

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02198

研究課題名（和文）ゲルマニウム中赤外光回路を用いたオンチップ分子センシングの基盤構築

研究課題名（英文）On-chip molecular sensing using Ge mid-infrared photonic integrated circuit

研究代表者

竹中 充（Takenaka, Mitsuru）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：20451792

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：Ge-on-insulator (GeOI)プラットフォームを用いたセンシング用Ge光集積回路の研究を推進した。導波損失を約10分の1まで低減したGe導波路を実現し、センシングに必要な導波路素子を実現した。キャリア注入型Ge光変調器の研究においては、固相ドーピングを用いて変調効率を大幅に改善するとともに、プラズマ分散効果を用いた光位相変調にも初めて成功した。結晶欠陥を用いた受光器をGeOI基板上で初めて実証するとともに、雪崩増幅による高感度動作を始めて実証した。これにより、Ge中赤外光回路を用いた小型かつ高感度な分子センサチップを実現する基盤技術の構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Geは中赤外波長全域で透明であることから、中赤外集積回路の導波路材料として期待されている。本研究を通じて、Ge導波路の導波損失の低減手法を確立したことで、低損失Ge導波路が実現された。これにより、様々な超小型導波路素子の作製が可能となった。光集積回路中の光信号の変調に用いる光変調器においても、強度変調の効率改善に加えて、位相変調にも初めて成功した。結晶欠陥準位を介した受光器の実証に成功した。これらの素子を一体集積することで、ウェアラブルデバイスに搭載可能な光センサーチップや光通信、コンピューティングへの応用が期待されることから、学術的だけでなく社会的にも意義の大きい研究成果となった。

研究成果の概要（英文）：We have conducted research on Ge photonic integrated circuits for sensing using a Ge-on-insulator (GeOI) platform. We have successfully reduce the propagation loss of the Ge waveguide by a factor of about 10, enabling various Ge waveguide elements required for sensing. In the study of carrier-injection Ge optical modulators, the modulation efficiency was greatly improved using solid-phase doping, and optical phase modulation using the plasma dispersion effect was also successfully achieved for the first time. A defect-mediated photodetector was demonstrated on a GeOI platform, and high-sensitivity operation by avalanche amplification was demonstrated for the first time.

As a result, we have successfully established the basic technology for realizing small and highly sensitive molecular sensor chips using Ge mid-infrared photonic circuits.

研究分野：光集積回路

キーワード：光集積回路 中赤外光 ゲルマニウム センシング 光通信 コンピューティング

### 1. 研究開始当初の背景

近年、中赤外光を用いた様々なセンシング技術に注目が集まっている。特に、各種分子は波長  $2\ \mu\text{m}$  から  $15\ \mu\text{m}$  の中赤外光に対して分子振動に応じた固有の光吸収を有する。このことから中赤外光を用いた分子センシングは医療や創薬向けセンサ、ガスセンサ、環境モニタ、食品モニタなど幅広い応用範囲が期待されている。しかし、中赤外光を用いたセンシングは大型で高価な計測器を必要とし、利活用が進んでいない。このため、小型かつ高感度の分子センサを安価で大量に製造できる技術が求められており、中赤外光回路を用いたオンチップ分子センサの研究が急速に立ち上がりつつある。特に光通信向けに大幅に進化したシリコンフォトニクス技術を用いた種々のシリコン (Si) 中赤外光回路が報告されている。一方、に示すように、Si は波長  $8\ \mu\text{m}$  より長波では吸収が大きく、中赤外全域で動作する光回路を実現できない。このことから、近年ゲルマニウム (Ge) に注目が集まっている。Ge は中赤外全域で透明なことから中赤外光導波路材料として理想的と言える。しかし、Ge 導波路を用いた光回路の研究は端緒についたばかりであり、数多くの研究課題を抱えている。これまでに Ge をコア材料とした種々の中赤外光導波路が提唱・報告されているが、Ge 光導波路の光損失の物理的起源は充分には理解されていない。導波路側壁荒れによる光損失に加えて、Ge 薄膜集積時に生じる結晶欠陥により発生する残留ホールによる自由キャリア吸収も損失要因と考えられる。Ge 光導波路における光損失の物理的起源を明らかにし、どこまで低損失化できるかを理解することは、種々の大規模光回路を実現する上で本質的に重要である。また、高感度オンチップ分子センシングを実現する為には、中赤外光変調器および中赤外光検出器を一体集積して、ロックイン検波することが有効である。しかし、Ge 光導波路を用いた中赤外光変調器の報告例は少なく、変調原理も含めてセンシングに適した Ge 中赤外光変調器は未開拓である。Ge 光導波路と一体集積した中赤外光検出器についても報告例はなく、中赤外光に適した検出原理から研究を進めることが必須である

