

超低消費電力光ノード実現に向けた超小型高速相変化光スイッチの研究開発

津田裕之⁽¹⁾ 斎木敏治⁽¹⁾ 河島整⁽²⁾

桑原正史⁽²⁾ 王 曉民⁽²⁾ 金高健二⁽²⁾ 庄司雄哉^{(2)*}

(1) 慶應義塾大学理工学部 電子工学科

(2) (独)産業技術総合研究所

* 現 東京工業大学

目次

1. 背景

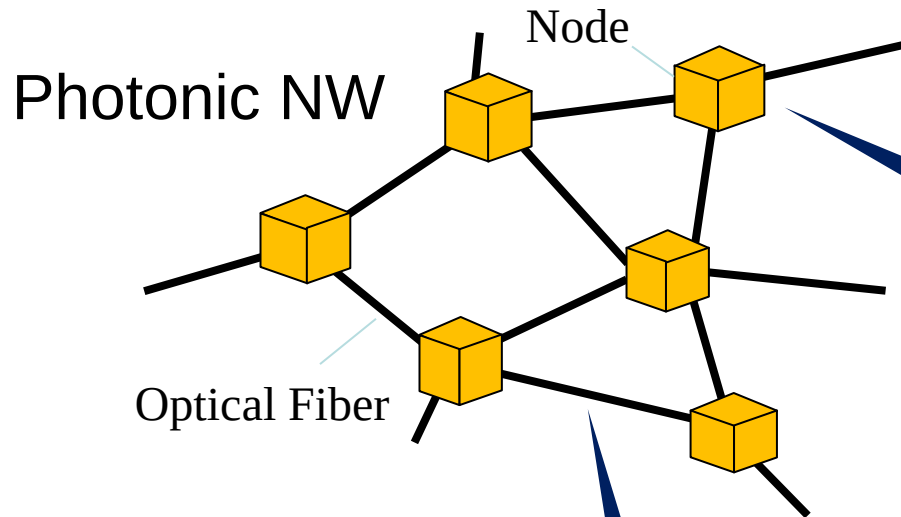
- ・ 光スイッチ技術と省エネ見積もり

2. 相変化材料を用いた自己保持型光スイッチ

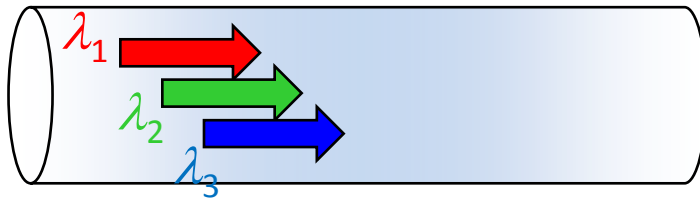
- ・ 相変化材料の特性
- ・ 光ゲートスイッチ
- ・ 2x2スイッチ

3. まとめ

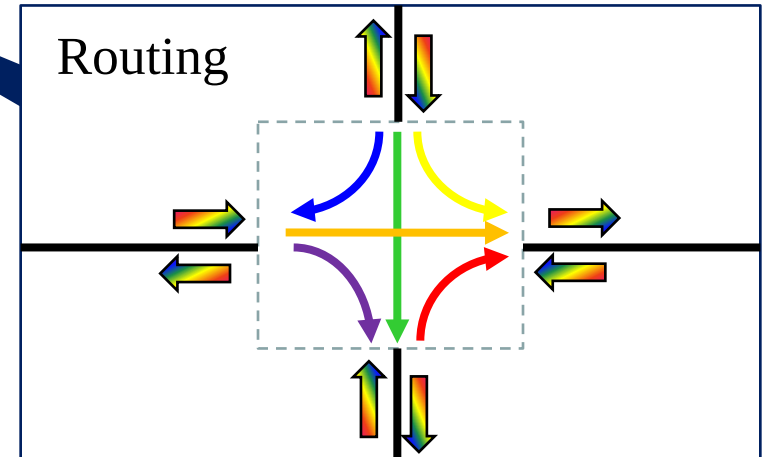
1. 背景



Transmission



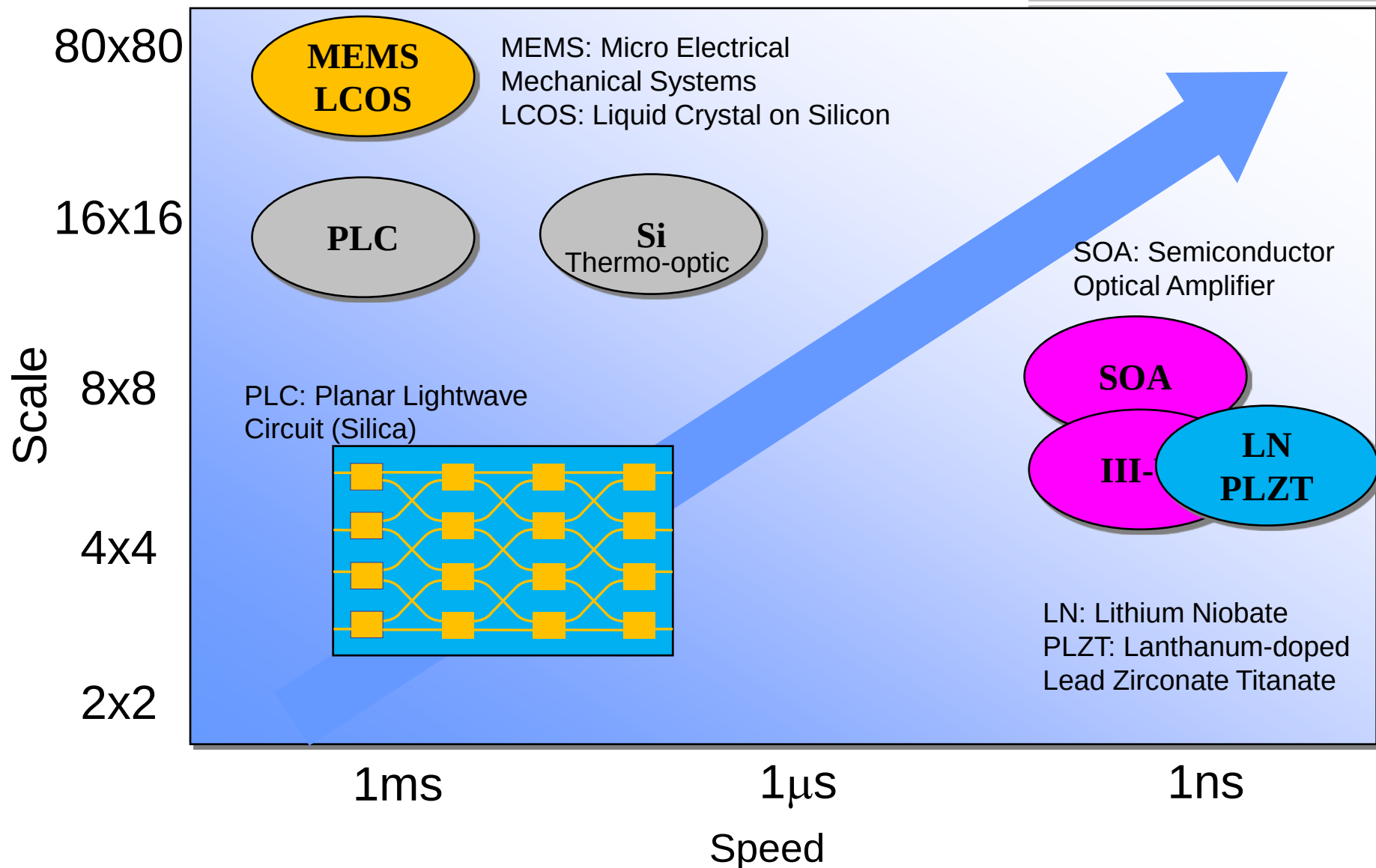
Laser diode, modulator, fiber, EDFA, WDM coupler, photodiode, etc.



