

均一温度環境で駆動する熱電変換に対するメタマテリアルの必要性

Role of Metamaterial on Thermoelectric Conversion in Uniform Temperature Environment

東京農工大, ○(M)齋藤宗平, 中山涼介, 久保若奈

Tokyo Univ. of Agri. and Technol. (TUAT), ○Sohei Saito, Ryosuke Nakayama, Wakana Kubo

E-mail: w-kubo@cc.tuat.ac.jp

熱を電気に変換する熱電変換素子は、素子内の温度勾配が起電力に変換されるゼーベック効果に基づき発電する。そのため、素子内の温度勾配が消失する温度分布が均一な環境では熱電発電が生じない。それに対し我々は、熱輻射を吸収するメタマテリアル (Metamaterial Absorber: MA)を用いて、従来の熱電素子が発電できない均一温度環境においても熱電発電するメタマテリアル熱電変換を提案、実現した [1, 2]。MA を熱電変換素子の片側の銅電極上のみ形成すると、MA は周囲環境が放出する熱輻射を吸収し、吸収したエネルギーは MA 内で局所的な熱に変換される。その局所的な熱は伝導熱伝搬によって銅(Cu)電極を介して熱電変換素子に伝搬し、熱電素子内に新たな温度勾配が生じ、熱電発電が起こる。本稿の発電機構における発電特性は MA の熱輻射吸収特性に依存するため、MA よりも効果的な吸収体を利用して同様の熱電発電が可能であると考えられる。それを確認するために本研究は、広帯域吸収体であるカーボンブラック (CB)を用いて均一温度環境下における熱電発電特性を調査し、均一温度環境で駆動する熱電発電における MA の必要性について検討した。

Cu 電極上に MA を形成した MA 電極と CB (膜厚 100 μm)を塗布した CB 電極の吸収スペクトルを Fig. 1(a)に示す。6 μm に狭帯域吸収を有する MA と比較し、CB は 2-25 μm 範囲で広帯域な吸収を示した。次にビスマスアンチモンテルル ($\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$)熱電変換素子の両端に、MA 電極と、Ag およびフッ化カルシウム (CaF_2)の積層からなる比較電極を装着し、MA 素子とした (Fig. 1(b))。同様に MA 電極を CB 電極に置換した CB 素子を準備した。各素子を均一温度環境下に設置し、出力電圧を測定した結果を Fig. 1(c)に示す。MA 素子は環境温度の上昇に伴い出力電圧が上昇したが、広帯域吸収特性を有する CB 素子はいずれの環境温度においても MA 素子より低い出力電圧を示した。この結果はメタマテリアル熱電変換の特性が電極の熱輻射吸収特性だけでは決定されないことを示唆する。メタマテリアル熱電発電では、熱輻射吸収によって生じた局所的な熱が熱電素子に伝搬するプロセスも含まれることから、各電極の熱伝導率も熱電特性の決定に寄与すると推測し、各電極の熱伝導率を 3 ω 法によって測定した。その結果、MA と CB の熱伝導率はそれぞれ 240, 62 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ であった。MA は狭帯域吸収特性であることから、CB よりも少ない熱輻射量を吸収するが、高い熱伝導率と物理的に薄い構造により、生じた局所熱を効率良く Cu 電極に伝搬し、熱電素子上に温度勾配を形成できると推測した。一方、CB はより多くの熱輻射量を吸収するが膜厚が大きく、また熱伝導率が低いことから、生じた局所熱を Cu 電極に伝搬できず、結果的に熱電素子上に誘起できる温度勾配が小さくなったと推測した。この結果は、均一な温度環境における熱電発電の駆動において、高い熱輻射吸収特性と、局所熱を効率的に伝搬できる物理的な薄さの双方が必要であることを示す。このことから、光学的な厚みと物理的な薄さを両立するメタマテリアルが均一な温度環境における熱電発電において不可欠であると結論した。

[1] S. Katsumata, T. Tanaka, and W. Kubo, Optics Express, 29, 16396 (2021).

[2] T. Asakura, T. Tanaka, W. Kubo, arXiv: Physics, 2204. 13235 (2022).

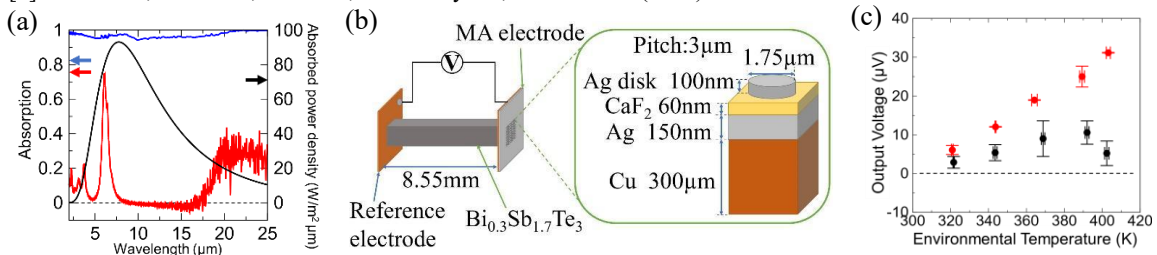


Fig. 1(a) Absorption spectra of the MA (red) and the CB (blue) electrodes. The blue line presents the blackbody radiation spectrum calculated at 100°C. (b) Schematic of the MA thermoelectric device and an enlarged cross-sectional image of the MA structure, and (c) comparison of output voltages generated on the MA device (red) and the CB device (black).

謝辞 $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ 素子をご提供いただきました(株)豊島製作所に感謝申し上げます。