

# 相変化材料を用いた超小型通信用光機能回路の研究

慶應義塾大学 理工学部電気情報工学科 津田裕之

Ultra-small Photonic Functional Circuits Using Phase-change Material

Hiroyuki Tsuda

Department of Electronics and Engineering, Faculty of Science and Technology,  
Keio University

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  の複素屈折率と結晶化温度の Se 組成依存性を測定した。Se 添加により光スイッチに利用する場合の性能指数が向上した。得られた複素屈折率の値から、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  と  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  を用いたマッハツェンダー型および方向性結合型の光三端子スイッチの最適化設計を行い、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  薄膜を用いた光スイッチが  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  を用いた光スイッチに比較して良好な特性を示すことを明らかにした。

The complex index and the crystalline temperature of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  as a function of Se composition are measured. It is found that the figure of merit of the material for an optical switch is improved with doping of Se. With the obtained complex index values, the structures of Mach-Zehnder type and directional coupler type optical triode switches are optimized. The optical triode switch using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  has superior characteristics than these of the optical switch using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

## 1. はじめに

光ネットワークの大容量化／省電力化、再構成可能な光ネットワークノードを実現するために、超小型、かつ、省電力な光スイッチが不可欠である。相変化材料は、結晶相とアモルファス相間の相変化に伴って屈折率が数十%以上変化し、各相状態は室温で安定である。このため、相変化材料を用いた光スイッチは、超小型かつ自己保持性を有して省電力である<sup>1-4)</sup>。

本研究では、素子特性を改善するために、従来利用されてきた相変化材( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ )よりも通信波長帯において吸収が小さい  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  薄膜の物性<sup>5)</sup>を検討し、これらの材料を用いた3端子型光スイッチの特性をシミュレーションにより明らかにした。

## 2. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$ 薄膜

### a) 蒸着による $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$ 薄膜の作製と評価

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  に Se を添加し、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  に対する組成比で Se が 10%, 30%, 50% になるように、材料を粉碎、混合した。石英管に真空で封じ、750°C に昇温し、30分保持して攪拌する。さらに、750°C に昇温し、30分保持して合金化する。50% 添加した場合、理想的には、Ge:Sb:Te:Se = 20:20:50:10 [%] となる。作製した資料を EDX で分析した結果を表1に示す。Ge と Sb がずれているのは、エネルギースペクトルが重なって分離が難しいからであると思われる。

表 1 : Se 50% 添加した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  組成分析結果

元素	原子番号	ネット	質量 [%]	重量ノーマライズ [%]	原子数 [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Germanium	32	22134	11.64	11.64	17.93	0.32	2.72
Antimony	51	184219	25.26	25.26	23.20	0.70	2.78
Tellurium	52	384678	56.49	56.49	49.50	1.52	2.69
Selenium	34	6181	6.61	6.61	9.37	0.19	2.88
		<b>Sum:</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>		

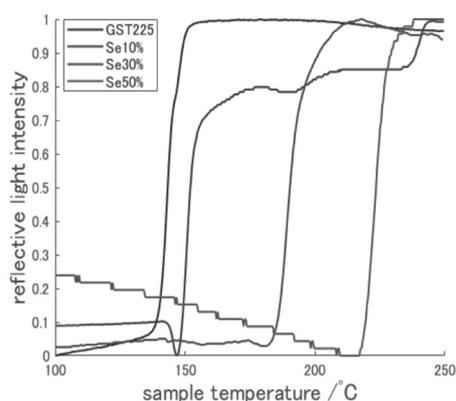


図 1 :  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  薄膜の反射率温度依存性

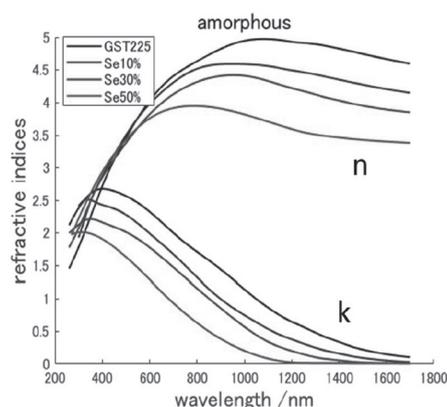


図 2 :  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

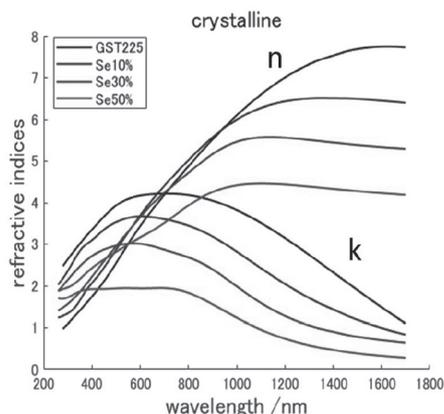


図 3 :  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  薄膜の複素屈折率 (結晶状態)

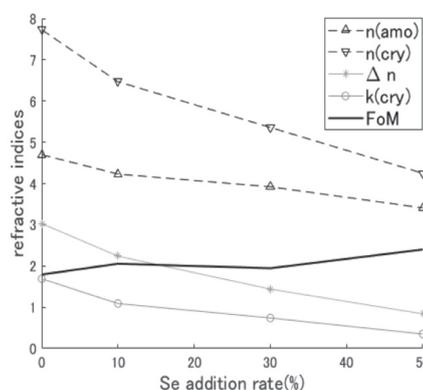


図 4 : FOM の Se 添加率依存性

合金を蒸着して薄膜を作製し、昇温に伴う反射率変化から結晶化温度を測定した。Ar ガス雰囲気中における  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$  薄膜の反射率温度依存性を図 1 に示す。Se 添加量の増大と共に結晶化温度が上昇していることが分かる。結晶化温度が高いと相状態が安定であるが、光スイッチに利用するときのスイッチングエネルギーが大きくなる。

エリプソメータを用いて測定した複素屈折率(アモルファス状態、結晶状態)を図 2 と図 3 に示す。また、波長 1500 nm における両状態の複素屈折率の実部、光スイッチの損失の原因となる結晶状態の複素屈折率の虚部、光スイッチに適用した場合の性能指数(FOM: Figure of Merit)を図 4 に示す。FOM は次式で与えられる。

$$FOM = \frac{\Delta n}{k_c} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta n$  は、アモルファス状態と結晶状態の複素屈折率の実部の変化、 $k_c$  は結晶状態の複素屈折率の虚部の値である。図4から、Seの添加量を増やした方が光スイッチの性能が向上することが分かる。

b) スパッタリングによる  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  薄膜の作製と評価

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  ターゲットを用意し、スパッタリングにより薄膜を作製した。結晶化温度は  $315^\circ\text{C}$  でかなり高温になっている。複素屈折率の評価を行った結果を図5と図6に示す。波長  $1550\text{ nm}$  での FOM は  $5.93$  であり、良好である。

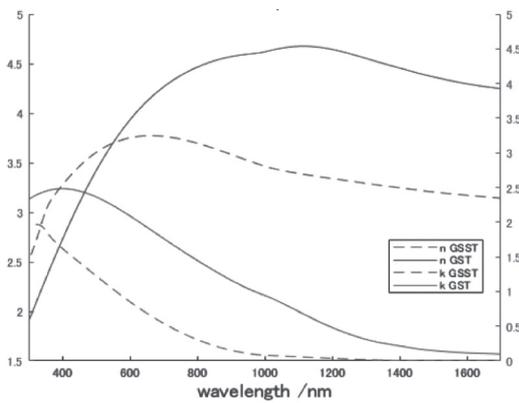


図5： $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

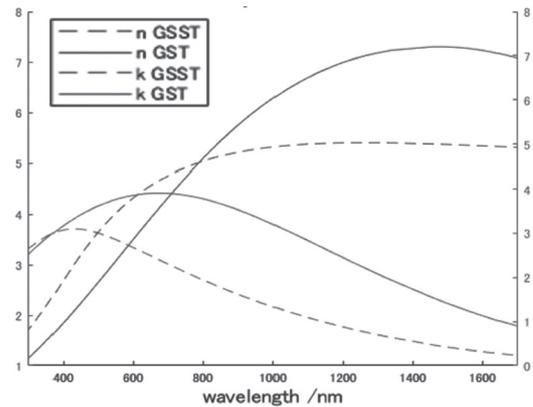


図6： $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

2. 三端子型光スイッチの設計

a) マッハツェンダー干渉計型光スイッチの設計

図7にマッハツェンダー干渉計型光スイッチ<sup>6)</sup>の構成を示す。プッシュプル動作のため、導波路長を2本のアームで僅かに変えて、 $\pi/2$ の位相差が設けられている。信号光は波長  $1550\text{ nm}$ 、制御光は波長  $1300\text{ nm}$  であり、制御光の入力ポートを有する3端子型<sup>7)</sup>の構成である。シリコン光導波路によって構成され、光導波路高さは  $210\text{ nm}$ 、標準的な導波路幅は  $450\text{ nm}$  であり、 $\text{SiO}_2$  に埋め込まれている。

