

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01501

研究課題名（和文）大規模光ネットワーク構成に向けた相変化型省電力光スイッチの研究

研究課題名（英文）Study on phase-change energy efficient optical switch for large-scale photonic network systems

研究代表者

津田 裕之（Tsuda, Hiroyuki）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：90327677

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：相変化光スイッチに用いるGeSbTe合金にSeを添加して、波長1500 nmにおける吸収を低減し、光スイッチを低損失化できることを明らかにした。Seを添加したGeSbTe薄膜の複素屈折率（アモルファス状態、結晶状態）評価により、相変化光スイッチの性能指数も向上することも明らかにした。相変化材料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、従来の設計に比較して良好な特性を示すことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相変化材料を用いた光スイッチの研究は、研究代表者のグループが世界に先駆けて開始し、先導的な立場にある。相変化材料は相変化に伴う屈折率変化が大きいため、超小型の光スイッチが構成可能であり、多数の光スイッチをシリコン基板上に集積可能である。相変化光スイッチの性能を向上させ、相変化光スイッチを光ネットワークノードにおける光信号のスイッチングに利用することによって、光ネットワークの省電力化、高性能化が期待される。

研究成果の概要（英文）：It was found that the loss of the phase-change optical switch could be reduced using Se doped GeSbTe alloy with reduction of absorption at a wavelength of 1500 nm. We had measured the complex index of Se doped GeSbTe thin film and confirmed that the figure of merit of the switch was also improved. We proposed optical triode using phase-change material with Mach-Zehnder interferometer configuration and with directional coupler configuration. Both structures were optimized, and they had better characteristics compared to the switch with the conventional design.

研究分野：光機能素子

キーワード：光スイッチ 光導波路 相変化材料 光回路 光三端子素子

1. 研究開始当初の背景

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。研究代表者は、世界で初めて相変化材料を用いた超小型省電力光スイッチを動作実証し、相変化のメカニズム解明、フェムト秒パルスによる超高速相変化の観測などを行ってきた。(図1参照)2000回以上のスイッチング動作を確認している。

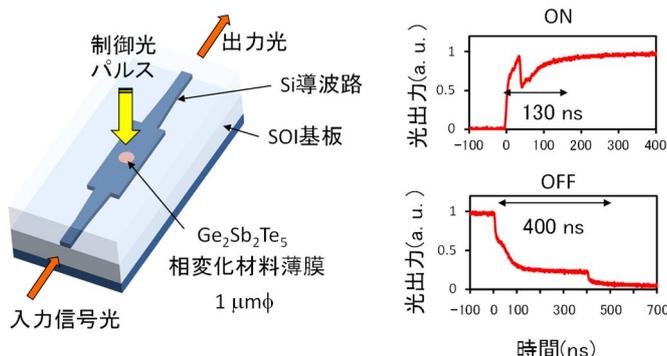


図1：相変化材料を用いた光ゲートスイッチ

過去の研究を調査すると、2006年にDavid Strandからテレコム波長帯における光通信用デバイスの可能性が報告されている。2015年には、我々の相変化光スイッチの報告に続いて、W. H. P. Perniceのグループが同様の構造で導波路型多値光メモリ(W. H. P. Pernice et al., Nature Photon., 9, 725(2015))を発表している。我々の研究チームは、相変化光スイッチを世界に先駆けて実現して動作実証を行うなど、本研究分野において先導的な立場にある。本研究は、相変化材料の相変化メカニズムを基礎的な側面から検討して材料設計に反映させ、光通信ネットワークからの要求条件に応えるようにデバイス設計を行い、最先端のAr液浸フォトリソグラフィを用いて高精度な素子作製を行うことに特徴がある。

光スイッチの特性比較を表1に示す。相変化光スイッチは、相変化材料の屈折率変化が非常に大きい素子の専有面積を従来型スイッチの1/100~1/1000以下にできること、スイッチング速度が数百nsと比較的高速であること、また、スイッチに自己保持性があり、スイッチング頻度が少ない場合は極めて低消費電力となることが特長である。これらの特性は、既存の材料を用いた光スイッチでは、材料の屈折率変化が小さく、メモリ性も無いので実現不可能である。