以上のことから、Ge 中赤外光回路を用いたオンチップ分子センシングを実現する為には、中赤外波長域における Ge 光導波路の光損失要因解明と低損失化、Ge 光導波路を用いた光変調・検出原理の探求が極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が提唱・研究を進めてきた、Ge-on-insulator (GeOI) 中赤外光回路プラットフォーム (図 1a) を使い、中赤外波長を用いた光センシングにより様々な分子を検出可能な革新的分子センサチップ (図 1b) を実現するための基盤技術構築を目指した。

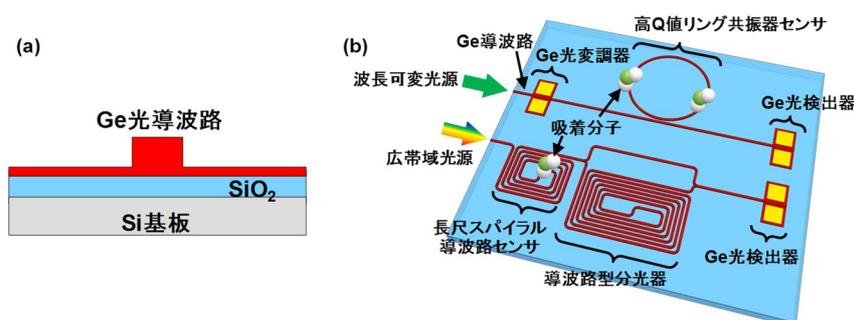


図 1. (a) 研究代表者が提唱・実証を進めてきた Ge-on-insulator (GeOI) 中赤外光回路プラットフォームおよび(b)本提案で実現を目指す分子センサ概念図。

### 3. 研究の方法

以下、各項目について研究内容を詳細に述べる。

#### 低損失Ge光導波路

これまで研究代表者が研究を進めてきた GeOI 基板上的単一モード Ge 光導波路の損失は  $17\ \text{dB/cm}$  と大きい。特に長尺スパイラル導波路を用いたセンシングにおいては Si 光導波路並みの  $3\ \text{dB/cm}$  以下に導波損失を低減することが必要である。一般的な側壁荒れによる光散乱に加えて、Ge 層中の残留ホ

## 【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

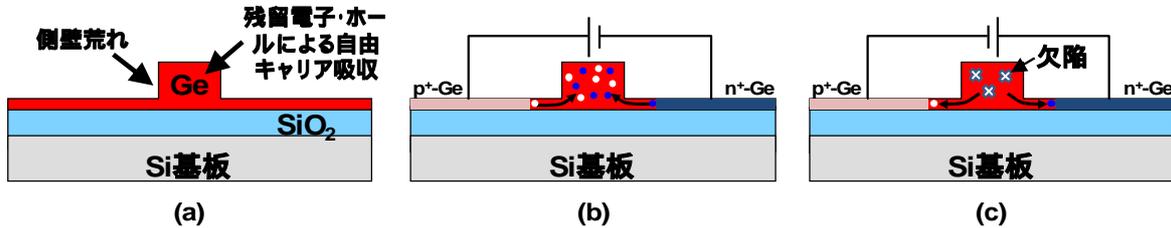


図 2. (a) Ge 光導波路の光損失要因, (b) キャリア注入 Ge 光変調器, (c) 欠陥誘起 Ge 光検出器。

ールによる自由キャリア吸収が大きい予想される(図 2a)。一方、電子による自由キャリア吸収は小さいとの理論予測もあり、n 型 Ge 導波路が低損失化の鍵であると言える。しかし、GeOI 基板作製に n 型バルク Ge 基板を用いても、基板剥離に用いる水素イオン注入時に発生する結晶欠陥により大量のホールが誘起され、低損失化が期待できる n 型 GeOI 基板の実現が困難であった。本研究を通じて、基板剥離時の水素イオン注入深さや注入エネルギーと結晶欠陥量の関係を評価することで、低欠陥 n 型 GeOI 基板作製プロセスの確立を目指した。これにより、Ge 光導波路の残留キャリア濃度等と光損失の関係を詳細に研究し、光損失の物理的起源を明らかにするとともに低損失 Ge 光導波路の実現を目指した。