Research target:

a fast, small and low-power consumption optical switch

光スイッチ技術



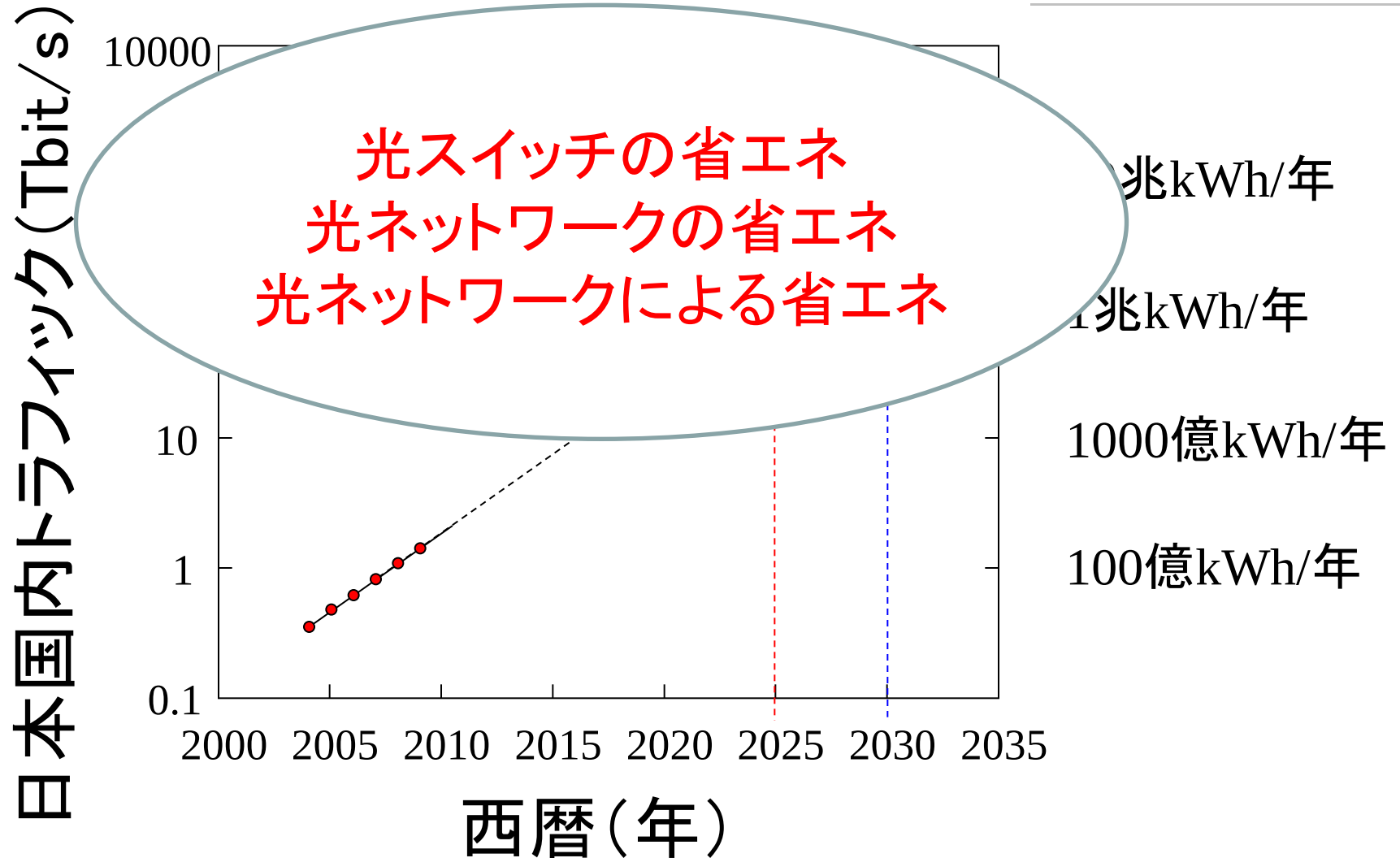
光スイッチ技術の課題

実用化されている光スイッチが少ない
→光スイッチの特性が不十分

1. 偏波無依存
2. 低クロストーク(-40dB以下)
3. 広帯域動作(少なくともCバンドカバー)
4. 低損失

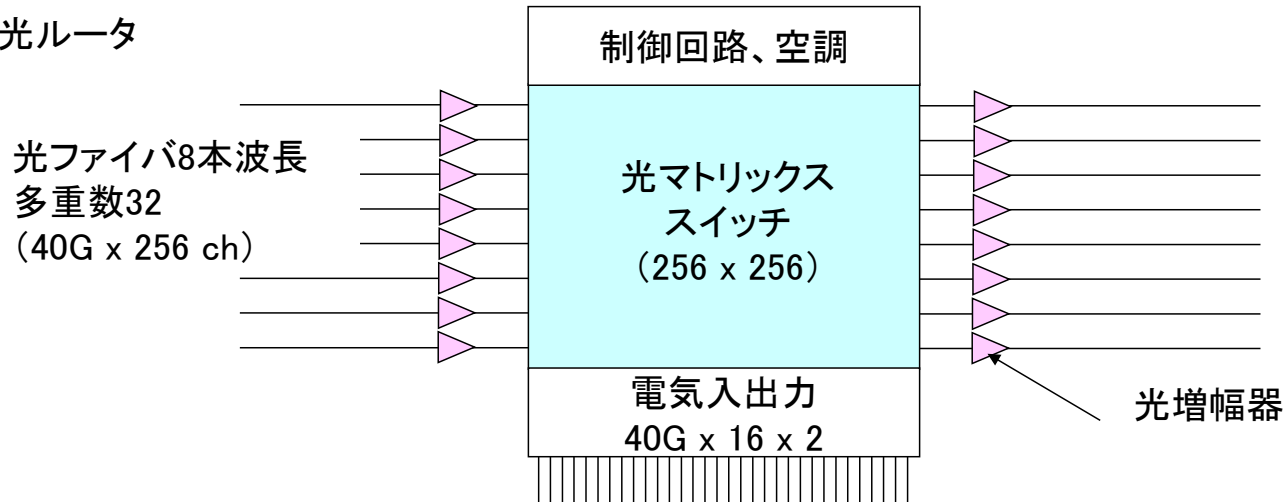
★1-4を満たす光スイッチは低速
LCOS, MEMS, 石英導波路等

光スイッチによる省エネ(1):トラフィック予測



光スイッチによる省エネ(2): コアルータ電力比較

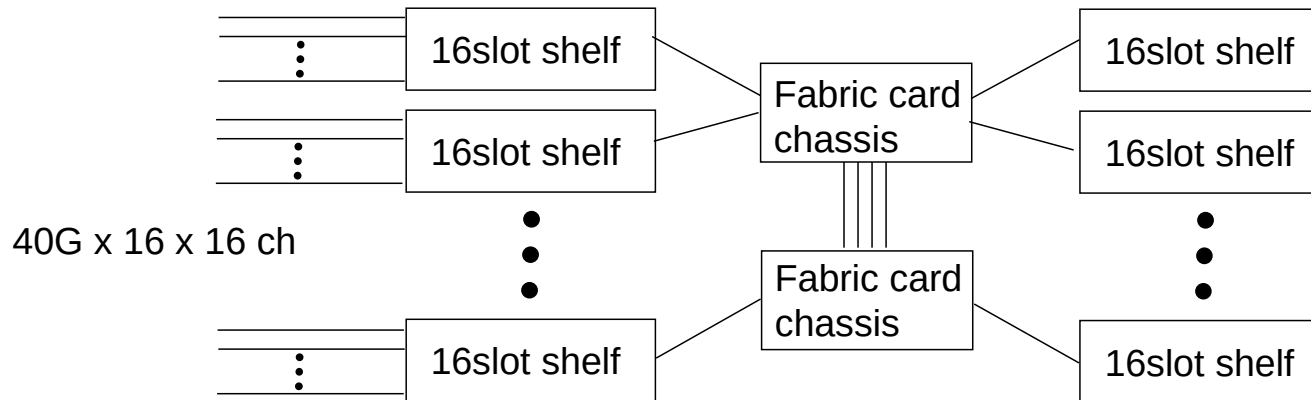
光ルータ



13 kW

・機能は同等ではない。

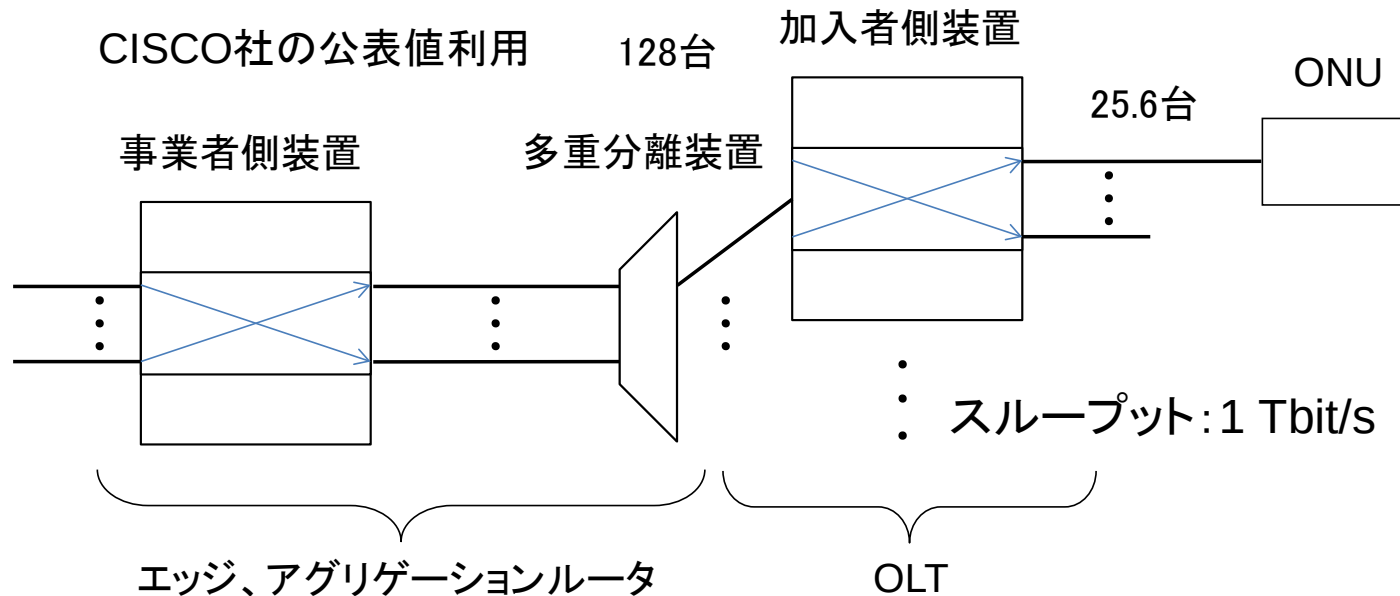
電気ルータ



520 kW

CISCO社 CSR-1の公表値利用

光スイッチによる省エネ(3): OLT電力比較



集線、OLTに光スイッチを適用する効果

5 kW → 1kW

相変化材料を用いた自己保持型光スイッチ

スイッチ特性の比較

Material	Index-control mechanism	Refractive index change	Switching speed	Self-holding characteristics
Silica、Si	Thermo-optic	0.05-0.5%	$\mu\text{s}\sim\text{ms}$	Not available
LN	Electro-optic	0.1%	ps	Not available
III-V	Plasma effect	0.5%	ns	Not available
Phase-change material	Phase change	> 30%	< 100 ns	Available

