

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20424

研究課題名（和文）定温制御したプラズモニックボロメータの高度集積による超小型中赤外分光器の開発

研究課題名（英文）Ultra-small mid-infrared spectrometer using highly integrated plasmonic bolometers controlled at constant temperature

研究代表者

安永 竣（Yasunaga, Shun）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：80963628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンで作製した熱抵抗素子アレイによって隣接ボロメータの熱的クロストークを評価した結果、距離に応じて減衰するクロストークが観測されたが、外部から電気エネルギーにより発熱を適切に補うことで、素子を一定温度に保ち、隣接素子からのクロストークを相殺できることが確認された。また、マイクロコンピュータによってリアルタイム定温制御可能なシステムを構築した。その上で、中赤外光への応答性の異なるナノ金属構造をもつボロメータのデバイスの製作プロセスを構築し、ボロメータアレイの光応答を確認した。プロセス不全のため前述の定温制御システムへ直接適用するには至らなかったが、一部を改変することで対応できると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ボロメータはサーモグラフィの形ですでに我々の生活に入り込んでいる身近な技術だが、非シリコン製の受光素子を熱的に基板から隔離し、真空パッケージしなければならないという常識がある。しかし本研究は、そのようにせずとも制御の力を借りてより簡便にボロメータの機能を実現できる可能性を示す点で学術的意義がある。本研究では特に、シリコンベースのボロメータ表面にプラズモニック構造をつくることで中赤外分光器の実現を目指しており、その見通しがたったということは非常に小型で安価な中赤外分光器の実現可能性が高まったということである。人間の目に見えない差を可視化するデバイスの実現で情報化社会の安全性を高める技術となる。

研究成果の概要（英文）：The thermal crosstalk between adjacent bolometers was evaluated using a thermal resistive element array fabricated on silicon. While the crosstalk was observed to decay with distance, the element was maintained at a constant temperature and the crosstalk from adjacent elements cancelled out by appropriately supplementing the heat generated by external electrical energy. A real-time temperature control system was also constructed using a microcomputer and successfully operated.

A fabrication process was then established to build a bolometer device with nanometallic structures with different responses to mid-infrared light, and the optical response of the bolometer arrays was confirmed. Due to process failure, the system could not be directly applied to the aforementioned constant-temperature control system, but we expect that it can be adapted by slightly modifying the system.

研究分野：MEMS

キーワード：マイクロボロメータ 定温制御 プラズモニクス 中赤外 分光器

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中赤外線(波長 2.5-25 μm)は、分子内の結合の種類に特有な吸収ピークを有し、化学組成分析に最重要な波長帯域であるが、分光分析器は高価かつ大型で、分光分析法の適用先に制約があった。分光器を小型化するうえで、赤外線を熱に変換して計測する熱型受光器と、再構成分光とよばれる逆問題的な分光法の組み合わせが有望視されるが、一般に再構成分光のためには外部フィルタを中赤外受光器アレイ上に配置する必要があり、かつ中赤外受光器は真空パッケージされるので小型化に限界があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プラズモニック構造をもつポロメータの定温制御により、常温・常圧で高速に動作するフィルタフリーのワンチップ中赤外分光器の実現可能性を検証することである。シリコン受光素子の表面に波長選択機能のあるプラズモニック構造を組み込み、外部波長フィルタ不要のポロメータとする。更にクロズドフィードバック回路で受光部温度を一定にする制御を掛ければ、原理的にアレイ素子間の熱伝達がゼロになり断熱(真空)が不要となり、小型化可能性は大きく押し進められる。

3. 研究の方法

まず、単純なシリコンのみの抵抗体の配列を基板上に浮かせ、うち一つに電流を流してジュール熱を発生させることで擬似的にポロメータに光があたっている状況を再現する。隣接する抵抗体には基板や空中を通じて熱が伝搬し抵抗が変化するが、外部から電流を適切に流すことで伝搬してきた熱との総和を一定にし定温制御できるかを検証する。次に、光に対する応答性が異なる受光器を隣接させたデバイスを定温制御することを目指す。表面に中赤外光を吸収するプラズモニック構造をもつ受光器と反射率の高い平坦なアルミニウム膜を有する受光器を配列して中赤外線を当てると、応答性の差から温度差が生じ、熱伝達によって、単独の場合と応答に差が出る(=クロストーク)。これを確認し、そして単純なシリコンのみで検証した定温制御を適用し、中赤外プラズモニックポロメータにおいて定温制御を実現する計画である。

4. 研究成果

第一の検証用デバイスである、単純なシリコンの抵抗体配列を以下の手順で製作した。デバイス層が 20 μm の Silicon-on-Insulator (SOI) 基板上に電子線リソグラフィで厚膜レジストをパターニングし、これをマスクとして深堀り反応性イオンエッチング (DRIE) にて不要なデバイス層を除去した。洗浄のち、気相フッ酸エッチングによって犠牲酸化層を除去し、抵抗体をリリースした。抵抗の両端のボンディングパッドに 2 本ずつワイヤボンディングをしてケルビン法による計測ができるようにした。デバイス層は抵抗率 0.03-0.06 Ωcm の p 型シリコンで、抵抗体ひとつあたりの抵抗は約 3 k Ω である。温度変化によって抵抗が線形に変化することをまず確認した。