表1：光スイッチの特性比較

導波路材料	屈折率変化	素子長 (位相シフト部)	スイッチング 速度	消費電力	自己保持性
石英	0.05%	1000 μm	10 ms	100 mW	無し
ニオブ酸リチウム	0.05%	1000 μm	ns	20 mW	無し
化合物半導体 シリコン	0.2%	250 μm	ns	20 mW	無し
相変化	10~50%	1-5 μm	数100 ns 非熱的過程でps	1 mW (1秒間に10 ⁶ 回 スイッチング)	有り

2. 研究の目的

本研究は、光ネットワークの大容量化/省電力化、再構成可能な光ノードの実現に向けて相変化光スイッチの高性能化を目的としている。特に、光スイッチの低損失化、高消光比化、及び、小型化が必須である。現状の特性は、光ネットワークシステム側からの要求に対して、大きな開きがある。光スイッチの損失がカプラによる分岐損よりも小さい場合に信号をスイッチングする効果が大きくなる。そのため、光スイッチの損失は、3 dB以下であることが望ましい。複数の光信号の混信による信号劣化が無視できる水準は、光信号の波長が近接している場合にクロストークが-40 dB以下、十分に離れている場合に-20 dB以下である。表1に示すように、相変化光スイッチは原理的に小型であるが、外部からの制御光を導く構造や制御用電流を注入する構造を小型化する設計も重要である。

3. 研究の方法

(1) 相変化材料の低損失化

従来利用されてきた相変化材料GST225($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$)にSeを添加することにより、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_5$ - x 合金を作製し、通信波長帯における結晶状態の吸収係数を低減させることを検討した。

(2) 3端子型相変化光スイッチの構造最適化

光制御型の光スイッチでは、制御光を信号光と分離して相変化材料に照射する構造を設けることによって、光3端子素子が構成される。マッハツェンダー型及び方向性結合型の2種類の3端子型光スイッチの構成を提案し、構造最適化を行うとともに、光スイッチング特性をシミュレーションにより明らかにした。

4. 研究成果

(1) 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 に昇温し、30分保持して攪拌する。さらに、750 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、 $\text{Ge}:\text{Sb}:\text{Te}:\text{Se} = 20:20:50:10$ [%] となる。作製した資料を EDX で分析した結果を表 2 に示す。Ge と Sb の組成がずれているのは、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 2 : 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
		Sum:	100.00	100.00	100.00		

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 2 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。

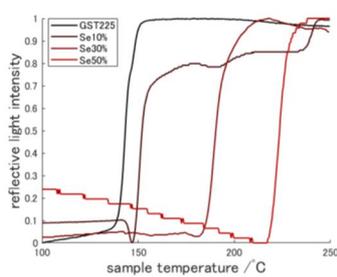


図 2 : $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$ 薄膜の反射率温度依存性

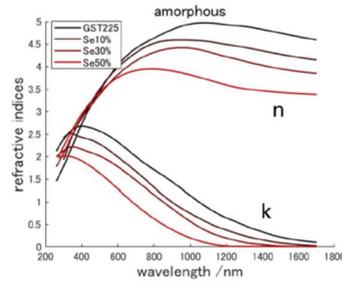


図 3 : $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$ 薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

エリブ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 3 と図 4 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 n/kc で与えられる。ここで、 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、 kc は結晶状態の複素屈折率の虚部の値である。図 5 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。

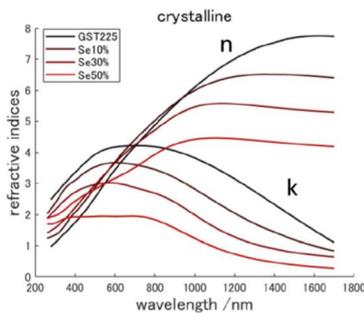


図 4 : $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_x\text{Te}_{5-x}$ 薄膜の複素屈折率 (結晶状態)

