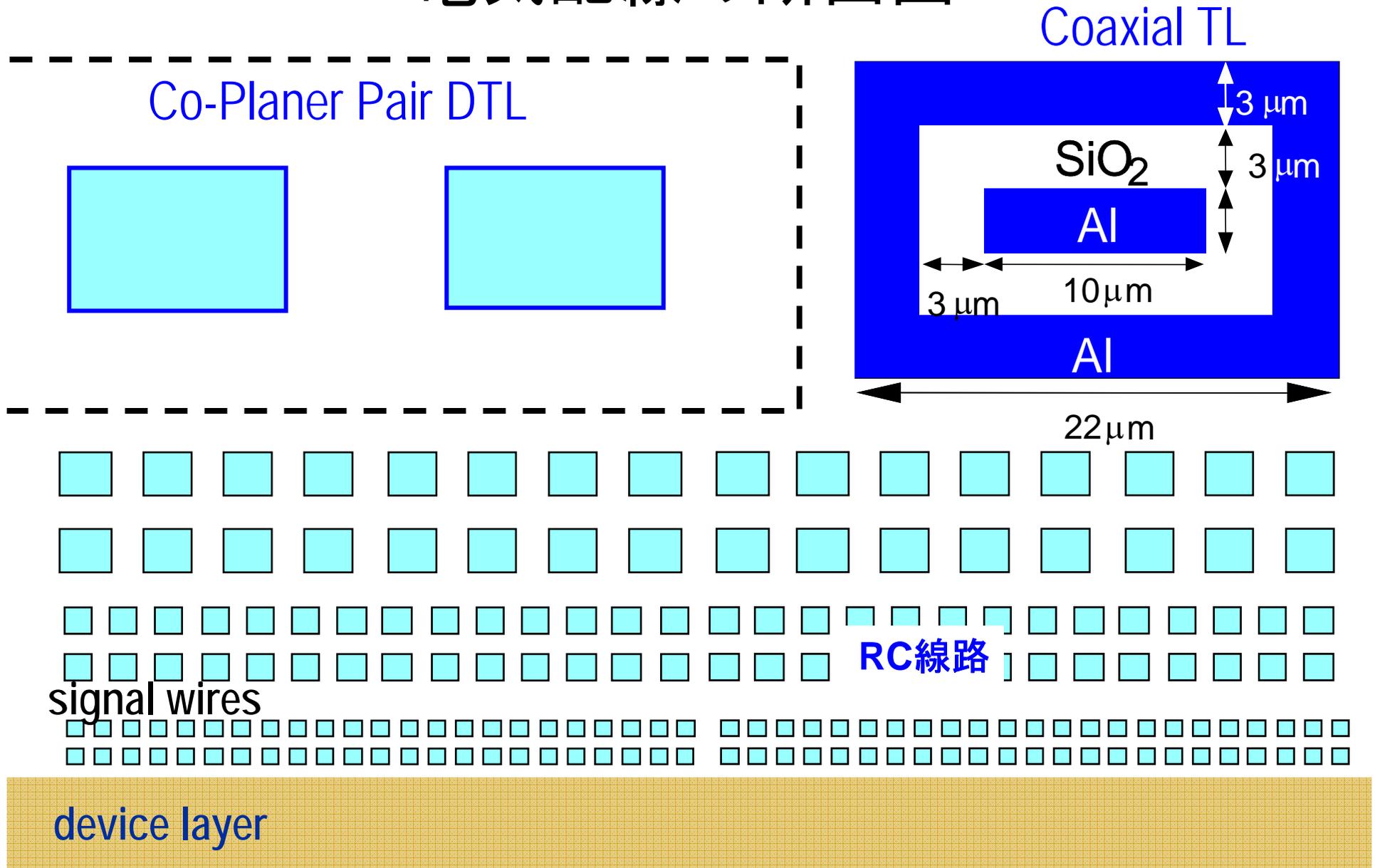


T. Doi, T. Namba, A. Uehara, M. Nagata, S. Miyazaki, K. Shibahara, S. Yokoyama, A. Iwata, T. Ae and M. Hirose: Ext. Abst. 1995 Intern. Conf. on Solid State Devices and Materials, p. 1075.

# 光電融合集積プロトタイプ



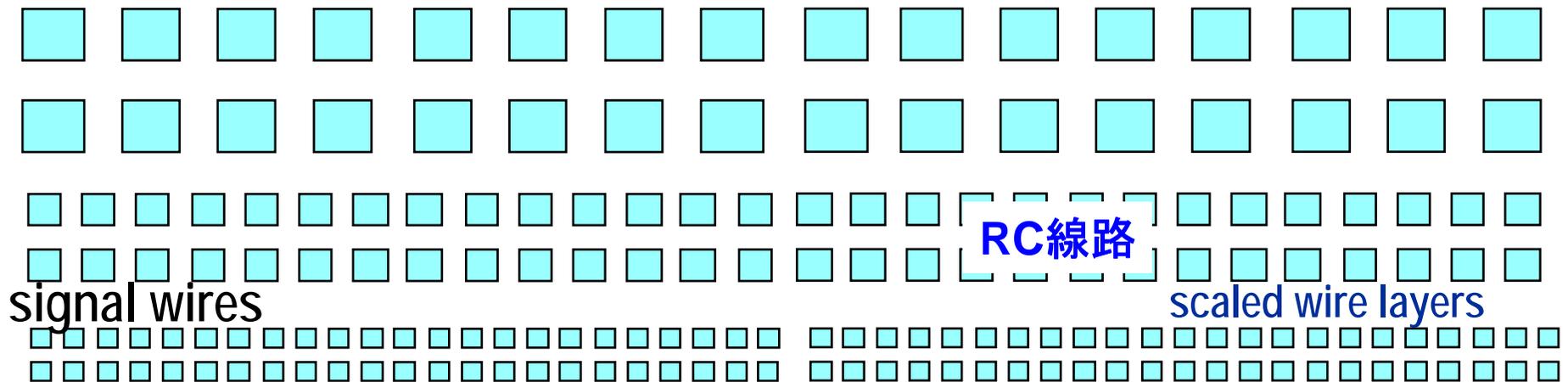
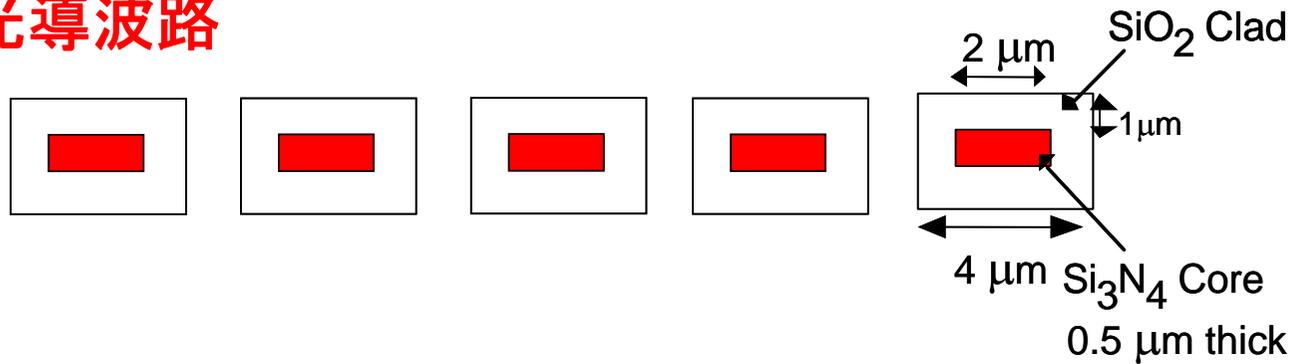
# 電気配線の断面図



