

プレーナ型微小熱電発電モジュールの P/N レグ幅による広がり抵抗の影響

Effect of Spreading Resistance in Planar Micro Thermoelectric Power Generator Module
by Ratio of P/N Width

早大理工¹, 産総研², [○]黒崎 天彩美¹, 富田 基裕¹, 織田 海斗¹, 安部 克基¹, 松木 武雄^{1,2}, 渡邊 孝信¹

Waseda Univ.¹, AIST², [○]A.Kurosaki¹, K.Oda¹, K.Abe¹, M.Tomita¹, T.Matsuki^{1,2}, T.Watanabe¹

E-mail : tenn@ruri.waseda.jp

【はじめに】我々は、Siの微細加工技術で作製できるプレーナ型の熱電発電デバイスを開発している[1]。熱電変換材料部をレグと呼ぶが、本研究ではSiワイヤをレグに用いている。エネルギー変換効率を上げつつ出力電圧を大きくするためには、多数のn型レグとp型レグを電氣的に直列接続させる必要があるが、Siは正孔の移動度が電子移動度と比べて小さく、n型レグとp型レグのインピーダンスを整合させるためには、両者の活性化不純物濃度に応じてSiレグの幅の比を最適化する必要がある。

今回、熱等価回路モデルを用いた解析と広がり抵抗を考慮した有限要素法(FEM)シミュレーションで、単位面積当たりの出力電力を最大化する、プレーナ型微小熱電発電モジュールのP/Nレグ幅比の最適条件を検討した。

【計算方法】Fig.1にn型レグとp型レグの直列接続構造を示す。この単純な数理モデルを用いると、熱電モジュールから得られる最大発電密度 P は次式のように表すことができる。

$$P = \frac{(V_{oc,n} + V_{oc,p})^2}{4(R_n + R_p)} \frac{1}{A}$$

$$= \frac{(V_{oc,n} + V_{oc,p})^2}{4 \left(\rho_n \frac{L_{wire}}{W_n t_{wire}} + \rho_p \frac{L_{wire}}{W_p t_{wire}} \right) (W_p L_{wire} + W_n L_{wire})}$$

$$= \frac{(V_{oc,n} + V_{oc,p})^2}{4 \frac{L_{wire}^2}{t_{wire}} \rho_n \left(\frac{\rho_p W_p}{\rho_n W_n} + \frac{W_p}{W_n} + \frac{\rho_p}{\rho_n} + 1 \right)}$$
 (1)

ここで $V_{oc,n}$, $V_{oc,p}$ は n 型、p 型レグの開放電圧、 R_n , R_p は n 型、p 型レグの電気抵抗、 A は熱電発電素子の面積、 ρ_n , ρ_p は n 型、p 型レグの比抵抗を表す。その他は寸法パラメータで、Fig.1a に示す通りである。ここで、P/N レグ幅比 W_p/W_n を変数とすると、発電密度 P が最大になる条件

$$\frac{d}{d(W_p/W_n)} \left(\frac{\rho_p W_n}{\rho_n W_p} + \frac{W_p}{W_n} + \frac{\rho_p}{\rho_n} + 1 \right) = 0$$
 (2)

から P/N レグ幅比の最適条件を求めると

$$\frac{W_p}{W_n} = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_n}}$$
 (3)

という単純な指針が得られる。

次に、Fig.1b,c に示すモデルを用いて FEM シミュレーションを行い、P/N レグ幅比の最適条件を計算した。p 型、n 型レグの境界は pn 接合ではなく完全導体としている。また、上部熱源からレグ端部に熱を伝えるヒートガイドは、レグとの間に薄い絶縁膜が挿入され電氣的に絶縁されているとする。n 型、p 型レグの熱伝導率はどちらも 16.5K/Wm [2]、ゼーベック係数はそれぞれ $-63\mu\text{V/K}$, $63\mu\text{V/K}$ [2]、活性化不純物濃度は両方者ともに $1.0 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ とした。デバイスの上面温度は 25°C 、下面温度は 20°C に設定した。レグの長さを $1\mu\text{m}$ 、 W_n を $10\mu\text{m}$ に固定し、 W_p を $10\sim 20\mu\text{m}$ の範囲で変化させ、熱・電気連成シミュレーションにより電気抵抗と発電密度を求めた。