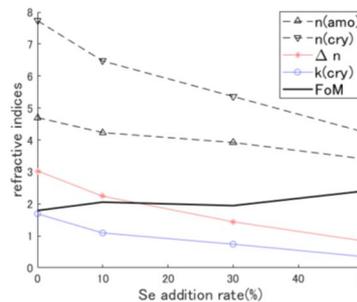


図 5 : FOM の Se 添加率依存性

(2) 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 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 6 と図 7 に示す。波長 1550 nm での FOM は 5.93 であり、良好である。

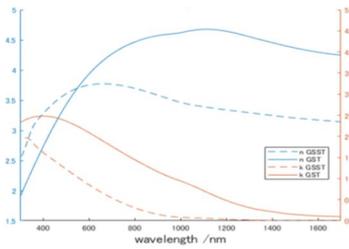


図 6 : Ge₂Sb₂Se₄Te₁ 薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

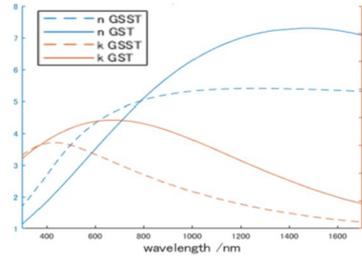


図 7 : Ge₂Sb₂Se₄Te₁ 薄膜の複素屈折率 (アモルファス状態)

(3) マッハツェンダー干渉計型光スイッチの設計

図 8 にマッハツェンダー干渉計型光スイッチの構成を示す。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 nm、制御光は波長 1300 nm であり、制御光の入力ポートを有する三端子型の構成である。シリコン光導波路によって構成され、光導波路高さは 210 nm、標準的な導波路幅は 450 nm であり、SiO₂ に埋め込まれている。

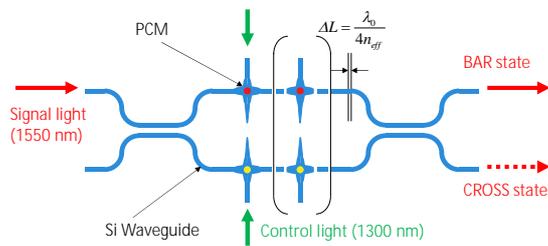


図 8 : マッハツェンダー干渉計型光スイッチの構成

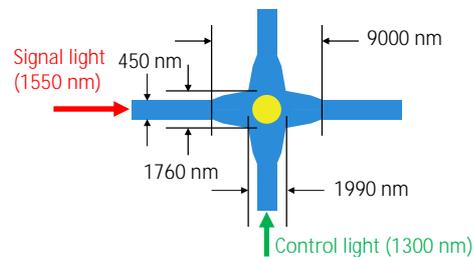


図 9 : 交差部の拡大図

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 9 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、Ge₂Sb₂Te₅ (GST) または Ge₂Sb₂Se₄Te₁ (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 3 に示す。図 10 と図 11 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。

表 3 : Ge₂Sb₂Te₅ (GST) と Ge₂Sb₂Se₄Te₁ (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

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 μm 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 μm 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 2.95dB 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 12、結晶状態の場合の光伝搬を図 13 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。

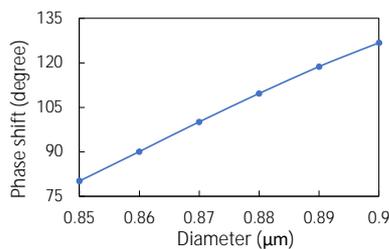


図 10 : 信号光位相シフトの GST 薄膜直径依存性

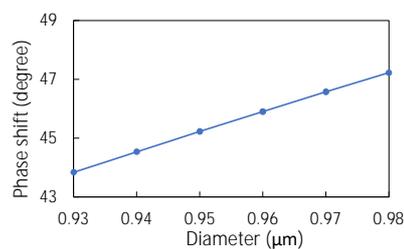


図 11 : 信号光位相シフトの GSST 薄膜直径依存性

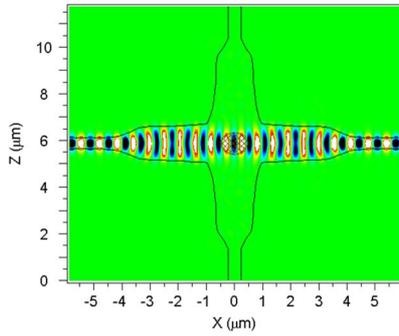


図 1 2 : 信号光伝搬シミュレーション (アモルファス状態)

