

薄膜トランスバース型ナノ TEG モジュールの設計と性能予測

Design and performance of transverse-type thin-film nano-TEG modules

°千脇 那菜^{1,2}, 清野 稔仁¹, 山下 涼音¹, 菅原 聡^{1,2}

°N. Chiwaki^{1,2}, T. Seino¹, S. Yamashita¹, S. Sugahara^{1,2}

1. 東工大未来研, 2 東工大電気電子系

1. Laboratory for Future Interdisciplinary Research of Science and Technology (FIRST), Tokyo Inst. of Tech.

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Inst. of Tech.

E-mail: chiwaki.n.aa@m.titech.ac.jp

【はじめに】Internet of humans (IoH)はヒトのバイタル/医療データをクラウドにビッグデータとして蓄積して、統計処理からヘルスケアや医療に役立てるシステムである。薄膜熱電材料を用いたマイクロ/ナノ熱電発電(μ /nTEG)モジュールは、このIoHにおけるマン・マシン・インターフェイスであるウェアラブルデバイスの電源として期待されている。我々は、集積回路技術を用いて薄膜ゼーベック素子の高密度集積化に適した薄膜トランスバース型 μ TEG とその設計方法を提案した[1,2]。この μ TEG ではゼーベック素子中の熱流と電流を基板の水平方向にとることで、薄膜熱電材料を用いても高い出力が得られるという特徴がある。これまでに、ゼーベック素子間に真空アイソレーションを仮定して、このモジュールにおける性能限界を明らかにした[3]。また、実際の作製時に必要となるモジュール内の熱的・電気的絶縁によって(たとえ、熱伝導率および電気伝導率の極めて低い材料を用いたとしても)、モジュールの発電性能は著しく低下することを報告した[4]。さらに、作製プロセスと高出力電力化の観点から、モジュール内をゼーベック素子の存在する領域と存在しない領域に分け、前者にはポラスシリカを、後者には真空アイソレーションを用いたモジュール構造も提案した[4]。今回はこのモジュール構造の設計と性能の詳細について報告する。

【モジュール構造と設計方法】モジュールの設計では、図 1(a)に示すヒトの代謝による熱流限界を考慮した恒温動物モデルを用いて系を設定した。図 1(b), (c)に薄膜トランスバース型 μ /nTEG の構造を示す。モジュールの全面積 $D \times D$ のうち、面積 $D \times L$ を μ /nTEG が占める。この $D \times L$ の領域の素子間はポラスシリカで熱的・電気的絶縁をとり、モジュールの μ /nTEG の存在しない領域には真空アイソレーションを用いた。設計ではトレードオフの関係にあるゼーベック素子の熱抵抗およびモジュールの内部(電気)抵抗を最適化するため、モジュール幅 D に対する全ゼーベック素子の占有率を表すトレードオフパラメータ γ によって熱抵抗および内部抵抗を表現して、出力電力 P_{out} および各構造パラメータの最適設計を行った。設計における重要なパラメータは、ゼーベック素子の幅 γd , 引き出し電極膜厚 t_c , ゼーベック素子長 L , ゼーベック素子の素子対数 m_0 である。 t_c については、 t_c を薄くするほど高出力が得られるが[4]、ここでは、素子間の広がり抵抗モデルが有効となる $t_c = (1+\gamma)d$ とした。今回の設計では、 $D = 1$ cm, $\Delta T_s = 10$ K とした。熱電材料には BiTe を用い(膜厚 $t_0 = 100$ nm), その物性値には報告値を用いた[5]。また、電極には銅、引き出し電極間を埋める熱的・電気的絶縁物にはポラスシリカを用いた。

