

# 宇宙用ハイブリッド光・熱エネルギー変換システムに関する研究 —遺伝的アルゴリズムによるダイクロイックミラーの多層薄膜設計とシステム設計の評価—

## Hybrid Energy Conversion System based on Thermophotovoltaic and Thermoelectric for Space Use

### —Design of Multilayer Thin Film for Dichroic Mirror Based on Genetic Algorithm and Performance Evaluation of System Design —

80717772 宮脇俊介(Shunsuke Miyawaki) Supervisor: 長坂雄次(Yuji Nagasaka)

#### 1 序論

近年の宇宙開発では、宇宙用電源として、熱光起電力(TPV)や熱電発電(TE)が着目されている。特に TPV は、ふく射光の波長選択により、一般的な高温物体を用いた高効率発電が期待される。本研究では、波長選択デバイスとしてダイクロイックミラー(DM)を提案し、TPV と TE によるハイブリッド光・熱エネルギー変換システム(HECS)の開発を最終目標とする。Fig. 1 に本研究で提案する HECS の概念図を示す。エミッタからのふく射光のうち、PV セル(GaSb)の感度領域(1.3~1.8 $\mu\text{m}$ )のみが DM を透過し、光電変換に寄与する。一方で、セルの温度上昇に対し支配的な領域(1.8~5 $\mu\text{m}$ )は反射され、TE の熱入力となる。このように DM を用いた波長分離により、システムとしてのエネルギー効率が高められる。また、DM の光学特性の設計により、波長選択の自由度が高く、DM 自身およびセルの温度制御が可能となる。本研究では、(1) DM の多層薄膜設計、(2) GaSb セルの量子効率測定、(3) システムの熱解析によるエネルギー計算を行った。

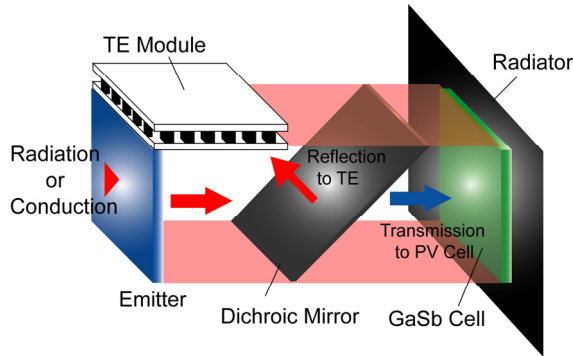


Fig. 1 Schematic Image of HECS.

## 2 ダイクロイックミラー(DM)の多層薄膜設計

### 2.1 設計方法

多層膜の反射率および透過率は、各層での反射、透過、干渉を考慮した漸化式から算出される。ここで、複素屈折率  $\bar{n}_m$ 、膜厚  $d$  の多層膜での振幅透過率  $T'$  を考える。光の入射側を最外層とし、基板を第 0 層とすると、第  $m$  層での  $T'$  は、

$$T'_{m,0}(\lambda, \theta) = \frac{t_{m,m-1} T'_{m-1,0}(\lambda, \theta) \exp(-i\delta_{m-1}/2)}{1 + r_{m,m-1} R'_{m-1,0}(\lambda, \theta) \exp(-i\delta_{m-1})} \quad (1)$$

$$\delta_m = 4\pi \bar{n}_m d_m \cos \theta_m / \lambda \quad (2)$$

で与えられる。また、膜の設計ツールには、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用し、さらに透過率の計算プログラムを組み込み、新たに評価関数を導入することで、DM 用の多層薄膜設計ツールとして改良した。評価関数には、1300K での黒体ふく射エネルギーに対する反射・透過のエネルギー比を導入した。(3)式に透過についてのみ示す。

$$T_{ratio} = \int_{1.3}^{1.8} T(\lambda) E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda / \int_{1.3}^{1.8} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

同様に  $R_{ratio}$  の推算を行い、これらの総和が適合度として出力される。また、高屈折率材料として Ge, HfO<sub>2</sub>、低屈折率材料として MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> の単層膜の光学定数をエリプソメトリにより測定しそれらの値を用いて設計を行った。