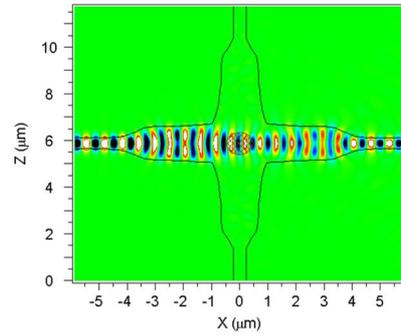


図 1 3 : 信号光伝搬シミュレーション (結晶状態)

(4) 方向性結合型光スイッチの設計

図 1 4 に方向性結合型光スイッチの構造を示す。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光三端子構成である。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 4 に示す。

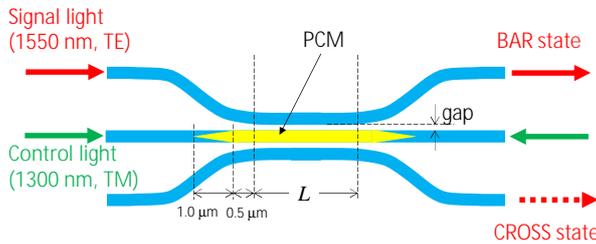


表 4 : 方向性結合型光スイッチの導波路、導波路間隔

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

図 1 4 : 方向性結合型光スイッチの構造

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 μm 、GSST の場合の最適長は 5.2 μm 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 1 5、結晶状態の場合の光伝搬を図 1 6 に示す。光スイッチが CROSS 接続状態の透過損失は 2.3dB、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。

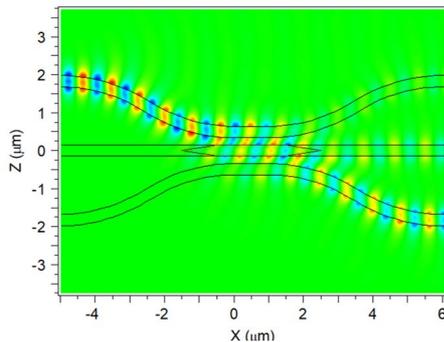


図 1 5 : 信号光伝搬シミュレーション (GST, CROSS 接続)

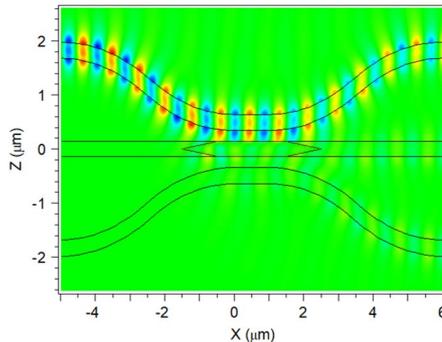


図 1 6 : 信号光伝搬シミュレーション (GST, BAR 接続)