### Ge 光変調器

オンチップでロックイン検波を実現するために、Ge 光導波路を用いた中赤外光変調器の研究を進めた。研究代表者はこれまでに、Ge 光導波路に PIN 接合を形成しキャリア注入することで、自由キャリア吸収を使った光強度変調に世界で初めて成功している(図 2b)。しかし、変調効率が理論予想よりも低いことが課題である。これは Ge 光導波路中の欠陥によりキャリア再結合寿命が短くなっていることが原因と推測される。接合形成手法などを改善することで、キャリア注入 Ge 光変調器の性能改善を目指した。

### Ge 光検出器

Ge 光導波路を用いた光検出器に関しても、新たに結晶欠陥を介した検出原理の検証を進めた(図 2c)。Ge 結晶中に結晶欠陥を生成し、欠陥準位を介した遷移を用いることで、バンドギャップよりもエネルギーが低い中赤外光の検出も可能となる。Ge は Si よりもバンドギャップが小さいことから、高性能な中赤外光検出器を Ge 導波路で実現できるものと期待される。本研究を通じて、欠陥準位を介した光検出動作の実証を目指した。

## 4. 研究成果

研究を進めた低損失 Ge 光導波路、Ge 光変調器、Ge 光検出器について得られた成果を述べる。

### 低損失 Ge 光導波路

GeOI 基板の作製プロセスを以下のようなものである。バルク Ge 基板上に SiO<sub>2</sub> キャップ層を堆積後、基板

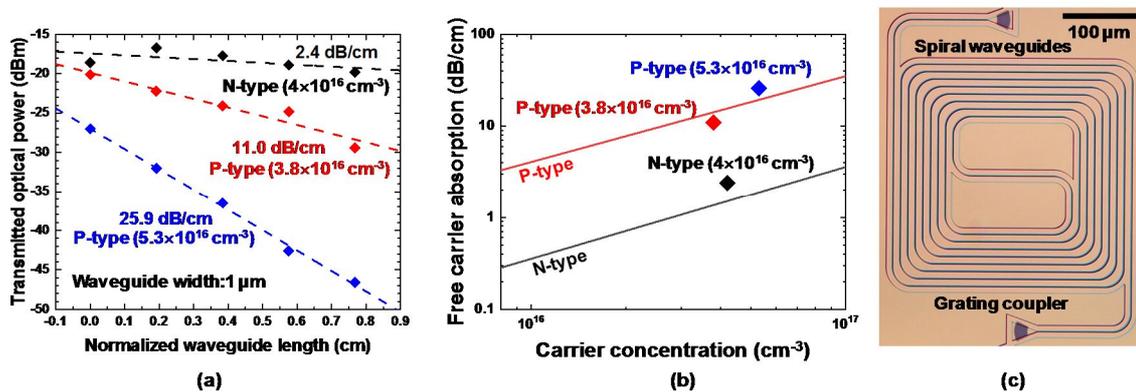


図 3. (a) Ge 導波路の損失評価結果、(b) 実験で得られた導波損失を残留キャリア濃度の関係、(c) スパイラル導波路チップ写真。

## 【 1 研究目的、研究方法など(つづき)】

剥離のための水素イオン注入を行う。SiO<sub>2</sub> キャップ層を除去後、表面パッシベーション層として原子層堆積法 (ALD) を用いて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を堆積する。熱酸化 Si 基板にも ALD で同様に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を堆積させ、両者を基板貼り合わせする。ALD で堆積した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は表面親水性を示すことから、基板貼り合わせで通常用いられる酸素プラズマ表面活性化処理がなくても、良好な貼り合わせを実現することができる。貼り合わせ後、基板をヒーター加熱することで、水素イオンを注入した箇所から Ge 基板が剥離する。その後、CMP を用いて表面を平坦化することで GeOI 基板が完成する。基板剥離に用いる水素イオン注入では、Ge 層に結晶欠陥が形成されることから、結晶誘起ホールの発生によって、n 型 Ge バルク基板を用いても、GeOI 基板作製後は、Ge 層は p 型を示す。このことが導波損失の要因となっていると考えられる。

