

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19005

研究課題名（和文）界面電子状態密度制御によるSiナノワイヤの熱電変換指数巨大化への挑戦

研究課題名（英文）Enhancement of thermoelectric property of core-shell SiNWs

研究代表者

磯野 吉正（Isono, Yoshitada）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：20257819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、シリコンナノワイヤ(SiNWs)に堆積させた原子スケール被覆絶縁層中の固定電荷に着目し、コアシェル構造SiNWsの熱電変換特性の大幅な向上を目指した。QSCV計測の結果、ワイヤの被覆絶縁層に採用したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は  $-9.82 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の固定電荷密度を有していることがわかり、同被膜によってp-SiNWの表面にホール蓄積層を誘起できることがわかった。一方、開発したシリコンナノワイヤを埋め込んだマイクロ発電デバイスでは、不純物拡散濃度の影響により、常温付近では大きな出力因子を得ることが困難であった。今後、不純物濃度を高めるとともに、より広い温度領域において評価する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SiNWsのMEMSプロセスへの融合によるマイクロ発電デバイスの開発研究は、将来の社会実装という可能性を秘めている。今後のIoT（Internet of Things）社会を支える情報端末やマイクロセンサへの最適なエネルギー供給源が重要になってくるが、とくに、膨大な数のセンサノードを繋ぐセンサネットワーク社会を構築するには、電池交換で対応することは困難であり、如何にして電源を確保するかという問題が必ず生じる。至るところに存在する熱エネルギーを電源として利用できれば、電源確保の概念が変わるだけでなく、IoT社会の早期構築によって我々の生活を劇的に変える潜在能力がある。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to develop a thermoelectric power generation device with embedded p-type silicon nanowires (p-SiNWs) wrapped with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> shell, in order to enhance the power factor (PF) of SiNWs by the fixed oxide charge in the shell. As a result of QSCV measurement, it was found that Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> shell has a fixed oxide charge density of  $-9.82 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , and that the shell can induce a hole accumulation layer on the surface of p-SiNWs. On the other hand, it was difficult to obtain a large PF around room temperature in the power generation device attributed to the lower impurity concentration in p-SiNWs. In the future, it is necessary to establish a technique to increase the impurity concentration only in the surface layer of SiNWs and to evaluate it in a wider temperature range.

研究分野：ナノマイクロ科学

キーワード：Siナノワイヤ 熱電変換 界面電子状態

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

当申請の研究目的は、『界面電子状態密度制御型 SiNWs (NWs: Nanowires)』を新開発することで SiNWs の熱電変換指数 ZT 値の巨大化を実現するとともに、同 SiNWs を埋め込んだモバイル用マイクロ発電デバイスの新創成に挑戦することである。理論上、ZT 値 ( $=S^2\sigma T/\lambda$ ; S:ゼーベック係数、 $\sigma$ :電気伝導率、 $\lambda$ :熱伝導率) を増大させるには、ゼーベック係数と電気伝導率を向上させると同時に、熱伝導率を低減させる必要がある。しかしながら、ゼーベック係数の主たる支配因子であるキャリア拡散の増加は、同時に熱伝導率の増加も招くことから、両者はトレードオフの関係にある。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、SiNWs に堆積させた原子スケール被覆絶縁層中の固定電荷に着目し、ワイヤと絶縁層との界面領域でのみ電子状態密度の変化を誘発させることで、界面近傍でのみキャリア拡散とキャリア移動を促進し、ゼーベック係数および電気伝導率の大幅な増大を図る。その一方で、体積の大部分を成すワイヤコア領域では、一次元化したワイヤ特有のフォノン散乱によって熱伝導率を低減させ、SiNWs の ZT 値の大幅な向上を目指す。また、MEMS 技術との融合により、多数の界面電子状態密度制御型 SiNWs を埋め込んだマイクロ発電デバイスの新開発に挑戦する。

