

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用
を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」
研究課題「磁性-金属-半導体異種材料集積による
待機電力ゼロ型フォトニックルータの開発」

研究終了報告書

研究期間 2015年 12月～2021年 3月

研究代表者： 水本 哲弥
(東京工業大学、理事・副学長)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究課題では、様々なデータサイズの情報飛び交うIoT時代を見据えた次世代光ネットワークを実現する革新的技術のひとつとして『待機電力ゼロ型フォトニックルータ』の開発を実施した。フォトニックルータは、**図 1.1** に示すように①不揮発光スイッチ、②磁性光メモリ、③メタマテリアル光バッファ、④スローライト受光器の新機能光デバイスから構成され、それら異種材料からなる光デバイスをシリコン上のワンチップに一体集積することで実現される。それぞれの要素デバイスと要素技術の開発について、以下の研究を実施した。

東工大水本・庄司グループでは、磁性材料を光回路に集積した不揮発光スイッチと磁性光メモリの開発を行った。これらは無電力で光スイッチ状態を保持する新しい光素子で、磁気光学効果と磁性体の不揮発性を利用して実現する。Optics Express (vol.28, p.31675) [1]で発表した成果は Editor's Pick に選ばれ、国際会議 OECC2019 では Best Student Paper Award を受賞するなど、国際的にも新規性、独創性に対して高い評価を得た。

東工大荒井・雨宮グループでは、メタマテリアル光バッファとスローライト受光器の開発を行った。メタマテリアル光バッファは微小共振器構造によって伝搬する光信号のトラップ/リリースを行う新しい光デバイスであり、その理論と設計について Optics Express (vol.27, p.15007) [2]で発表し、国内外で多くの招待講演依頼を受ける反響を得ている。スローライト受光器は、フォトニック結晶構造による光の回折限界を超える超集光によって、高速性と微細性を兼ね備える導波路型ナノスケールフォトディテクタ (PD) である。光電流 $94 \mu\text{A}$ においても 3dB 帯域 10 GHz 以上を維持する検出器のストライプ幅を設計した。

東工大西山グループでは、異種材料からなる光デバイスを一体集積する技術として、常温表面活性化接合において、実レーザ構造での光学特性、接合特性を確認したのち、実際にハイブリッドレーザを作製し、常温表面活性化接合を利用したデバイスでは、世界で初めてとなる室温連続発振を実現した。また、Direct Transfer Bonding を利用し、8 インチ Si 基板上への小片接合を実現した。

産総研池田グループでは、Si プラットフォーム光回路の製作と実装技術の開発を行った。産総研スーパークリーンルーム (SCR) の 300mm ウェハプロセスを用いた高精度のチップ作製を行うとともに、フォトニックルータのような多くの光素子を集積しそれらを統合的に駆動するためのシステム開発を行った。大規模光回路の作製技術を実現するため広帯域化 32x32 光スイッチを試作し、その動作を実証した。この成果は、Journal of Lightwave Technology (Vol. 38, p. 226) [3]や国際会議 OECC 2019 にて発表し Best Paper Award を受賞するなど、国際的に高い評価を受けている。

最終的に、こうした多種の材料からなる各光素子を Si プラットフォーム上に集積するプロセス開発を全グループが協力して実施した。産総研 SCR で**図 1.2** のシリコン集積チップを作製し、東工大で各光素子を追加加工し、ルータチップを作製する。こうした異種材料集積を用いた機能チップの開発は世界的にも新しく、様々な問題が浮上しては解決する難易度の高い試みであった。緊急事態宣言などを受けた実験遅延の影響があるものの、残り期間において光ルータモジュールを完成し、4x4 光スイッチによる遅延線評価や経路切り替えを実証する。

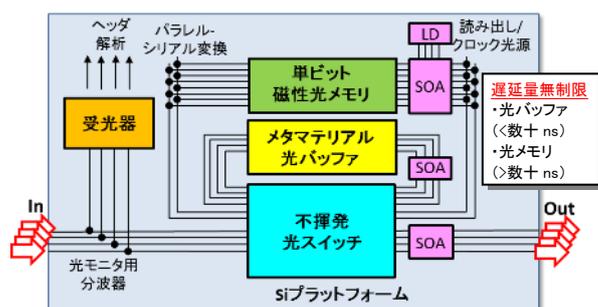


図 1.1: フォトニックルータの構成図

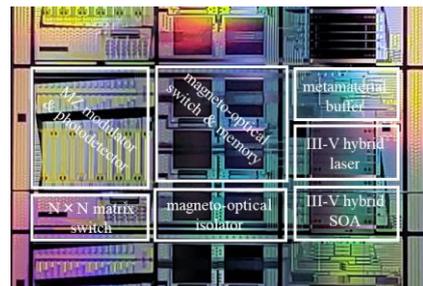


図 1.2: 産総研 SCR で作製したシリコン集積チップ

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 磁性材料を用いた新機能光デバイス

概要：磁性体の不揮発性を利用した光機能素子の開発を行い、Optics Express 誌などをはじめ多くの論文、国際会議で成果を発表した。磁性体を光回路に組み込むことで、従来困難であった無電力で状態保持をする光素子が実現でき、フォトニックルータに限らず新しい光集積回路の応用展開が期待される。この研究は本研究グループが先駆的・独創的に進めているもので、国際的にも高い評価を得ている。