### 2.2 設計結果

Fig. 2 に入射角 30° での DM の光学特性を示す。エネルギー比は、 $T_{ratio}=86.4\%$ 、 $R_{ratio}=84.3\%$  と、両者とも 80% 以上の値が得られた。膜構成は、SiO<sub>2</sub>(500 $\mu\text{m}$ )の基板から 9 層目までは CaF<sub>2</sub> と Ge、9 層から最外層の 12 層目までは、HfO<sub>2</sub> と Ge の交互層となった。SiO<sub>2</sub>での裏面反射防止のため、裏面にも低屈折率材料を設置した結果、 $T_{ratio}$  の 2% 向上が確認できた。

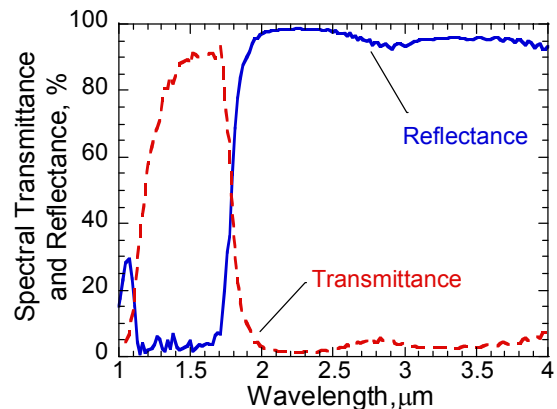


Fig. 2 Optical Characteristic of Designed DM.

### 3 GaSb セルの量子効率測定

HECS のエネルギー効率を評価するため、GaSb セルを購入し、量子効率の温度依存性を測定した。GaSb セルは、感度領域が広いので、宇宙空間でのブロードな黒体ふく射光に対して有効である。測定サンプルおよび測定部を Fig. 3 に示す。まず、単色光の照射による出力電流をプローブで検知する。その後、照射位置の補正のために検知した電圧量  $M_1$ 、 $M_2$  および光の有効面積  $a$  を用いて(4)式より分光感度  $F$  を算出する。

さらに、光の波数  $\nu$ 、電荷量  $e$  を用いて、(5)式より量子効率  $Q_{eff}$  を算出する。なお、測定はペルチェ素子でセルを加熱・冷却し、15~105°Cの温度範囲で行った。Fig. 4に測定結果を示す。最大値は、1.3~1.7 $\mu\text{m}$  で約78%となった。また、温度上昇に伴い、基礎吸収端波長が長波長側へシフトしていることがわかる。これは、セルの温度上昇により、バンドギャップが低くなり、長波長での励起が可能となることに起因する。

$$F=(I/M_2)/(a \times P/M_1) \quad (4)$$

$$Q_{eff}(\lambda, T)=F \times h\nu/e \quad (5)$$

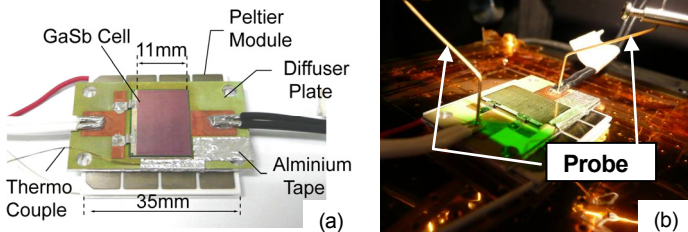


Fig. 3 Overview of (a) GaSb Cell and (b) Photocurrent Probe.

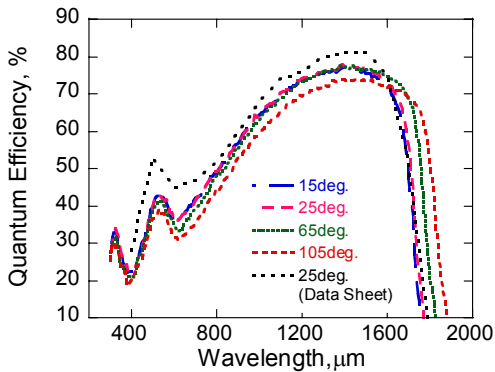


Fig. 4 Measured Quantum Efficiency of GaSb Cell.