# 光電融合配線の断面図

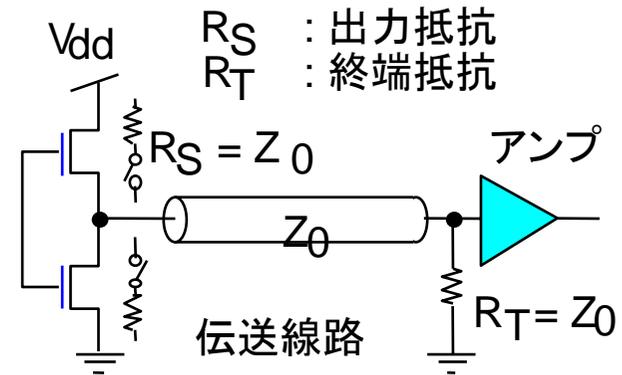
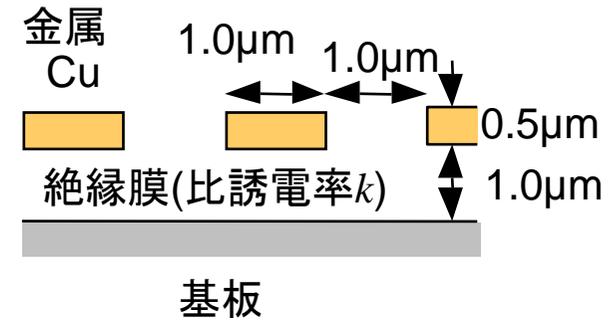
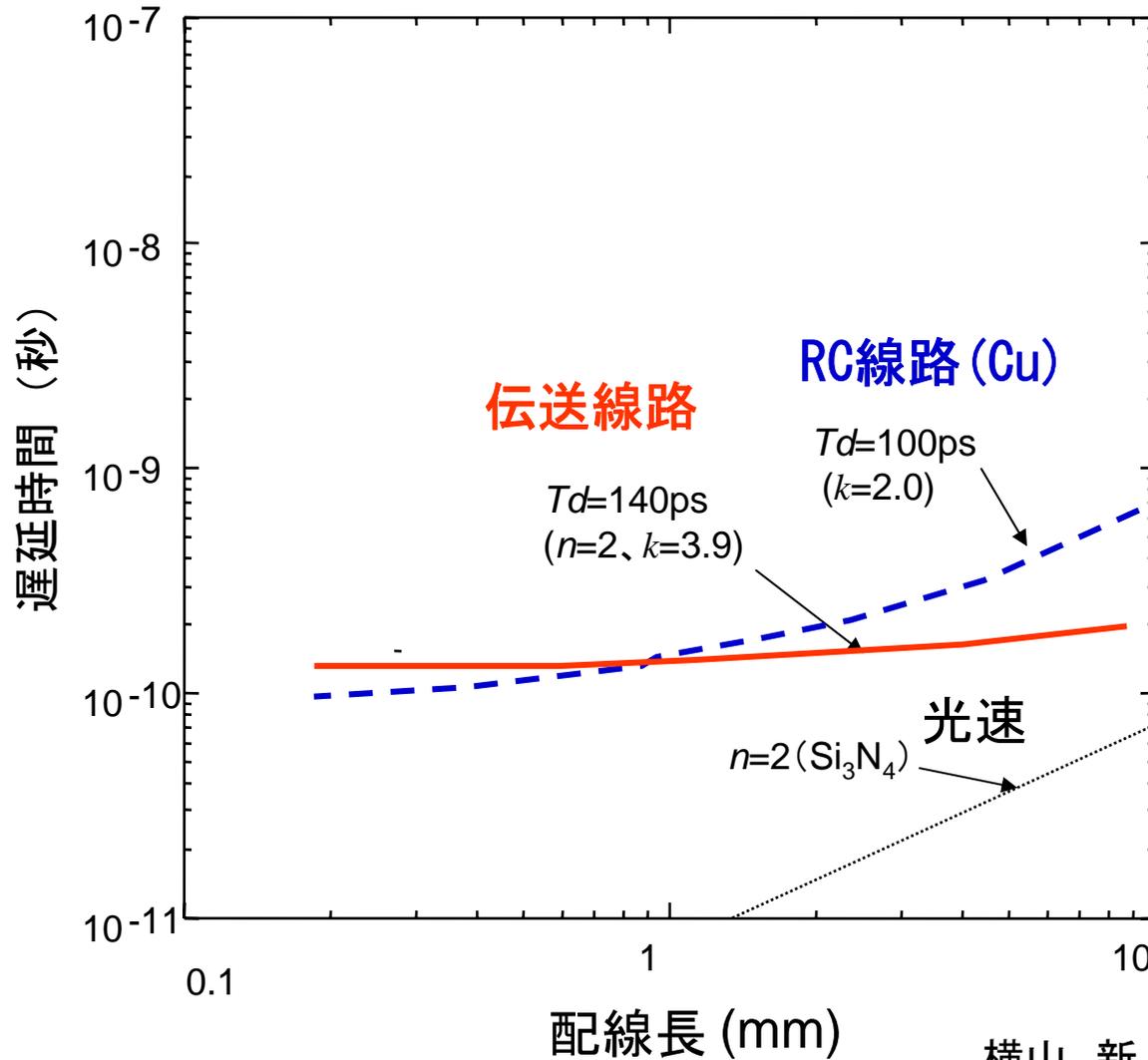
エネルギーを狭い領域に閉じこめることができる

## 集積化光導波路



device layer

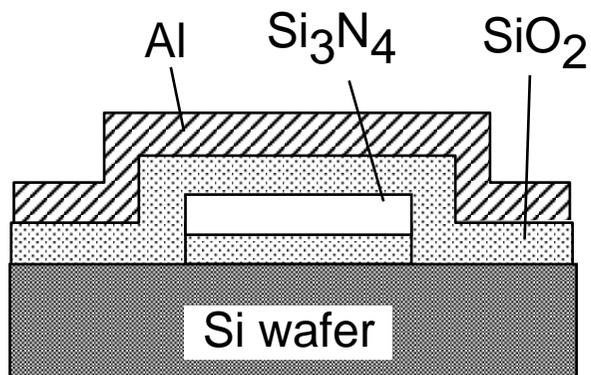
# RC線路と伝送線路の遅延時間の比較



横山 新, LSIにおける光配線技術, 応用物理、第76巻、第11号、p.1238-1245, 2007.

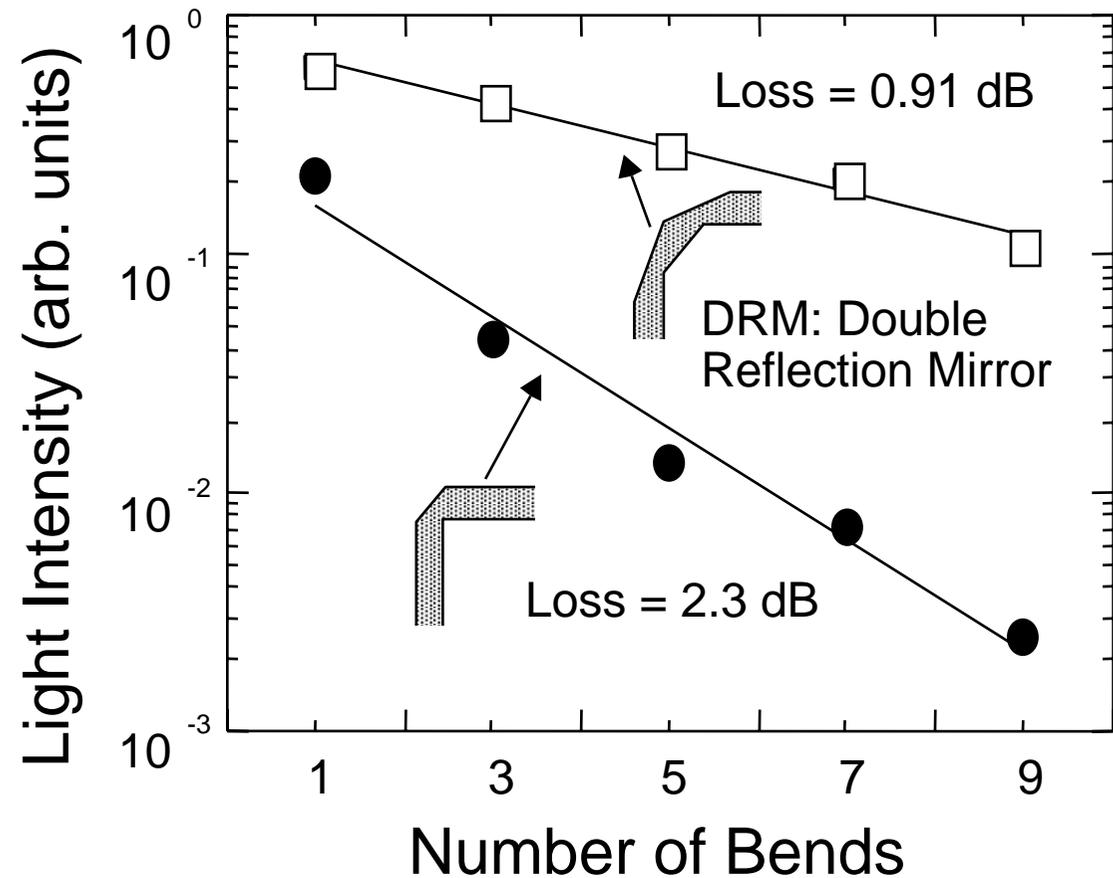
# シリコン導波路

Cross section

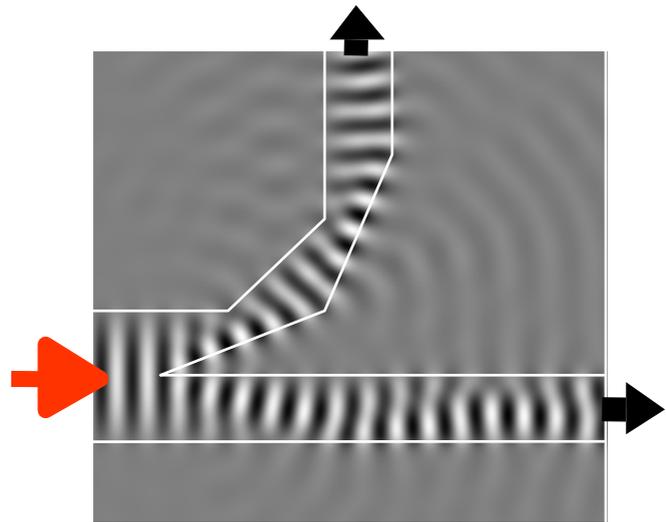


Measured Loss  
= 0.6 dB/cm

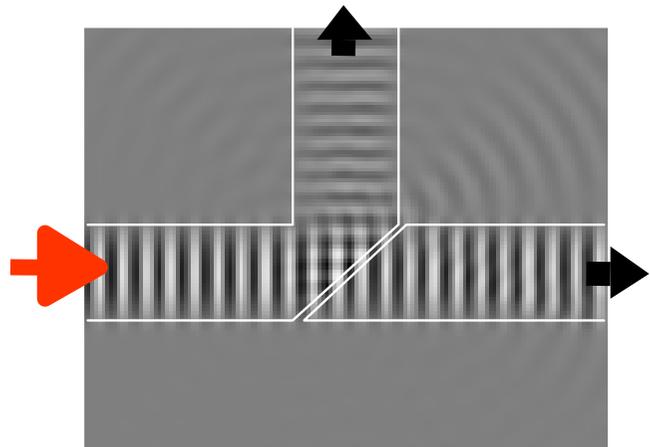
Measured Loss of Corner Bends



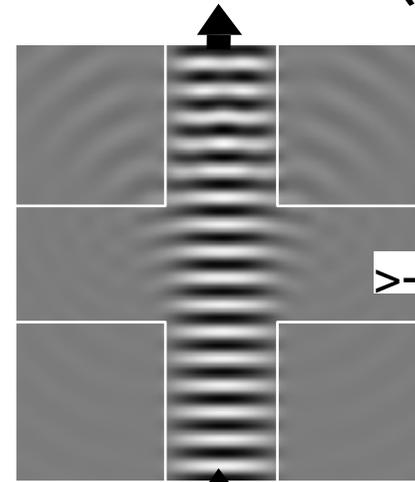
# 半導体導波路部品 of 電磁界解析(FD-TD)



