ペルチェ効果とジュール発熱を含む等価回路モデルによる微小熱電変換デバイスの性能解析 Performance Evaluation of Cavity-free Micro Thermoelectric Generator

by Electro-thermal Equivalent Circuit Model Including Peltier and Joule Effects 早大理工¹,大工大², 産総研³, ^O富田 基裕¹,保科 拓海¹,鎌倉 良成²,

松木 武雄 1.3, 渡邊 孝信

Waseda Univ.¹, OIT², AIST³, ^oM. Tomita¹, T. Hoshina¹, Y. Kamakura², T. Matsuki^{1,3},

and T. Watanabe¹ E-mail: tomita_motohiro@watanabe.nano.waseda.ac.jp

【はじめに】Si ナノワイヤ(Si-NW)の優れた熱電変換性能を活かした、Si-CMOS 技術と親和性 が高い微小熱電発電素子(µ-TEG, Micro Thermoelectric Generator)の研究開発が盛んに進められてい る。我々は Si-NW を SiO₂/Si 基板上に直接置いたキャビティフリーµ-TEG 構造を考案し、単段の μ-TEG デバイスを試作し、微細化により発電密度が向上することを実証した[1]。これまで行ってきたデバイス動作解析では、熱電効果としてビーベック効果のみ考慮してきたが、熱電変換性能 を正確に評価するためにはペルチェ効果やジュール発熱も考慮する必要がある。本研究では、こ れらペルチェ効果とジュール発熱効果を含めたキャビティフリーμ-TEG の等価回路モデルを作成 し、最大変換効率の定式化を行った。

【計算モデル】Fig.1に電熱等価回路モデルを示す。Si基板の上にSiO_絶縁層があり、その上にSi-NWが形成されている。赤色で示した熱等価回路部は、有限要素シミュレーションで計算したデバ イス内部の温度分布に基づいて作成しており、温度勾配の大きな部分に熱抵抗素子を配置してい る[1]。Si-NW長L_{NW}が10 µm以下ではSi基板部分の水平方向の温度勾配は無視できるほど小さいた め、Si基板部分は垂直方向成分の熱抵抗素子一つで表した。この熱等価回路モデルにペルチェ効 果よって発生する温度差ΔTpiおよびジュール発熱による熱流Jpiを加えた。本研究ではLnwを0.01~ 10 µmまで、ゼーベック係数S_{NW}を100~10000 µV/K変化させて熱電変換効率がどのように変化す るか調べた。その他の熱伝導率、寸法などのパラメータは参考文献[1]で用いた値を採用した。

【結果】Fig.2に熱電変換効率ηmaxのLNW依存性を示す。ここではSi基板の厚さを745 μmとしており この条件ではL_{NW}~0.1µm付近で変換効率が最大になる。最大効率の式をL_{NW}-1、およびL_{NW}で級数 展開すると

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \frac{\kappa_{sub} \kappa_{NW} Z_{NW} W_{NW} t_{SiO2}}{\kappa_{siO2} P_{NW} (2\kappa_{sub} t_{SiO2} + \kappa_{SiO2} t_{sub})} \frac{1}{L_{NW}^2} + O(\frac{1}{L_{NW}})^4$$
(1)
$$\kappa_{siO2} \kappa_{sub} P_{NW} Z_{NW} (3\kappa_{sub} t_{SiO2} + \kappa_{SiO2} t_{sub})$$

 $\frac{1}{\kappa_{NW}t_{NW}(\kappa_{sub}t_{Si02} + \kappa_{Si02}t_{sub})[8(3\kappa_{sub}t_{Si02} + \kappa_{Si02}t_{sub}) + Z_{NW}T_{NW_{H}}(\kappa_{sub}t_{Si02} + \kappa_{Si02}t_{sub})]}L^{2}_{NW} + O(L_{NW})^{4}$ (2) $\eta_{max} =$

と表すことができる。ここで*K*_{sub}, *K*_{SiO2}, *K*_{NW}はそれぞれSi基板、SiO2層、Si-NWの熱伝導率、Z_{NW}は Si-NWの無次元性能指数(=S_{NW}² p_{NW}/ k_{NW})、W_{NW}, t_{NW}, P_{NW}はそれぞれSi-NWの幅、厚さ、隣接ワイヤ とのピッチ、TNWHはSi-NWの高温側の絶対温度を表している。式(1)に示すようにLNWが長い領域で は変換効率はL_{NW}2に反比例し、L_{NW}が短い領域では式(2)で示すようにL_{NW}2に比例する。また、ここ ではゼーベック係数をS_{NW}=200μV/Kとしているが、この条件下では、ペルチェおよびジュール効 果の有無による差は無視できるほど小さい。

Fig.3に熱電変換効率のゼーベック係数SNW依存性を示す。SNWが1000μV/K以下では、ペルチェ 効果およびジュール効果の有無の影響は小さく、変換効率はSnwの2乗に比例して増加する。一方、 SNW>1000µV/Kでは、ペルチェ効果およびジュール効果による熱電変換効率の低下が顕在化する ことが判明した。ただし、Si-NWでパワーファクタが最大となる時のS_{NW}は200μV/K程度であり[2]、 この条件ではペルチェ効果およびジュール発熱効果を無視しても問題ないといえる。





Fig.1 Schematic of TE generator and equivalent heat-electric circuit model.



Fig.3 Generation efficiency vs S_{NW} obtained by 2 equivalent models with wire length is 0.1µm.