Phase-change

amorphous ↔ crystalline

Small-sized

Fast switching

Low-power consumption

相変化材料

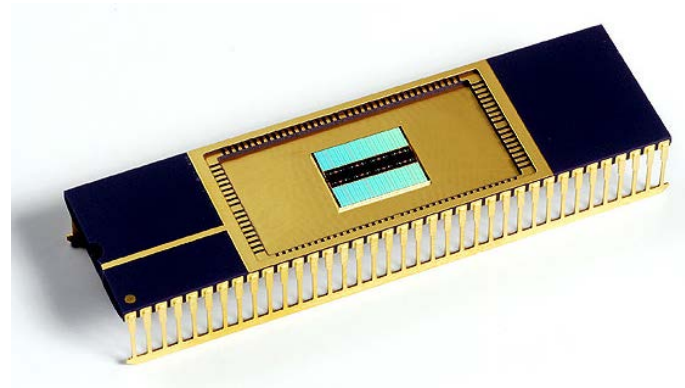
- Optical rewritable media (DVD-RW, etc.)
- Phase-change random access memory (PRAM)

DVD-RW



Optical recording

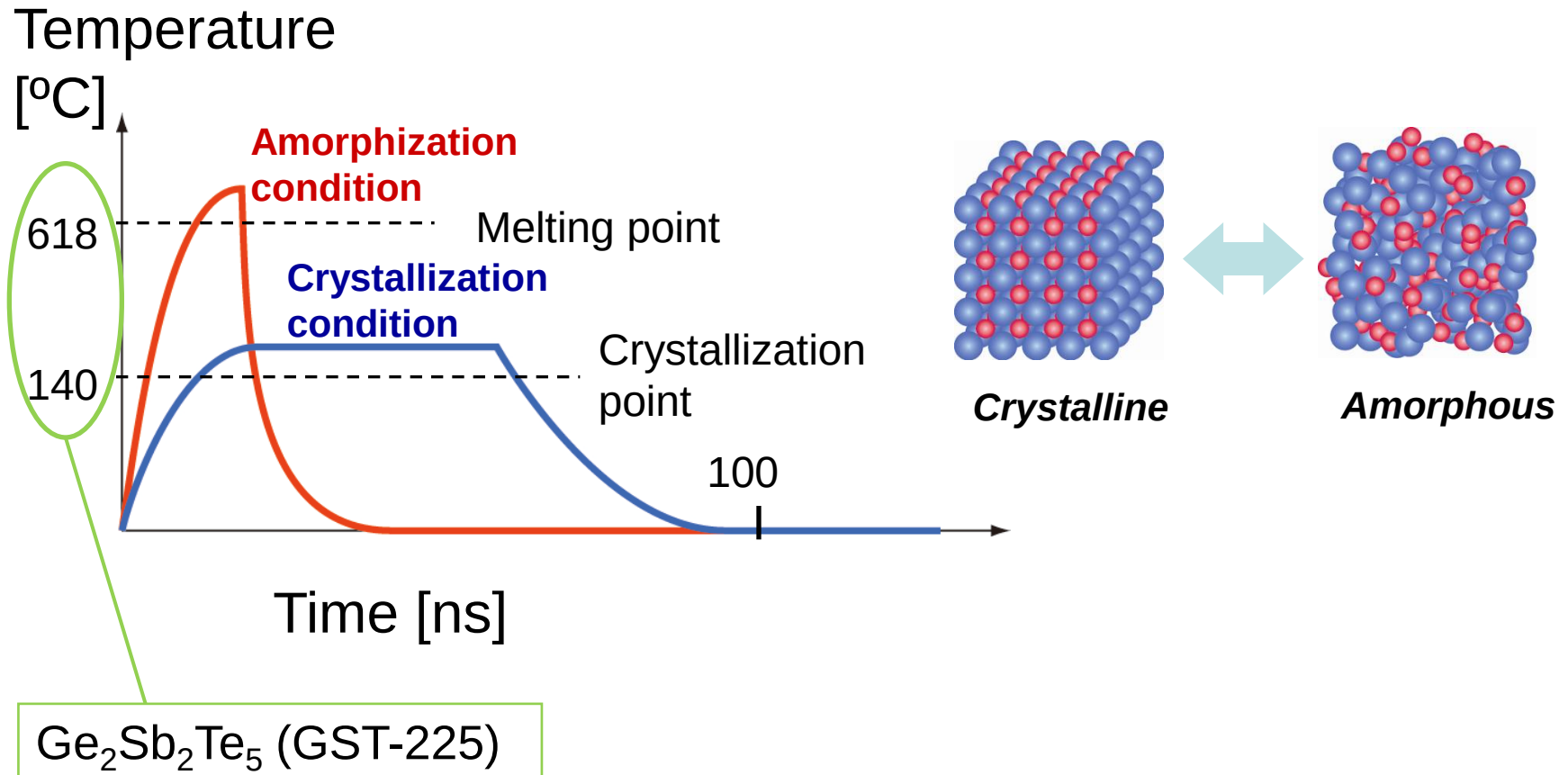
PRAM



512-Megabit chip (Samsung, 2009)

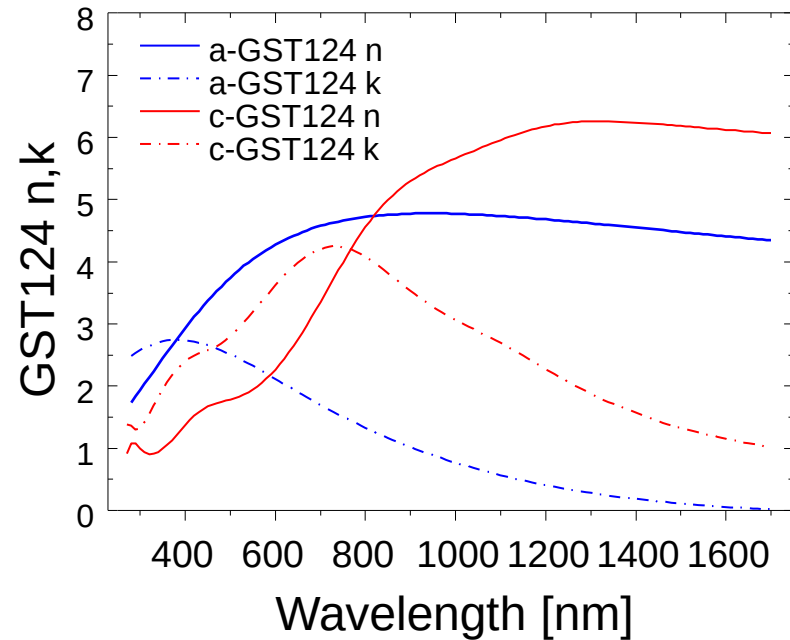
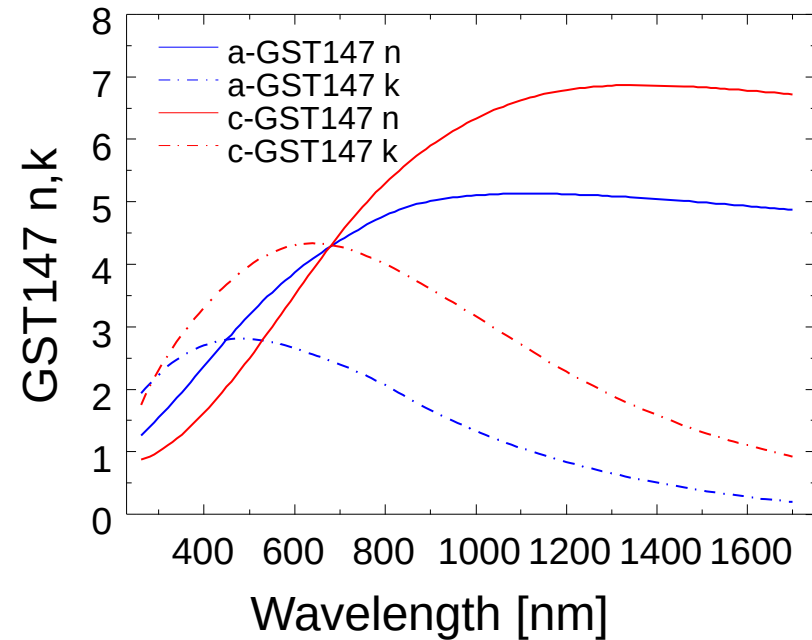
Electrical recording

