

シリコン光-電気融合プラットフォームによる光集積回路の研究開発 (051403002)

Optoelectronic integrated circuits based on silicon platform.

研究代表者

板橋聖一 日本電信電話株式会社マイクロシステムインテグレーション研究所
Seiichi Itabashi NTT Microsystem Integration Laboratories

研究分担者

和田一実[†]

Kazumi Wada[†]

[†]東京大学 工学系研究科

[†]Graduate school of engineering, Tokyo University

研究期間 平成 17 年度～平成 20 年度

概要

本研究開発では、光ネットワークと電子機器とを繋ぐ小型・低消費電力・高性能デバイスの実現を目指し、シリコン (Si) 光機能デバイス、Ge 受光デバイス、さらには Si 電子デバイスとを Si 基板上でモノリシックに形成して、これらを融合するための基盤技術開発を行った。加えて、Si 細線中の非線形効果を活用した、革新的機能デバイスを搭載するための技術検討を進めた。その結果、Si 光機能素子と Ge 受光素子のモノリシック集積化を実現して動作を確認した。さらに、Si 中のキャリアによる影響を抑制し、4 光波混合現象を利用した効率的な波長変換デバイスも搭載可能であることを実証した。

Abstract

Ultra-small, low power consumption and high performance devices, which connect between network and electrical equipment, would be required. Silicon photonics is expected to realize those devices on the basis of monolithic integration utilizing the silicon micro fabrication technology. In this study, fundamental technology which enables optoelectronic integration has been developed, and it serves as the driving force for u-Japan.

1. まえがき

近年、シリコンプラットフォームの上に、極微小光素子と電子素子とを集積し、高性能で低コストなデバイス実現を目指すシリコンフォトリソ技術が注目を集め、世界中で研究開発が加速されている。

本研究開発は、シリコンプラットフォームの上に、光ファイバに接続可能な光素子と、これらを制御する電子素子とをモノリシックに形成するシリコンフォトリソの基盤技術確立を目標として進めた。目標達成に向けて研究開発を行うにあたり、図 1 の構成を有するデバイスをターゲットとして設定し、先ずデバイスを構成する、波長フィルタ、受光、光変調等の機能をもつ各要素技術開発を進め、続いて要素技術を統合することでシリコン光-電気融合プラットフォーム基盤技術検証を行う方針で進めた。

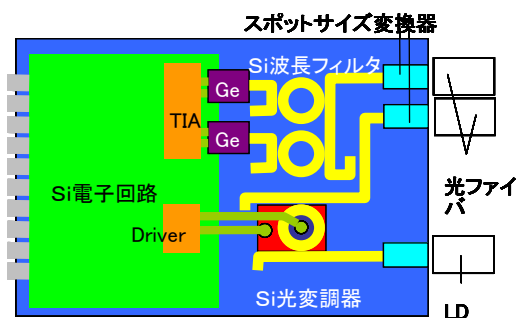


図 1 ターゲットデバイス概念図

2. 研究内容及び成果

先ず波長分離機能を実現するために、チャンネル型の Si 細線導波路をベースとして波長フィルタを試作した。試作したフィルタは、レーストラック型共振器構造を有し、直線部分の長さを変えることで、選択波長を高精度に制御可能であることを確認した。さらに、Si 導波路中のキャリア量を制御して屈折率変化を誘起し、光変調機能等を実現するために、導波路中にキャリアを注入、あるいは引き出す PIN 構造を形成する技術開発を進めた。PIN 構造作製には、従来型のチャンネル型に加え、図 2 に示す様に、光伝播部の両側に P+層と N+層を形成することができるリブ型細線導波路の開発が必要である。そこで Si プラットフォームの基盤技術となるリブ型光導波路の製作技術開発を行った。その結果、シングルモード伝播する導波路形状で、伝播損失は 2.3dB/cm と十分に小さく、素子開発が可能なレベルを達成した。この導波路をベースに、光伝播領域に注入したキャリア量により、光量が制御可能な PIN 構造を試作した。Mach-Zehnder 型干渉計を組むことで、キャリア注入によって 1GHz 以上の速度で動作し、消費電力 8mW で -13dB の動作が可能な変調素子を実現した。さらなる高速化には、キャリア引き抜き構成を検討する必要がある。以上の結果から、Si 細線導波路加工技術をベースと

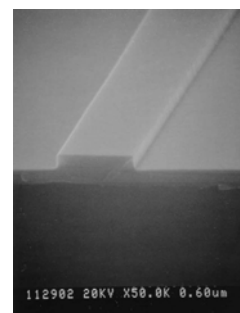


図 2 細線リブ型導波路

して、インプラ等の LSI 加工プロセスを組み合わせること
 で光機能素子が形成できることが確認された。

続いてシリコン上の Ge 選択エピ膜成長技術を用いた受
 光器を開発した。初めに
 図 3 に示すように、Si 細
 線導波路に接続した Si
 面を露出させ、この上に
 Ge を選択的に成長させ
 るプロセスを立ち上げた。
 成長した Ge エピ膜中
 には貫通欠陥が発生する
 が、アニールによってこ
 れを回復できることを
 明らかにした。続いて
 Ge 膜の上部と下部に
 インプラによって P+と
 N+層を形成し、縦型の
 PIN 構造を有する受光
 器を試作し、導波路か
 ら伝播する光を高効率
 で受光可能であることを
 検証した。図 4 に Si
 導波路に接続した受光
 器の特性を評価した結
 果を示す。逆バイアス
 電圧-1V 印加時の感度
 は約 0.8 A/W、暗電流
 は 15 mA/cm² の良好な
 値が得られた。