### 3. 研究の方法

半導体ナノ細線において、これまでの常識を覆すほどの巨大な熱電変換指数を達成する『界面電子状態密度制御型 SiNWs』を新開発するには、如何にしてボトムアップ成長 SiNWs に原子スケール絶縁層を被覆するかが鍵となる。また、多数の SiNWs を埋め込んだマイクロ発電デバイスを設計・開発する前段階として、SiNWs 単体でのゼーベック係数と熱伝導率を定量評価しておくことが重要となる。以下に研究実施項目とその方法の概略を示す。

#### (1) 絶縁層被覆 SiNWs の形成技術の確立

研究代表者が開発した LPCVD 装置を用いて、Vapor-liquid-solid (VLS) 法による直径約 50nm の p 型に拡散した SiNWs の形成と、ALD (Atomic Layer Deposition) 法による同 NWs 周囲への原子スケール  $\text{Al}_2\text{O}_3$  絶縁層の形成手法を確立する。ここでは、ALD 法では、トリメチルアルミニウム (TMA) と水蒸気を原材料とした約 10nm 程度の均一な  $\text{Al}_2\text{O}_3$  絶縁層を SiNWs 周囲に被覆する。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  絶縁層はプロセス中に微弱な負の電荷を帯電することが報告されているが、本研究では  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜の極性および固定電荷密度を QSCV (Quasi-Static Capacitance-Voltage) 法で定量評価し、これを確認する。また、比較検討のための、絶縁膜である  $\text{SiO}_2$  層についても併せて評価する。

#### (2) MEMS 技術を用いた熱電変換特性評価デバイスの開発

SiNW 単体の電気伝導率、ゼーベック係数、熱伝導率を高精度に定量評価するため、MEMS 技術を用いて熱電変換特性評価デバイスを開発する。ここでは、ゼーベック係数評価のために、デバイスにはマイクロヒーターを集積し、ワイヤ両端に温度勾配を発生させる構造とする。

#### (3) SiNW 単体でのオンチップ熱電変換特性評価

上記(2)項で開発したデバイスを用いて、SiNW 単体での熱電変換特性 (電気伝導率、ゼーベック係数、熱伝導率) を計測し、ZT 値を求める。ここで、熱伝導率評価には、電流印加に伴うジュール発熱を考慮した一次元熱伝導方程式から導出される 3 $\omega$  法 [1], [2] を採用する。

まず、熱電変換特性評価デバイスを真空チャンバー内に設置し、 $10^{-3}$  Pa の圧力の下で上記 3 種類の物理量計測を実施する。ゼーベック係数は、SiNW 両端での温度差に伴って発生する熱起電力の大きさを示すものであり、次式で示される。

$$S = \frac{V_s}{T_h - T_m}$$

本研究では、デバイス加熱部のマイクロヒーターにのみ電圧を印加して、高温側の温度  $T_h$  を実現し、低温側に当たる固定部のマイクロヒーターには電圧を印加せずに室温  $T_m$  を維持した。一方、SiNW 単体に対する熱伝導率  $\lambda$  の計測では、3 $\omega$  法を採用した。3 $\omega$  法は、電気伝導性と抵抗値の温度依存性を持つ金属細線や半導体細線材料に対して、角振動数  $\omega$  の交流電流を流して周期加熱を実施した際、細線の交流温度と温度振幅の各周波数依存性を測定することで熱伝導率を算出する方法である。交流温度は細線の電気抵抗値の温度変化から求め、温度振幅は細線両端から交流電圧中の 3 $\omega$  成分を検出して測定する。ここで、3 $\omega$  成分の交流電圧は次式で表される。

$$V_{3\omega} = \frac{4I^2 L R R'}{\pi^2 \lambda A \sqrt{1 + (2\omega\gamma)^2}}$$

同式中、 $I$  は交流電流値  $I_0$  を 2 で除した値、 $L$  は細線長さ、 $R$  は電気抵抗値、 $R'$  は抵抗値の温度依存係数、 $A$  は細線断面積である。ここで、 $\gamma$  は  $=L^2/\pi^2\alpha$  で表され、 $\alpha$  は熱拡散率である。