GST ($\text{Ge}_x\text{Sb}_y\text{Te}_z$)

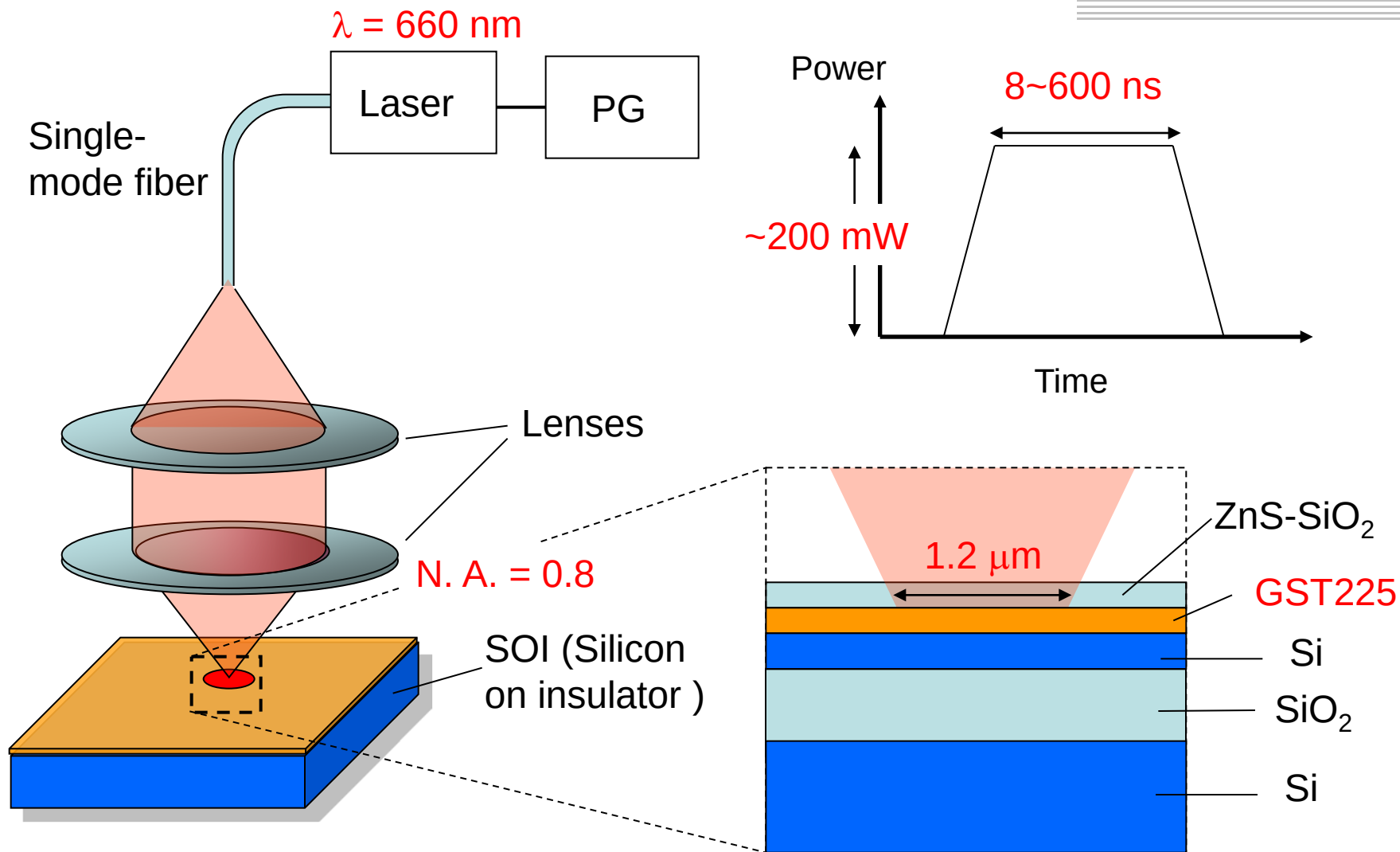


GSTの光学特性

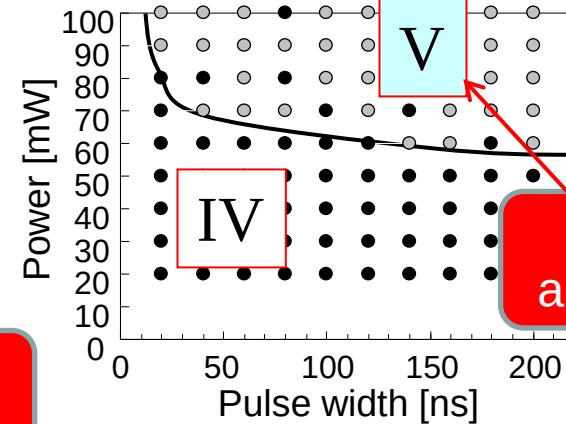
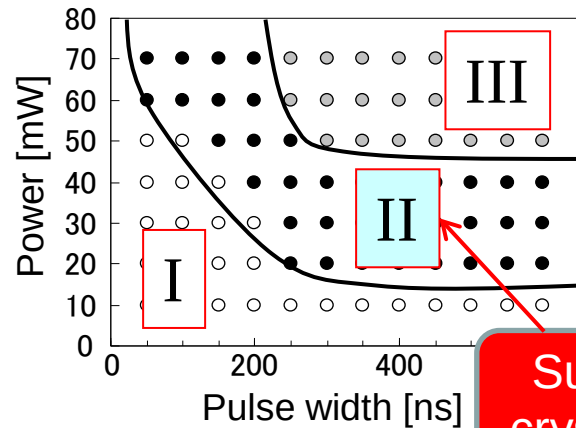
エリプソメータによる薄膜評価例



GSTの光学特性(3)

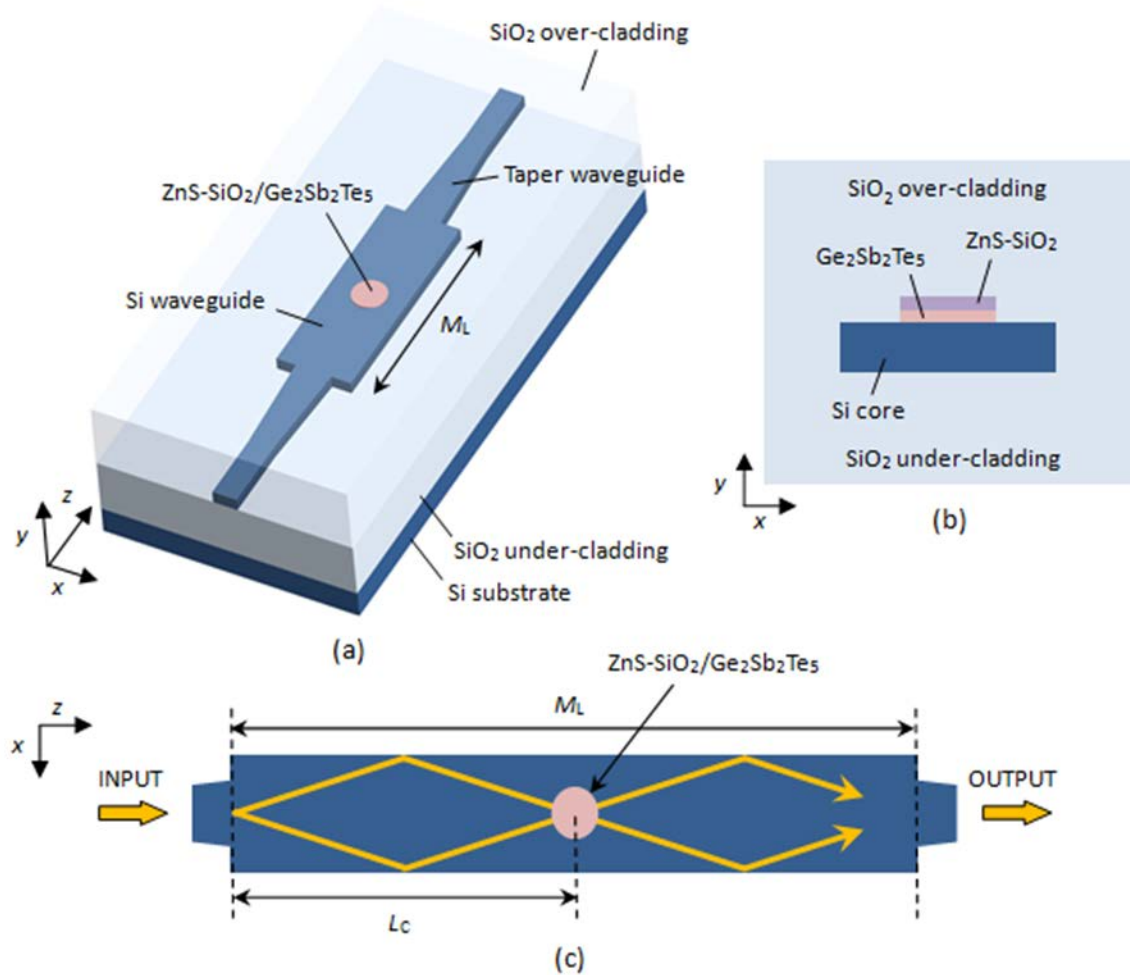


GSTの光学特性(4)