一方、GSST を利用した光スイッチにおいて、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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Fumi Nakamura, Kyosuke Muramatsu, Keijiro Suzuki, Ken Tanizawa, Minoru Ohtsuka, Nobuyuki Yokoyama, Kazuyuki Matsumaro, Miyoshi Seki, Keiji Koshino, Kazuhiro Ikeda, Shu Namiki, Hitoshi Kawashima, and Hiroyuki Tsuda	4. 巻 26
2. 論文標題 Integrated silicon photonic wavelength-selective switch using wavefront control waveguides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 13573-13589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.013573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumi Nakamura, Hideaki Asakura, Keijiro Suzuki, Ken Tanizawa, Minoru Ohtsuka, Nobuyuki Yokoyama, Kazuyuki Matsumaro, Miyoshi Seki, Keiji Koshino, Kazuhiro Ikeda, Shu Namiki, Hitoshi Kawashima, and Hiroyuki Tsuda	4. 巻 15
2. 論文標題 Silicon Photonics based 1×2 Wavelength Selective Switch Using Fold-Back Arrayed-Waveguide Gratings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20180532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.15.20180532	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryogo Kubo, Marino Matsunaga, Takahiro Shobudani, Takuto Fujimoto, Hiroyuki Tsuda, Makoto Sudo, Tadashi Hajikano, Yasunori Tomomatsu, Katsumi Yoshizawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Demonstration of 10-Gbit/s transmission over G.652 fiber for T-band optical access systems using quantum-dot semiconductor devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20180810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.15.20180810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakamoto Kenta, Kuwahara Masashi, Tsuda Hiroyuki	4. 巻 11276
2. 論文標題 Figure of merit of phase change materials for Mach-Zehnder interferometer-based and directional-coupler-based optical switches	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PROCEEDINGS OF SPIE	6. 最初と最後の頁 1127604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2545700	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuda Hiroyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Silicon photonics platforms for optical communication systems, outlook on future developments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20202002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.17.20202002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yudai Okuno, Koki Sugiyama, Tadashi Hajikano, Yasunori Tomomatsu, Katsumi Yoshizawa and Hiroyuki Tsuda
2. 発表標題 Polarization Diversity Circuit Using Photonic Crystal Waveplates for 1.2- μm Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers
3. 学会等名 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsutaka Sato and Hiroyuki Tsuda
2. 発表標題 Low-Crosstalk Multistage Silicon Wavelength Multi/Demultiplexer
3. 学会等名 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayata Kobayashi and Hiroyuki Tsuda
2. 発表標題 Spatial Mode Multiplexer for 35 Single Mode Fibers to the 7-Core, 5-Mode Fiber
3. 学会等名 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Shobudani, Risa Kawashima, Takuto Fujimoto, Ryogo Kubo, Hiroyuki Tsuda, Makoto Sudo, Tadashi Hajikano, Yasunori Tomomatsu, and Katsumi Yoshizawa
2. 発表標題 Integrated Passive Optical Local-Area and Access Network Architecture Using T/O-band Wavelength Routing System
3. 学会等名 Microoptics Conference (MOC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 克賢、津田 裕之
2. 発表標題 低クロストーク多段構成シリコン合分波器
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会4月研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小原 遼太郎、津田 裕之
2. 発表標題 光空間スイッチングと波長ルーティングを用いたデータセンタネットワーク構成法の検討
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会4月研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 颯、津田 裕之
2. 発表標題 相変化材料膜による光波面制御の検討
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会4月研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保亮吾、津田裕之、須藤誠、初鹿野圭、友松泰則、吉沢勝美
2. 発表標題 T/Oバンドを用いた1081チャンネル波長ルーティング技術
3. 学会等名 2018年電子情報ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 颯、津田裕之
2. 発表標題 7コア、5モードファイバ用空間モード多重器の設計
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chencen Liu、Hiroyuki Tsuda
2. 発表標題 Polarization Independent Silicon Arrayed Waveguide Gratings Using Polarization Rotator
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井 滋彬、津田 裕之
2. 発表標題 サブ波長構造を用いたシリコン偏光回折格子の作製
3. 学会等名 第66回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本 健太、桑原 正史、遠藤 理恵、津田 裕之
2. 発表標題 Ge2Sb2Te5の屈折率に対するSe添加の影響
3. 学会等名 第66回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮 正篤、津田 裕之
2. 発表標題 LCoS-SLMを用いた広角光線走査
3. 学会等名 第66回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	神成 文彦 (Kannari Fumihiko) (40204804)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	
研究分担者	桑原 正史 (Kawahara Masashi) (60356954)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	斎木 敏治 (Saiki Toshiharu) (70261196)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	河島 整 (Kawashima Hitoshi) (90356840)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・総括研究主幹 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関