2. 微小金属共振器からなるメタマテリアル光素子

概要：メタマテリアルは人工的に作った微細構造によって光学特性を発現・操作する新しい手法である。微小金属共振器は、本来光周波数では 1 となる比透磁率を変化させるのもので、光バッファとしての応用を検討した。成果としてメタマテリアルを用いた光学素子の設計理論の確立と高い群屈折率の実証に成功し、Optics Express 誌など多くの論文、国際会議で発表した。新規性は高く、多くの招待講演依頼を受けるなど、国際的にも高い評価を得ている。

3. リング共振器を用いた高効率光熱変換

概要：磁性光メモリの記録動作への応用を目的として、リング共振器中に設けた金属層で生じる光吸収に伴う局所的な発熱機構を提案した。素子の作製と解析を行うことで 6.8 mW の光入力に対して 300°C 以上の発熱現象を実証した。Journal of Lightwave Technology 誌で発表するとともに、本手法を応用した全光型光スイッチを提案し、特許出願や Photonic Technology Letter 誌で発表している。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. III-V 族化合物半導体とシリコンの異種材料集積技術

概要：シリコンフォトニクスは光デバイスの産業化に革新をもたらしたが、直接遷移半導体でないなどその光物性には限界が見えている。III-V 族化合物半導体はそれらの機能を補完する有望な材料であり、本研究課題では特に部分的な異種材料集積技術の開発を行い、接着層を介さずに良質な結晶同士を分子レベルで接合する様々なボンディング技術を開発した。この成果は産業的に重要な役割を占めると期待される。

2. 大規模シリコンフォトニクス光回路の作製と実装技術

概要：産総研スーパークリーンルームの 300mm ウェハ CMOS プロセスラインを利用して均一性の高い光回路チップを作製し、大規模光集積デバイスの開発を行った。光導波路だけでなく、電極やファイバアレイ、制御システムを含めた実装技術の開発も必要とされ、32x32 光マトリックススイッチの高い動作特性は論文誌をはじめ光分野トップの国際会議 OFC でポストデッドライン論文として採択されるなど、国際的にも高い評価を得ており、産業化に向けた革新性の高い成果である。

<代表的な論文>

1. T. Murai, Y. Shoji, N. Nishiyama, T. Mizumoto, “Nonvolatile magneto-optical switches integrated with magnet stripe array,” Optics Express, Vol. 28, No. 21, pp. 31675-31685 (2020).

概要：磁気光学ガーネット Ce:YIG 上に薄膜磁石 FeCoB を集積することで不揮発に状態保持が可能な光スイッチを実現した。波長スペクトルのシフト量から磁気光学効果の寄与を正確に見積もるとともに、高い消光特性を実現した。制御電流の値を振ってヒステリシス特性を得るなど光デバイスとしてユニークな動作実証に成功している。不揮発動作な光学動作については、他機関から相変化材料や浮遊ゲートを利用した報告されているが、それらと比較して書き換

え回数の無制限や低損失など実用性の高い手法である。

2. T. Amemiya, S. Yamasaki, M. Tanaka, H. Kagami, K. Masuda, N. Nishiyama, S. Arai, "Demonstration of slow-light effect in a silicon-wire waveguide with a metamaterial," *Optics Express*, Vol. 27, No. 10, pp. 15007-15017 (2019).

概要：微小金属のスプリットリング共振器(SRR)を装荷したメタマテリアル光導波路を提案し、理論解析から C バンド帯においてスローライト効果を示す構造設計が可能であることを示した。そして、マッハツェンダ干渉計からなるメタマテリアル光導波路素子を作製し、通常のシリコン導波路に比べて10倍以上の群屈折率の向上を確認した。本成果は、メタマテリアルを光導波路に集積することで機能デバイスとしての応用を示している点について独創性と新規性が高い。

3. K. Suzuki, R. Konoike, N. Yokoyama, M. Seki, M. Ohtsuka, S. Saitoh, S. Suda, H. Matsuura, K. Yamada, S. Namiki, H. Kawashima, and K. Ikeda, "Nonduplicate Polarization-Diversity 32 x 32 Silicon Photonics Switch Based on a SiN/Si Double-Layer Platform," *J. Lightwave Technol.* Vol. 38, pp. 226-232 (2020).

概要：1つのスイッチマトリクスで、直交偏波成分用の2回路を同時に実現できる新たな偏波ダイバーシティ構成を採用し、さらに光経路の交差を減らすための SiN 層を導入した 32x32 シリコン光スイッチを作製し、32x32 の規模で初めて低偏波依存動作を実証した。産総研 SCR の非常に均一性の高い CMOS プロセスと超多電極に対応できる実装・制御技術により、1チップ上に 7600 個以上の素子を集積した世界最大規模の光集積回路を実現した。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「東工大」グループ(研究機関別)

研究代表者:水本 哲弥 (東京工業大学 理事・副学長)

研究項目

(サブグループ:水本・庄司グループ)

・不揮発光スイッチの開発

・磁性光メモリの開発

(サブグループ:荒井・雨宮グループ)

・メタマテリアル可変遅延光バッファの開発

・スローライト受光器の開発

(サブグループ:西山グループ)

・部分的異種材料集積技術の開発

・InP/Si 光利得・非線形素子の開発

②「産総研」グループ(研究機関別)

主たる共同研究者:池田 和浩 (産業技術総合研究所 プラットフォームフォトニクス研究センター
研究チーム長)

研究項目

・Si プラットフォーム光回路の製作

・電極実装技術の開発

・制御システムの構築