$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST-225) -25 nm

光ゲートスイッチの構造



Complex refractive index
of Ge₂Sb₂Te₅ at 1550 nm

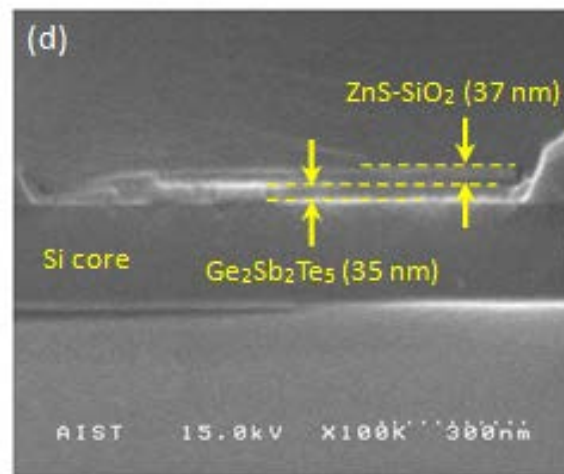
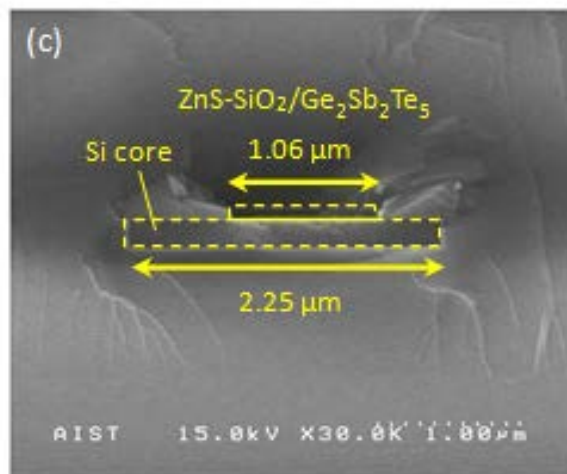
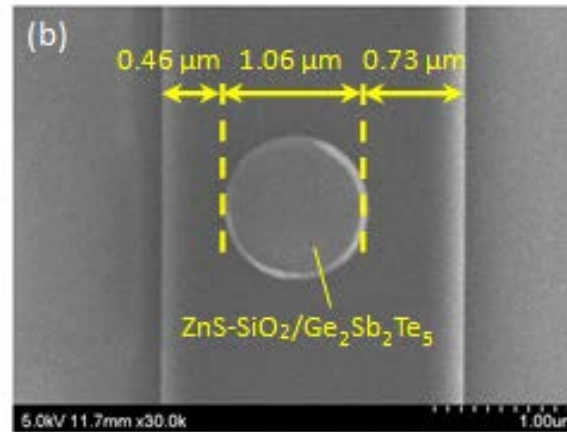
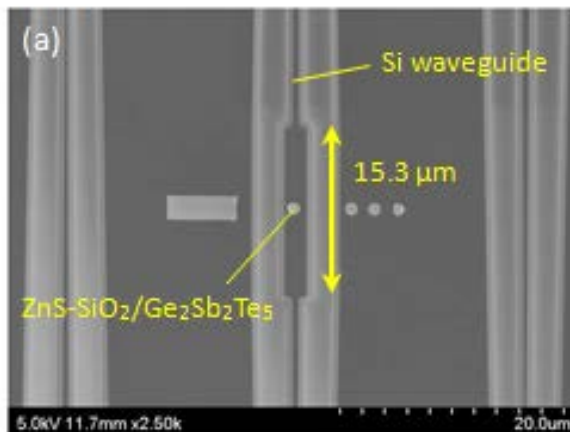
$4.4 + 0.098i$
(amorphous state)



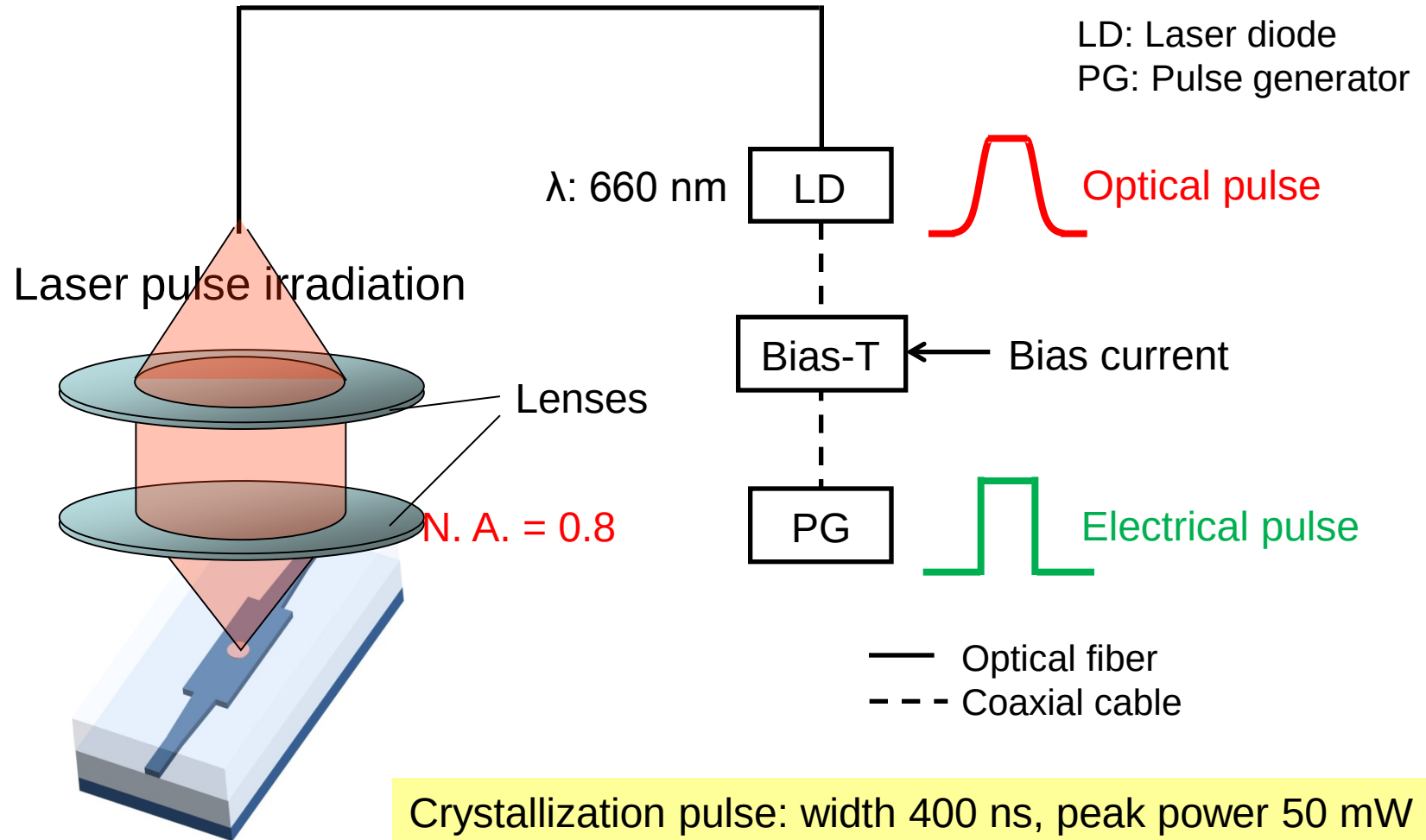
$7.1 + 0.78i$
(crystalline state)

Daiki Tanaka, Yuya Shoji, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, Kenji Kintaka, Hitoshi Kawashima, Tatsuya Toyosaki, Yuichiro Ikuma, and Hiroyuki Tsuda, Optics Express Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283–10294 (2012).