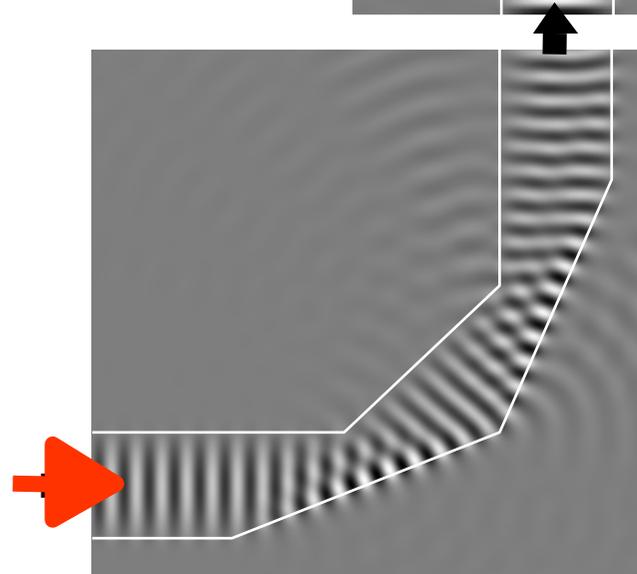
Branch using Double Reflection Mirror



Branch using Slit Mirror



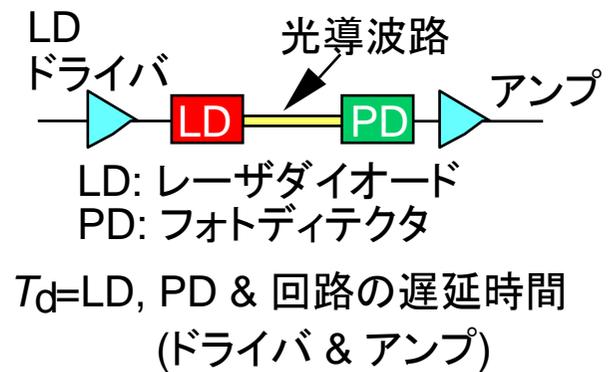
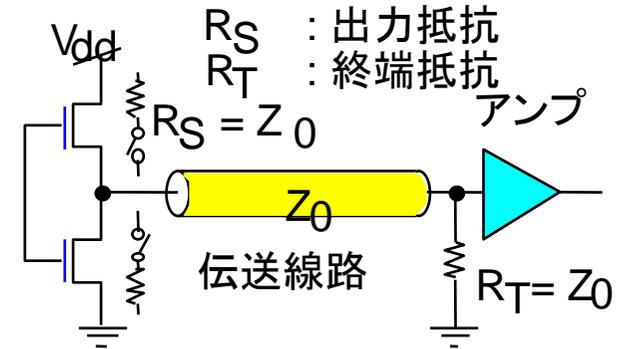
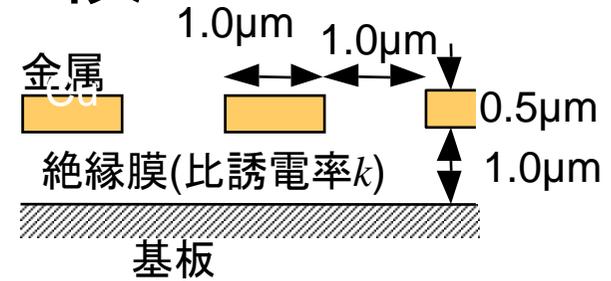
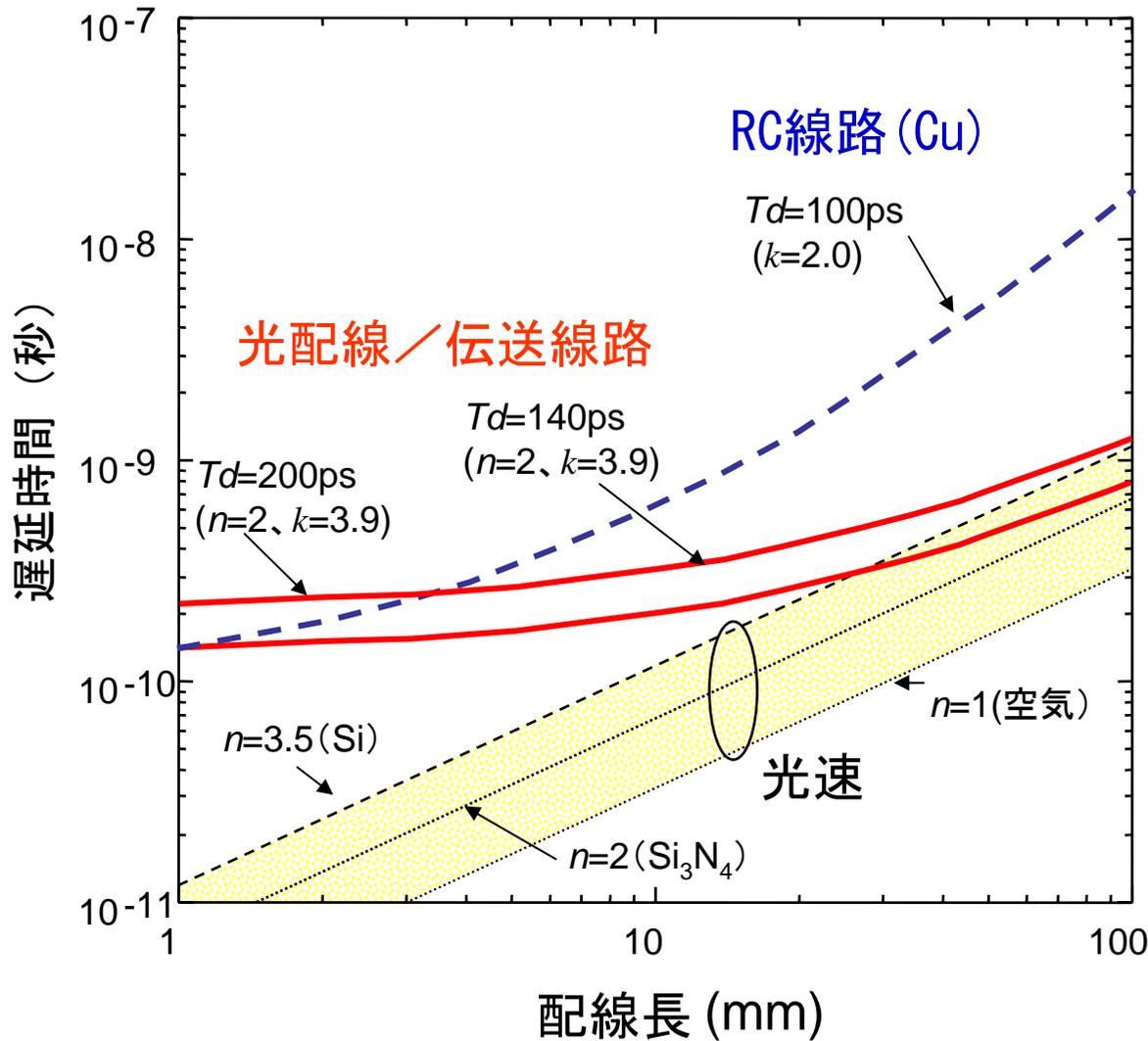
Right-angled Cross



Corner Bend using DRM

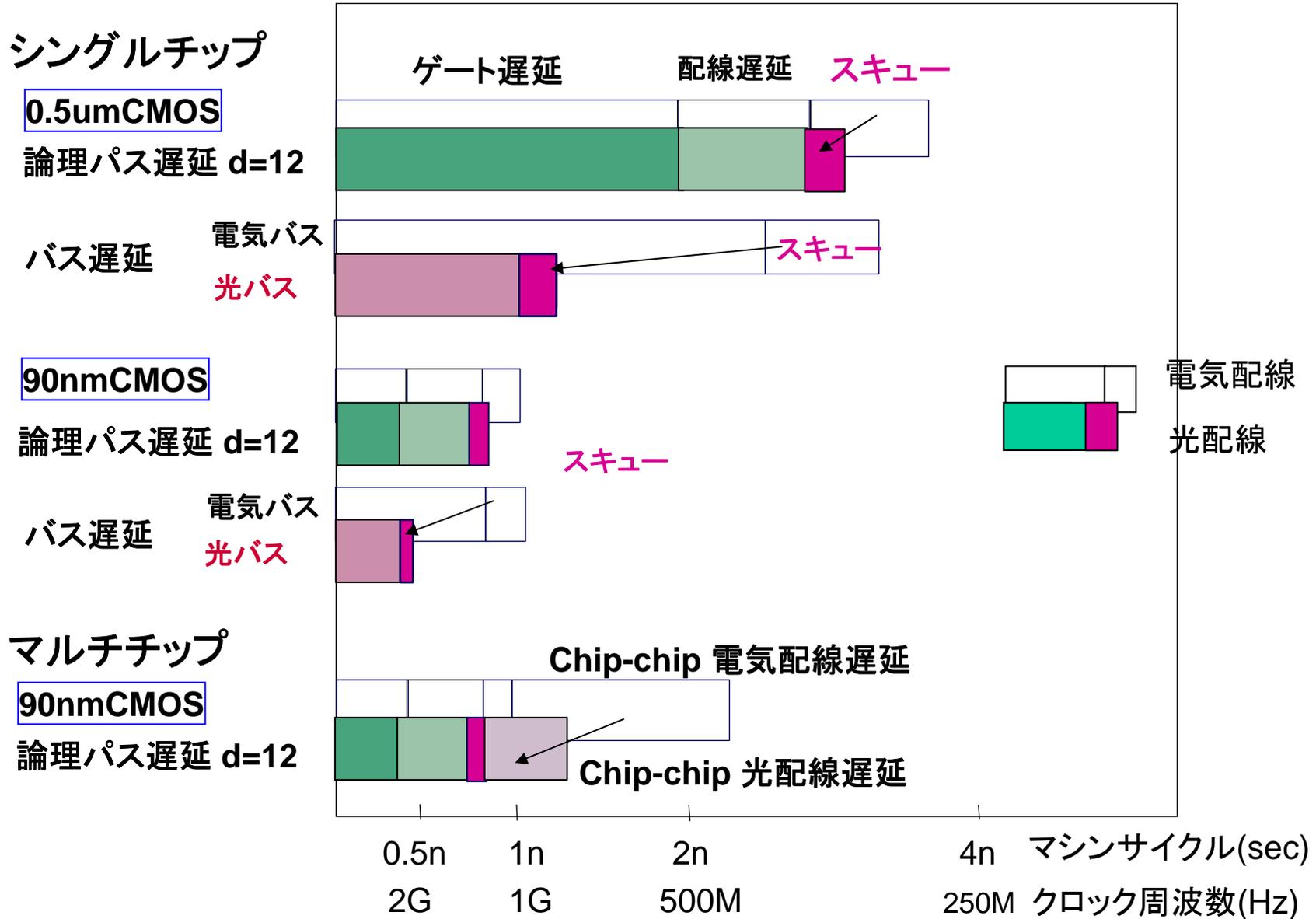
T. Doi, T. Namba, A. Uehara, M. Nagata, S. Miyazaki, K. Shibahara, S. Yokoyama, A. Iwata, T. Ae and M. Hirose, Optically Interconnected Kohonen Net for Pattern Recognition, JJAP, Vol.35. Part I, No. 2B, pp. 1405-1409, 1996.

