

急速溶融成長法で作製された SiGe ワイヤの熱電特性

Thermoelectric Characteristic of SiGe Wires Fabricated by Rapid-Melting Technique

早大理工¹、名大院工²、学振特別研究員³、JST さきがけ⁴、○熊田 剛大¹、中村 俊貴¹、富田 基裕¹、中田 壮哉²、高橋 恒太^{2,3}、黒澤 昌志^{2,4}、渡邊 孝信¹Waseda Univ.¹, Nagoya Univ.², JSPS Research Fellow³, JST-PRESTO⁴,○T. Kumada¹, T. Nakamura¹, M. Tomita¹, M. Nakata², K. Takahashi^{2,3}, M. Kurosawa^{2,4}, T. Watanabe¹E-mail: kumada_takehiro@watanabe.nano.waseda.ac.jp

【はじめに】IoT (Internet of things) 社会の実現に向けて、ゼーベック効果による熱電発電をはじめとする、エネルギー・ハーベスティング技術に関する研究が近年活発化している。近年、Si ナノワイヤが優れた熱電性能指数を示すことが明らかにされ^[1]、Si-CMOS プロセスとの親和性の高い熱電材料として注目されている^[2,3]。また、古くから高温領域で優れた熱電性能を示すことが知られている SiGe も Si-CMOS プロセスで用いられる材料であり、Si と同様に細線化することでさらなる熱電性能の向上も期待される。我々はこれまで、急速溶融成長法で作製した組成傾斜を有する SiGe ワイヤの熱電性能を評価してきた^[4,5]。今回、長さの異なる SiGe ワイヤの熱電発電量を比較した。

【実験】作製した微小熱電デバイスは、組成傾斜を有する SiGe ワイヤの両端が、Ni の電極パッドに接続された構造となっている (Fig.1)。ワイヤ幅 W_{wire} は $3\ \mu\text{m}$ とし、ワイヤの長さ L_{wire} は $10\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ の2種類を用意した。デバイスの作製手順を以下に示す。まずシリコン窒化膜上に、アイランド状に加工した Ga ドープ多結晶 Si 層を $50\ \text{nm}$ 形成し、MBE法により a-Si_{0.15}Ge_{0.85} 膜を $100\ \text{nm}$ 堆積し、ワイヤ状にパターンニングした。その後 PECVD で SiO₂ キャップ層を $1\ \mu\text{m}$ 堆積した後、最高温度 1100°C 、N₂ 雰囲気下で熱処理を行い、急速溶融成長法により組成傾斜型 SiGe ワイヤを形成した。本研究では不純物ドーピングは行っていない。

熱電発電測定では、SiGe ワイヤの両端に温度差を印加した状態で、 $-0.2\ \text{nA} \sim +0.2\ \text{nA}$ の範囲で定電流を印加して I - V 特性を測定し、そこから内挿して開放電圧 (V_{oc}) を求めた。また、顕微サーモグラフィカメラにより、ワイヤ両端の温度差 (ΔT_{wire}) を求めた。以上の方法で測定した V_{oc} と ΔT_{wire} から、SiGe ワイヤの実効的なゼーベック係数を評価した。

