

サーモパイル型赤外線イメージセンサ用 熱電変換ナノモジュール構造の開発

[1] 組織

代表者：石田 明広
(静岡大学工学部)

対応者：池田 浩也
(静岡大学電子工学研究所)

[2] 研究経過

図1に示すようなサーモパイル型赤外線イメージセンサは、熱型（非冷却型）に分類される赤外線センサのひとつであり、量子型（冷却型）と呼ばれるものと比較して、小型、軽量、低価格などの特長を持っているが、応答速度・感度ともやや劣るという欠点を持つ。サーモパイルとは複数の熱電対を直列に並べたものであり、熱電堆とも呼ばれる。したがって、センサの感度を上げるためのひとつの方策は、熱電対の熱起電力を改善することである。本研究プロジェクトでは、ナノワイヤ構造の導入によって熱電変換特性および熱電モジュール性能（サーモパイル性能）を劇的に向上させ、センサの高感度化を目的とする。

本プロジェクトは、本年度が初年度であった。これまで、シリコンのナノ構造化によるゼーベック係数の変化に注目して、研究を進めてきた。金属に対するゼーベック係数は、理論的にはフェルミエネルギー近傍の状態密度のエネルギー微分に比例するため、ナノ構造に現れる急峻な状態密度分布においてフェルミエネルギーを調節することにより、ゼーベック係数の増大が期待できる。この条件をn型半導体で考えると、フェルミエネルギーを伝導帯端近傍に設定することになり、不純物を高濃度ドーピングする必要がある。しかしながら、様々な濃度にリンドーピングした極薄SOI (Si on insulator) 層のゼーベック係数を測定したところ、 $3.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高濃度試料では、ゼーベック係数が不純物バンドの影響を強く受けることがわかった。

そこで、本プロジェクトでは、これまでの成果を踏まえながら、シリコンに外部電圧を印加することによるフェルミエネルギーの制御に関する研究を展開した。それと並行して、実デバイス作製時に必要

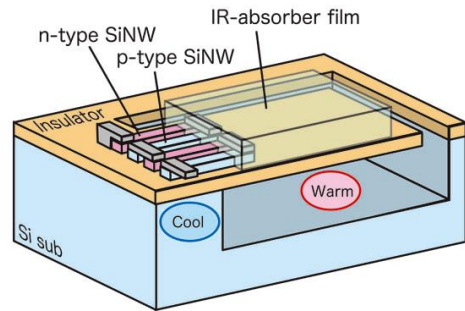


図1：シリコンナノワイヤサーモパイル型赤外線イメージセンサの概略図。

となるイオン注入によるゼーベック係数の変化の実験並びに、ナノ構造における種々の熱電特性を予測するための理論計算モデルの構築を行った。

以下、研究活動状況の概要を記す。

研究打ち合わせ：随時（共同研究者が同一キャンパスに在籍しているため）

研究討論会：2回（9/13, 2/15）

[3] 成果

(3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

【1】SOI ゼーベック係数の外部電圧制御

表面に電極を有する構造のSOI 試料を作製し、外部電圧印加に対するSOI 試料のゼーベック係数の変化を調べた。特に、フェルミエネルギーが伝導帯端近傍にくる負電圧印加時の振る舞いを、実験と理論計算の両面から調べた。その結果、外部電圧印加時のゼーベック係数は、SOI/BOX 界面付近のキャリア密度、すなわちフェルミエネルギーを介して制御でき、その値にはフォノンドラッグの効果も寄与することがわかった。また、状態密度分布の急峻性を乱すことなく、フェルミエネルギーを伝導帯端近傍で制御できる可能性を示した。

【2】イオン注入によるp型SOIの作製

SOI 基板上にシリコンナノワイヤ n 型モジュールを作製するために、収束イオンビーム (FIB : focused ion beam) による n 型 SOI 層へのガリウム

「様式3」

イオン注入を行い、p型SOI層の作製を試みた。イオン注入シミュレーションから見積もられる平均のガリウム濃度が 10^{18} cm^{-3} と 10^{19} cm^{-3} の試料を作製し、そのゼーベック係数を測定した。その結果、ゼーベック係数の符号がプラスに反転し、p型SOI層が形成されていることが確認できた。

【3】半導体における熱電変換特性の定式化

有効質量の異方性および非放物型の分散関係、バンドギャップの温度依存性を考慮した電子輸送理論に基づいて、ゼーベック効果、ペルチェ効果、トムソン効果、熱伝導率、ホール効果、ネルンスト効果などの熱電変換特性を定式化した。IV-VI族化合物半導体材料に対してゼーベック係数を計算したところ、実験値とよい一致を示した。また、本研究で得られた理論式が、超格子構造材料にも適用できることも確認できた。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトでは、ナノ構造における熱電変換特性を解明するところから始まるため、結晶中の電子の振る舞いのみならず、フォノンの輸送現象の理解も必須である。そのため、結晶中のフォノンの振る舞いを理論的に扱っている大阪大学と立命館大学の先生方との交流を開始しており、今後飛躍的に活性化させる。それに加えて、赤外線吸収膜部分の性能向上のため、有機薄膜の成長と光学特性を専門とされる先生と連携を図り、大型外部資金の獲得を目指している。

また、本プロジェクトで明らかになった熱電変換特性の成果は、一般的な熱電変換材料の性能向上に

も有用であるため、廃熱を利用する熱電発電モジュールの開発においても重要な知見を与え、グリーンエネルギー産業に大きく貢献する。

[4] 成果資料

- (1) A. Ishida, Y. Sugiyama, H. Tatsuoka, T. Ariga, M. Koyano, S. Takaoka, "Electronic transports for thermoelectric applications on IV-VI semiconductors", Mater. Trans., 53, pp. 1226-1233 (2012).
- (2) F. Salleh, K. Miwa, H. Ikeda, "Variation of SOI Seebeck coefficient by applying an external bias", J. Adv. Res. Phys., 3, pp. 021207-1-4 (2012).
- (3) K. Miwa, F. Salleh, H. Ikeda, "Improvement in measurement system of Seebeck coefficient by KFM", J. Adv. Res. Phys., 3, pp. 021205-1-4 (2012).
- (4) H. Ikeda, K. Miwa, F. Salleh, "Construction of Seebeck-coefficient measurement by Kelvin-probe force microscopy", AIP Conf. Proc. of the 9th European Conference on Thermoelectrics, 1449, pp. 377-380 (2012).
- (5) H. Ikeda, F. Salleh, "Theoretical study on the stability of the single-electron-pump refrigerator with respect to thermal and dimensional fluctuations", IEICE Trans. Electron., E95-C, pp. 924-927 (2012).