

# 各種層間絶縁膜を用いた薄膜 $\pi$ 型マイクロ TEG モジュールの最適設計

Design optimization of  $\pi$ -type thin-film micro-TEG modules using various interlayer insulators.

○熊谷 颯人, 塩津 勇作, 大久保 岳, 菅原 聡

H. Kumagai, Y. Shiotsu, T. Okubo, and S. Sugahara

東工大未来研, FIRST, Tokyo Inst. of Tech.

E-mail: h.kumagai@isl.titech.ac.jp

**【はじめに】** 近年, ヒトを対象とした IoT ともいえる Internet of Humans (IoH) が注目を集めている[1]. ウェアラブルデバイス(WD)はこのような IoH における重要なマン・マシン・インターフェイスとして期待されている. WD の最もパワーハングリーな機能はデータ通信であるが, スマートフォンなどの通信デバイス機器が存在する状況下での使用が想定できるため, WD には短距離通信のための数 mW 程度以下の電力供給があればよい. したがって, ヒトの体温を用いた熱電発電を WD に応用できる可能性がある. 最近では熱電発電を用いた WD も市販されている. しかし, その性能は熱電発電に用いている  $\mu$ TEG の構造が必ずしも体温を用いた発電に最適化されたものではないことに起因して十分ではない. 搭載されている  $\mu$ TEG の出力を一度昇圧してバッテリーに充電してから用いる必要があることから, このような WD の機能は従来型のバッテリー式に比べるとかなり制限されている. 最近, 我々は WD の電源に応用可能な薄膜熱電材料を用いた薄膜  $\mu$ TEG を提案した[2-4]. この薄膜  $\mu$ TEG では, 恒温動物であるヒトの体温を熱源としたモジュール構造の最適設計を行うことで, WD に必要な電力を直接供給できる可能性がある. 今回, 真空/絶縁体ハイブリッドインレイション[3,4]を用いた薄膜  $\mu$ TEG の最適設計にゼーベック素子間を埋める層間絶縁材料の熱物性が与える影響について調べた. 層間絶縁膜に, 熱伝導率と機械的強度がトレードオフになることを考慮して, ポーラスシリカ(PS), 水素シルセスキオキサン(HSQ),  $\text{SiO}_2$  を用いた場合の最適設計を行った.

**【モジュール構造と設計方法】** 図 1 に薄膜  $\pi$  型  $\mu$ TEG のモジュール構造を示す. 大気中への放熱を確保するために必要となるモジュールの表面積を  $D \times D$  とし,  $L \times L$  の面積にゼーベック素子を集積化する. 真空/絶縁体ハイブリッドインレイションを実現するために, コールドプレートは凸型になっており, モジュールの外周には真空封じのための支持構造(真空封じ壁)を導入してある. この支持構造の幅を  $x$ , 高さを  $H$  とする.  $L \times L$  領域のゼーベック素子間は, 熱的・電気的絶縁体で埋めてある. ゼーベック素子には  $ZT=1$  程度の BiTe 系材料を用い, ゼーベック素子領域の絶縁体材料には PS, HSQ,  $\text{SiO}_2$  を用いた. 真空封じ壁には硬質・低熱伝導率有機系材料を採用した. モジュールの設計は, トレードオフパラメータ  $\gamma$  を用いてゼーベック素子の熱抵抗とモジュールの内部抵抗を表現し, この  $\gamma$  によって出力を最適化することで, 最適構造を求めた[2-4]. 構造最適化にはヒトの産熱能力を考慮した恒温動物モデルを用いた[3,4]. この最適化ではゼーベック素子とメタルコンタクトとの間に生じる寄生抵抗も考慮してある[3]. 設計には,  $D=1\text{cm}$  およびヒトの体温と外気との温度差  $\Delta T_s = 10\text{K}$  を用いた. また, 支持構造は  $x=0.3\text{mm}$ ,  $H=5\text{mm}$  とした. 以下,  $t_0$ ,  $\gamma d$ ,  $(1-\gamma)d$ ,  $m_0$ ,  $R_M$ ,  $\beta \Delta T$ ,  $v_s$ ,  $P_{\text{out}}$  をそれぞれゼーベック素子の膜厚, 幅, 素子間幅, ゼーベック素子の素子対数, モジュールの熱抵抗, ゼーベック素子にかかる温度差, 出力電圧, 出力電力とする. 出力の目標値としてリストバンド程度の実装面積 ( $100\text{cm}^2$  程度:  $1\text{cm}$  角のモジュール複数個で実現)で  $1\text{mW}$  以上とした ( $D=1\text{cm}$  角のモジュール 1 つで  $10\mu\text{W}$  程度以上).