【結果】Fig. 2 に熱電測定で得られた、SiGe ワイヤの開放電圧-外部印加温度差 ($V_{\text{oc}}-\Delta T$) 特性を示す。温度差が増大するにつれて V_{oc} が増大する傾向が確認された (Fig.2)。これは、印加温度差 ΔT の増大とともに、ワイヤ両端の温度差 ΔT_{wire} も増大し、 $V_{\text{oc}} (= S\Delta T_{\text{wire}})$ が増大したためである。前回我々は、熱起電流 (I_{TE}) を直接測定することによって、SiGe ワイヤの熱電特性を評価した^[4]。しかし I_{TE} は $\sim 10^{-2}\ \mu\text{A}/\text{cm}$ 程度と小さく、測定回路のノイズに影響を受けやすいため、 ΔT - I_{TE} の測定結果のばらつきが大きかった^[4]。これに対して今回は、測定回路のノイズの影響が小さい V_{oc} を測定した。その結果、 ΔT と V_{oc} のリニアな関係性が明瞭に確認された (Fig.2)。印加温度差 $\Delta T = 25\text{K}$ の温度差を付与した場合、測定された V_{oc} と ΔT_{wire} から、SiGe ワイヤのゼーベック係数は $+9.3\ \mu\text{V}/\text{K}$ と見積もられた^[5]。以前報告した値 ($+24\ \mu\text{V}/\text{K}$)^[4] と大きさは異なるが、P 型の特性を示した点は一致している。ノンドープ SiGe 混晶のキャリアタイプは P 型であり、正のゼーベック係数が測定されたことは妥当といえる。このゼーベック係数のナノワイヤ長 L_{wire} 依存性を Fig.3 に示す。 L_{wire} の縮小につれてゼーベック係数が増大する傾向が確認された。この傾向は、Si ナノワイヤでも繰り返し観測されている^[5,6]。最大発電量 P_{max} は通常内部抵抗に反比例する。すなわち、ナノワイヤの場合は L_{wire} が短くなるほど P_{max} が増大するが、今回得られた結果では、ゼーベック係数のナノワイヤ長 L_{wire} 依存性も加わって、内部抵抗の変化のみから予想される発電量の増大傾向をさらに上回った (Fig.3)。これらの結果は、SiGe ワイヤを用いた微小熱電発電デバイスにおいても、Si ナノワイヤの場合と同じく微細化・高集積化によって高出力化できることを示している。本研究は JST-CREST (PMJCR15Q7)、JST さきがけ (JPMJPR15R2) および六研連携プロジェクト (文部科学省) の支援により実施された。PECVD-SiO₂ 成膜にご協力頂いた角田功先生 (熊本高専) に御礼申し上げます。

[1] A. I. Hochbaum, et al., Nature, 451, 163 (2008). [2] M. Totaro et al., Microelectronic Engineering, 97, 157 (2012). [3] G. Pennelli, Beilstein J. Nanotechnol., 5, 1268 (2014). [4] S. Hashimoto et al., IEEE Electron Devices Technol. Manuf. Conf. (EDTM), 283-285, (2018). [5] T. Kumada et al., EDIT (2019). [6] T. Zhan et al., Sci. Technol. Adv. Mater., 19, 1, 443-453, (2018).

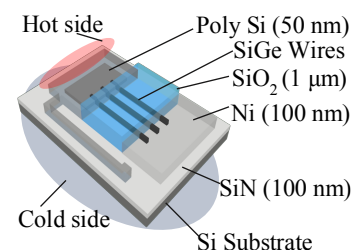


Fig.1 Schematic of fabricated planar Micro Thermoelectric Generator of laterally graded SiGe wires.

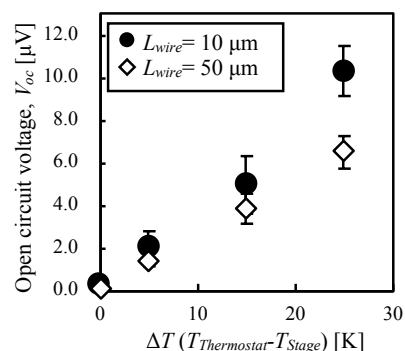


Fig.2 $\Delta T_{\text{wire}}-V_{\text{oc}}$ characteristics of SiGe wires^[5].

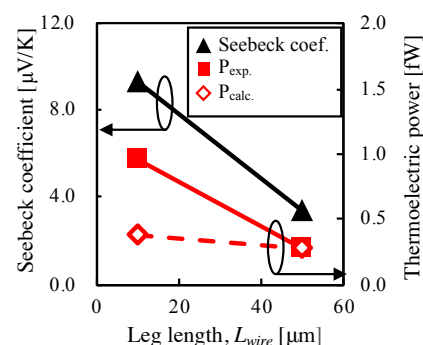


Fig.3 $L_{\text{wire}}-S$ and P characteristics of SiGe wires. $P_{\text{exp.}}$ and $P_{\text{calc.}}$ are the measured power and predicted power from resistance, respectively.