F105 熱光発電高効率化のための 金属被膜シリコンマイクロキャビティによる輻射スペクトル制御

Efficiency Prediction of Thermophotovoltaic with Metal-coated Silicon Microcavity

○ 鹿島 玄貴 (東大)
正 鈴木 雄二 (東大)

切替 大善 (東大)
正 笠木 伸英 (東大)

Genki KASHIMA, Daizen KIRIKAE, Yuji SUZUKI and Nobuhide KASAGI

Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

Ti-coated Si microcavity have been developed as a selective emitter for micro thermovoltaic power generation system. For microcavity fabricated with vacuum arc evaporation, the emittance spectra correspond well to the electromagnetic resonance modes. By using a Ge PVcell, energy conversion efficiency with the present microcavity at 900°C is found to be 3.4 %, which is in good agreement with the estimates with an equivalent circuit model. It is estimated that the energy conversion efficiency is increased to 12.3 % for the emitter temperature of 1200°C.

Key Words: Thermophotovoltaic, Selective emitter, Microcavity, Conversion efficiency

1. 緒言

携帯電子機器に用いられる Li-ion 電池に替わる超小型エネルギー源として、エネルギー密度の高い炭化水素燃料を用いたエネルギー源が注目されている。本研究では、可動部がなく、補機がほとんど不要なマイクロ熱光発電システムに着目した。熱光発電とは、高温の熱源から放射される輻射エネルギーを光電変換素子により電気エネルギーに変換するものである。一般に、光電素子のバンドギャップ相当波長と輻射スペクトルが整合しないため、変換効率を改善するためには、マイクロキャビティなどの選択的輻射体が必要となる⁽¹⁾。

効果的な輻射スペクトル制御を行うためには、キャビティ内部での電磁波共鳴が用いられる。本研究では、シリコン基板に大面積のマイクロキャビティを形成し、金属被膜することによって選択的放射体を試作し、発電実験と等価回路モデルの比較から、選択的放射体を用いた場合の熱光発電の性能予測を行うことを目的とする。

2. キャビティの製作

キャビティ内での電磁波共鳴モードに対応する輻射率のピークは、次式で与えられる⁽¹⁾。

$$\lambda_r(n_x, n_y, n_z) = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{2L_z}\right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $n_x, n_y = 0, 1, 2, 3, \dots$, $n_z = 0, 1, 3, 5, \dots$ であり、 L_x, L_y はキャビティ開口径、 L_z はキャビティ深さである。本研究では、 $L_x = L_y = L_z = 1.8 \mu\text{m}$, ピッチ $2.0 \mu\text{m}$ ($\lambda_r = 3.2 \mu\text{m}$), および、 $L_x = L_y = L_z = 0.7 \mu\text{m}$, ピッチ $1.0 \mu\text{m}$ ($\lambda_r = 1.25 \mu\text{m}$)のキャビティを製作した。

キャビティ製作方法としては、Si 基板上に電子描画装置 (ADVANTEST 製, F5112+VD01) を用いてレジストパターンを形成した⁽²⁾。次に、SF₆ プラズマを用いて Si 基板をエッチング加工することでキャビティを形成した。キャビティ壁面を平滑に保つために、Non-Bosch プロセスを用いた。キャビティ壁面に平滑な金属被膜を形成させるために、

真空アーク蒸着により Ti を斜め蒸着した。最後に赤外光の透過を防ぐために、Si 基板背面に Pt 膜を蒸着した。図 1 に製作したマイクロキャビティを示す。

3. 輻射率計測実験

図 2 に、輻射率計測で用いた実験系を示す。金属被膜の酸化と熱損失を防ぐために、サンプルを真空チャンバ内に設置し、背面から赤外線ランプを用いて加熱した。サンプルの温度は放射温度計により計測した。サンプルの輻射光は 2 枚の凹面鏡を用いて分光器に導いた。サンプルの輻射率 $\epsilon_{sam}(\lambda)$ は、次式により求めた。サンプルの単色輻射エネルギーを $E_{sam}(\lambda)$ 、単色輻射率を $\epsilon_{ref}(\lambda)$ とし、既知の参照試料の輻射エネルギー $E_{ref}(\lambda)$ を用いた。

Figure 1. Ti-coated Si microcavity fabricated with vacuum arc evaporation.

Figure 2. Experimental setup for radiation spectrum measurement.

Figure 3. Emittance spectra of microcavity at 800°C.