# 配線遅延時間の比較



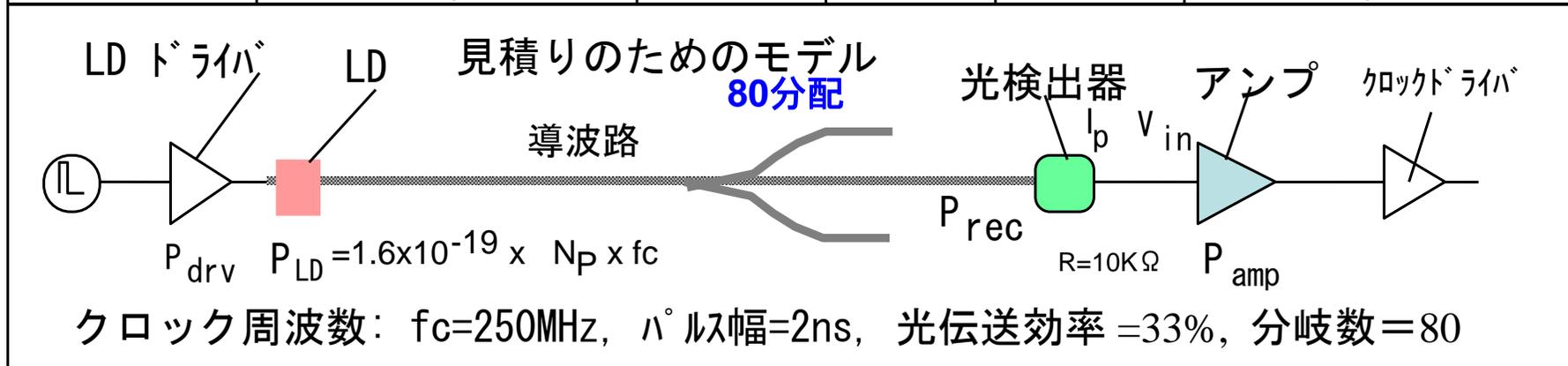
横山 新, LSIにおける光配線技術, 応用物理、  
第76巻、第11号、p.1238-1245, 2007.

# マイクロプロセッサの遅延時間と光導入の効果



# クロック分配の消費電力(1995)

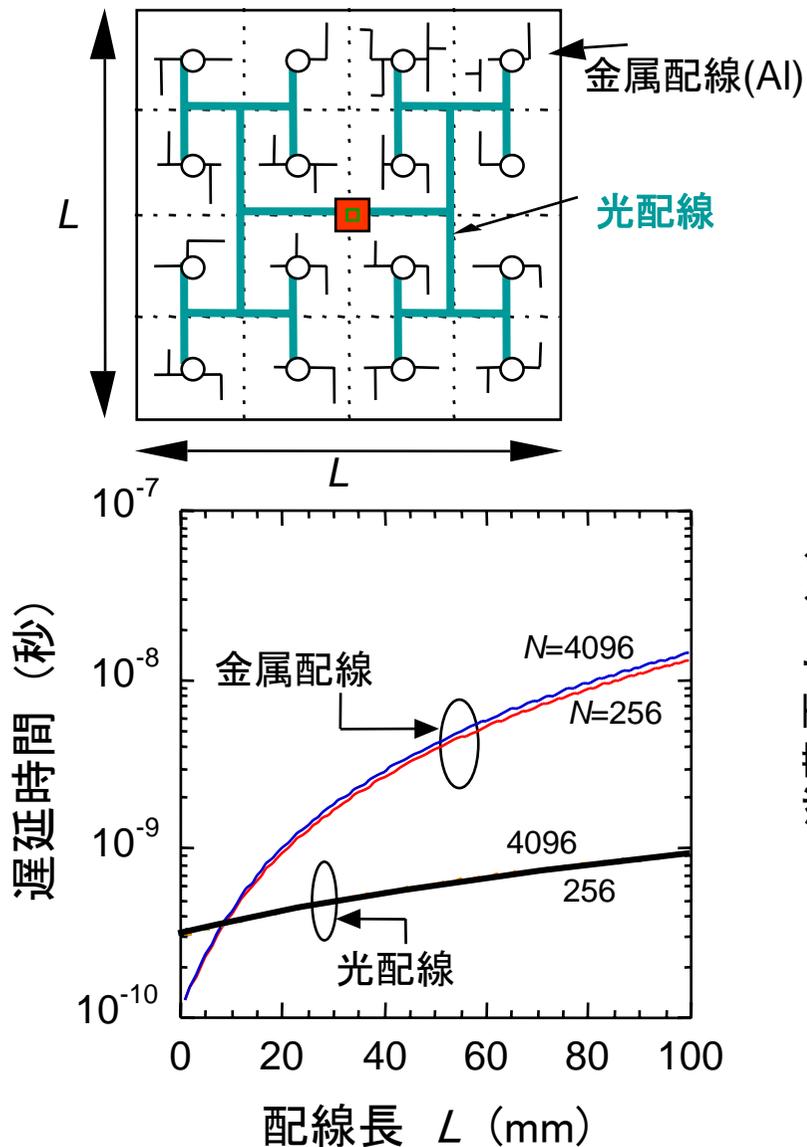
$N_p$	$P_{LD}$	$P_{drv}$	$P_{rec}$	$I_p$	$V_{in}$	$P_{amp}$	$P_{total}$
パルス当たりの光子数	送信光パワー	LDドライバ消費電力	受信光パワー	光電流	受信電圧	アンプ消費電力	全消費電力
$10^4$	0.1 mW	0.4mW	0.4 $\mu$ W	0.8 $\mu$ A	8 mV	80 mW	80.4 mW
$10^5$	1.0 mW	4.0mW	4 $\mu$ W	8 $\mu$ A	80 mV	6.0 mW	10.0 mW
$3 \times 10^5$	3.0 mW	12mW	12 $\mu$ W	24 $\mu$ A	240mV	3.6 mW	15.6 mW



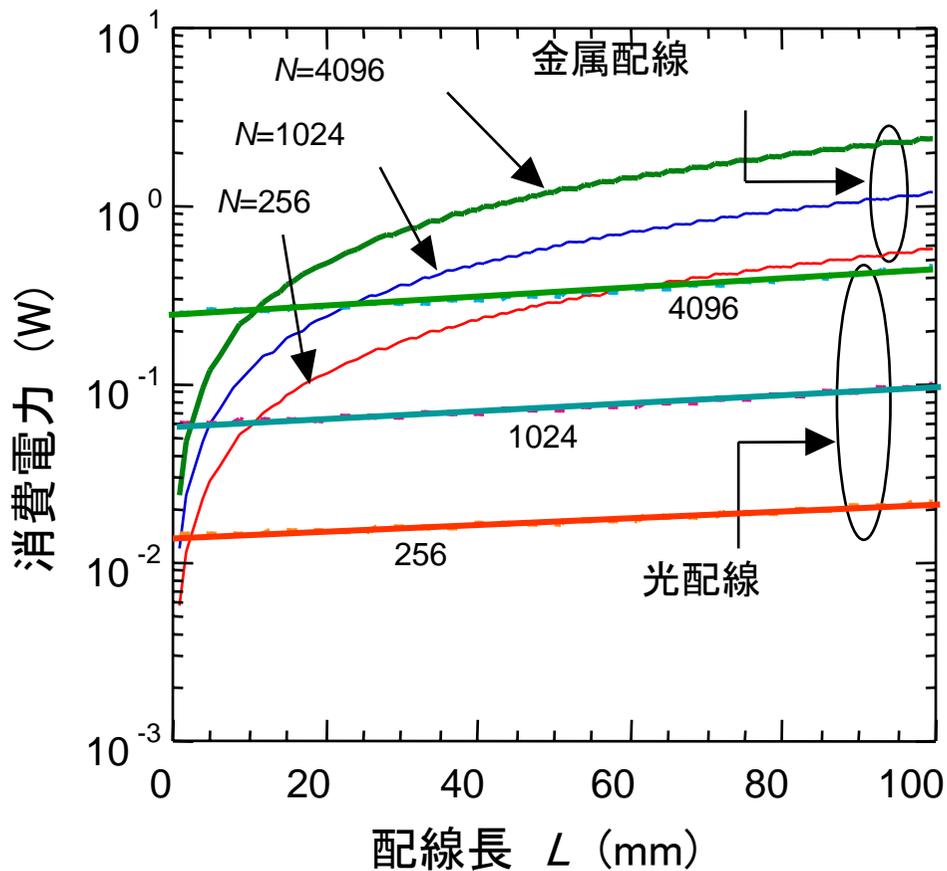
消費電力が最小となる光子数の最適値が存在する  
 光子数: 大 LDドライバの電力が支配的  
 光子数: 小 受信アンプの電力が支配的