上式において、 $R'$ を予め別の実験にて計測しておけば、未知数は $\lambda$ と $\gamma$ の2種類になることから、少なくとも2つの周波数の交流電流により周期加熱し、 $V_{3\omega}$ を計測すれば $\lambda$ が実験的に求められる。

#### (4) マイクロ発電デバイスの設計・試作・評価

MEMS技術とボトムアップNWs結晶成長技術を融合して、SiNW単体ではなく、マイクロギャップ間に多数のSiNWs群が架橋成長したマイクロ熱電デバイスを開発し、熱起電力および出力因子を評価する。通常の熱電変化素子にはp-n接合構造が用いられるが、本研究では、同SiNWsと金属とのUni-leg構造を採用し、プロセスの複雑さとコストの低減を図る。

SiNWs群は、SOI (silicon-on-insulator)基板のデバイス層を加工した幅10  $\mu\text{m}$ 、深さ5  $\mu\text{m}$ 、長さ1000  $\mu\text{m}$ のマイクロトレンチ内部に架橋成長させる。SiNWs群をボトムアップ結晶成長させるVLS-CVD法においては、SiNWsは主に基板の $\langle 111 \rangle$ 方位に沿って成長することが報告されており、SiNWsがマイクロトレンチ側壁に対して垂直に架橋成長するように、側壁結晶面が $\{111\}$ 面となるように設計した。また、基板表面は不純物拡散により低抵抗のp型Si層とすることで、SiNWsおよび金属電極との間でオーミックな電氣的接続を得られるようにする。熱電デバイス中央部には、Cr/Au薄膜細線からなるマイクロヒーターにより表面加熱部を設置する。マイクロトレンチ近傍においても、Cr/Au薄膜細線からなる温度センサ構造を設け、デバイス中央およびマイクロトレンチ近傍の温度を、同薄膜細線の電気抵抗値の変化から計測できるようにしている。

### 4. 研究成果

#### (1) 絶縁層被覆SiNWsの形成技術の確立

絶縁層 $\text{Al}_2\text{O}_3$ で被覆SiNWの形成のため、絶縁層被覆である $\text{Al}_2\text{O}_3$ 層が有する固定電荷の極性および固定電荷密度を実測した。ここで、本研究に使用する絶縁層被覆層は $\text{Al}_2\text{O}_3$ であるが、比較検討のため $\text{SiO}_2$ 薄膜も併せて用いて、固定電荷計測用デバイスを作製した。 $\text{SiO}_2$ は正の固定電荷が、また $\text{Al}_2\text{O}_3$ は負の固定電荷を有していると報告されており、前者はTEOS-CVD法にて、後者はALD法にて成膜した。固定電荷計測用デバイスには、p-Si基板表面上に $\text{SiO}_2$ および $\text{Al}_2\text{O}_3$ をそれぞれ成膜し、また、表面、裏面には電極となるAl電極を設けており、QSCV測定を実施した。

固定電荷密度を算出するのに必要なパラメータである、金属と半導体の仕事関数の差 $\phi_{\text{ms}}$ は、p-Si基板とp-Si基板上のAlに対する不純物濃度と仕事関数の関係から推定した。本研究で使用したp-Si基板の比抵抗は8~12  $\Omega\cdot\text{cm}$ であったため、不純物濃度を $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ と概算されたことから、p-Si基板とAlの仕事関数の差は $\phi_{\text{ms}} = -0.9 \text{ V}$ を得た。

図1に $\text{SiO}_2$ 基板と $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基板のC-Vグラフを示す。 $\text{SiO}_2$ は-5~5 V、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ は-3~1 Vの範囲で電圧を印加した。 $\text{SiO}_2$ と比較して $\text{Al}_2\text{O}_3$ の印加電圧の範囲が小さいのは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ において1 Vを超える電圧においてリーク電流が発生したためである。同図より、 $\text{SiO}_2$ は負の電圧方向に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が正の電圧方向にシフトしていることが確認できる。また、フラットバンド電圧 $V_{\text{fb}} = 0.9 C_{\text{ox}}$ となる電圧は、 $\text{SiO}_2$ において $V_{\text{fb}} = -3 \text{ V}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ において $V_{\text{fb}} = 0 \text{ V}$ となった。この結果を踏まえて、両絶縁膜皮膜層の固定電荷密度は、 $\text{SiO}_2$ が $Q_f = +9.97 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が $Q_f = -9.82 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と算出された。すなわち、当初の想定に従って、 $\text{SiO}_2$ は正の固定電荷、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ は負の固定電荷が含まれていることが示された。このことから、p-SiNW上に $\text{Al}_2\text{O}_3$ 被膜の形成によって、p-SiNWsの表面にホール蓄積層を誘起させることができると考えられる。

