

短い熱電エレメントを有するシリコン熱電発電デバイスの設計

Designing of a silicon thermoelectric generator with short thermoelement

早大理工¹ 徐 泰宇¹, 橋本 修一郎¹, 麻田 修平¹, 渡邊 孝信¹Waseda Univ.¹ T. Xu¹, S. Hashimoto¹, S. Asada¹, and T. Watanabe¹

E-mail: jo@watanabe.nano.waseda.ac.jp

【はじめに】熱電発電は環境の温度差から電気エネルギーを作り出す究極の再生可能エネルギー利用法である。熱電発電素子の出力を大きくするには、熱電エレメント中に大きな温度勾配をつくる必要がある。そのためには、熱電エレメント以外の部位の寄生熱抵抗を相対的に小さくするため、熱電エレメント長をできるだけ長くすることが得策と考えられてきた[2]。しかし、寄生熱抵抗を徹底的に抑制できれば、熱電エレメントを短くする方が温度勾配を大きくでき、大きな発電能力が得られるはずである (Fig. 1)。本研究では、シリコンチップの表面に形成可能な熱電素子の実現を目指し、シリコンナノワイヤを熱電エレメントとする極微細熱電発電素子の設計を行った。

【シミュレーション方法】Fig. 2 に、プレーナ型熱電発電素子の 3 次元シミュレーションモデルを示す。Si ナノワイヤの幅および高さを 20nm、熱伝導層の AlN の厚さを 500nm、レグとレグの間の櫛の部分の幅を 500nm とした。ナノワイヤ構造の Si の熱伝導率はバルクに比べて大幅に低下することが知られている[3]。今回のシミュレーションでは Si ナノワイヤ部の熱伝導率を $1.31\text{W/m}\cdot\text{K}$ とした (バルク Si の $1/100$)。デバイスは SOI 基板上に形成されており、BOX 層および支持 Si 基板の厚さはそれぞれ 145nm と 775um とした。熱境界条件として、基板の裏面に 300K の定温熱浴、デバイスの中央の AlN 膜表面に 350K の定温熱浴を設けた。様々なナノワイヤ長について Si ナノワイヤ中の温度分布を計算した。シミュレーションには、COMSOL Multiphysics 5.2 を用いた。

【結果】Fig. 3(a) に Si ナノワイヤの両端の温度差のワイヤ長依存性を、Fig. 3(b) に Si ナノワイヤ内部の温度分布を示す。Fig. 3(a) から、長さ 0.1um 以上の Si ナノワイヤでは両端に約 40K の温度差が生じていることがわかる。Fig. 3(b) より、特に高温熱源近傍で急峻な温度勾配が形成されており、ワイヤ長が短くなるにつれナノワイヤ全体にわたって温度勾配が維持されていることがわかる。これまで提案されてきたプレーナ型熱電発電素子では、熱流のバイパス経路を遮断するため熱電エレメント下部に空洞が設けるのが普通である。しかし今回提案する構造ではそのような空洞は設けられておらず、熱流の大部分は高温熱極から垂直に基板裏面に向かって流れる。その一部の漏れ熱流が、局所的に大きな温度勾配を形成したと考えられる。この結果から、熱電デバイスの構造を最適化すれば、短い熱電発電エレメントでも十分な熱電性能が見込めることがわかる。講演会当日は発電シミュレーションの結果も含めて議論する。

【謝辞】本研究は JST-CREST の支援により実施された。

【参考文献】[1] L. E. Bell, Science, vol. 321, no. 5895, pp. 1457-1461, Sep. 2008. [2] K. Y. Lee, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 5, no. 8, Aug 2015. [3] A. I. Boukai et al., Nature 451, 168

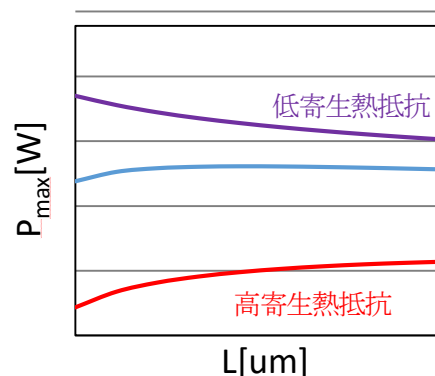


Fig.1. Dependence of maximum power, legs' length and parasitic thermal resistance.

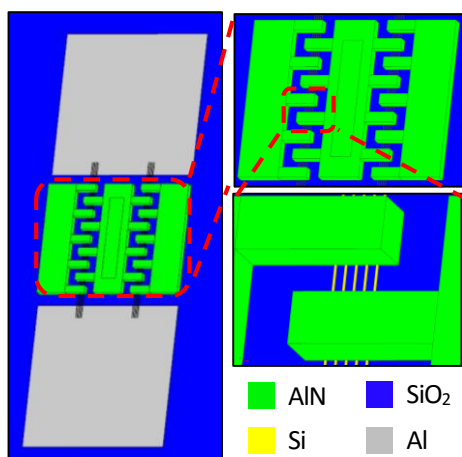


Fig.2. 3-D TCAD simulation model.

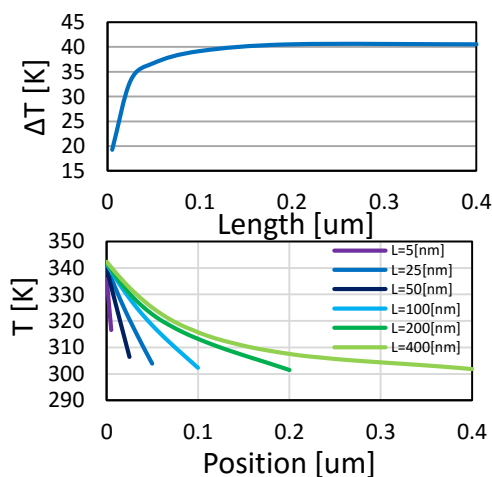


Fig.3. (a) Dependence of ΔT and legs' length. (b) Dependence of temperature profile and legs' length.