**【設計結果と性能評価】** 図 2 に  $L=8\text{mm}$  および  $100\mu\text{m}$  とした場合の  $P_{\text{out}}$  の  $t_0$  依存性を示す. 層間材料は PS, HSQ, または  $\text{SiO}_2$  である.  $L=8\text{mm}$  のとき出力は小さく, 特に熱伝導率が大きな絶縁体を用いると, 出力はより大きく劣化している. 一方,  $L=100\mu\text{m}$  のときでは, 出力は大幅に改善し, また層間絶縁膜の種類による差も小さくなる. 図 3-5 に  $t_0=3000\text{nm}$  における  $P_{\text{out}}$  および各指標の  $L$  依存性を示す.  $L$  を小さくすると, TEG 内の真空領域が十分に大きくなるため, 層間材料による影響が小さくなり, 3 つの材料間で  $\beta \Delta T$ , すなわち  $v_s$  に大きな差は生じなくなる. また, 層間絶縁膜の熱伝導率が大きくなると,  $\gamma d$ , を大きくして  $m_0$  を減らすことでより小さな  $R_M$  を実現している.  $P_{\text{out}}$  は  $(m_0 v_s)^2$  に比例し,  $R_M$  に反比例する. 熱伝導率の大きな層間絶縁膜を用いた場合では,  $m_0$  を減らしても  $R_M$  を小さくすることで,  $m_0$  に比べて  $R_M$  の寄与を大きくできるため,  $P_{\text{out}}$  を大きくできる.

**【参考文献】**[1] A.M. Ionescu, 63rd IEEE Int. Electron Devices Meeting, p. 1.2, 2017. [2] T. Kondo *et al.*, 2017 IEEE Electron. Dev. Tech. and Manufact. Conf. pp. 201-203. [3] 清野 稔他, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-G203-3, 2018. [4] N. Chiwaki *et al.*, J. Micromech. Microeng. **28**, 094003, 2018.

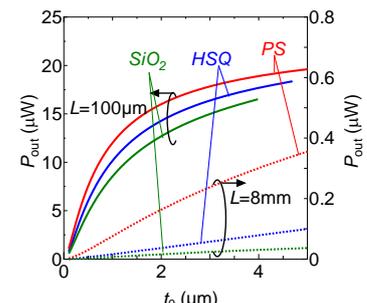
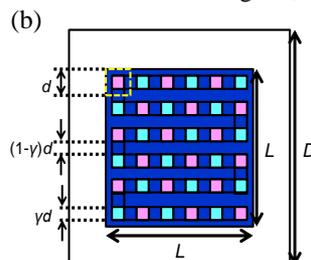
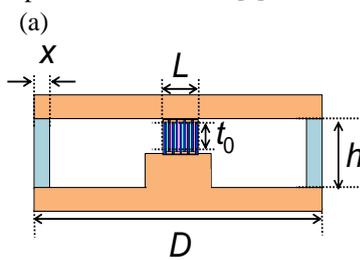


図 1. 薄膜  $\pi$  型  $\mu$ TEG モジュールの構造 (a)縦断面, (b)ゼーベック素子領域の横断面

図 2.  $P_{\text{out}}$  の  $t_0$  依存性

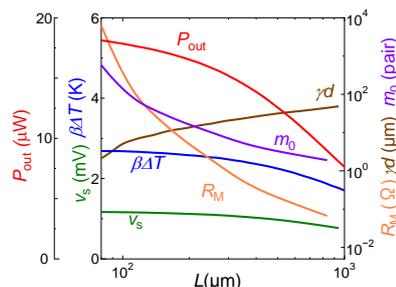


図 4. 層間材料に PS を用いた場合における  $P_{\text{out}}$ ,  $\gamma d$ ,  $v_s$ ,  $R_M$ ,  $m_0$ ,  $\beta \Delta T$  の  $L$  依存性 ( $t_0 = 3000\text{nm}$ )

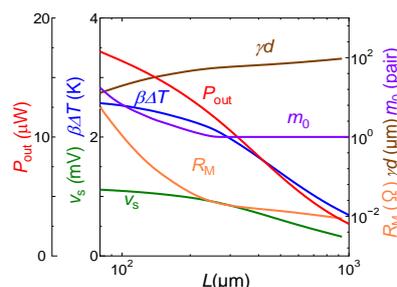


図 5. 層間材料に HSQ を用いた場合における  $P_{\text{out}}$ ,  $\gamma d$ ,  $v_s$ ,  $R_M$ ,  $m_0$ ,  $\beta \Delta T$  の  $L$  依存性 ( $t_0 = 3000\text{nm}$ )

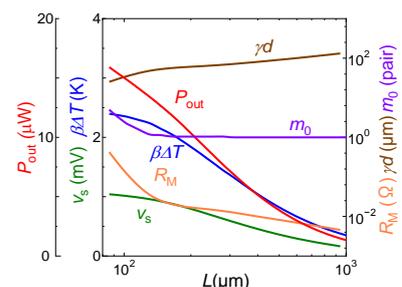


図 6. 層間材料に  $\text{SiO}_2$  を用いた場合における  $P_{\text{out}}$ ,  $\gamma d$ ,  $v_s$ ,  $R_M$ ,  $m_0$ ,  $\beta \Delta T$  の  $L$  依存性 ( $t_0 = 3000\text{nm}$ )