2本のアーム上に交差導波路が設けられ、交差部に相変化材料が装荷されている。図8

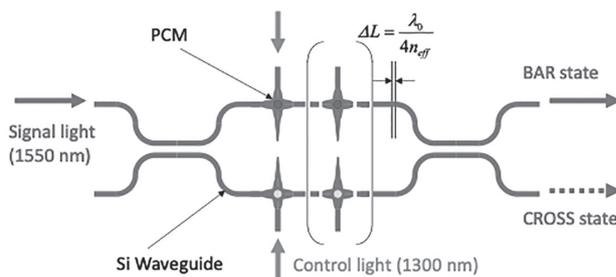


図7：マッハツェンダー干渉計型光スイッチの構成

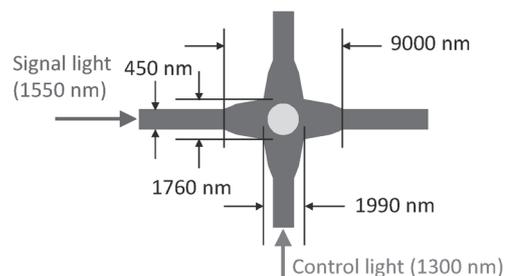


図8：交差部の拡大図

表 2 :  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) と  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) の複素屈折率

Material	GST				GSST			
	1300		1550		1300		1550	
Phase	Crystalline	Amorphous	Crystalline	Amorphous	Crystalline	Amorphous	Crystalline	Amorphous
Refractive Index	7.18+2.08i	4.57+0.340i	7.27+1.27i	4.33+0.129i	5.40+0.700i	3.29+0.018i	5.35+0.366i	3.19+0.0012i

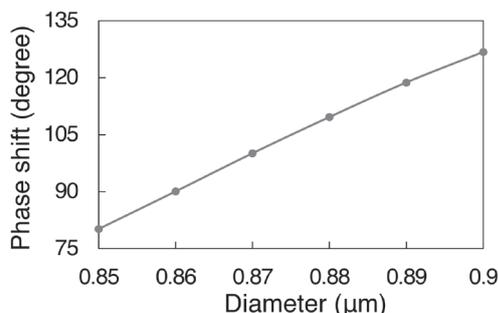


図 9 : 信号光位相シフトの GST 薄膜直径依存性

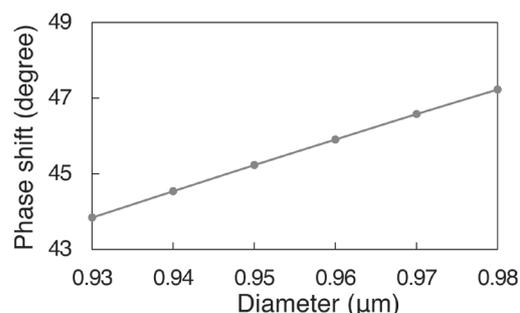


図 10 : 信号光位相シフトの GSST 薄膜直径依存性

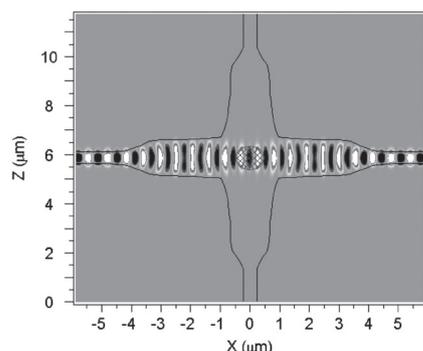


図 11 : 信号光伝搬シミュレーション (アモルファス状態)

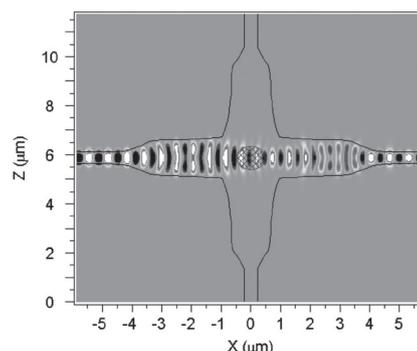


図 12 : 信号光伝搬シミュレーション (結晶状態)

