

各種層間絶縁材料を用いたトランスバース型薄膜 μ TEG の高精度集中定数回路モデル

Modeling of transverse-type thin-film micro-TEG modules using various interlayer insulators

東工大未来研[○]佐貫 海斗, 遠藤 弘之, 塩津 勇作, 菅原 聡

[○]K.Sanuki, H.Endou, Y. Shiotsu, and S. Sugahara, *FIRST, Tokyo Inst. of Tech.*

E-mail: sanuki.k.aa@m.titech.ac.jp

【はじめに】 ウェアラブルデバイス(WD)は医療・介護・ヘルスケアを対象とした internet of humans (IoH)における man-machine interface として期待されている[1]. 我々は, このような WD に応用できるヒトの体温を用いた薄膜熱発電(μ TEG)モジュールの研究開発を進めている. これまでに層間絶縁材料(ILI)にポーラスシリカ(PS)を用いたトランスバース型薄膜(TTF- μ TEG) の高精度集中定数回路(LCC)モデルを構築し, 最適設計および性能評価を行ってきた[2-4]. PS は熱伝導率が極めて低く, TTF- μ TEG の高出力電力化に有効であるが, この一方で, 機械的強度が低くデバイスプロセスに適さないといった課題がある. 今回は, 熱伝導率が PS に比べて増加するが, 十分な機械的強度を確保できると考えられる水素シルセスキオキサン(HSQ)と SiO_2 を ILI として用いた TTF- μ TEG を検討した. 各種 ILI に対応できる高精度 LCC のモデリングを行い, 最適設計から性能予測を行なった.

【モジュール構造と設計方法】 図 1(a)に TTF- μ TEG の構造を示す. 短冊形状のゼーベック素子が面内方向で接続され, 各接合部は交互に高温側プレートと低温側プレートに引き出し電極を用いて熱コンタクトされている. ゼーベック素子には $ZT=1$ 程度の BiTe 系材料を用い, ILI には PS, HSQ, または SiO_2 を用いて電気的・熱的に絶縁している[2-4]. この μ TEG 部は図 1(b)のようなモジュールに真空実装される[3]. デバイス構造の最適化アルゴリズムには計算速度の速い LCC モデルが必要となるが, デバイスの幾何学的構造から決定される単純な LCC モデルでは ILI を漏れる/流入する熱流を正確に表現することが難しい. HSQ や SiO_2 といった熱伝導率が高い ILI では, この熱流の影響は特に大きくなってしまふ. 一方, 正確な熱流の解析が可能な分布定数回路(DCC)モデルでは膨大な計算時間を必要とし, 最適化アルゴリズムへの適用は難しい[2,3]. 前回の発表では, ILI に PS を用いた場合, 引き出し電極の熱抵抗(K_{Lead})と ILI における広がり熱抵抗の一部(残留熱抵抗)に定数の補正因子を導入するだけで高精度 LCC モデルが実現できることを示した[2]. 本発表では, ILI が HSQ と SiO_2 の場合も同様に, 2 つの定数補正因子を導入して高精度 LCC モデルを構築することを試みた. ただし, 今回は ILI に関する補正因子は残留抵抗を含む広がり熱抵抗全体(K_{ILI})に導入した. モジュールサイズを $D \times D = 1 \text{ cm}^2$, 体温と外気との温度差を $\Delta T_0 = 10 \text{ K}$ として, ゼーベック素子の長さ γd , 幅 L , 素子対数 m_0 などの構造最適化を行った. γ は最適化を行う際のトレードオフパラメータである[3]. 今回の構造最適化では, 出力の限界値を評価するためにモジュール表面からの放熱による熱抵抗 K_{air} も最適化した. ゼーベック素子の膜厚 t_s は $1 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ の場合を検討した.

【設計結果と性能評価】 図 2 に出力電力 P_{out} の γ 依存性を示す. ILI は PS, HSQ, または SiO_2 である. LCC モデルの結果を点線, 補正因子を導入した修正 LCC モデルの結果を実線で示す. どちらのモデルでも横軸(γ)の各点で P_{out} が最大になるようにデバイス構造を最適化した. また, DCC モデルの結果を破線で示す. 補正因子のない LCC モデルでは, P_{out} のピークにおける DCC モデルとの誤差が, PS, HSQ, SiO_2 それぞれ 15%, 59%, 118%であったが, 補正因子を導入することでどの ILI を用いても誤差 2%程度に抑えることができる. 図 3 にデバイス構造の最適結果を示す. (a)には P_{out} , モジュールの熱抵抗 K_M , 電気抵抗 R_M および補正因子, (b)には構造パラメータを示してある. グラフの横軸は ILI の熱伝導率 λ_{ILI} である. $t_s = 1, 10 \mu\text{m}$ の場合の結果をそれぞれ破線と実線で示してある. λ_{ILI} が増加しても K_{ILI} の減少を抑え, モジュールにかかる温度が最適値になるように (K_M が一定になるように) 構造が最適化される. この最適化によって, λ_{ILI} の増加とともに R_M が増加し P_{out} は減少する. t_s を増加させると, 温度に対するマッチングを取り, さらに R_M が減少できるように構造が最適化されるため P_{out} は増加する. この場合, ILI に HSQ を用いても, $\sim 100 \text{ cm}^2$ のリストバンド程度の実装面積で短距離通信可能な $\sim 1 \text{ mW}$ 程度の出力が得られる.

【参考文献】 [1] 菅原聡, までりあ, **60**, 562, 2021. [2] 遠藤他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 10p-N406-4, 2021. [3] Y. Shiotsu *et al.*, *IEEE T-ED* **67**, 3834, 2020. [4] N. Chiwaki *et al.*, *JMM* **28**, 094003, 2018.

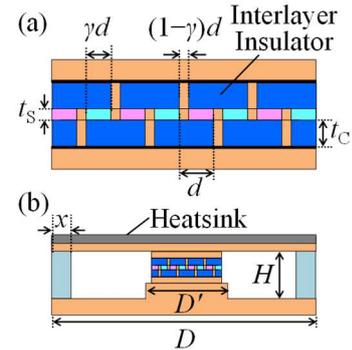


図 1. (a) TTF- μ TEG と (b) モジュール構造

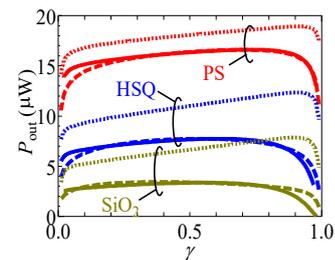


図 2. 出力電力 P_{out} の γ 依存性

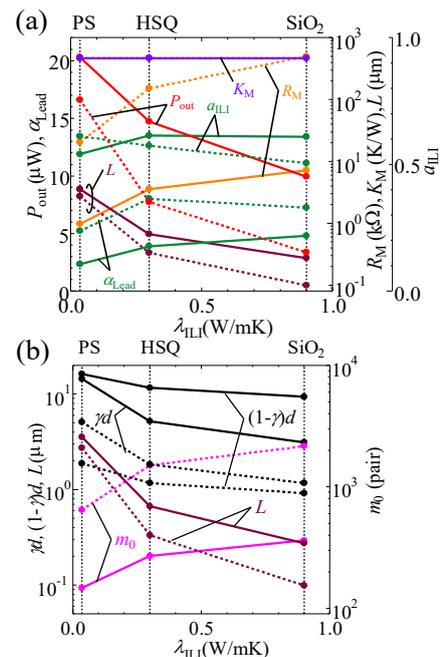


図 3. (a) 性能指標と (b) 構造パラメータの λ_{ILI} 依存性