金属被膜シリコンマイクロキャビティの ふく射スペクトルに対する表面粗さの影響

Effect of Surface Roughness on Emittance Spectra of Metal-coated Silicon Microcavity

	*切替	大善	(東大)	伝正	鈴木	雄二	(東大)
伝正	笠木	伸英	(東大)				

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 thermophotovoltaic power generation system. In order to examine the effect of surface roughness on emittance spectra, two different metal deposition methods, electron-beam evaporation and vacuum arc evaporation are investigated. An emittance peak appears at the wavelength of $3.2 \,\mu\text{m}$, which corresponds to the designed value. For microcavity fabricated with vacuum arc evaporation, the emittance spectra is correspond to the electromagnetic resonance mode. When InGaAsSb PV cell is assumed, theoretical conversion efficiency becomes $31 \,\%$ for the present microcavities at $800 \,^\circ\text{C}$.

Key Words : Thermophotovoltaic, Selective emitter, Microcavity, Surface roughness

1. 緒言

携帯電子機器に用いられる Li-ion 電池の代替として,エ ネルギ密度の高い炭化水素燃料を用いた超小型エネルギ源 が注目されている.本研究では,可動部を持たず,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,高温の燃焼器から放射されるふく射エネルギ を光電素子により電気エネルギに変換する方法である.し かし,光電素子のバンドギャップ相当波長とふく射スペク トルが整合しないため,変換効率の改善のためにマイクロ キャビティなどの選択的ふく射体が提案されている⁽¹⁾.

効率的なふく射スペクトルの制御のためには、キャビティ内部での電磁波共鳴が必要であり、本研究では、キャビティ内壁の表面粗さの異なるマイクロキャビティを製作し、 ふく射スペクトルの制御特性に及ぼす影響について検討した.

2. キャビティの製作

キャビティ内での電磁波の共鳴モードに相当するふく射 率ピークは,

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

で与えられる⁽¹⁾. ここで, n_x , $n_y = 0,1,2,3...$, $n_z = 0,1,3,5...$ 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 μm ($\lambda_r = 3.2 \,\mu\text{m}$), および, $L_x = L_y = L_z = 0.7 \,\mu\text{m}$, ピッチ 1.0 μm ($\lambda_r = 1.25 \,\mu\text{m}$) の2種類のキャビティを製作した.

キャビティ製作にあたっては、まず、Si 基板上に電子線 描画装置(ADVANTEST 製, F5112+VD01)を用いてレジス トパターンを形成する⁽²⁾. その後、SF₆プラズマを用いて Si 基板をエッチング加工し、キャビティを形成した. この際、 側壁を平滑に保ったまま加工するため、Non-Bosch プロセ スを用いた.また、キャビティ側壁に金属被膜を形成させ るため、電子ビーム蒸着、および、より粒子径の小さな被 膜を形成可能な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、基板背面に Pt を蒸着し た.図1に製作したマイクロキャビティを示す.

第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2009-6)

3. ふく射率計測実験

本研究で用いた実験系を図 2 に示す.金属被膜の酸化及 び,熱損失を防ぐため、サンプルを真空チャンバ内に設置 し、背面から赤外線加熱装置を用いて加熱した.サンプル の熱ふく射光は 2 枚の凹面鏡を用いて分光器に導いた.サ ンプルのふく射率 $\epsilon_{sam}(\lambda)$ は、サンプルの単色ふく射エネルギ $E_{sam}(\lambda),および、単色ふく射率<math>\epsilon_{ref}(\lambda)$ 既知の参照試料のふく 射エネルギ $E_{ref}(\lambda)$ を用いて、次式により求めた.

$$\varepsilon_{sam}(\lambda) = \varepsilon_{ref}(\lambda) \frac{E_{sam}(\lambda)}{E_{ref}(\lambda)} \frac{\exp\left(\frac{hc}{kT_{sam}\lambda}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{kT_{ref}\lambda}\right) - 1}$$
(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, 放射温度計により計測したサ ンプル温度である. 参照試料には, ふく射率 0.94 の黒体塗 料(ジャパンセンサー製, JSC-3)をシリコン基板上に塗布 したものを用いた. 単色ふく射率の不確かさ(95%包括度) は, サンプル温度を 900℃とした場合, 最大で 9.2%である.