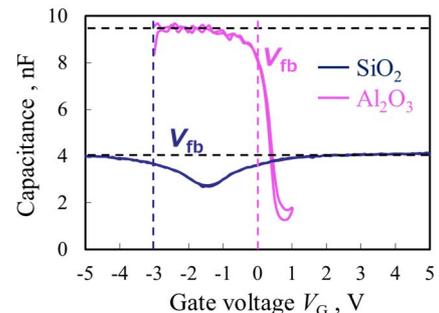


図1  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜と $\text{SiO}_2$ 膜のCV特性

#### (2) MEMS技術を用いた熱電変換特性評価デバイスの開発

SiNW単体のゼーベック係数 $S$ 、比抵抗 $\rho$ 、および熱伝導率 $\lambda$ を計測するため、熱電変換特性評価デバイスを開発した。図2(a)、(b)に同デバイスのSEM像を示す。同図(a)において、評価デバイスは加熱部と固定部から構成されるナノワイヤ試験片部、支持梁部、および支持バネ部から構成されている。加熱部と固定部との間には3  $\mu\text{m}$ のギャップを設けて、SiNW単体を自立固定できるようにしている。ここで、ゼーベック係数評価の際にSiNWの両端に温度勾配を発生させる必要があることから、加熱部および固定部には、同図(b)に示す幅1.5  $\mu\text{m}$ の金薄膜製マイクロヒーターを集積している。図示は省略するが、同ヒーターのパターン寸法形状は、有限要素法によるジュール熱・熱伝導連成解析を実施して決定しており、0.64 Vの印加電圧によって加熱部構造体の温度が5 K上昇する設計となっている。また、加熱部および固定部には、各2本、合計4本の金薄膜製リード線が設けられ、この4本全てにSiNW単体が交差するように設置される。これは、SiNWの $S$ 、 $\rho$ 、 $\lambda$ を4端子法によって電氣的に計測するためである。

一方、支持梁部は、マイクロヒーターによって昇温した加熱部から基板部への熱伝導を抑制するため、一つの梁の長さが  $280\ \mu\text{m}$ 、幅が  $8\ \mu\text{m}$  と細長い構造とし、計 4 本の支持梁で加熱部を基板部から自立させている。また、支持バネ部は、昇温時の加熱部構造体の熱膨張に伴うギャップ間距離の変化を抑制するために設けている。同支持バネの寸法形状は、5K の温度上昇時に設計時のギャップ間距離  $3\ \mu\text{m}$  を維持できるように、有限要素法による熱伝導・弾性構造連成解析によって決定している。すなわち、支持バネは、ゼーベック係数計測時に、SiNW の歪み発生を抑制するためのものである。

以上により、SiNW の破損を抑制しつつ、かつ 1 つのデバイス上で熱電変換性能評価指数  $ZT$  を概算するために必要な 3 種類の物理量を計測することが可能となる。SiNW 単体のゼーベック係数  $S$ 、比抵抗  $\rho$ 、および熱伝導率  $\lambda$  の計測に当たっては、試験片部ギャップ間に SiNW を架橋し、かつ 4 本の金リード線に交差するように設置する必要がある。本研究では、同ギャップ間への SiNW の架橋は、FIB-SEM 内に設置されたナノプロービングシステムを用いて実施した。図 3 に示すように、VLS-CVD 法によって SiNW 群が結晶成長した Si 基板から、ナノプローブによって SiNW 単体を捕獲する。その後、プローブを加熱部と固定部のギャップ位置に移動させ、同図に示すように、4 本のリード線全てに接触させる。この状態を維持しながら、接触点にイオンビーム照射するとともにタングステンを含んだ化合物ガスを供給することで、SiNW とリード線とを電氣的に接続しつつ同ギャップ間に固定した。本研究で架橋に成功した SiNW の長さは  $8.34\ \mu\text{m}$ 、直径は  $292\ \text{nm}$  となった。