SEM 写真

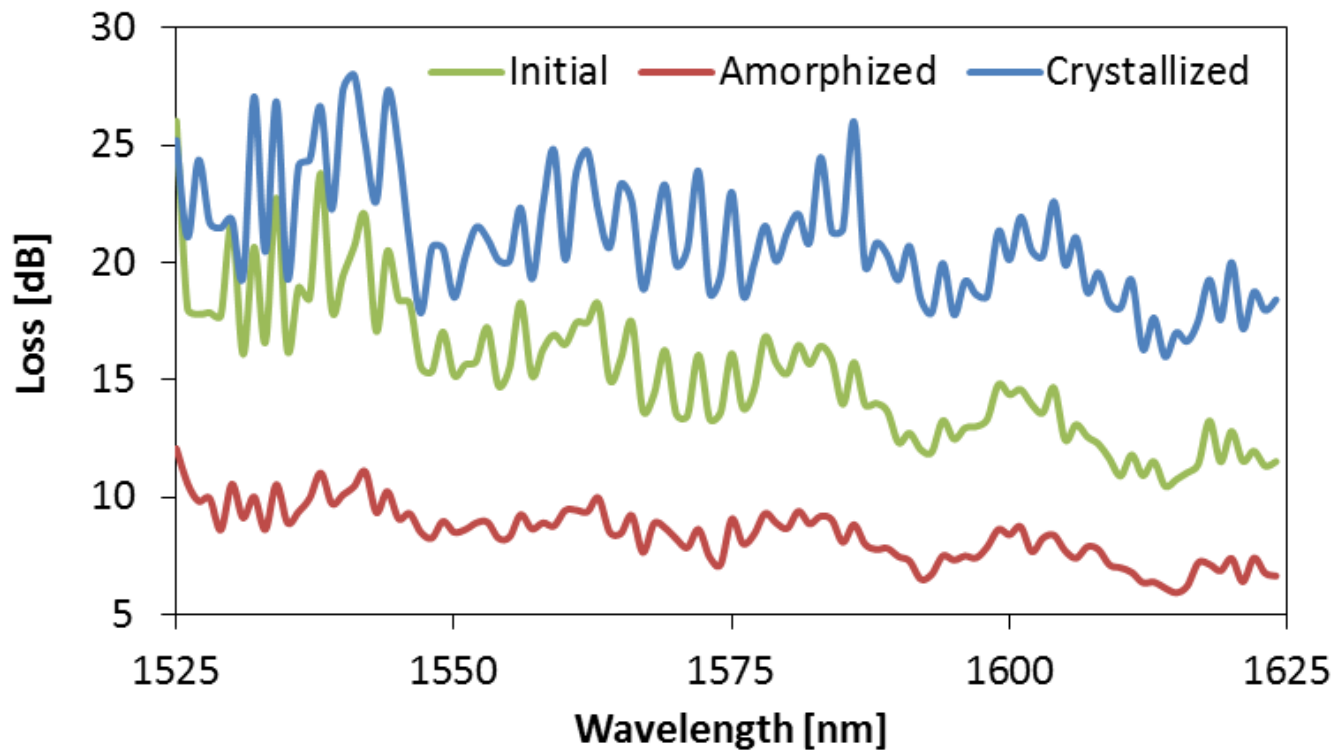


Daiki Tanaka, Yuya Shoji, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, Kenji Kintaka, Hitoshi Kawashima, Tatsuya Toyosaki, Yuichiro Ikuma, and Hiroyuki Tsuda, Optics Express Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283–10294 (2012).



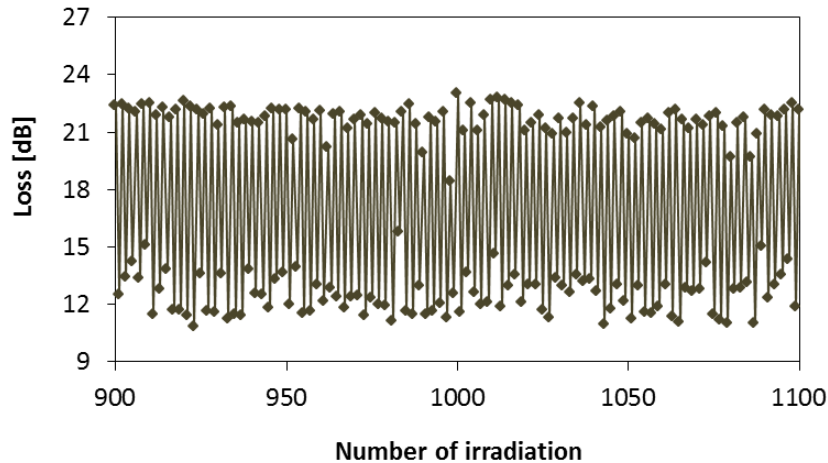
Crystallization pulse: width 400 ns, peak power 50 mW
Amorphization pulse: width 40 ns, peak power 160 mW

波長依存性



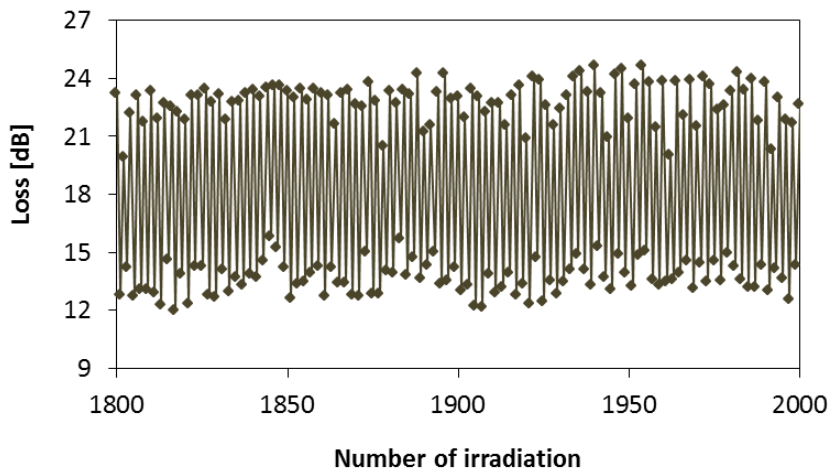
Daiki Tanaka, Yuya Shoji, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, Kenji Kintaka, Hitoshi Kawashima, Tatsuya Toyosaki, Yuichiro Ikuma, and Hiroyuki Tsuda, Optics Express Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283–10294 (2012).

繰り返し動作



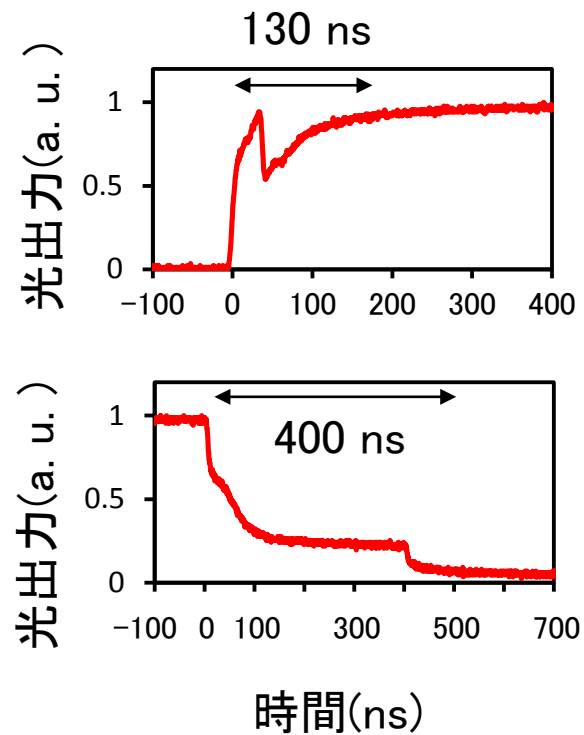
Extinction Ratio: 9.3 dB

Cycles: >2000

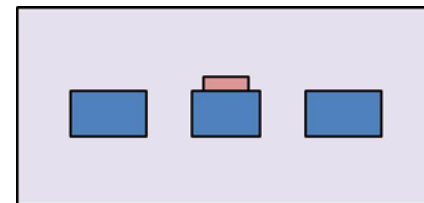
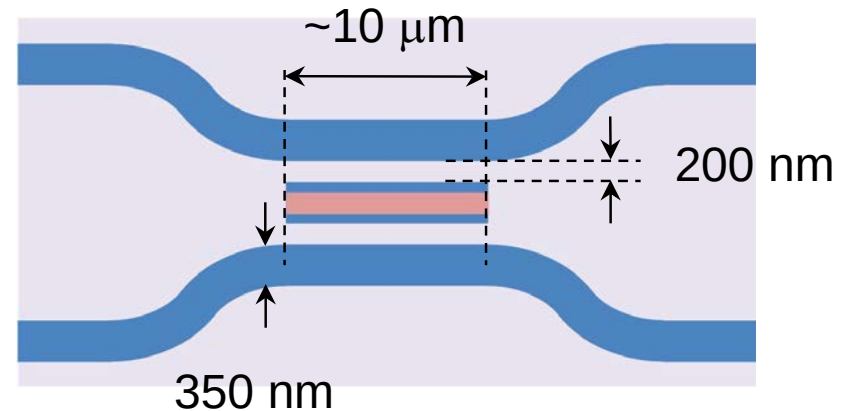
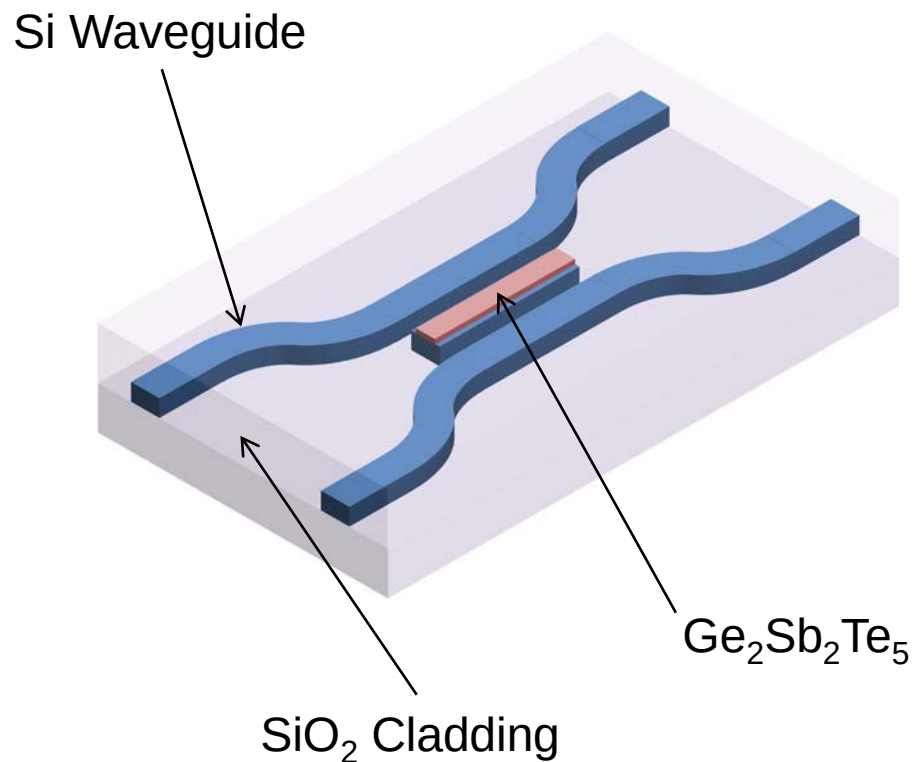