4. 実験結果と考察

4.1 表面粗さの検証 図 3 にシリコンマイクロキャビティ



Figure 1 SEM image of Ti-coated silicon microcavity fabricated with vacuum arc evaporation.



Figure 3 Si microcavity fabricated with Ti film using (a) electron beam evaporation and (b) vacuum arc evaporation.

の側面図を示す.図3(a)より,電子ビーム蒸着を用いたサ ンプルでは100 nm オーダの荒れが生じていることが判る. 一方で,真空アーク蒸着を用いたサンプルはほとんど荒れ が生じておらず,電子ビーム蒸着を用いたサンプルに比べ 表面粗さは小さい(図3b).

4.2 ふく射率スペクトル計測 まず,本計測の信頼性評価 のため,参照試料のふく射エネルギを2度計測し,参照値 と比較した.ほぼすべての波長において参照値は不確かさ の範囲内に収まっており,計測の信頼性を確認した(図省 略).

図 4 に $L_x = L_y = L_z = 1.8 \ \mu m$ のサンプルの,800 °C におけ るふく射率スペクトルの計測結果を示す.電子ビーム蒸着, 真空アーク蒸着を用いたサンプル共に設計値 3.2 μm にふく 射率のピークが現れている.真空アーク蒸着を用いたサン プルは,1.7 μm ,2.4 μm に小さなピーク,2.0 μm ,2.7 μm にふく射率の谷が現れ,電磁波共鳴モードと良く一致して



Figure 4 Emittance spectra of microcavities ($L_x=L_y=L_z=1.8 \mu m$) fabricated with vacuum arc and electron beam evaporation.



Figure 5 Emittance spectra of the microcavities ($L_x=L_y=L_z=0.7$ µm).

いる.一方,電子ビーム蒸着を用いたサンプルは,これら の共鳴モードが現れず,長波長域におけるふく射率も比較 的高い.従って,キャビティ側壁の表面粗さが電磁波共鳴 に重要であり,表面粗さの小さい真空アーク蒸着を用いた キャビティが選択的ふく射体に適していることが判る.

図5に真空アーク蒸着を用いて製作したサンプル($L_x = L_y = L_z = 0.7 \mu m$)の,800°Cにおけるふく射率特性の計測結果を示す.顕著な共鳴ピークが得られるとともに、3 μm 以上の長波長では、平滑面と同程度のふく射率になっていることが判る.本計測結果をもとに、InGaAsSb セルに対する,バンドギャップ相当波長以下の波長域のふく射エネルギの、全ふく射エネルギに対する割合を算出すると31%となる.従って、理想変換効率は、黒体放射を仮定した場合の16%から大幅に改善されることが判り、本研究で用いたマイクロキャビティによる選択的輻射体の有効性が示される.

5. 結論

Non-bosch プロセスを用いて平滑な側壁を持つマイクロキ ャビティを製作し,金属被膜を異なる手法により成膜する ことによって,表面粗さの異なるシリコンマイクロキャビ ティを製作した.ふく射率計測の結果,設計値と一致する3.2 µm にピークが得られた.また,キャビティ側壁の表面粗さ を低減することで,電磁波の共鳴モードに一致するふく射 率スペクトルが得られ,長波長側のふく射率増加が抑えら れ,変換効率の大幅な向上が可能であることを示した.

参考文献

- S. Maruayama · 他 3 名, Appl. Phys. Lett., 79(2001), 1393-1395.
- D. Kirikae · 他 3 名, Proc. of PowerMEMS 2008, Sendai, (2008), 369-372