#### 4 HECS の熱解析によるエネルギー計算

設計した DM を用いて、熱解析およびエネルギー計算を行った。なお、熱解析ソフトには、Thermal Desktop を用いた。Fig. 5 に示すように、外壁にはグラファイトクリスタル(GC)を適用し、ラジエータ裏面にはそのシートを設置する。ただし、GC と DM およびラジエータは、ヒートパイプで結合されている。また、熱電材料には SiGe を適用し、システム全体は宇宙空間に曝されているものとする。エミッタの温度を 1000°C として解析した結果、DM の温度が 83°C、GaSb セルの温度が 53°C となり、使用温度を満たしている。また、TE の素子数を 200 対とすると、DM が無い場合に対し、6.4W の電力が得られることがわかった。ただし、TPV の発電効率は 9.3%で、単位面積あたりの出力電力は 1300W/m<sup>2</sup>を得ている。ところで、TE への熱入力を増やすためには、TE 素子基板の全半球放射率が高いことが理想的であるが、一方でふく射による DM の温度上昇から、TPV の効率低下を招く。そこで、TE 素子基板の全半球放射率に依存した TPV および TE の発電効率を計算した。計算結果を Fig. 6 に示す。これより、全体の発電効率を考える場合には、両者の発電効率が交差する 0.5 付近が最適であることがわかる。また、DM から GaSb セルへのふく射を緩和するには、DM の放射率を下げる必要がある。Fig. 7 に示すように、放射率を現状の 0.65 から 0.2 まで低減できれば、セルの温度は室温領域となり発電効率で 11.8%、出力電力で 1657W/m<sup>2</sup>が得られる。

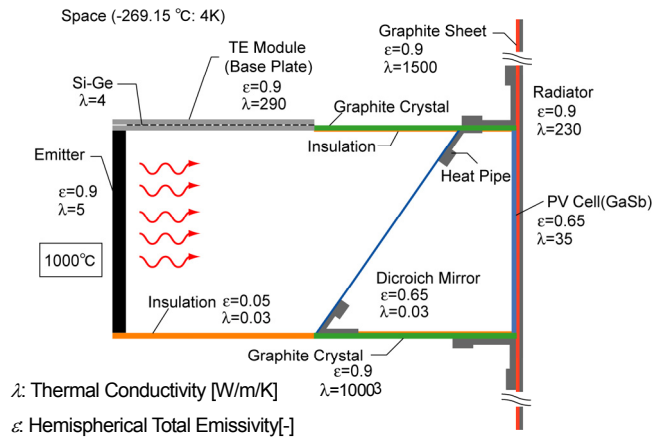


Fig. 5 HECS Model and Thermophysical Properties [1].

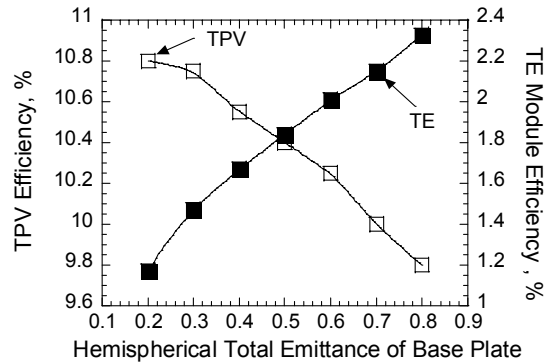


Fig. 6 TPV and TE module Efficiency.

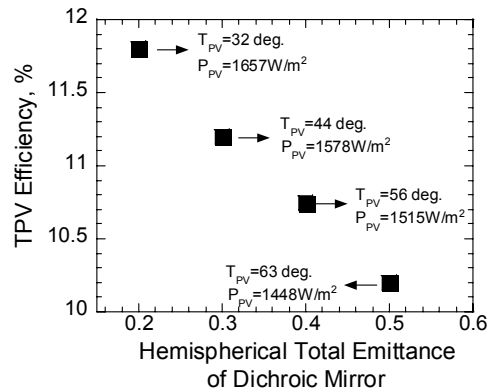


Fig. 7 Temperature Dependence of TPV Performance.

#### 5 結論

TPV の波長選択デバイスとして DM を提案し、GA を用いた多層薄膜設計を行った。その結果、エネルギー比として、 $T_{ratio}$  が 86.4%、 $R_{ratio}$  が 84.3%の光学特性を得られた。次に、GaSb セルの特性を測り、DM の設計結果を用いて熱解析とエネルギー計算を行った。ヒートパイプの設置により、DS およびセルを使用温度範囲に抑え、TE では 6.4W が得られることがわかった。また、システムの発電効率を考慮した場合、TE 素子基板の放射率が 0.5 のとき最適となる。今後、DM の放射率を 0.2 まで低減すれば 11.8%の発電効率を得られることから、宇宙用電源としての有用性が示された。

#### 6 参考文献

[1] 日本熱物性学会, 熱物性ハンドブック, 養賢堂, (1990).