Daiki Tanaka, Yuya Shoji, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, Kenji Kintaka, Hitoshi Kawashima, Tatsuya Toyosaki, Yuichiro Ikuma, and Hiroyuki Tsuda, Optics Express Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283–10294 (2012).

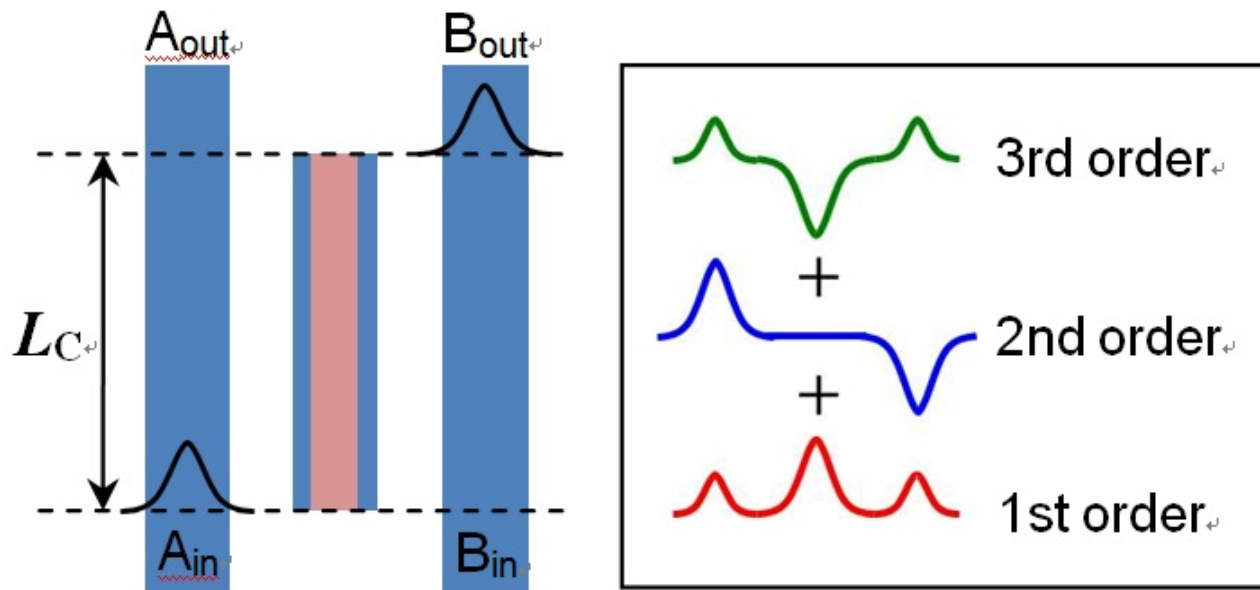
応答速度評価



2x2 スイッチ (3平行導波路型)



Directional coupling in three waveguides



Equation of each coupling length

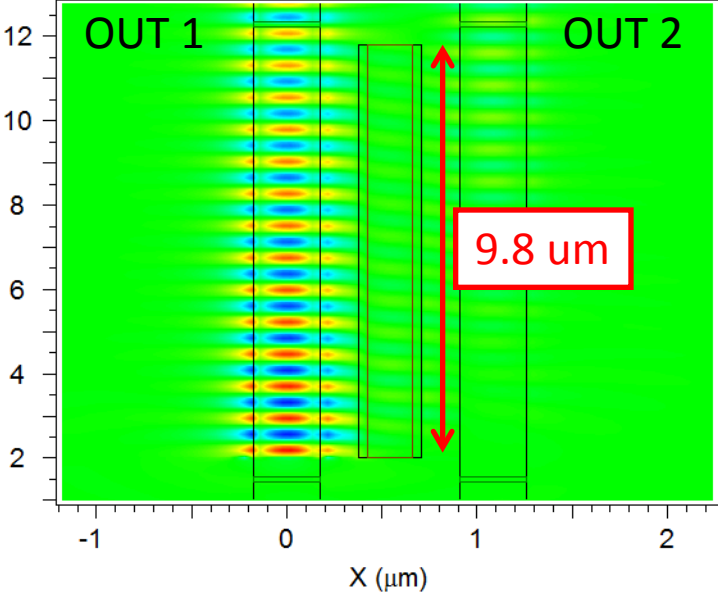
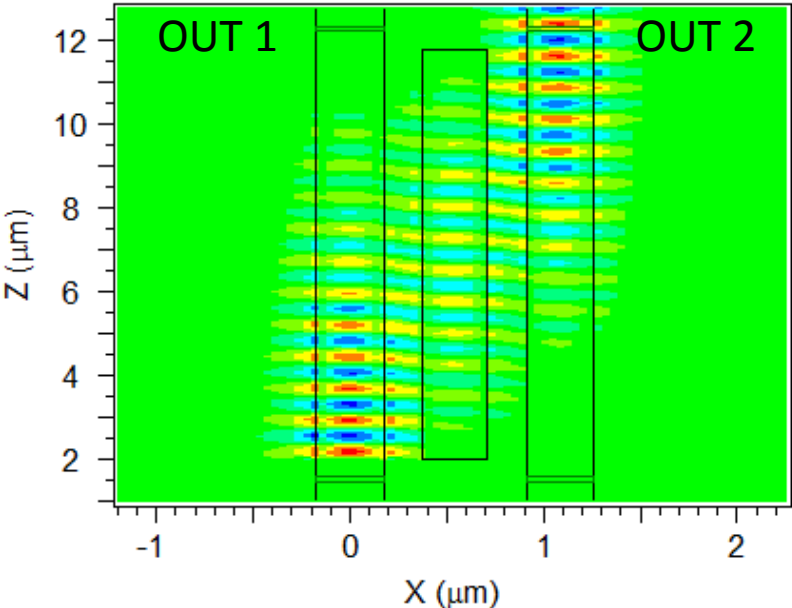
$$\left\{ \begin{array}{l} L_{12} = \frac{\lambda}{2(n_1 - n_2)} \\ L_{23} = \frac{\lambda}{2(n_2 - n_3)} \\ L_{13} = \frac{\lambda}{n_1 - n_3} \end{array} \right.$$