まずシミュレーションを用いて、水素イオン注入による発生する Ge 基板中の結晶欠陥の分布を解析した。水素イオン注入エネルギーとして、従来用いてきた 80 keV に加えて、160 keV の場合についてもシミュレーションを行った。高エネルギーで注入することで、水素イオンは Ge 表面からより深い位置に分布することが分かる。これに伴って、Ge 中に形成される結晶欠陥の分布もより深い位置にシフトする。この結果、デバイスとして用いる表面から 300–400 nm の Ge 層においては、結晶欠陥が減少することが分かった。このシミュレーション結果に基づき、80 keV、160 keV で水素イオンを注入して GeOI 基板を作製した。基板剥離直後の GeOI 基板の断面を TEM で観察した。これまで用いてきた 80 keV で水素イオン注入した場合、貼り合わせ界面付近まで Ge 層に結晶欠陥が残留している様子が観察された。一方、160 keV で水素イオン注入した場合、シミュレーションで予想される通り、貼り合わせ界面から 300 nm 程度までは結晶欠陥が減少していることが分かった。80 keV で作製した GeOI 基板をホール測定で評価した結果、Ge 層は p 型伝導を示し、ホール密度は  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度であった。一方、160 keV の場合、Ge 層は n 型伝導を示し、電子密度は  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度となった。この結果から、残留キャリア密度は、水素イオン注入による結晶欠陥が要因であり、高エネルギー水素イオン注入により Ge デバイス層中の結晶欠陥量を減少させることが、n 型 GeOI 基板を得るために重要であることが明らかとなった。

作製した GeOI 基板を使って、Ge 導波路の導波損失を評価した結果を図 3a に示す。p 型 GeOI 基板を用いた場合、従来の導波損失は 25.9 dB/cm と極めて大きかった。ドライエッチング条件の最適化で Ge 導波路の側壁荒れを改善することで、導波損失は 11.0 dB/cm まで改善した。更に n 型 GeOI 基板を用いることで、導波損失を 2.4 dB/cm まで低減することに成功した。実験で得られた導波損失と残留キャリア密度の関係を図 3b に示す。実線で示した自由キャリア吸収による損失の計算結果と実験結果はよく一致していることから、Ge 導波路の損失要因は残留キャリアによる自由キャリア吸収であることが明らかになった。n 型 GeOI 基板の作製プロセスを確立し、n 型 Ge 導波路を用いることで Si 導波路並みに導波損失を低減した。これにより、図 3c に示す長尺スパイラル導波路でも良好な導波を確認した。

