

Si 製高集積熱電発電モジュールの最適設計： Si ナノワイヤの熱伝導率が発電性能に与える影響

Optimum Design of Si-based Integrated Thermoelectric Generator Module: Impact of Thermal Conductivity of Si-nanowires on the Module Performance

早大理工¹、静岡大学²、産総研³、[○]安部 克基¹、織田 海斗¹、富田 基裕¹

猪川 洋²、池田 浩也²、松川 貴³、松木 武雄^{1,3}、渡邊 孝信¹

Waseda Univ.¹, Shizuoka Univ.², AIST³, [○]K.Abe¹, K.Oda¹, M.Tomita¹, H.Inokawa², H.Ikeda²,

T.Matsukawa³, T.Matsuki^{1,3} and T.Watanabe¹

E-mail: katsube.aki@akane.waseda.jp

【はじめに】IoT 時代の新たな電源技術として、熱電発電をはじめとするエナジー・ハーベスティングに期待が寄せられている。近年、ナノサイズの Si が優れた熱電変換能力を示すことが明らかにされている[1]。我々の研究グループは、Si ナノワイヤ(Si-NW)を用いた熱電発電デバイスの構造を考案し[2]、微細化によって発電性能が向上することを実証してきた[3]。我々が提案する熱電発電デバイスを IoT デバイスなどに適用するには、このデバイスの高密度集積化が必要である。これまで、集積化モジュールの発電性能を最大にする構造とサイズを詳細に明らかにするため、有限要素法(FEM)を用いたデバイス設計に取り組んできた[3, 4]。Si-NW 長さについてはサブ μm に最適値があることを報告したが[3]、Si-NW の太さおよび熱伝導率が発電性能に与える影響についてはまだ検討していなかった。Si-NW を細くすると熱伝導率が下がるが、熱伝導率は Si-NW 表面形状にも依存するという報告もある[5]。今回、発電性能を最大化する Si-NW の最適な高さおよび長さに対する影響を解析した結果を報告する。

【計算方法】FEM 計算で使ったモデルを Fig. 1 に示す。n 型 Si-NW のみを用いる、いわゆるユニレグ型熱電発電素子が二つ含まれており、各素子の高温側同士が隣り合わせになるように配置されている。二つの素子は、第一 Al 配線層(1st Al wiring layer)を通じて電気的に接続されている。第一 Al 配線層と SiO₂ を挟んで電気的に絶縁された第二 Al 配線層(Heat source)のコンタクト部分(Al heat guide layer)を通じて第一 Al 配線層に熱流のみが優先的に導かれる。NW の長さを 250nm~1000nm、厚さを 50nm~230nm の範囲で変化させ、単位面積当たりの発電量を比較した。Si-NW 両端の Si パッドの幅ならびに Al 配線の幅は 1200nm、Si パッドと Al 配線をつなぐ Al コンタクトの幅は 600nm に固定した。デバイス上面は温度 298.15K の高温熱源に、底面は 293.15K の低温熱源に接している。SOI 層の NW 以外の部分、SiO₂、Al の熱伝導率は 131W/m²K、1.4 W/m²K、238 W/m²K に設定した。バルクの Si の熱伝導率は、131W/m²K である。Si-NW の熱伝導率はサイズに大きく依存し、数 10 ナノメートルまで細くなるとバルクの 1/10~1/100 まで低下することが知られている[6]。本研究では、これまでの我々の試作デバイスを用いた評価結果とさらなる評価結果を参考に[7]、Si-NW の熱伝導率を 1.4 W/m²K と 16.5 W/m²K に設定し、発電性能を比較した。

【結果】Fig. 2、3 に、熱伝導率が 1.4 W/m²K および 16.5 W/m²K の場合の発電密度と Si-NW サ

イズの関係を示す。青い矢印で示すように NW 長が増えるほど最大発電量が得られる NW 幅が増加していく。赤い点は探索した範囲における最大発電密度が得られた点である。NW が短い場合、熱伝導率の大きさに依らず、NW の厚さが薄いほど発電密度が増している。これは、NW が厚くなることで熱抵抗が減少し、高音部と低温部の温度差が付きにくくなるためと説明できる。一方 NW 長が 1000nm の場合に注目すると、熱伝導率 1.4 W/m²K では、NW 部が厚くなるほど発電密度が高くなり、16.5 W/m²K の場合では厚さ 140nm で発電密度が最大となった。このように Si-NW の熱伝導率によって最適寸法が大きく変わることがシミュレーションで明らかとなった。Si-NW を用いた熱電デバイスを設計するには、Si-NW 部の正確な熱伝導率を知ることが不可欠である。なお、本研究は JST-CREST (JPLJCR19Q5) の助成を受けている。

[1] A. Boukai et al., Nature, 451.7175 (2008) 168., [2] H. Zhang, et al., IEEE TED 65 (2018) 2016., [3] M. Tomita, et al., VLSI Symp. Tech. Dig. (2018) 93., [4] K. Oda, et al., SSDM, C-1-02 (2019)., [5] Arden L. Moore, Sanjoy K. Saha, et al., Appl. Phys. Lett 93, 083112(2008)., [6] A. Hockbaum, et al., Nature 451, (2008) 163., [7] Y. Goi, et al., JSAP Spring, 9p-W371-13 (2019).

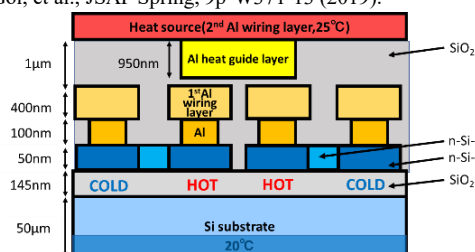


Fig.1 Cross section view of simulated device

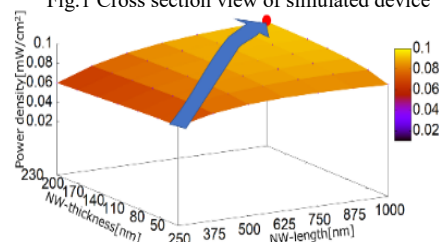


Fig.2 Power generation density with nanowire's thermal conductivity 1.4W/m·K

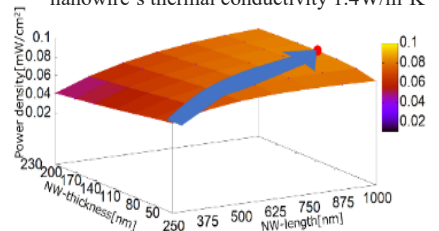


Fig.3 Power generation density with nanowire's thermal conductivity 16.5W/m·K