λ : wavelength
 n : effective refractive index of each mode

2x2 SW FDTD シミュレーション例

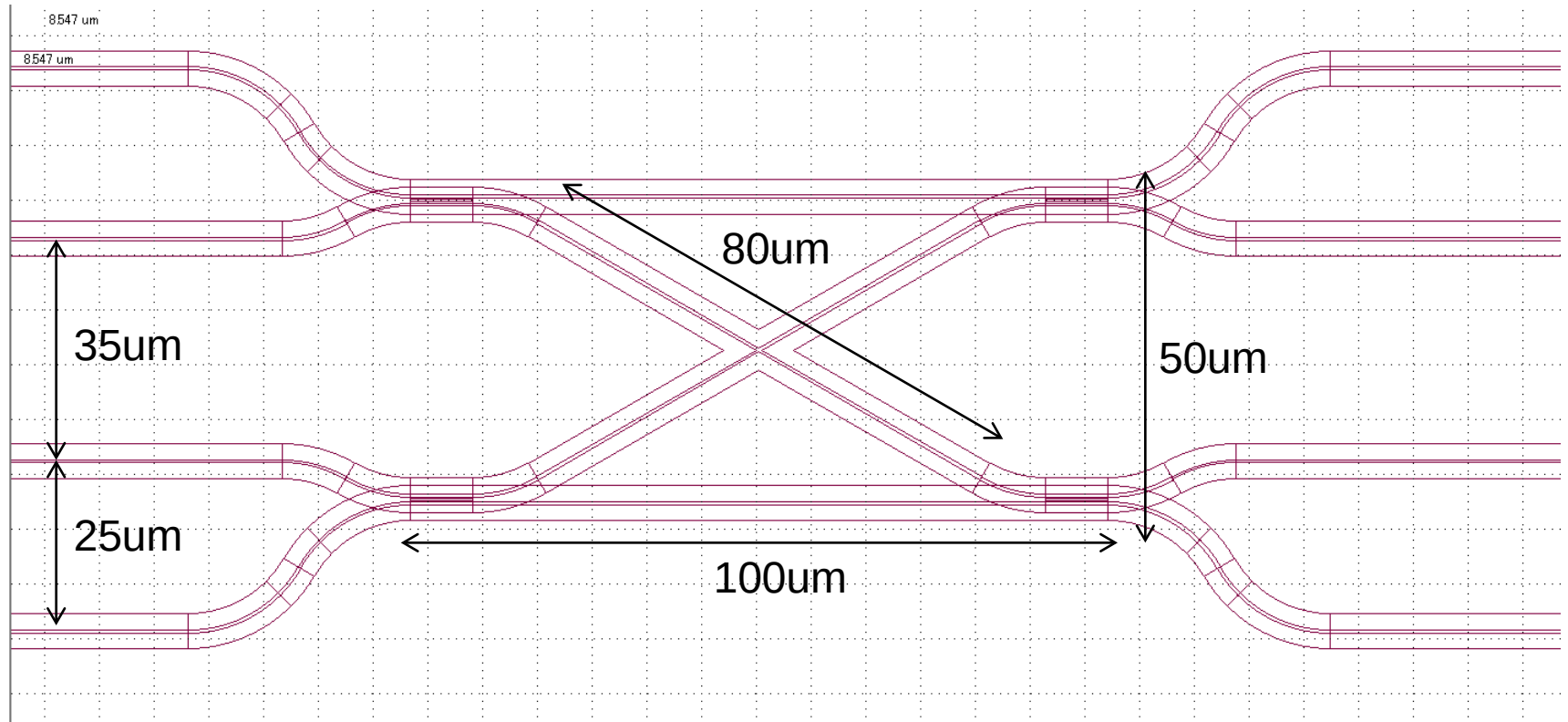
アモルファス状態

結晶状態



状態	OUT 1	OUT 2
amo	-21.0 dB	-0.5 dB
cry	-3.0 dB	-10.8 dB

ブロッキング4x4SWレイアウト例



現在、試作中

相変化材料を用いた自己保持型光スイッチまとめ

(1) 相変化材料を用いた光スイッチの提案

- 小型、高速、広帯域、かつ、自己保持特性

(2) MMI型光ゲートスイッチ

- スイッチング時間: 130 ns(アモルファス化)、400 ns(結晶化)
- 動作波長: 1525-1625 nm
- 消光比: 9.3 dB
- 繰り返しスイッチング回数: > 2000
- 相変化材料寸法: 1 $\mu\text{m}\phi$

(3) 2 x 2 Optical unit switch

- 相変化材料長: 9.8 μm (under fabrication)

超低消費電力光ノード実現に向けた超小型高速相変化光スイッチの研究開発

研究目的: Siフォトニクス技術とGeSbTe系の相変化材料を組み合わせた、スイッチング時間100ns以下、全長20ミクロン以下、かつ、自己保持機能を有する光スイッチを実現する。

Siフォトニクス技術

- ・Si細線導波路
- プラズモン共鳴

+

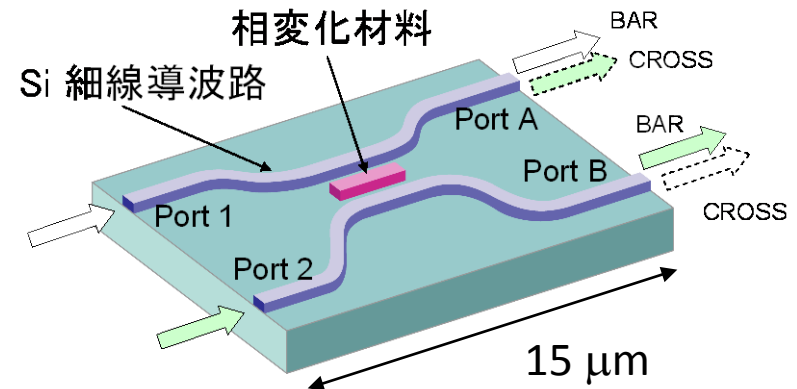
高速相変化
素過程の解明

相変化材料($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 等)

- ・メモリ性(DVD等で実用化)
- ・高速相変化(100ns、フェムト秒パルス)
- ・複素屈折率変化大(>30%)

新規光スイッチ(光制御型及び電気制御型)

- ・自己保持機能(低消費電力)
- ・高速性(100ns以下)
- ・超小型(全長20 μm 以下)→ 大規模化



期待される研究成果とその社会的意義

- 光ノード
- ・ルーティングの高速化 (石英、MEMS、液晶より高速)
 - ・高速スイッチングによるバッファメモリ削減→ノードの低消費電力化、低遅延化
 - ・自己保持機能によるスイッチング自体の低消費電力化



低遅延・省電力NWの実現と双方向通信サービスの隆盛

超低消費電力光ノード実現に向けた超小型高速相変化光スイッチの研究開発

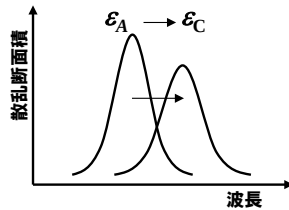
研究目的: Siフォトニクス技術とGeSbTe系の相変化材料を組み合わせた、スイッチング時間100ns以下、全長20ミクロン以下、かつ、自己保持機能を有する光スイッチを実現する。

研究開発の結果及び成果

相変化材料の検討

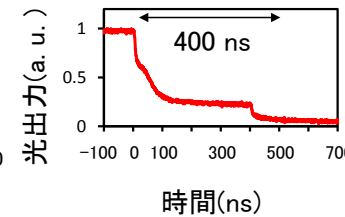
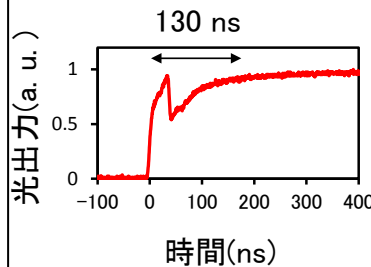
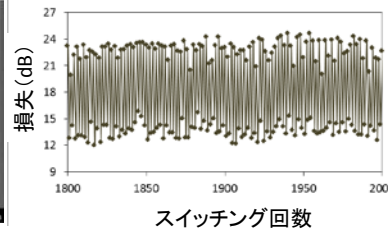
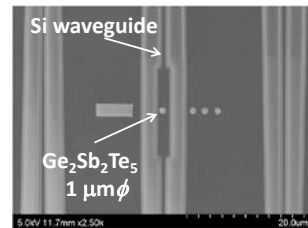
- ・系統的 material 探索
- ・金ナノ粒子による低しきい値化
- ・相変化メカニズムの理解

	GST 2-2-5	GST 1-2-4	GST 1-4-7	GST 10-2-13	InSb 1-1	SbTe 2-3
Amorphous n	4.39	4.5	4.9	3.95	5.19	6.67
Amorphous k	0.16	0.13	0.25	0.04	1.47	1.02
Crystalline n	7.25	6.2	6.75	7.51	4.12	7.69
Crystalline k	1.55	1.3	1.25	1.23	0.49	1.63
Optical SW	Δ	Δ	Δ	$\bigcirc$	Δ	$\times$



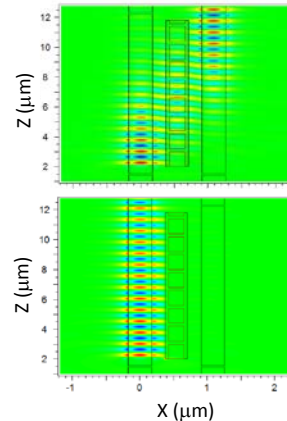
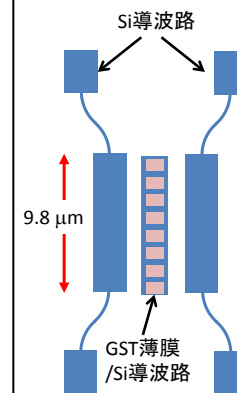
光ゲートスイッチの実現

- ・スイッチング速度 100ns
- ・ゲート部寸法 1μm
- ・スイッチング回数 > 2000回



2x2スイッチの設計

- ・相互作用長 9.8 μm
- ・消光比 > 18 dB
- ・損失 2.2 dB



研究成果の社会的意義・社会への波及効果

相変化光スイッチの特長

自己保持性(メモリ性)
高速性(LCOS, MEMSの置き換え)
超小型(大規模化の可能性)

次世代光NWへの適用

プロテクションスイッチ
光ノードの空間スイッチ

省電力、リアルタイムNWの実現
大容量・双方向サービスの隆盛