以上より、熱電変換特性評価デバイスの製作に成功した。

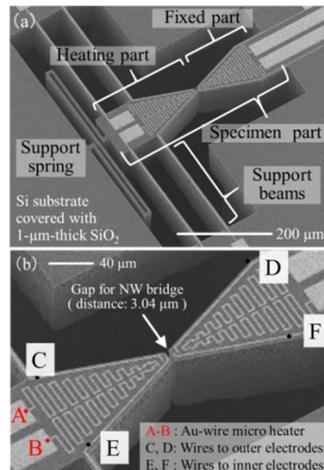


図 2 熱電変換特性評価デバイスの SEM 像

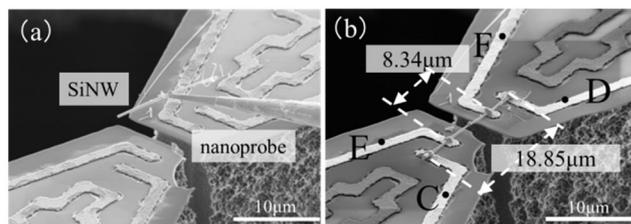


図 3 SiNW 単体のデバイスへの架橋 SEM 像

### (3) SiNW 単体でのオンチップ熱電変換特性評価

SiNW 単体に対するゼーベック係数  $S$ 、比抵抗  $\rho$ 、および熱伝導率  $\lambda$  の計測では、SiNW を固定した計測用デバイス上の 4 配線のうち、内側の 2 配線を用いて 2 端子法にて実施した。計測用デバイスの設計、製作の当初は、前述のように、高精度計測のために 4 端子法計測を想定したが、架橋後の予備計測の結果、外側 2 本のうち 1 本のリード線で導通が確認されなかったためである。この理由は、SiNW 架橋時のタングステンによるデポジションが不十分であったため、SiNW と配線が接触していないことに起因するものであった。

図 4 に、マイクロヒーターを用いて構造体を加熱した際の SiNW の温度依存係数と、室温(300 K)での  $I$ - $V$  特性を示す。同図より、SiNW の室温での比抵抗と室温近傍での温度依存係数は、それぞれ  $3.34 \times 10^{-3}\ \Omega \cdot \text{m}$ 、 $3.72 \times 10^{-1}\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}/\text{K}$  であった。得られた比抵抗は、ハイドープ(不純物濃度約  $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ )された SiNW の比抵抗  $3 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{m}$  [3]より 2 桁大きい値を示した。また、温度依存係数も、ハイドープ SiNW の  $2.5 \times 10^{-3}\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}/\text{K}$  [3]より 2 桁大きい値となった。すなわち、計測に用いた SiNW の不純物濃度は非常に低いと考えられる。

図 5 に、加熱部側だけをマイクロヒーターで加熱した際に生じた SiNW の熱起電力を示す。SiNW 両端に 5 K の温度差を与えた時の熱起電力は  $0.74\ \text{V}$  であり、計測結果と温度差の関係からゼーベック係数  $S$  は  $76.1\ \mu\text{V}/\text{K}$  と算出された。これは、他研究で得られているハイドープ(不純物濃度約  $3 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ )の SiNW に対する  $200\ \mu\text{V}/\text{K}$  [4]に比べて小さい。一般に、半導体材料のゼーベック係数  $S$  は不純物濃度が低いほど高いとされていることから、得られた SiNW のゼーベック係数は相反する結果となった。これは、SiNW 架橋時に付着したガリウム及びタングステンから成るフレアガスによる影響と考えられる。