【計算結果】Fig.2 は熱電発電素子 1 個当たりの電気抵抗と発電密度のグラフである。FEM シミュレーションでは、数理モデルの結果とは異なり、 W_p を広くしても電気抵抗があまり下がらなかった。発電密度も W_p を広くするにつれて数理モデルとのずれが大きくなっていく。式(3)によると $W_p/W_n=1.7$ が最適条件となるが、FEM では $W_p/W_n=1.0$ で発電密度のピークに達した。

FEM と数理モデルの差は、レグ内の広がり抵抗の影響によるものと考えられる。Fig.3 に、数理モデルで発電密度が最大となる $W_p/W_n=1.7$ における、Si ワイヤ内の電流密度分布を示す。p 型レグの端部に電流密度が低い場所が生じていることが分かる。これは幅が狭い n 型レグから幅の広い p 型レグに流れ込んだ電流が、p 型レグ全体に広がり切れなかったことを示している。このため W_p を広くしても p 型ワイヤの抵抗があまり下がらず、数理モデルの予測と一致しなかったと考えられる。

以上の結果から、レグ長が短い微小熱電発電素子を実設計する上で、広がり抵抗の影響を考慮して n 型レグと p 型レグの幅比を決定する必要があるといえる。

【謝辞】本研究は JST-CREST(JPMJCR19Q5)の支援により実施された。

【参考文献】[1] T. Watanabe et al., EDTM Proc. Tech. Papers, (2017) 86.[2] Y. Goi, et al., JSAP Spring, 9p-W371-13 (2019)

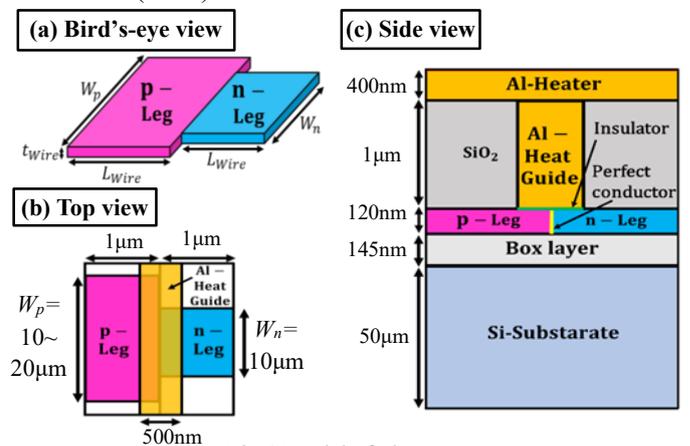


Fig.1 Model of planer TEG.

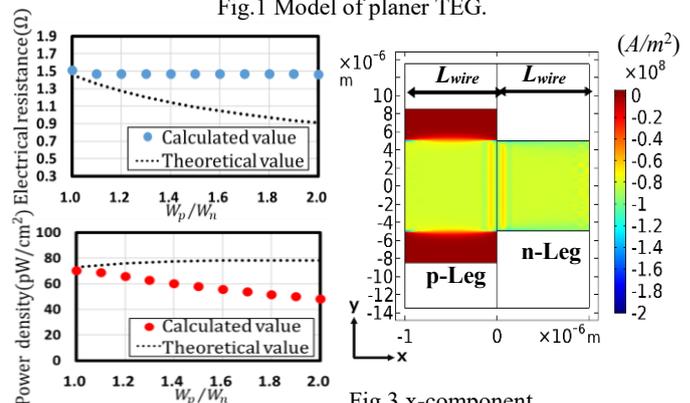


Fig.2 Electrical resistance and Areal power density.

Fig.3 x-component current density distribution of Si-Leg.