

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560701
 研究課題名（和文） ナノワイヤー構造を用いた高性能シリコン熱電変換モジュールの開発
 研究課題名（英文） Development of high-efficiency thermoelectric module using Si nanowire structures
 研究代表者
 池田 浩也 (IKEDA HIROYA)
 静岡大学・電子工学研究所・准教授
 研究者番号：00262882

研究成果の概要：

本研究では、シリコン微細加工技術を礎として、ナノ構造の導入によりシリコン系熱電変換材料の性能指数の向上を目指した。

- (1) ナノメートルサイズまで薄層化したn型SOI層におけるゼーベック係数の測定を行い、キャリア濃度に対するユニバーサルカーブを得た。そのカーブはバルクシリコンの結果と一致しており、SOI構造に由来する効果は特に見られなかった。また、高不純物濃度領域 ($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上) において、ゼーベック係数の向上が観察された。これは、不純物バンドの形成が原因であると考えられる。
- (2) KFM（表面電位顕微鏡）を用いて、温度差を与えたシリコン基板の表面電位を測定しゼーベック係数を評価したところ、 $S=-0.71 \text{ mV/K}$ が得られた。この値は、これまでの測定方法で得られた値に近い値であり、KFMによりナノ構造材料のゼーベック係数測定が可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：（分科）材料工学（細目）構造・機能材料

キーワード：熱電変換材料，シリコンナノ構造，ゼーベック係数，SOI基板，KFM（表面電位顕微鏡）

1. 研究開始当初の背景

熱エネルギーを利用した電源開発や冷却装置開発の分野において、熱電変換素子が注目されている。しかし発電効率は10%程度とかなり低いいため、熱電変換技術の実用化に

は熱電変換効率の向上が第一の研究課題となる。熱電変換効率は性能指数Zの増加と共に向上し、Zはゼーベック係数の二乗および電気伝導率に比例し、熱伝導率に反比例することが知られている。

ナノ構造を導入することにより、電子のバンド構造および状態密度、フォノンのバンド構造を変化させ、性能指数Zを向上できることが理論的に予測されている。実際、超格子構造でのZ向上が幾つか報告されている。その一方で、量子細線や量子ドット構造に対する実験的な報告はほとんどない。この理由は明白で、熱電変換材料として注目されてきたBiTe系材料や金属酸化物材料では、量子効果が発現するほどの微細構造を作製するのが困難だからである。

2. 研究の目的

本研究では、シリコン微細加工技術を利用してナノ構造を精度よく作製し、ナノ構造導入の効果を解明する。そして、シリコン熱電変換材料の性能指数の飛躍的向上を目指す。それとともに、ナノ構造材料の熱電特性を精度よく評価する測定技術を確立する。

3. 研究の方法

自作のゼーベック係数および電気伝導率を測定するための装置を用いて、SOI基板を極薄化したシリコン量子井戸構造に対する横方向のゼーベック係数と電気伝導率の測定を、系統的に行う。フェルミレベルの位置を掃引するために、ゲート電極を配したナノ構造試料を作製し、熱電特性に与える量子効果の影響を明らかにする。さらに、温度差をつけたシリコン基板についてKFM（表面電位顕微鏡）による熱起電力測定を行い、ゼーベック係数を評価する。

4. 研究成果

(1) 極薄SOI層のゼーベック係数

熱起電力ならびに試料温度の時間変化を同時にモニターできる測定装置システムを導入することにより、測定精度を大幅に向上した。そのシステムを用いて、2~100 nmまで薄層化したn型SOI基板のトップシリコン層におけるゼーベック係数の測定を行った。残念ながら、2~4 nm厚の試料では、ノイズが大きくゼーベック係数の評価ができなかった。しかしながら、6 nm以上の厚さの試料について、キャリア濃度に対するユニバーサルカーブを得た。そのカーブはバルクシリコンの結果と一致しており、SOI構造に由来する効果は特に見られなかった。また、高不純物濃度領域 ($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上)において、ゼーベック係数の向上が観察された。次項で述べる、不純物バンドの効果と思われる。今後はさらに薄層化を進め、電子の閉じ込め効果が期待される膜厚に対して測定を行う。