Figure 4. Experimental setup for power generation.

$$\varepsilon_{sam}(\lambda) = \varepsilon_{ref}(\lambda) \frac{E_{sam}(\lambda)}{E_{ref}(\lambda)} \frac{\exp\left(\frac{hc}{kT_{sam}\lambda}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{kT_{ref}\lambda}\right) - 1} \quad (2)$$

ここで、 h 、 c 、 k 、 λ 、 T は、それぞれ、プランク定数、光速、ボルツマン定数、波長、サンプル温度である。

図3に800℃におけるサンプルの輻射スペクトルの計測結果を示す。 $L_x = L_y = L_z = 1.8 \mu\text{m}$ のサンプルでは、輻射率のピークが設計値の $3.2 \mu\text{m}$ と一致している。また、 $1.7 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ に小さなピーク、 $2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.7 \mu\text{m}$ に谷が現れており、電磁波共鳴モードと良く一致することが判る。一方、 $L_x = L_y = L_z = 0.7 \mu\text{m}$ のサンプルでは、共鳴モードが設計値よりも長波長側にずれているものの、 $3 \mu\text{m}$ 以上の長波長では、平滑面と同程度の輻射率になっており、短波長側の輻射エネルギーが増大している。Ge光電素子に対する理想変換効率を、バンドギャップ波長より短い領域の輻射エネルギーの割合と定義すると、黒体の6.1%に対し、25.5%に改善されることが判る。

4. 発電実験

発電実験では、輻射率測定実験の真空チャンバの蓋部を図4のように変更した。サンプルの温度は、K熱電対($\phi 1.0$)をサンプルと同形状のシリコン基板により挟み、セラミック接着剤により接着することで計測した。Ge光電素子(Fraunhofer ISE製)は、真空チャンバ蓋にサンプルと対面になるように設置し、背面から水冷した。形態係数を大きくするために、サンプルと光電素子の距離は2mmとした。また、光電素子の発電特性を得るために、電子負荷装置を用いてI-V曲線を測定した。またサンプルとしては、 $L_x = L_y = L_z = 0.7 \mu\text{m}$ のマイクロキャビティを用いた。表1に発電実験の条件を示す。

図5に発電実験の結果を示す。輻射体温度900℃において、出力密度 111 mW/cm^2 、変換効率 $\eta_{\text{exp}} = 3.36\%$ であった。これはFergusonら⁽³⁾により提案されている等価回路モデル

Figure 5. I-V characteristic of a Ge PVcell with present emitter at 900°C.

Table 1. Experimental condition

Condition	
Emitter areas [cm^2]	7.0
Emitter temperature [$^{\circ}\text{C}$]	900
Ge cell areas [cm^2]	1.6
Ge cell temperature [$^{\circ}\text{C}$]	29.7
Distance [mm]	2
View factor [-]	0.22

による変換効率の予測値 $\eta_{\text{th}} = 3.49\%$ と良く一致しており、等価回路モデルが妥当なモデルであることが示された。

以上より、等価回路モデルを用いることで、熱光発電システムの変換効率が予測可能となった。Ge光電素子の面積が輻射体と同じ 7.0 cm^2 と仮定した場合、変換効率の予測値は、黒体で3.0%、マイクロキャビティで6.4%となり、マイクロキャビティを用いることによって、2倍近く改善できると考えられる。さらに、輻射体の温度を1200℃とすると、短波長側の輻射エネルギーが増大するため、変換効率は黒体で7.0%、マイクロキャビティで12.3%と大幅に改善できる。また、平滑面の輻射率がより低い白金被膜を施した場合、輻射体900℃で6.8%、1200℃で13%と予測される。

5. 結論

Non-boschプロセスと真空アーク蒸着を用いて、熱光発電のための金属被膜シリコンマイクロキャビティを試作し、輻射率スペクトルの計測、Ge光電素子を用いた発電実験を行った。その結果、Ti被膜マイクロキャビティにおいて、輻射率ピークが電磁波共鳴モードと一致することを確認した。また、発電実験の結果から、等価回路モデルと一致する出力が得られ、これにより発電システムの変換効率を予測可能であることが示された。そして、Ti被膜の場合、輻射体温度が1200℃のとき、黒体放射のほぼ2倍となる12.3%となることが明らかになった。

本研究の一部は、科学技術振興機構・戦略的国際科学技術協力推進事業の支援を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) S. Maruyama・他3名, Appl. Phys. Lett., 79, pp. 1393-1395, 2001.
- (2) D. Kirikae・他2名, Proc. 23rd IEEE Int. Conf. MEMS, pp. 1195-1198, 2010.
- (3) L.G. Ferguson・他1名, Sol. Energy Master Cells, 39, pp. 11-18, 1995.