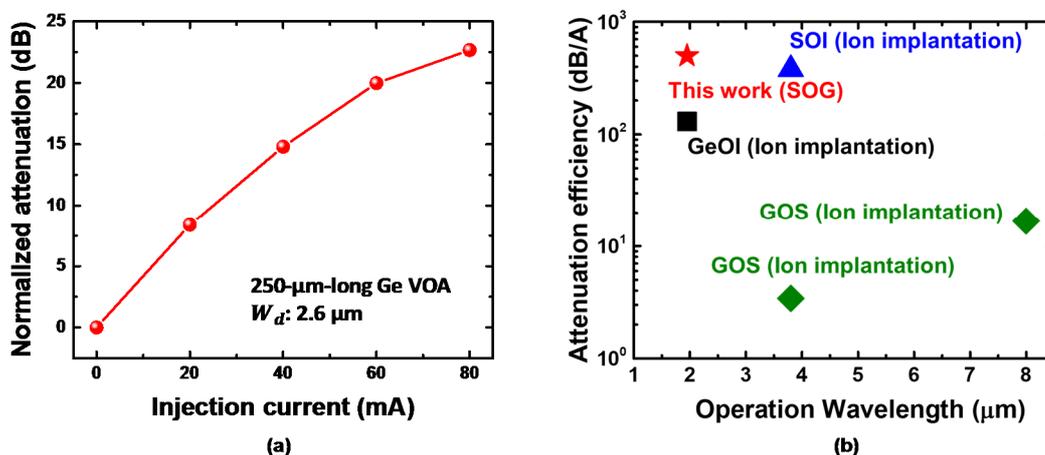


図 4. (a) Ge 変調器特性および(b)ベンチマーク結果。

## 【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

### Ge光変調器

これまで研究代表者のグループは、GeOI 基板上に形成した Ge 導波路に PIN 接合を形成したキャリア注入光変調器を実証している。しかし、自由キャリア吸収から予想される特性と比較して、性能が悪いことが課題であった。これは、接合形成に用いたイオン注入時に発生した結晶欠陥により注入キャリアの再結合が促進されたためであると考えられる。n 型 Ge 層を得るための P イオン注入は活性化アニール時の拡散が早く、結晶欠陥回復が難しいという課題が知られている。このことから、イオン注入に替わって、スピンオングラスからの固相拡散で n 型 Ge 層を形成するプロセスを試みた。GeOI 基板上に Ge 導波路を形成後、p 型 Ge 層を形成するための B イオン注入を行った。その後、P をドーピングしたスピンオングラスを塗布し、アニールすることで P を固相拡散させた。P 原子の分布を SIMS で評価した結果、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  程度のドーピングが得られており、接合プロファイルも変調器応用上は十分急峻であることが分かった。

電流注入量に対する光減衰量変化を測定した結果を図 4a に示す。素子長  $250 \mu\text{m}$  の変調器に  $80 \text{ mA}$  の電流を注入したとき、 $22 \text{ dB}$  程度の光強度変調を得た。図 4b に、中赤外波長における Ge 光変調器と Si 光変調器の変調効率をベンチマークした結果を示す。固相拡散を用いることで、変調効率を  $380\text{--}460 \text{ dB/A}$  と大幅に改善することに成功した。これは中赤外波長域で報告された光変調器として最も高い変調効率である。

### Ge光検出器

PIN 接合を形成した  $500 \mu\text{m}$  長の Ge 光検出器に波長  $2 \mu\text{m}$  の光を入射した電流電圧特性を図 5 に示す。本来 Ge は波長  $2 \mu\text{m}$  の光に対して透明であるにもかかわらず、十分大きな光電流が得られることが分かった。 $5 \text{ V}$  のバイアス電圧印加時においては、 $0.25 \text{ A/W}$  と極めて高い受光感度が得られた。これまで報告された Si 光検出器と比較して、一桁以上感度を改善することに成功した。これは Ge のバンドギャップが Si よりも小さく、熱励起あるいはトンネル効果を介したキャリア励起の確率が Si よりも大きいことに起因すること考えられる。