(2) シリコンゼーベック係数の理論計算

ナノ構造導入によるシリコンゼーベック係数の期待値を理論的に予測するために、ポ

ルツマン輸送方程式に基づいた理論計算を行った。第一段階としてバルクシリコンの計算を行ったところ、上記のユニバーサルカーブとはずれを生じた。これは、低不純物濃度領域ではフォノンドラッグに起因する熱起電力効果が、高濃度領域では不純物バンドの形成が原因であると考えられる（信学技報 ED2008-238 SDM2008-230 (2009)）。

(3) KFMによるゼーベック係数測定

KFMを用いて、温度差を与えたシリコン基板（不純物濃度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ）の表面電位を測定し、ゼーベック係数を評価した。温度差の増加に対して表面電位差も増加しており、熱起電力が測定できていることを示している。このデータを元に、測定時のバンドの曲がり方を考慮してゼーベック係数を評価したところ、 $S = -0.71 \text{ mV/K}$ が得られた。この値は、これまでの測定方法で得られた値とほぼ一致しており、KFMによるゼーベック係数測定が可能であることを示すことができた。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- 1) 池田浩也, ファイズサレ, 浅井清涼, 石田明広, 『高効率熱電変換デバイス用シリコンナノ構造の熱電特性』信学技報 ED2008-238 SDM2008-230 (2009) pp.81-85. (査読無し)
- 2) 池田浩也, 山下尚見, 『シリコンナノ構造による熱電変換デバイスの特性向上』信学技報 ED2007-224 SDM2007-255 (2008) pp.39-42. (査読無し)

〔学会発表〕（計 15 件）

- 1) H. Ikeda, F. Salleh and K. Asai, “Seebeck coefficient of ultrathin SOI films”, International Conference of Thermoelectrics 2009 & European Conference of Thermoelectrics 2009, Germany (2009.7).
- 2) ファイズサレ, 浅井清涼, 池田浩也, 石田明広, 『シリコンのゼーベック係数測定と理論的評価』, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, つくば (2009 年 3 月).
- 3) 池田浩也, ファイズサレ, 浅井清涼, 『KFM によるナノ構造熱電変換材料のゼーベック係数測定』, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, つくば (2009 年 3 月).
- 4) 池田浩也, ファイズサレ, 浅井清涼, 石田明広, 『高効率熱電変換デバイス用シリコンナノ構造の熱電特性』, 電子情報通信学会講演会, 札幌 (2009 年 1 月).
- 5) ファイズサレ, 浅井清涼, 池田浩也, 『極薄 Si 膜のゼーベック係数測定のための

装置開発』, 表面科学会中部支部学術講演会, 名古屋 (2008年12月).

- 6) H. Ikeda, "New functional and high performance devices by Si nanostructures", 10th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium and 5th International Symposium on Nanovision Science, Hamamatsu (2008.11).
- 7) H. Ikeda, "Thermoelectric characteristics of ultrathin SOI layers", 7th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2008), Hungary (2008.9).
- 8) 池田浩也, ファイズサレ, 浅井清涼, 『SOI基板におけるゼーベック係数』, 第69回応用物理学学会学術講演会, 春日井 (2008年9月).
- 9) H. Ikeda and N. Yamashita, "Thermoelectric characteristics of 2D Si slab structure on SOI wafer", International Conference of Thermoelectrics 2008, Oregon (2008.8).
- 10) 池田浩也, 山下尚見, 『Si ナノ構造の熱電特性』, 第55回応用物理学関係連合講演会, 習志野 (2008年3月).
- 11) 池田浩也, 山下尚見, 『シリコンナノ構造による熱電変換デバイスの特性向上』, 電子情報通信学会講演会, 札幌 (2008年1月).
- 12) N. Yamashita, H. Ikeda, "Electron confinement effect on thermoelectric characteristics in Si slab structures", 3rd Korean-Japanese Student Workshop, Hamamatsu, Japan (2007.10).
- 13) N. Yamashita, H. Ikeda, "Thermoelectricity in Si nanostructures", 9th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium and 4th International Symposium on Nanovision Science, Hamamatsu, Japan (2007.10).
- 14) H. Ikeda, K. Asai, N. Yamashita, M. Tabe, "Development of new functional devices using Si nanostructures - Single-electron turnstile device and thermoelectric device -", 6th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2007), Hamamatsu, Japan (2007.9).
- 15) 山下尚見, 池田浩也, 『Si ナノ構造の熱電特性』, 第68回応用物理学学会学術講演会, 札幌 (2007年9月).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田浩也 (IKEDA HIROYA)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号: 00262882

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし