

Siワイヤのゼーベック係数におけるサイズ効果の解明と表面電位顕微鏡を用いた新しい測定技術の構築

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2018-06-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鈴木, 悠平 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00025233

(課程博士・様式7) (Doctoral qualification by coursework, Form 7)

学位論文要旨

Abstract of Doctoral Thesis

専攻：ナノビジョン工学専攻 氏名：鈴木 悠平

論文題目：Si ワイヤのゼーベック係数におけるサイズ効果の解明と表面電位顕微鏡を用いた新しい測定技術の構築

論文要旨：近年、熱エネルギーと電気エネルギーを相互に直接変換できる特性から熱電変換材料の開発が期待されている。これまで様々な熱電材料が報告されているが、どの材料も変換効率にして約 10%であり実用化するためには不十分である。熱電変換デバイスの変換効率は熱電性能指数の増加に伴い単調に増加する。熱電性能指数はゼーベック係数の 2 乗と電気伝導率に比例し、熱伝導率に反比例する。高効率熱電変換デバイスの実現のためには、高いゼーベック係数と電気伝導率及び低い熱伝導率を持つ材料が求められる。

本研究では、熱電材料として Si に注目している。ゼーベック係数は他の主要な材料と比べて大きいため、取り出すことのできる電力は高い。しかし、Si の高い熱伝導率が熱電性能指数を制限しており、変換効率が低いため熱電材料として広く普及していない。性能指数の向上を実現する 1 つの方法として Si をナノワイヤ化する方法が考えられている。Si ナノワイヤの導入により、フォノンの境界散乱の増加に起因する熱伝導率の実験的な減少が報告されており、結果としてバルクサイズの Si と比べて約 100 倍の性能指数が期待される。一方、ゼーベック係数に関しては、電子の量子閉じ込め効果に起因するゼーベック係数の理論的な上昇が報告されているが、ナノワイヤ化による実験的なゼーベック係数の向上は報告されていない。従って、更なる変換効率向上のためには微細構造 Si に対するゼーベック係数の実験的な検証が不可欠である。

本研究では、Si ナノワイヤのゼーベック係数を実験的に調べるための予備実験として、大きく分けて次の 2 点について検証を行った。1 つ目は、Si ワイヤのゼーベック係数の測定である。作製が容易なサブマイクロメートルオーダーの直径を持つ Si ワイヤを作製し、そのゼーベック係数を測定した。また、ボルツマン輸送方程式から導かれるゼーベック係数のキャリア拡散成分の計算及びフォノン散乱課程の見積もりから、フォノンドラッグ成分の寄与について Si ワイヤの不純物原子の影響及び試料サイズの影響を検討した。2 つ目は、従来の方法ではナノワイヤ構造試料のゼーベック係数測定が困難であることから、表面電位顕微鏡(Kelvin-probe force microscopy : KFM)を用いたゼーベック係数測定装置の確立を行った。まず、ゼーベック係数を求めるために必要な試料温度を KFM で測定される表面電位から見積もる手法について検討した。また、マイクロオーダーの Si ワイヤを作

製し、その表面電位の分布を観測した。

Silicon on insulator(SOI)ウエハを用いて、長さ 1 mm、幅 500 nm、厚さ 85 nm の Si ワイヤを作製した。測定した Si ワイヤのゼーベック係数の測定値はバルク Si に比べて低い値を示した。この要因を明らかにするために、Si に対してキャリア輸送に起因するゼーベック係数を計算した。バルク Si の実験値は理論計算値よりも高い値を示した。この差はゼーベック係数のフォノンドラッグ成分と考えられる。一方、Si ワイヤの実験値はキャリア輸送のみを考慮した理論値に近い値を示した。このことから、作製した Si ワイヤにおいてゼーベック係数のフォノンドラッグ成分が低減したと予測される。ゼーベック係数のフォノンドラッグ成分を支配するフォノン散乱の頻度を計算によって見積もった。バルクサイズにおいてフォノン・フォノン散乱が支配的であったが、Si ワイヤの断面積を $0.3\mu\text{m}^2$ より減少させるとフォノンの境界散乱の頻度が支配的になった。このことから、作製した共ドープ Si ワイヤにおいてフォノンの境界散乱の影響が顕著になり、フォノンが電子に与える運動量の割合が減少し、フォノンドラッグ効果を低減させたと考えられる。

ゼーベック係数の評価で必要となる温度測定を KFM で見積もるために、バルク Si の温度を変化させながら KFM によって表面電位を測定した。熱電対で測定した試料の参照温度に比べ、KFM で見積もった試料温度は高い値を示した。さらに、見積もったフェルミエネルギーの温度係数は非常に良い線形性を示したが、その絶対値は報告値と異なった。このことから、KFM による温度測定ではいくらか過大評価している可能性がある。この要因として Si 表面と自然酸化膜の間に存在する界面トラップ電荷の影響が考えられる。測定したフェルミエネルギーの温度係数から界面トラップ電荷密度を見積もった。界面トラップ電荷密度の測定値と報告値のオーダーが濃度の異なる Si 全てにおいて近い値を示したことから、トラップ電荷がフェルミエネルギーの温度係数に影響を与えている可能性が高いと考えられる。結果として、界面準位密度を用いてフェルミエネルギーの温度係数に校正をかけることで、KFM による温度測定が十分可能であることを見出した。

次に、長さ $15\ \mu\text{m}$ 、厚さ 55 nm、幅 $2\ \mu\text{m}$ 、不純物濃度 $N_A=10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ の Si ワイヤを SOI ウエハ上に作製し、Si ワイヤに温度差を与えながら KFM によってその表面電位分布を測定した。Si パッド間には、温度差を与えていない状態と比べ、有意な表面電位差が観測された。このことから $15\ \mu\text{m}$ の比較的短い Si ワイヤであっても温度差をつける事が可能であり、その温度差に対応した表面電位を KFM で測定出来ることが分かった。捕獲電荷の影響を考慮した KFM で測定されるフェルミエネルギーの温度係数の理論式に測定した表面電位の値を代入することで Si パッド間の温度差を 7.1 K と見積もった。