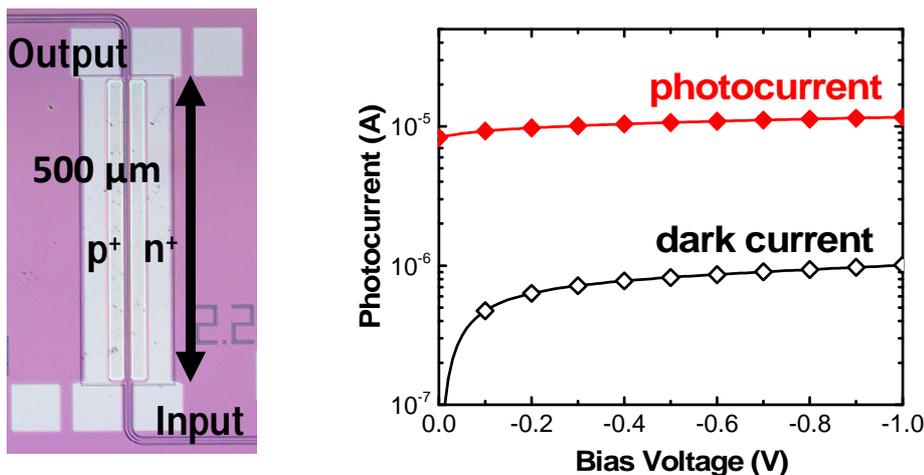


図 5. 欠陥誘起 Ge 光検出器の特性評価結果。

以上のように、本研究を通じて、n 型 GeOI 基板の作製プロセスを確立するとともに、Ge 導波路の損失要因が残留キャリアによる自由キャリア吸収であることを明らかにした。これにより低損失 Ge 導波路を実現したことで、センシングに必要なスパイラル導波路などの受動デバイスが実現可能となった。また、固相拡散を用いた接合形成プロセスを適用することで、Ge 光変調器の特性を大幅に改善した。GeOI 基板上の Ge 導波路を用いた欠陥誘起光検出器の動作実証にも初めて成功した。これにより、GeOI 基板を用いた分子センサ用の要素デバイスを実証し、Ge 中赤外光集積回路を用いたセンシングを実現するための基盤技術の確立に成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zhao Ziqiang, Lim Cheol-Min, Ho Chongpei, Sumita Kei, Miyatake Yuto, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi, Takenaka Mitsuru	4. 巻 11
2. 論文標題 Low-loss Ge waveguide at the 2- $\mu$ m band on an n-type Ge-on-insulator wafer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 4097 ~ 4097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.444071	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 竹中充, 高木信一	4. 巻 48
2. 論文標題 Ge-on-insulatorを用いた近赤外・中赤外集積フォトニクス	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 535-539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 Miyatake Yuto, Makino Kotaro, Tominaga Junji, Miyata Noriyuki, Nakano Takashi, Okano Makoto, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi, Takenaka Mitsuru	4. 巻 70
2. 論文標題 Proposal of Low-Loss Non-Volatile Mid-Infrared Optical Phase Shifter Based on Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 2106 ~ 2112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TED.2023.3235865	査読の有無 有
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 Piyapatarakul Tipat, Tang Hanzhi, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi, Takenaka Mitsuru	4. 巻 62
2. 論文標題 Efficient optical phase modulator based on an III?V metal-oxide-semiconductor structure with a doped graphene transparent electrode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1008 ~ SC1008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/aca59c	査読の有無 有
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 Miyatake Yuto, Ho Chong Pei, Pitchappa Prakash, Singh Ranjan, Makino Kotaro, Tominaga Junji, Miyata Noriyuki, Nakano Takashi, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi, Takenaka Mitsuru	4. 巻 12
2. 論文標題 Non-volatile compact optical phase shifter based on Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> operating at 2.3 μm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 4582 ~ 4582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.473987	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 該当する

1. 著者名 Takenaka Mitsuru, Zhao Ziqiang, Ho Chong Pei, Fujigaki Takumi, Piyapatarakul Tipat, Miyatake Yuto, Tang Rui, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi	4. 巻 109
2. 論文標題 Ge-on-insulator Platform for Mid-infrared Photonic Integrated Circuits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 47 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10904.0047ecst	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Piyapatarakul Tipat, Tang Hanzhi, Toprasertpong Kasidit, Takagi Shinichi, Takenaka Mitsuru	4. 巻 61
2. 論文標題 Numerical analysis of optical phase modulator operating at 2 μm wavelength using graphene/III?V hybrid metal-oxide-semiconductor capacitor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1031 ~ SC1031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4443	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Y. Miyatake, C.-P. Ho, K. Makino, J. Tominaga, N. Miyata, T. Nakano, N. Sekine, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Reduction of optical loss of phase-change phase shifter based on Ge2Sb2Te5 operating at mid-infrared wavelength
3. 学会等名 11th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Takenaka, K. Toprasertpong, and S. Takagi
2 . 発表標題 Materials drive Si photonics
3 . 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Z. Zhao, C.-P. Ho, Q. Li, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2 . 発表標題 Ge ring modulator based on carrier-injection phaser shifter operating at two micrometer band
3 . 学会等名 European Conference on Optical Communication (ECOC2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Takenaka, Z. Zhao, C.-P. Ho, T. Fujigaki, K. Toprasertpong, and S. Takagi
2 . 発表標題 Germanium mid-infrared integrated photonics on GeOI platform
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Miyatake, C.-P. Ho, P. Pitchappa, R. Singh, K. Makino, J. Tominaga, N. Miyata, T. Nakano, N. Sekine, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2 . 発表標題 Mid-infrared non-volatile compact optical phase shifter based on Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub>
3 . 学会等名 European Conference on Optical Communication (ECOC 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Miyatake, C. P. Ho, P. Pitchappa, R. Singh, K. Makino, J. Tominaga, N. Miyata, T. Nakano, N. Sekine, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Non-volatile compact optical phase shifter based on Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub> operating at mid-infrared wavelength
3. 学会等名 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Zhao, C.-P. Ho, Q. Li, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Experimental evaluation of the free-carrier plasma dispersion effect in germanium
3. 学会等名 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Zhao, C.-P. Ho, Q. Li, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Two-micrometer monolithic germanium waveguide photodetector integrated with lateral PIN junction
3. 学会等名 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮武 悠人, 何 鐘培, 牧野 孝太郎, 富永 淳二, 宮田 典幸, 中野 隆志, 関根 尚希, トーブラサートボン カシディット, 高木 信一, 竹中 充
2. 発表標題 波長2.4 μmで動作する相変化材料を用いた中赤外光位相シフタ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Z. Zhao, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Enhancement of the Ge sub-bandgap photo-response at 2- $\mu$ m band by photo-gating effect
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮武 悠人, 何 鐘培, 牧野 孝太郎, 富永 淳二, 宮田 典幸, 中野 隆志, 関根 尚希, トーブラサートボン カシディット, 高木 信一, 竹中 充
2. 発表標題 相変化材料を用いた中赤外光位相シフトの提案
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Zhao, C. Ho, Q. Li, Z. Lin, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Investigation of Optical Phase-shift by Free-carrier effect in Germanium Waveguides for Mid-infrared Photonics
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Miyatake, K. Makino, J. Tominaga, N. Miyata, T. Nakano, M. Okano, K. Toprasertpong, S. Takagi, M. Takenaka
2. 発表標題 Record-low loss non-volatile mid-infrared PCM optical phase shifter based on Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
3. 学会等名 International Electron Devices Meeting (IEDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Piyapatarakul, H. Tang, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2 . 発表標題 Design of the III-V MOS optical modulator with doped graphene electrode for efficient, high-speed phase modulation
3 . 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Takenaka, Z. Zhao, T. Piyapatarakul, Y. Miyatake, K. Toprasertpong, and S. Takagi
2 . 発表標題 Ge-on-insulator platform for mid-infrared photonic integrated circuits
3 . 学会等名 242th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Piyapataraku, H. Tang, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2 . 発表標題 Analysis of III-V MOS optical modulator with transparent doped graphene gate electrode
3 . 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Takenaka, H. Tang, K. Watanabe, T. Ochiai, T. Akazawa, Y. Miyatake, S. Ohno, K. Sumita, S. Monfray, F. Boeuf, R. Tang, K. Toprasertpong, and S. Takagi
2 . 発表標題 III-V/Si hybrid integration for scalable optical switching and computing
3 . 学会等名 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC2022) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Miyatake, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Compact, low-loss, fabrication-tolerant, and thermally stable 2x2 Si optical coupler designed by CMA-ES
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Miyatake, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka
2. 発表標題 Optimization of Compact and Low-loss 2x2 Si Optical Coupler based on CMA-ES
3. 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮武悠人, 牧野孝太郎, 富永淳二, 宮田典幸, 中野隆志, 岡野 誠, トーブラサートポン カシディット, 高木信一, 竹中 充
2. 発表標題 Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> S <sub>2</sub> を用いた不揮発性相変化中赤外光位相シフト
3. 学会等名 電気学会ナノエレクトロニクス機能化・応用技術調査専門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮武悠人, 牧野孝太郎, 富永淳二, 宮田典幸, 中野隆志, 岡野 誠, トーブラサートポン カシディット, 高木信一, 竹中 充
2. 発表標題 Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> S <sub>2</sub> を用いた不揮発性相変化中赤外光位相シフト
3. 学会等名 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会 (SDM) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹中 充
2. 発表標題 ウェハ接合を用いた光集積回路およびコンピューティング応用
3. 学会等名 電子実装工学研究所 ( IMSI ) 第3回委員会 ( 招待講演 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹中充
2. 発表標題 極薄III-V族半導体を用いたSiハイブリッド光集積回路および光コンピューティング応用
3. 学会等名 学振R025産学協力委員会第11回研究会 ( 招待講演 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮武 悠人, トーブラサートポン カシディット, 高木 信一, 竹中 充
2. 発表標題 CAM-ESに基づく小型低損失2×2カブラの設計
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tipat Piyapatarakul, Hanzhi Tang, Kasidit Toprasertpong, Shinichi Takagi, Mitsuru Takenaka
2. 発表標題 Numerical analysis of III-V MOS optical modulator with graphene transparent electrode for efficient phase modulation
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Si Photonics Lab  
<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/takenaka-lab/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------