【設計結果と性能評価】はじめに、 γ による最適化の例として、図 2(a)に P_{out} , 起電力 V_s , γd , モジュールの熱抵抗 K_M , 内部抵抗 R_M の γ 依存性を示す。ここでは、 L , m_0 は固定してある。 γ を用いることで、 P_{out} を最適化する熱抵抗, 内部抵抗, ゼーベック素子幅を同時に決めることができる。次に、 γ を用いて、 L , m_0 の最適設計を行い、このときの出力 (P_{out} , V_s) を求めた。図 2(b)に P_{out} , V_s , m_0 , K_M , γd , R_M の L 依存性, 図 2(c)に P_{out} , V_s , L , K_M , γd , R_M の m_0 依存性を示す。これらの L および m_0 依存性において、 γ は横軸の L または m_0 の各値の下で最適化されている。 L が短いほど熱抵抗・内部抵抗はともに増加するため、 L には最適値が存在する。また、 m_0 が多いほど起電力が増えるが、内部抵抗も増加するため、 m_0 にも最適値が存在する。したがって、 L および m_0 を最適化することで高い出力が得られる。特に、今回導入した真空アイソレーションの構造では、 L , γd をともに $1\mu\text{m}$ 以下のナノスケールで最適化が可能であることがわかった(nTEG 構造)。図 2(d)にこの薄膜トランスバース型 nTEG を実装した場合の電流 I , P_{out} の出力電圧 V_{out} 特性を示す。ここでは $L = 100$ nm として、実装面積を 20 cm^2 から 120 cm^2 まで 20 cm^2 ずつ増加させてある。リストバンド程度の面積(100 cm^2)に実装することで 2.5 mW 程度の出力が得られる。これはスマートフォンなどの通信機器のある状況下で、短距離通信を想定したウェアラブルデバイスに十分応用可能な値である。

【参考文献】[1]近藤他, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 21p-W323-11, (2016). [2]近藤他, 第 13 回日本熱電学会学術講演会, S2B6, (2016). [3]T. Kondo *et al.*, IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference 0144, (2017). [4] 千脇他, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-E206-3, (2017). [5] O. Yamashita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 42, pp. 492-500, (2003).

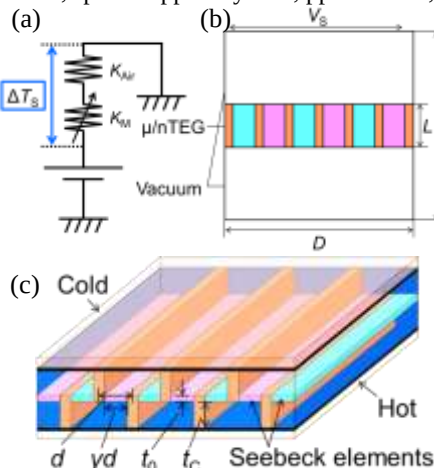


図 1. (a)恒温動物モデル. (b)(c)薄膜トランスバース型 μ /nTEG の構造.

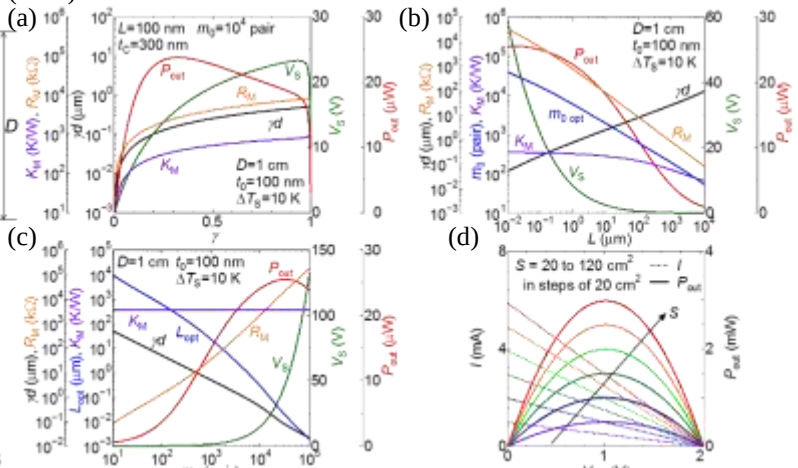


図 2. (a) P_{out} , V_s , γd , K_M , R_M の γ 依存性. (b) P_{out} , V_s , m_0 , K_M , γd , R_M の L 依存性. (c) P_{out} , V_s , L , K_M , γd , R_M の m_0 依存性. (d) I , P_{out} - V_{out} 特性.