図 3 Ge 受光器の SEM 像

動作速度についても 1
 GHz 以上で動作する
 ことを確認した。

続いて、各要素を集
 積化するプロセス開
 発に取り組んだ。集積
 化にあたっては、エ
 ッ칭ング、インプラ
 および熱拡散、Ge
 のエピ成長と欠陥回
 復、さらにはクラド
 酸化膜形成等が相互
 に干渉しないような
 プロセスを開発し、
 図 5 に示す Si 変調
 素子と Ge 受光器の
 モノリシック形成を
 実現した。試作した
 デバイスにおいて、
 Si 変調素子で変調
 した光を、Si 導波
 路で結合する Ge 受
 光器で検出する評価
 を行い、両者が連携
 して動作することを
 確認した。以上の結
 果から、Si 変調素子
 と Ge 受光器のモノ
 リシック形成が可能
 であることが実証さ
 れ、シリコンフォト
 ニクスにおける重要
 な基盤技術が確立さ
 れた。

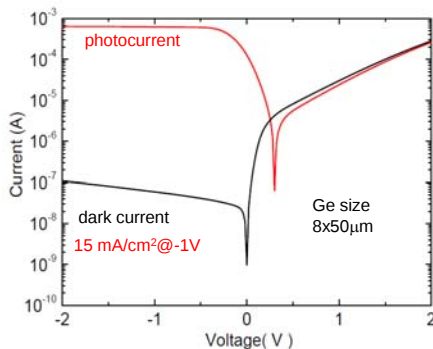


図 4 導波路結合 Ge 受光器の特性

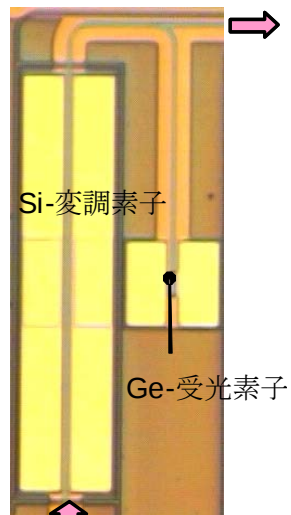


図 5 Si 変調素子と Ge 受光素子集積デバイス写真

同時に、シリコンプラットフォーム上に革新的な機能素
 子を搭載する検討も進めた。初めに、Si 細線導波路にお
 いては、光の強い閉じ込め効果を利用して、効率的に 4 光
 波混合現象を誘起し、波長変換等の機能素子形成が可能
 であることを実証した。しかし同時に、2 光子吸収現象も誘

起され、これによって生成された寿命の長いキャリアが光
 を吸収して効率的な現象発現を妨げる事を見出した。そこ
 で先ず、導波路中に欠陥を形成し、キャリアの除去を試み
 た。その結果、再結合現象によるキャリアの短寿命化と除
 去に成功した。しかし欠陥形成は同時に、励起光も減衰さ
 せてしまうため、続いて PIN 構造に逆バイアスを印加す
 ることによる生成キャリアの引き抜き方式を検討した。チ
 ャネル型細線導波路中
 での光減衰をできるだけ
 減らすために、光ファイ
 バとリブ型の PIN 構
 造とを近接させて接続
 する図 6 の構造を開
 発した。その結果、2
 光子吸収で生成された
 キャリアによる影響は
 少なくなり、強い励起
 光強度が維持されるた
 め、強い変換光が観測
 された。本素子は変調
 素子と同じ構造である
 ため、Si プラットフ
 ォーム上への搭載が
 可能である。

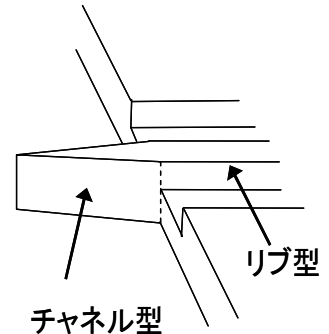


図 6 リブ導波路と光ファイバの接続を可能にする構造

3. むすび

本研究開発により、シリコンプラットフォーム上への
 Si 波長フィルタ、光変調素子、Ge 受光素子、および波長
 変換光素子等の集積が可能であることが検証された。本成
 果は、シリコン電子回路との融合に向けた基盤技術に繋
 がるものである。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Shinjima and S. Itabashi, "Ultrasmall polarization splitter based on silicon wire waveguides", OPTICS EXPRESS Vol.14 No.25, pp.12401-12408 (11 December 2006)
- [2] T. Tanabe, K. Nishiguchi, A. Shinya, E. Kuramochi, H. Inokawa, M. Notomi, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Fukuda, H. Shinjima, and S. Itabashi, "Fast All-Optical switching using Ion-Implanted Silicon Photonic Crystal Nanocavities.", Appl. Phys. Lett. 90, 031115 (2007)
- [3] H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Shinjima and S. Itabashi, "Silicon photonic circuit with polarization diversity", Optics Express, Vol.16, No.7, pp.4872-4880, (31 March 2008)

【申請特許リスト】

- [1] 山田、板橋、渡辺、土澤、福田、篠島、"シリコン光導波路"、日本、平成 19 年 2 月 23 日
- [2] 山田、板橋、渡辺、土澤、福田、篠島、"電磁波偏波面回転装置"、日本 平成 19 年 12 月 17 日
- [3] 土澤、板橋、山田、渡辺 "光導波路の製造方法"、日本 平成 20 年 11 月 18 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.microphotonics.material.t.u-tokyo.ac.jp>