は交差部の拡大図である。テーパ形状の導波路が交差することで損失を低減している。次に交差数と交差部構造の最適化を行った。相変化材料は、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) または  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) を利用した。薄膜の膜厚は、30 nm と仮定し、シリコン導波路の直上に積層されている。これらの材料の複素屈折率を表 2 に示す。図 9 と図 10 に GST と GSST 薄膜の場合に、円形の相変化材料薄膜の直径と信号光の相変化に伴う位相シフトの関係を示す。光伝搬計算は、3次元 FDTD (Finite-difference time-domain) 法により行った。

この結果から、GST の場合は各アームの交差数は 1 で、GST 薄膜の直径が  $0.86 \mu\text{m}$  のときに 90 度の位相シフトが得られる。GSST の場合は各アームの交差数は 2 で、GSST 薄膜の直径が  $0.95 \mu\text{m}$  のときに 45 度の位相シフトが得られる。交差部における信号光の透過損失は、GST の場合、アモルファス状態で 0.62 dB、結晶状態で 24.9 dB であった。また、GSST の場合の透過損失は、アモルファス状態で 0.07 dB、結晶状態で 2.95 dB であった。この結果から、GST は吸収損失が大きく、光スイッチを構成することが困難であることが分かる。GSST がアモルファス状態の場合の光伝搬を図 11、結晶状態の場合の光伝搬を図 12 に示す。この交差構造を用いて三端子型光スイッチを構成すると、光スイッチの透過損失は、2.55 dB、消光比は 12.46 dB であった。

b) 方向性結合型光スイッチの設計

図 13 に方向性結合型光スイッチ<sup>8)</sup>の構造を示す。中央の導波路上に厚さ 30 nm の相変化材料薄膜が装荷され、両側から制御光が入力される。相変化材料が結晶状態のとき、BAR 接続、アモルファス状態のとき、CROSS 接続となる。相変化材料薄膜の両端は急激な等価屈折率変化を避けるために鋭角の鋸形状となっている。また、相変化材料との相互作用を増やすために、制御光は TM モードとしている。シリコン導波路の高さは 210 nm であり、幅の一覧を表 3 に示す。

GST と GSST の場合について、損失とクロストークの観点から、平行導波路長  $L$  の最適化を行った。その結果、GST の場合の最適長は  $1.0 \mu\text{m}$ 、GSST の場合の最適長は  $5.2 \mu\text{m}$  であった。GST を利用した光スイッチにおいて、GST がアモルファス状態の場合の光伝搬を図 14、結晶状態の場合の光伝搬を図 15 に示す。光スイッチが CROSS 接続状態の透過損失は 2.3 dB、消光比は 11.8 dB、BAR 接続状態の透過損失は 2.9 dB、消光比は 11.9 dB であった。

一方、GSST を利用した光スイッチにおいて、GSST がアモルファス状態の場合の光伝搬を図 16、結晶状態の場合の光伝搬を図 17 に示す。光スイッチが CROSS 接続状態の透過損失は 1.4 dB、消光比は 14.1 dB、BAR 接続状態の透過損失は 1.5 dB、消光比は 10.4 dB であった。

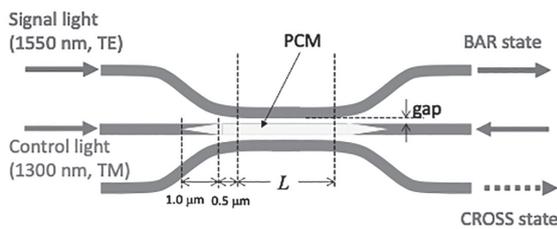


図 13：方向性結合型光スイッチの構造

表 3：各部導波路幅

	Outer Waveguide Width (nm)	Center Waveguide Width (nm)	Gap Width (nm)
GST	300	280	200
GSST	350	335	200

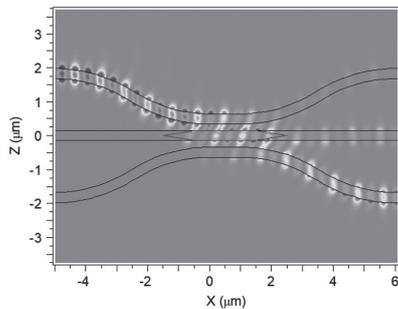


図 14：信号光伝搬シミュレーション (GST, CROSS 接続)