3 本隣接した抵抗のうち片端の抵抗に電流を流した際、中央および反対側の抵抗が変化し、反対側端の抵抗より隣接する中央の抵抗変化が大きいことから、ジュール熱が基板ないし空気により熱が伝わる様子を確認した(図 1)。次に、あらかじめ中央の抵抗体に電流を流して加温しておき、左端に電流を加える瞬間に中央の抵抗体に流す電流を減少させると、適切に電流を変化させることで温度変化を完全に抑えられることがわかった。あらかじめ温度と抵抗の関係を調べておけば、抵抗変化から温度を読み取ることができるので、定温制御すべき抵抗体の抵抗値をモニタリングして、変化が生じた時目標温度との差分を打ち消すようにリアルタイムで電流値を変化させるフィードバック制御をマイクロコンピュータを用いて実装した。温度を読み出すプログラムのポーリングのレートおよび抵抗体の温度変化にかかる時間で遅延が生じるが、目標温度に定温制御できることを確認した(図 2)。以上の結果をもって、抵抗体のリアルタイムな定温制御が可能であることを確認した。

次に、中赤外線を吸収するプラズモニック構造を表面にもつポロメータ配列を設計し、プロセスフローを策定した。プラズモニック構造については、ブロードな吸収を示す金属-絶縁体-金属積層構造(MIM 構造)に関する先行研究を参考に、有限要素

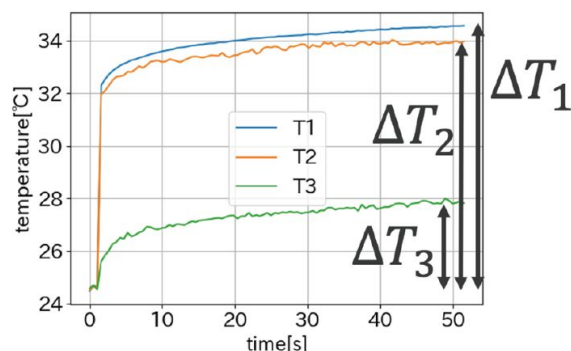


図 1. 3 連抵抗体配列の片端に電流を与えた時の中央および反対側端の抵抗変化から読み取った温度変化。T1: 電流を与えた抵抗体、および T2: 中央、T3: 反対側の抵抗体。

シミュレーションによって $3.3\mu\text{m}$ 付近を吸収帯中心とする構造を求めた . アルミニウム膜上に SiO_2 膜を挟んでアルミニウムマイクロディスクが配列された構造で , これを SOI 基板のデバイス層でつくったポロメータ表面に乗せた構造を製作した . ポロメータはシリコンの抵抗率変化を利用するため , MIM 構造自体に電流が流れず , また隣接ポロメータ間でも電気的絶縁が取れる構造とする必要がある . そのため , MIM 構造の下にさらに SiO_2 層をはさみ , 各ポロメータ間はデバイス層を掘り切った . また , 受光面の温度変化のみを捉えるため , ボンディングパッドから受光面近くまではデバイス層上のアルミニウム層を電流が通り , 受光面近くのアルミニウム-シリコン間のオーミック接触によってシリコン基板に電流を導く構成である . 5 回のデポジション , 5 回のリソグラフィ , 5 回のエッチング , 2 回のリフトオフを含むプロセスフローを策定し , デバイスを実際に作製した (図 3) . オーミック接触の不良により電流-電圧特性が非線形となったが , 温度に比例した抵抗変化と中赤外線に対する応答を確認した . 非線形な電流-電圧特性ゆえに , 前段階で構築したフィードバック制御が直接適用できず , プラズモニックポロメータの定温制御には至っていないが , 非線形特性を加味したフィードバック値の決定方法とすること , オーミック接触部に適切にドーピングするか , 接触面積を増加させることで線形な電流電圧特性に近づけることで定温制御が可能であると考えられる .

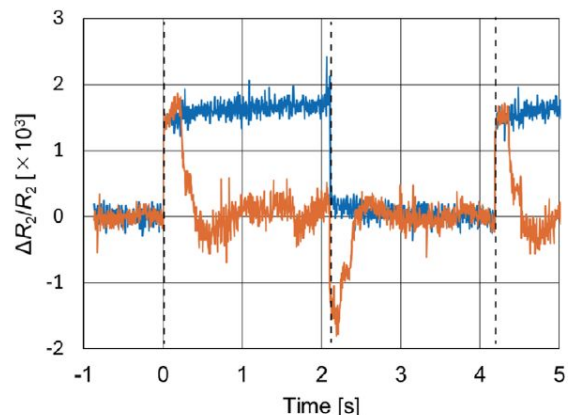


図 2 . 3 連抵抗体配列の片端にかける電圧を変化させたときの中央の抵抗変化 . 青: フィードバック制御なし , 橙: フィードバック制御あり .

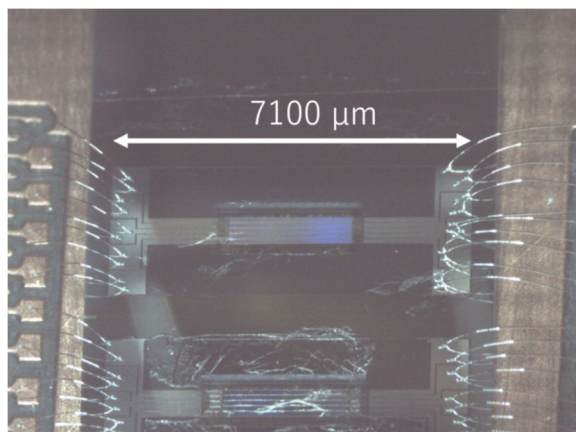


図 3 . MIM 型プラズモニック構造を表面に有するポロメータ配列 . 中央の青く反射する部分がポロメータ部分 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安永 竣
2. 発表標題 再構成分光法のための中赤外ディテクタ集積デバイス
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Sakuma, S. Yasunaga, K. Misumi, A. Higo, and Y. Mita
2. 発表標題 Constructing Temperature Constant Controlled Silicon-on-Insulator Bolometers
3. 学会等名 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP 2024)
4. 発表年 2024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
研究協力者	菅 哲朗 (Kan Tetsuo) (30504815)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	

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