

微小 Si 熱電発電デバイスにおけるペルチェ効果とジュール発熱の影響

Peltier and Joule Effects on the Performance of Micro Si Thermoelectric Generator

早大理工¹, 産総研² ○保科 拓海¹, 安部 克基¹, 織田 海斗¹, 富田 基裕¹,
松木 武雄^{1,2}, 渡邊 孝信¹

Waseda Univ.¹, AIST², ^oT. Hoshina¹, K. Abe¹, K. Oda¹, M. Tomita¹,
T. Matsuki^{1, 2} and T. Watanabe¹

E-mail: 3ya5norisu792@fuji.waseda.jp

【はじめに】熱電デバイスの発電性能はゼーベック効果のみを用いて解析することが多いが、厳密には熱起電流によるジュール発熱や、熱起電流によって吸熱・発熱が起こるペルチェ効果も存在する。我々は Si 集積回路の加工技術で作製できる微小熱電発電デバイス[1]の開発を進めており、有限要素法(FEM)シミュレーションと等価回路モデルによる数値モデリングで、発電性能を最大化するデバイス構造の最適条件を調査してきた。これまでの解析ではジュール発熱やペルチェ効果は無視してきたが、サブミクロンオーダーに微細化された熱電デバイスの集積モジュールの性能を正確に予測する上で、果たしてそれらの効果が無視できるかどうか定かではない。そこで今回、ペルチェ効果とジュール発熱の効果を含んだ FEM シミュレーションを実施し発電性能に与える影響を調査した。

【計算方法】FEM シミュレーションに用いたモデルの断面図を Fig.1 に示す。n 型 Si ナノワイヤ(Si-NW)を電氣的に直列接続したユニレグ構造となっている。Si 基板上に SiO₂ 絶縁層を挟んで n 型 Si-NW が配置され、両端が Si パッドと接続されている。隣接する熱電素子の高温側が隣り合うように配置し、これらが Al 配線層を通じて電氣的に接続されている。熱源 (Heat source)から高温側の Al 電極にのみ熱流が優先的に導かれるように Heat guide layer が設けられ、Al 配線層と Heat guide layer は SiO₂ 膜を挟んで電氣的に絶縁されている。Si パッド幅と Al 配線幅は 3 μ m、Si パッドと Al 配線を繋ぐ Al コンタクトの幅は 1.8 μ m に固定した。Al 熱源の温度は 298.15K、デバイス底面は 293.15K の低温熱源に接している。Si-NW の長さを 0.1 μ m ~1 μ m、Si のゼーベック係数 S は我々の行った実験[2]を参照して-200 μ V/K と、一桁大きい-2000 μ V/K に設定し、Table I に示すようにペルチェ効果とジュール発熱効果の有無を変えて最大発電効率の違いを比較した。

【結果】 Fig.2 と Fig.3 に、 $S=-200\mu\text{V/K}$ および

$S = -200 \mu\text{V/K}$ の場合の、最大発電効率と Si-NW 長さの関係を示す。 S が $-200 \mu\text{V/K}$ の場合では、条件 A, B, C において最大発電効率に違いは見られなかった。一方、 $S = -200 \mu\text{V/K}$ の場合、ペルチェ効果がない条件 B と比べて、ペルチェ効果を含む条件 A では最大発電効率が約 50% 小さくなることが判明した。ジュール発熱については、条件 A, C の結果を比較して分かるように、 S の大小に関わらず性能への寄与が小さいことが確認できた。これまでの我々の実験で、基板上に横たわった Si ワイヤのゼーベック係数 S は $-200 \mu\text{V/K}$ よりも小さな値 [2] であり、この条件では、ペルチェ効果とジュール発熱の効果を共に含まないシンプルなモデルで十分正確な性能予測が可能と考えられる。

【謝辞】本研究は JST-CREST(JPMJCR19Q5)の助成を受けている。

[1] M. Tomita et al., IEEE TED 65 (2018) 5180.

[2] K. Katayama et al., SSDM, F-2-04 (2020).

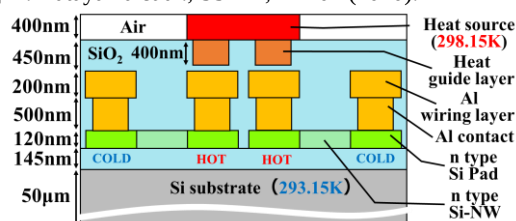


Fig.1 Cross section view of simulated device model

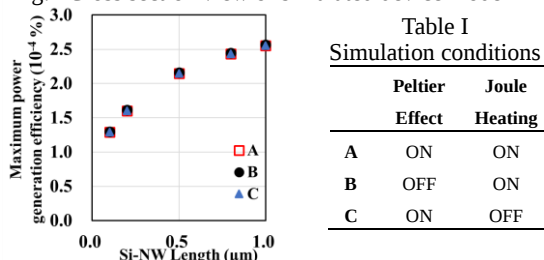


Fig.2 Maximum power generation efficiency with Si-NW's Seebeck coefficient $-200\mu\text{V/K}$

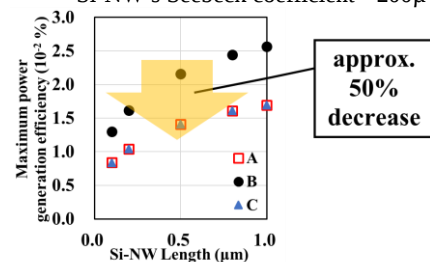


Fig.3 Maximum power generation efficiency with Si-NW's Seebeck coefficient $-2000\mu\text{V/K}$