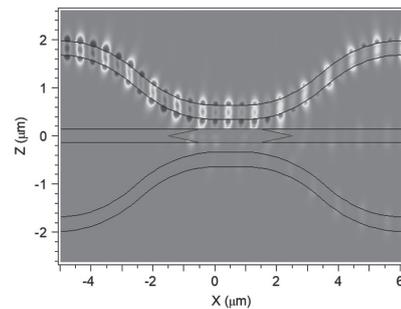


図 15：信号光伝搬シミュレーション (GST, BAR 接続)

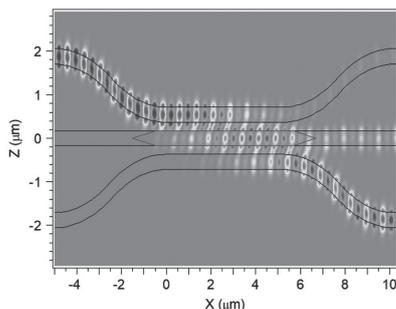


図 16：信号光伝搬シミュレーション (GSST, CROSS 接続)

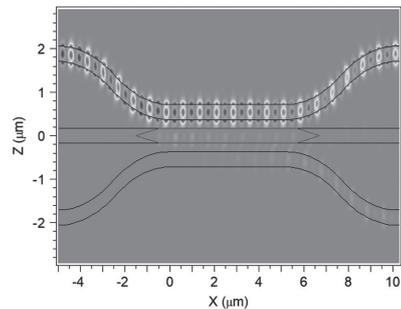


図 17：信号光伝搬シミュレーション (GSST, BAR 接続)

#### 4. まとめ

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  に対する Se の添加量を増大させると、結晶状態の吸収係数が減少し、光スイッチに应用する場合の性能指数が増大することを明らかにした。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  と  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  を用いた、マッハツェンダー型および方向性結合型の光三端子スイッチの最適化設計を実施した。その結果、マッハツェンダー型スイッチでは、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  は吸収が大きくて適さず、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  を用いる必要があることが分かった。この構成のスイッチでは、光スイッチの透過損失は 2.55 dB、消光比は 12.46 dB であった。方向性結合型スイッチでは、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  を用いる場合、CROSS 接続状態の透過損失は 1.4 dB、消光比は 14.1 dB、BAR 接続状態の透過損失は 1.5 dB、消光比は 10.4 dB が得られることが分かった。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  に Se を添加した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  を用いることで光スイッチの性能が向上することを明らかにした。

#### 5. 謝辞

本研究は、平成 30 年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものです。同助成会に大変感謝致します。また、本研究の実験とシミュレーションを実行した坂本健太君に感謝します。

#### 6. 参考文献

- 1) H. Tsuda, The 19 th Symposium on Phase Change Optical Information Storage, Proceedings, pp. 39-42, November 29-30, Atami, Japan (2007).
- 2) D. Tanaka, Y. Shoji, M. Kuwahara, X. Wang, K. Kintaka, H. Kawashima, T. Toyosaki, Y. Ikuma, and H. Tsuda, Optics Express, Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283–10294 (2012).
- 3) K. Kato, M. Kuwahara, H. Kawashima, T. Tsuruoka, and H. Tsuda, Appl. Phys. Exp., Vol. 10, No. 7, pp. 072201 (2017).
- 4) Y. Zhang, J. B. Chou, J. Li, H. Li, Q. Du, A. Yadav, S. Zhou, M. Y. Shalaginov, Z. Fang, H. Zhong, C. Roberts, P. Robinson, B. Bohlin, C. Ríos, H. Lin, M. Kang, T. Gu, J. Warner, V. Liberman, K. Richardson and J. Hu, Nature Communications, DOI: 10.1038/s41467-019-12196-4.
- 5) K. Sakamoto, M. Kuwahara, R. Endo and H. Tsuda, The Symposium on Phase Change Oriented Science 2019, P. 7, Nov. 28-29, Shizuoka, Japan, (2019).
- 6) T. Moriyama, D. Tanaka, P. Jain, H. Kawashima, M. Kuwahara, X. Wang, and H. Tsuda, IEICE Electron. Express, Vol. 11, No. 15, pp. 20140538 (2014).
- 7) H. Tsuda and T. Kurokawa, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 1, pp. 449-451 (1989).
- 8) Y. Ikuma, T. Saiki, and H. Tsuda, IEICE Electron. Express Vol. 5, No. 12 pp. 442-445 (2008).