SiNW の  $V_3$  に対する交流電流周波数依存性を図 6 に示す。同図より、SiNW 単体の熱伝導率は  $1.82 \times 10^{-1}\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  と算出された。この値は、直径  $52\ \text{nm}$  のハイドープ SiNW に対する  $1.6\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  [3]より 1 桁小さいであった。以上より、環境温度(300 K)での SiNW 単体での  $ZT (=S^2\sigma T/\lambda)$

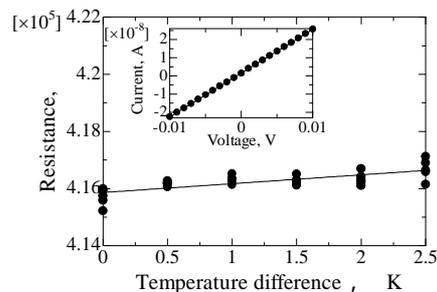


図 4 SiNW 単体の電気抵抗温度依存性と  $I$ - $V$  曲線

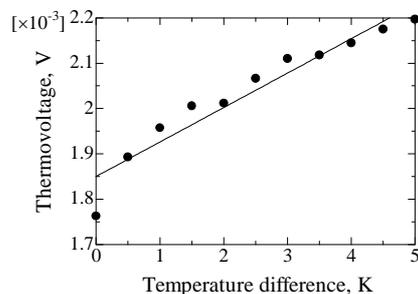


図 5 SiNW 単体の起電力の温度差依存性

値は  $2.86 \times 10^{-3}$  となり、これまでに報告されているハイドープ SiNW の ZT 値 0.2 ~ 0.6 [3], [4] より 2 桁小さい結果となった。これは、2 桁小さい比抵抗とゼーベック係数に起因するものである。今後は、SiNW の不純物濃度をさらに高める必要がある。

#### (4) マイクロ発電デバイスの設計・試作・評価

架橋成長した SiNWs を含む熱電変換発電デバイスの SEM 像と、SiNWs 架橋部の拡大 SEM 像をそれぞれ図 7(a), (b) に示す。SiNWs 群の平均的な直径はそれぞれ約 100 nm

であった。また、マイクロレンチの反対側の側壁まで成長した SiNWs は、マイクロレンチ側壁に対して垂直に、すなわち  $\langle 111 \rangle$  方位に成長したものもあるが、成長過程で異なった方位へと折曲成長したものも多く存在している。これは、SiNWs 成長に必要となるモノシランガスのマイクロレンチ内部への流入の不均一性に金したものと考えられる。SiNWs 架橋成長後、同ワイヤ群に不純物ドーピングを実施し、また、ALD 法による  $\text{Al}_2\text{O}_3$  層の形成、各種金属リード線および電極を形成し、デバイス作製は完了した。

SiNWs の抵抗計測結果から、平均の比抵抗は  $0.19 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  (表面不純物層では  $0.69 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$  と推定)、表面不純物濃度は  $2.32 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  程度であると推定された。これは研究計画当初の表面不純物濃度  $\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  より低い値となった。

一方、図 8 に温度差 6 ~ 8K での起電力計測結果を示す。半導体のゼーベック係数は不純物濃度が低いほど高いとされているが、SiNWs 群のゼーベック係数は  $1266 \mu\text{V/K}$  となり、既に報告されている低濃度ドーパブルク Si (不純物濃度  $3.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) の  $1200 \mu\text{V/K}$  [5] と近い値を示した。

図 9 に、計測で求められた比抵抗およびゼーベック係数を用いて 25 ~ 40 °C の温度範囲で概算した出力因子 (PF) を示す。SiNWs の 25 °C での PF は  $0.85 \mu\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}^2)$  となり、これはピスマステルルの  $4000 \mu\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}^2)$  [6] やハイドープ SiNW の  $3000 \mu\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}^2)$  [3] の 4 桁小さい値となった。ゼーベック係数が大きい値にも係わらず PF の極端な低下を招いた原因は、大きい比抵抗 (低い不純物濃度) による影響と考えられる。このことから、実用水準を満たすためには、SiNWs 群への電気伝導率の増大を図る必要があると言える。また、PF は温度依存性があり、材料毎に高性能が得られる温度領域が異なる。そのため、今後はより広い温度領域において比抵抗およびゼーベック係数の計測を行うことで、高い性能が得られる温度領域を解明する必要もある。