A. Iwata: Optoelectronics-Devices and Technologies 9, No. 1, 39 (1994).

# クロック分配における遅延時間と消費電力



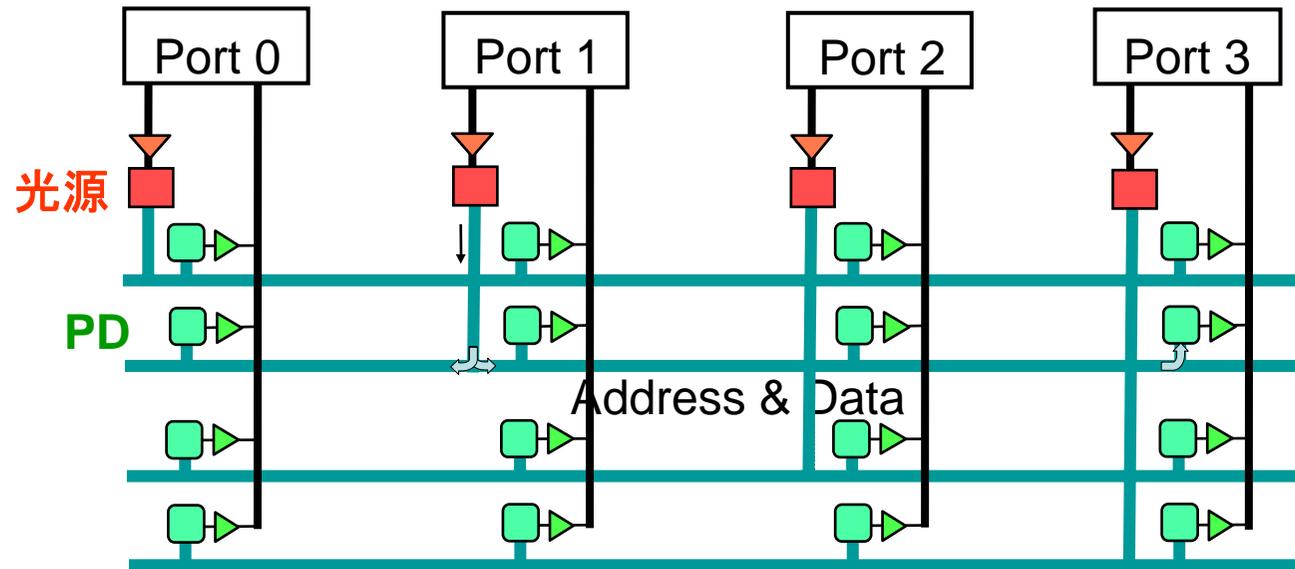
- $N$  : Hツリーの総分岐数 クロック周波数は?
- $L$  : Hツリーの枝長
- ▣ 信号源(レーザとレーザドライバ)
- Hツリーの末端(受光素子とアンプ)



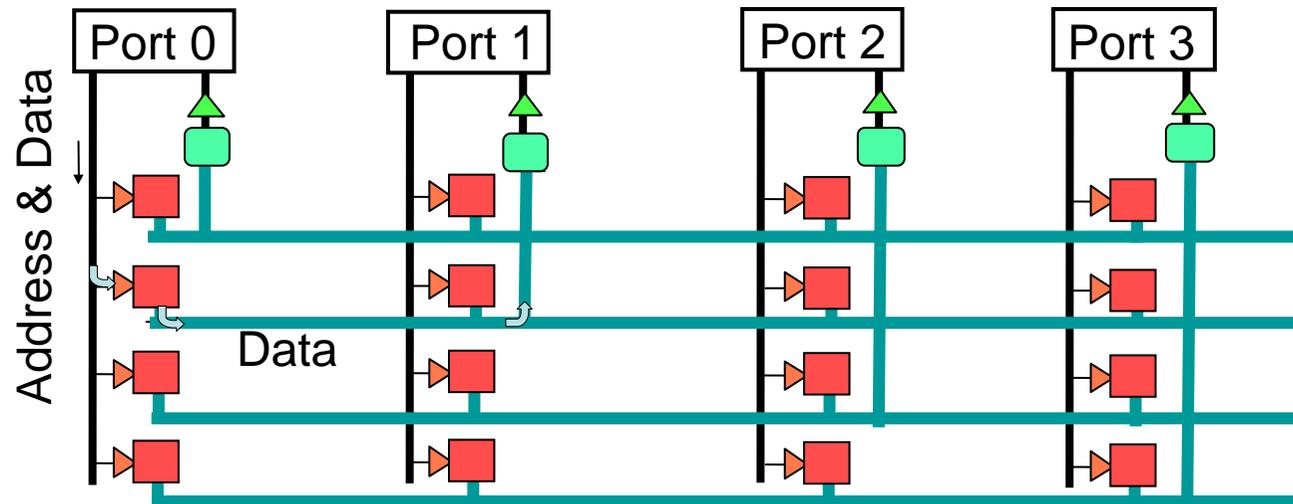
T. Doi, T. Namba, A. Uehara, M. Nagata, S. Miyazaki, K. Shibahara, S. Yokoyama, A. Iwata, T. Ae and M. Hirose  
 Optically Interconnected Kohonen Net for Pattern Recognition, JJAP, Vol.35. Part I, No. 2B, pp. 1405-1409, 1996

# 光電融合クロスバースイッチ

受信側  
スイッチング  
(TSS)

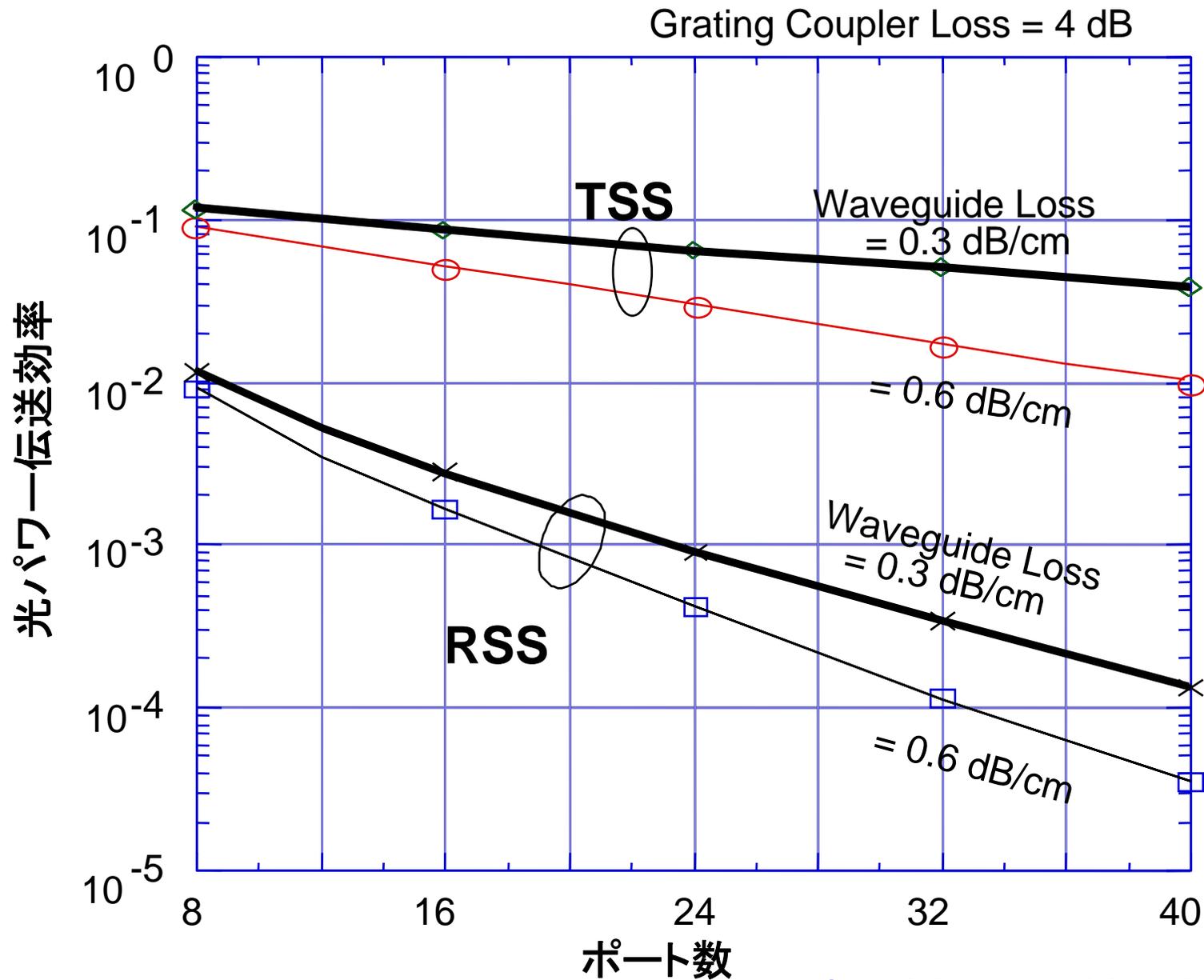


送信側  
スイッチング  
(RSS)

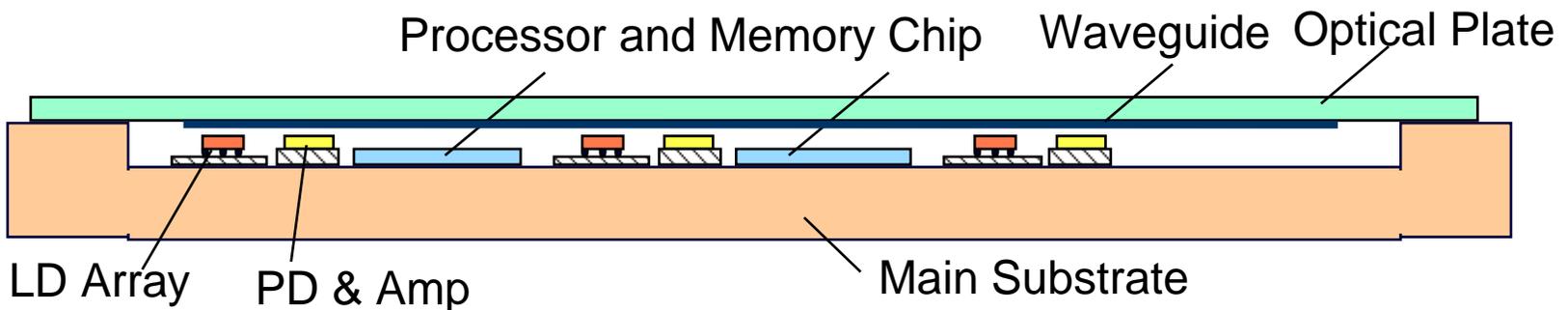
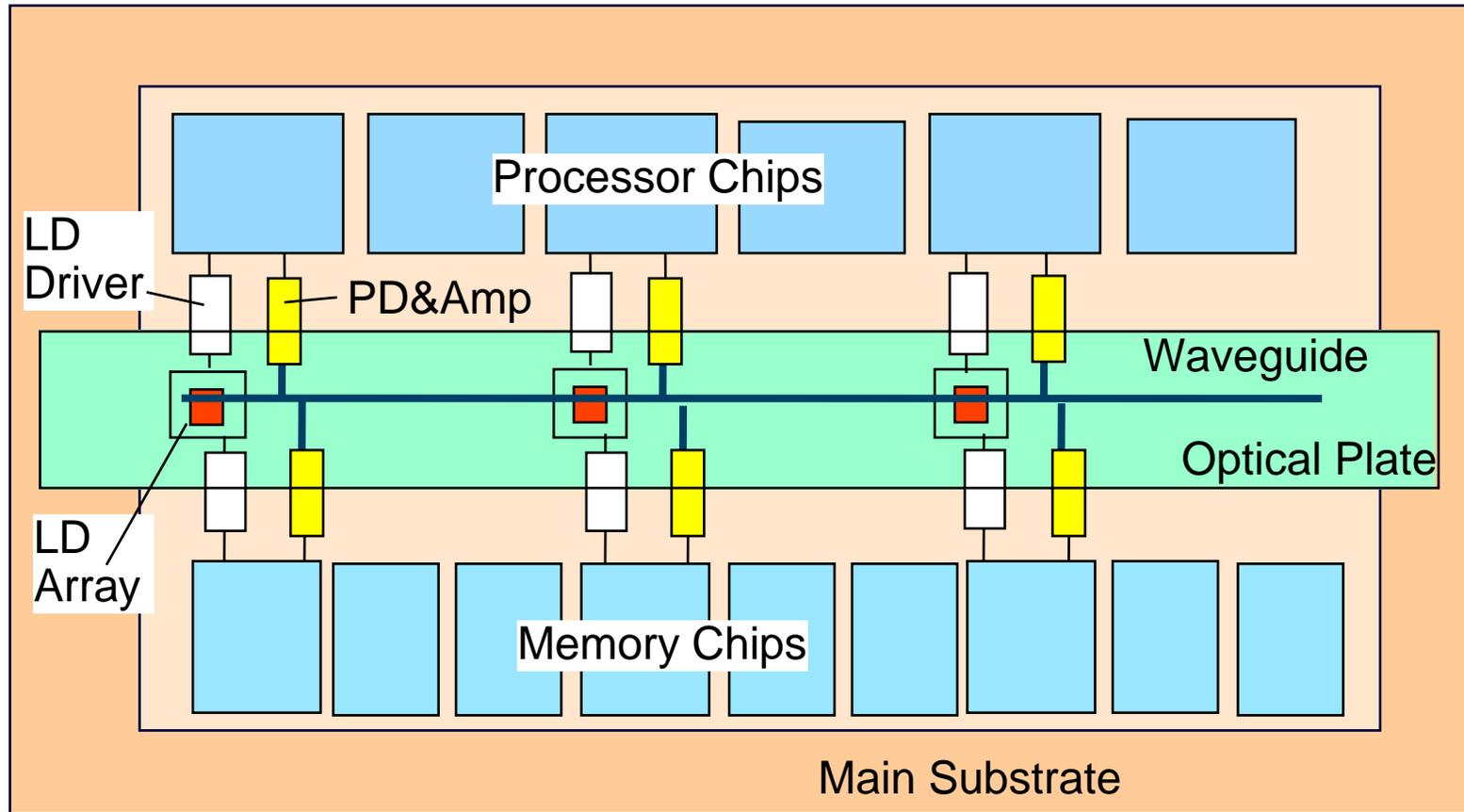


A. Iwata, T. Doi, M. Nagata, S. Yokoyama and M. Hirose, Photo-Electric Crossbar Switches for Multi-Processor Systems Applications of Photonics Technology 2 , pp.505-510,(1997).

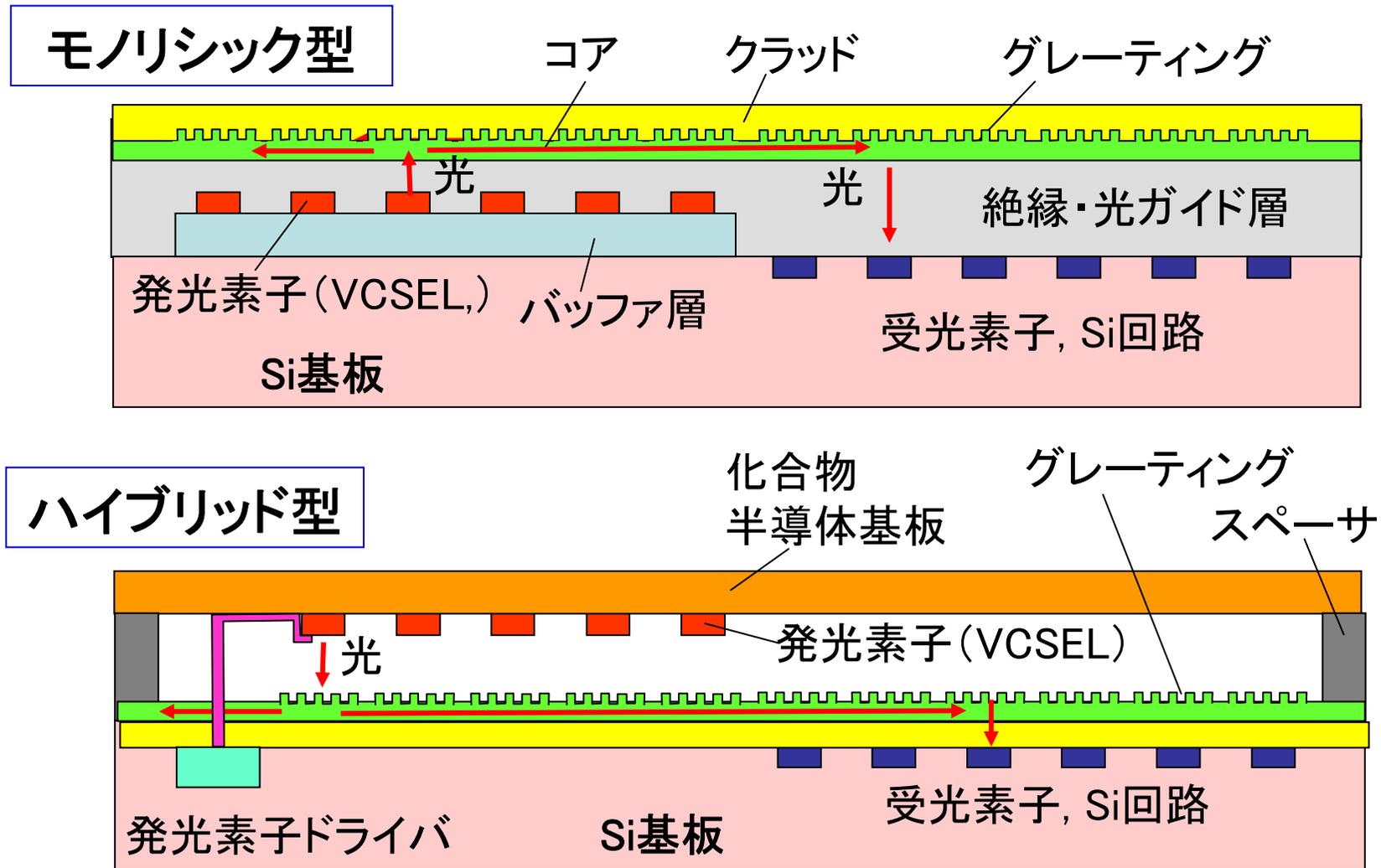
# 光電融合XB-SWの光パワー伝送効率



# 光電融合XB-SWのMCMプロトタイプ



# 光配線を用いた光電融合集積回路



VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

# フォトディクタの進歩

課題：高感度化，高速化，小型化，Siとの整合性

表面プラズモン共鳴Siナノ光検出器

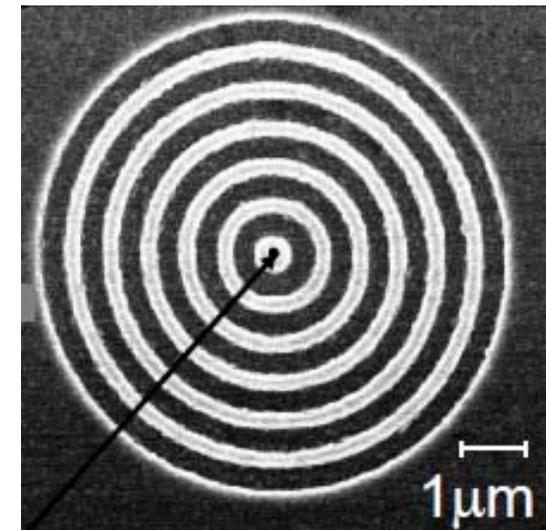
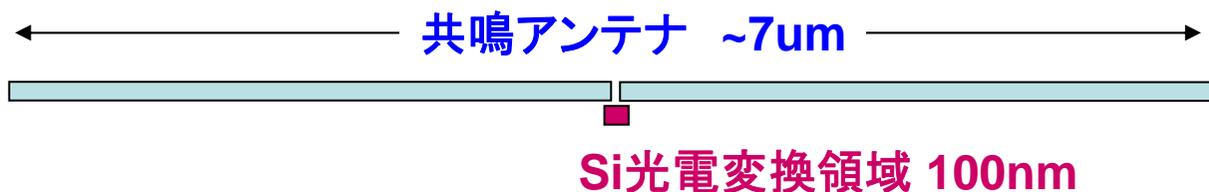
共鳴アンテナとショットキダイオードの電極を一体化

数100nm領域に光を閉込めて，

Siで光電変換器

容量低減(1aF)

> 出力電圧増加と高速動作

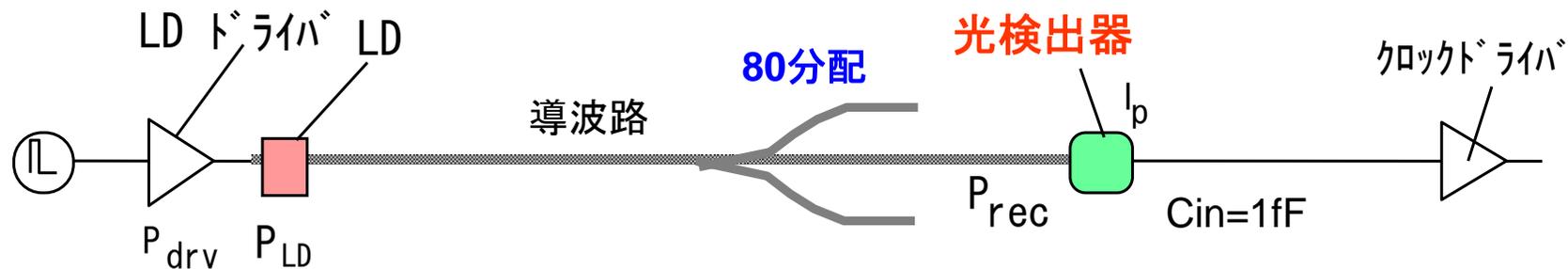


1) K. Ohashi, et. al. Optical Interconnect technology for high speed VLSI chips using silicon nano photo-diode, ISSCC pp.426-427, 2006.

2) 大橋他, LSIオンチップ光配線技術, 信学誌, Vol. 91, No.3, pp.201-206, 2008

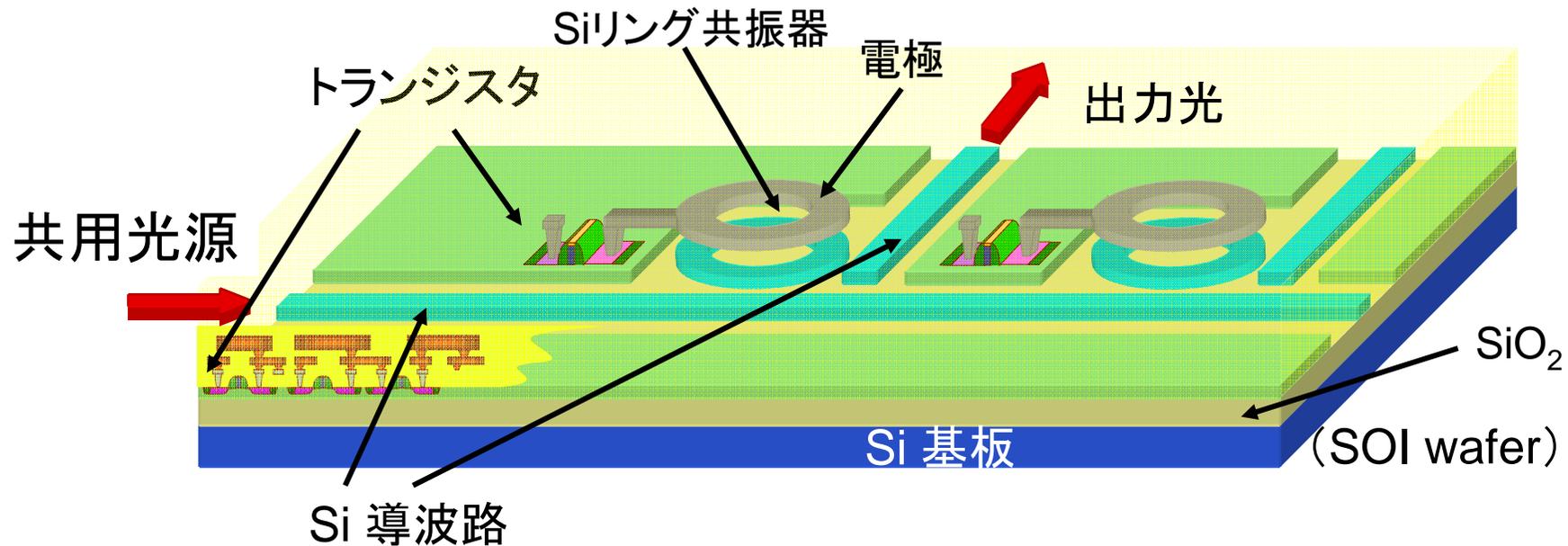
# クロック分配の消費電力(2007)

$N_P$	$P_{LD}$	$P_{drv}$	$P_{rec}$	$I_p$	$V_{in}$	$P_{amp}$	$P_{total}$
パルス当たりの光子数	送信光パワー	LDドライバ消費電力	受信光パワー	光電流	受信電圧	アンプ消費電力	全消費電力
$10^3$	0.1 mW	0.4mW	0.04 $\mu$ W	0.08 $\mu$ A	16mV	10 mW	10.4 mW
$10^4$	1 mW	4mW	0.4 $\mu$ W	0.8 $\mu$ A	0.16V	—	<b>4 mW</b>



クロック周波数=2.5GHz, パルス幅=0.2ns, 光伝送効率=33%, 分岐数=80

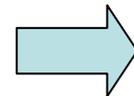
# UOEICの構造例 (2005)



## チップ上長距離配線を光配線に置換

- ・Si光配線 でデータ転送
- ・Si光モジュレータで信号制御

Si導波路は小型化が可能

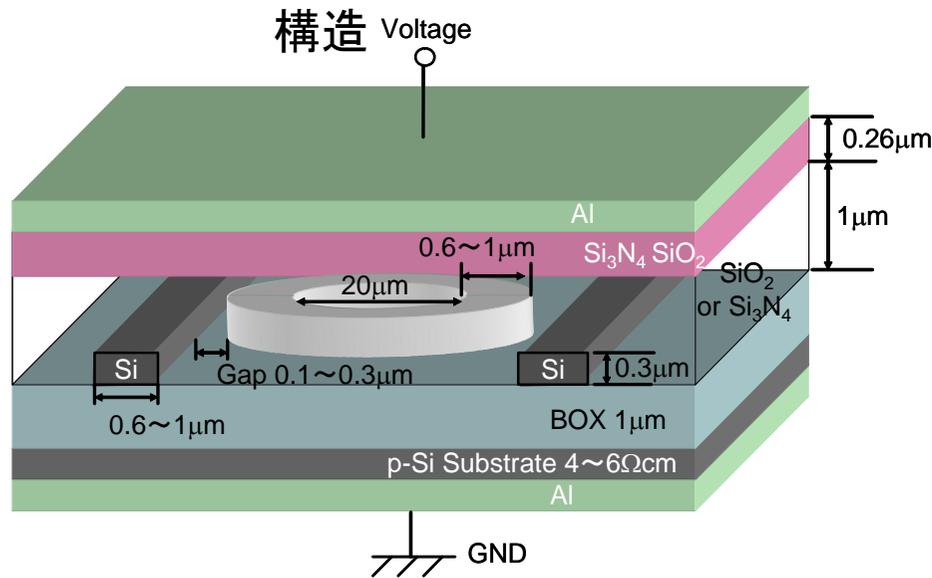


SOIウエハを用いた  
光スイッチの実現

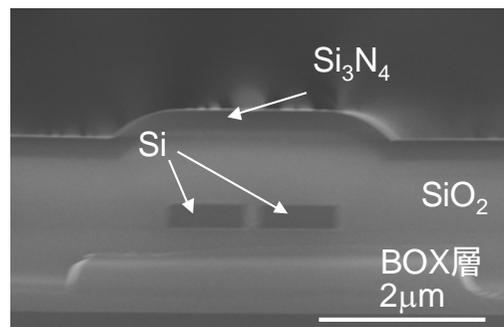
横山 新, LSIにおける光配線技術, 応用物理、第76巻、第11号、p.1238-1245, 2007.

# 電界駆動Siリング共振器型光スイッチ

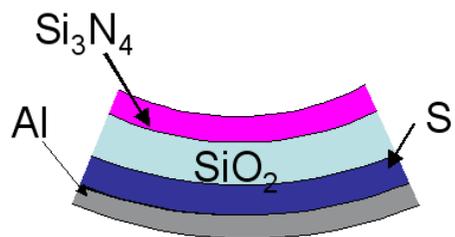
極低消費電力動作が期待できる光配線LSI用の光スイッチとして、  
初めて電界駆動Siリング共振器型光スイッチの動作に成功



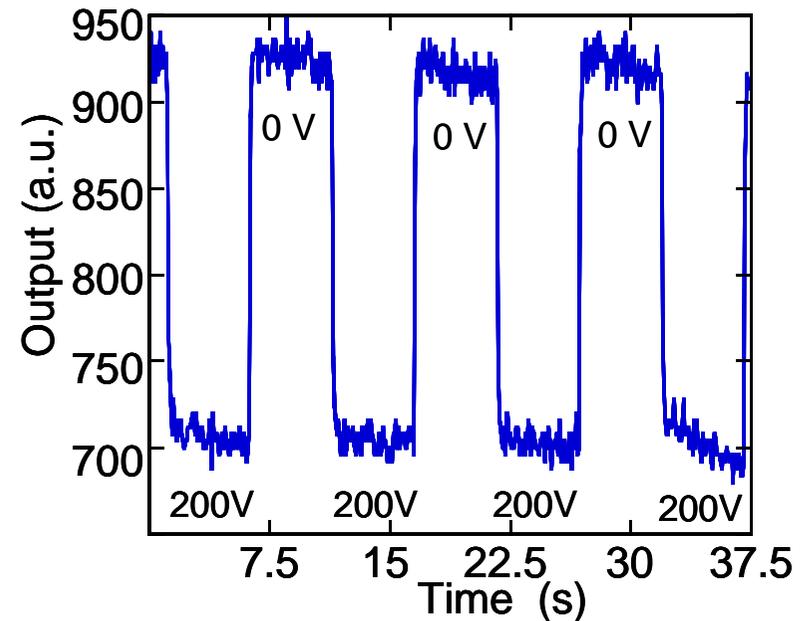
SEM写真 (ストレス印加部)



引張応力



光変調特性: 30%変調



電気光学効果(数ps)  
キャリア変調に比べ  
高速、低電力化が可能

徳永智大、田主裕一郎†、雨宮嘉照、横山新, シリコンリング共振器を用いた電界駆動光変調素子,  
信学会 シリコン・フォトニクス研究会, 2007年12月14日

# 競合インタコネク技術と適用形態

	チップ内	チップ間	インタポーザ, PCB
電気 インタコネク	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">多層配線(RC)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">伝送線路(TL)</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">貫通ビア(TSV) バンプ</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">PCB伝送線路 同軸ケーブル フラットケーブル</div>
光 インタコネク	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">導波路, ミラー, レンズ, グレーティング</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">光配線基板(Hybrid)</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">自由空間</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">光ファイバー</div>		
無線 インタコネク		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">誘導結合 (L) 短距離</div>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">静電結合 (C) 極短距離</div>	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">電磁波結合〔アンテナ〕 長距離</div>		
接続距離	~1mm	二次元 ~10mm 三次元 ~0.1mm	二次元 ~100mm 三次元 ~10mm

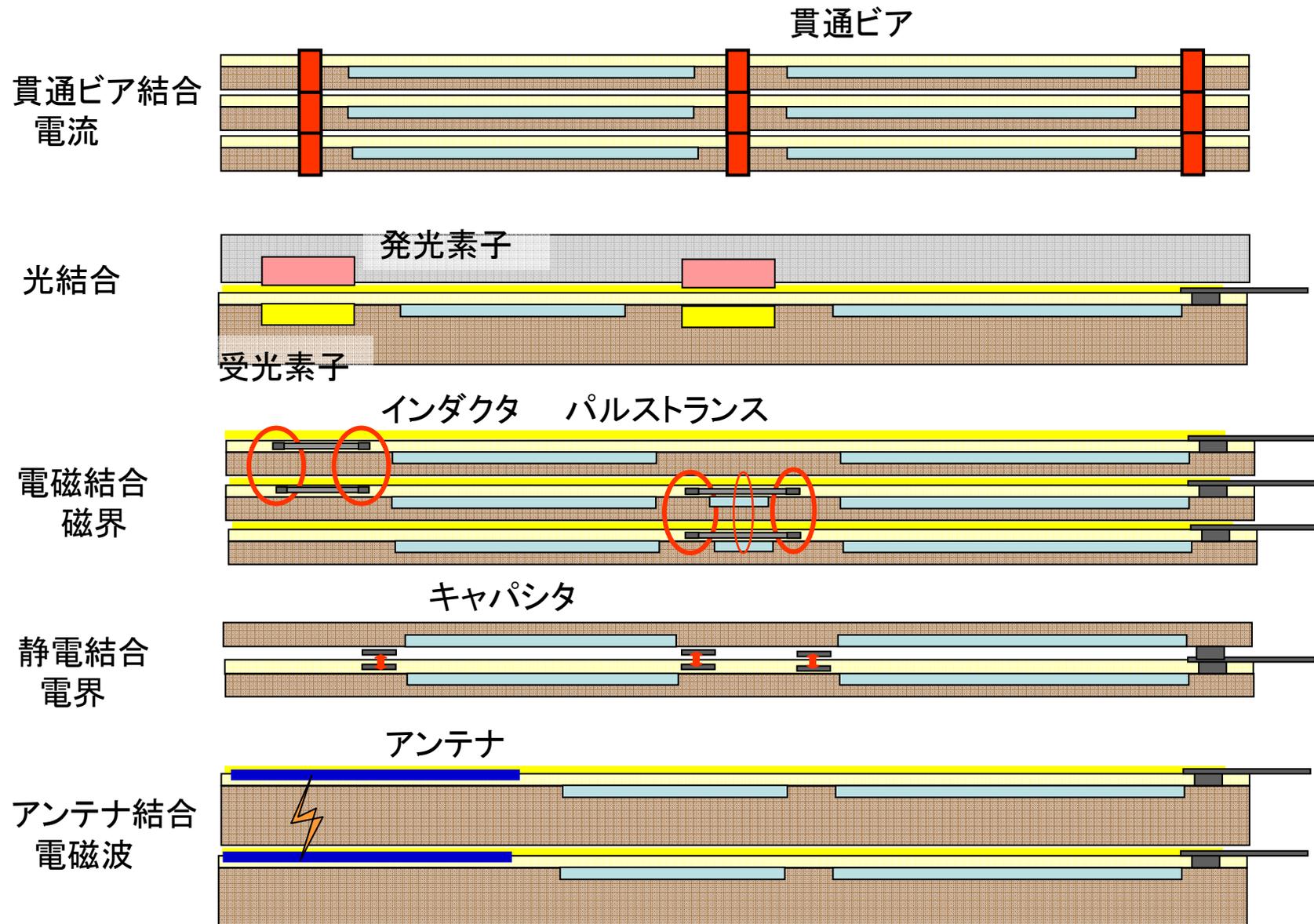
岩田穆、電気、光、磁気、電波複合インタコネクションによる新しい三次元集積技術、  
学振光ネットワークシステム技術第171委員会資料、2008.1.21

# 競合インタコネク技術と適用形態

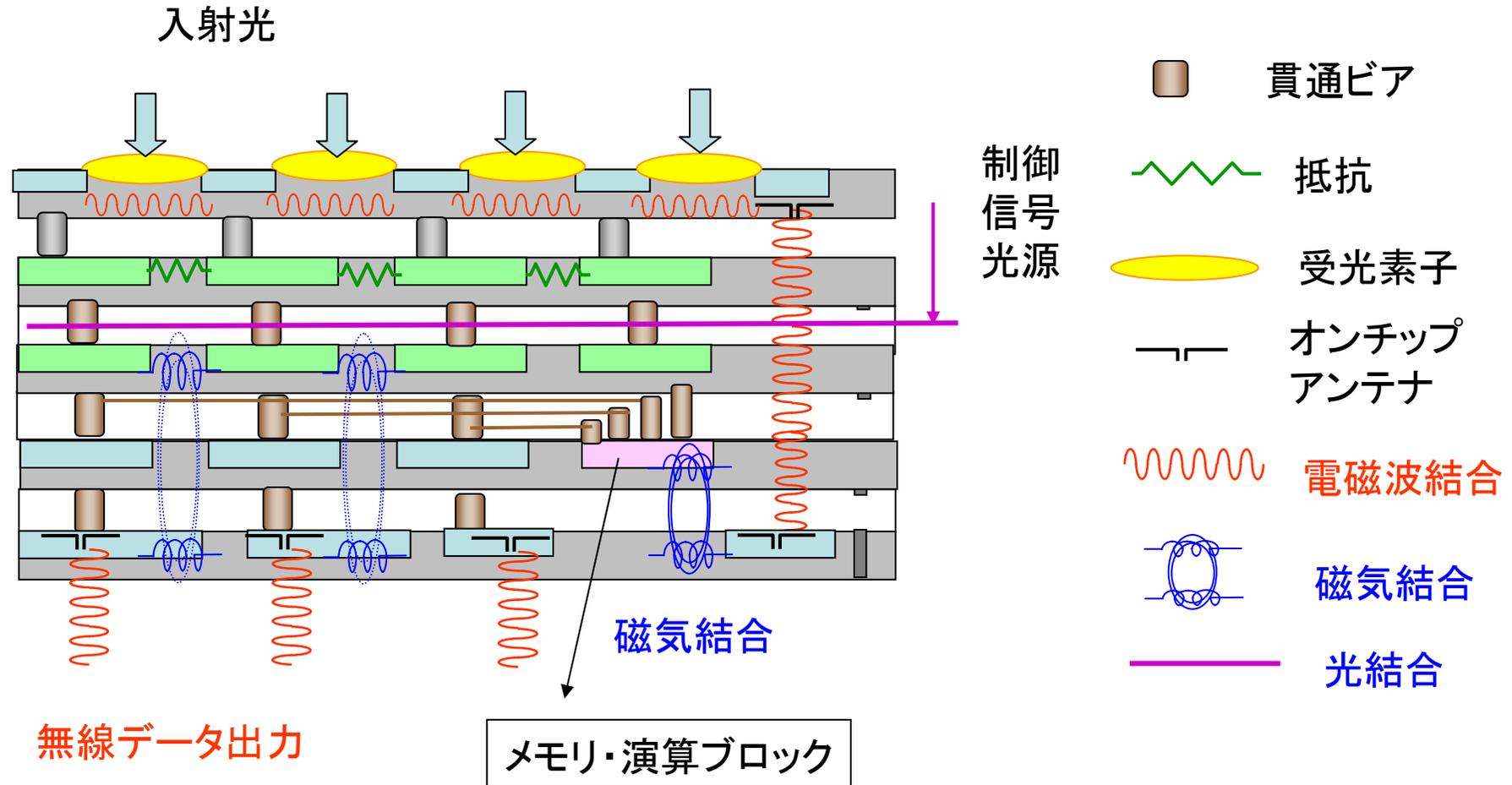
	チップ内	チップ間	インタポーザ, PCB
電気 インタコネク	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">多層配線(RC)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">伝送線路(TL)</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">貫通ビア(TSV)  bumps</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">PCB伝送線路 同軸ケーブル フラットケーブル</div>
光 インタコネク	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">導波路, ミラー, レンズ, グレーティング</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">光配線基板 (Hybrid)</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">自由空間</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">光ファイバー</div>		
無線 インタコネク	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">誘導結合 (L) 短距離</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">静電結合 (C) 極短距離</div>		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">電磁波結合 [アンテナ] 長距離</div>		
接続距離	~1mm	二次元 ~10mm 三次元 ~0.1mm	二次元 ~100mm 三次元 ~10mm

岩田穆、電気、光、磁気、電波複合インタコネクションによる新しい三次元集積技術、  
学振光ネットワークシステム技術第171委員会資料、2008.1.21

# チップ積層集積におけるインタコネクタ技術



# 電気、光、磁気、電波複合インタコネクション 三次元集積技術



岩田 穆、電気、光、磁気、電波複合インタコネクションによる新しい三次元集積技術、  
学振光ネットワークシステム技術第171委員会資料、2008.1.21

# まとめ

光をSi-LSIに導入するUOEICの研究の歴史は古い。  
現在, Siフォトリクスとして  
光検出器, 光スイッチ, 導波路などが進展.

三次元集積が必須になり,  
チップ内・チップ間インタコネクションが鍵になった。  
金属配線では集積伝送線路, 送受信回路が進歩。  
非接触(無線)インタコネクションが進展  
・インダクタ結合, ・アンテナ結合など.

今後, 各インタコネクションの特徴を複合化した  
三次元集積に進展

この研究にあたり ご指導, ご協力いただきました.  
皆様に感謝いたします.

UOEIC研究会でご指導いただいた  
故林巖雄先生, 広瀬全孝先生  
同研究会でご討論いただいた  
武田光夫先生, 小柳正光先生, 和田修先生,  
阿江忠先生, 石川正俊先生,  
広島大学でUOEICプロトタイプをいっしょに開発した  
横山新先生, 土居武司氏, 永田真先生

光部品を浜松フォトニクス, NECからご提供いただきました  
CMOSチップをNTTエレクトロニクスに試作いただきました.