#### < 引用文献 >

- [1] N. O. Birge, "Specific-heat spectroscopy of glycerol and propylene glycol near the glass transition", Phys. Rev. B, Vol. 34, No. 3, pp. 1631-1642 (1986)
- [2] L. Lu, W. Yi, and D. L. Zhang, "3 $\omega$  method for specific heat and thermal conductivity measurements", Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 7, pp. 2996-3003 (2001)
- [3] A. I. Hochbaum, R. Chen, R. D. Delgado, W. Liang, E. C. Garnett, M. Najarian, A. Majumdar, and P. Yang, "Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires", Nature, Vol. 451, pp. 163-167 (2008)
- [4] A. I. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J.-K. Yu, W. A. Goddard, and J. R. Heath, "Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials", Nature, Vol. 451, pp. 168-171 (2008)
- [5] 古藤誠, "VLS 法による半導体ナノワイヤの成長とその応用に関する研究," 関西大学博士論文, (2011)
- [6] J. H. Bahk, H. Fang, K. Yazawa, A. Shakouri, "Flexible thermoelectric materials and device optimization for wearable energy harvesting", Journal of Materials Chemistry C (2015)

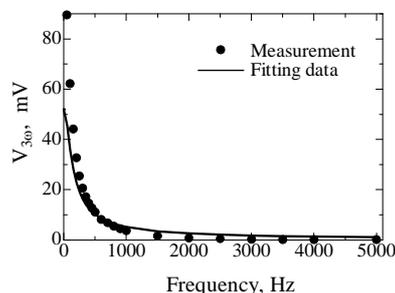


図 6  $V_{3\omega}$  の周波数依存性

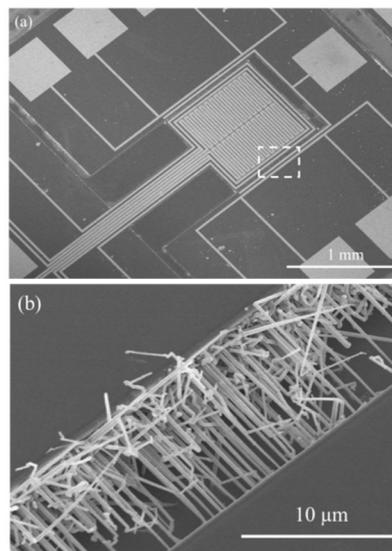


図 7 SiNWs 埋め込みマイクロ発電デバイスの SEM 像

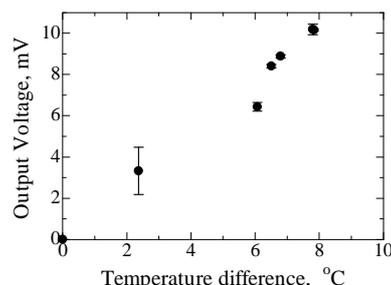


図 8 熱起電力の温度差依存性

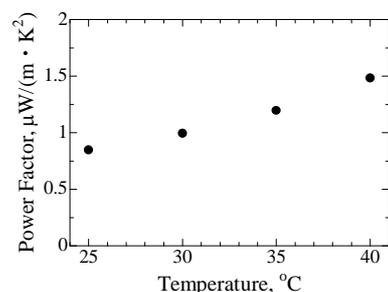


図 9 マイクロ発電デバイスの出力因子 (PF)

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 北川諒, 井本大暉, 上杉晃生, 菅野公二, 磯野吉正
2. 発表標題 VLS成長SiNW単体に対する熱電変換特性評価
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川 諒, 岸本 卓巳, 小國 凌, 上杉 晃生, 菅野 公二, 磯野 吉正
2. 発表標題 架橋成長Si ナノワイヤの熱電特性評価に関する研究
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----