

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600129

研究課題名(和文)狭ギャップ熱電子素子

研究課題名(英文)Narrow gap thermionic power generator

研究代表者

小野 崇人(Ono, Takahito)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90282095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：熱電子発電は、熱を電気に変換するクリーンエネルギーの一つである。我々は、低温でも動作が可能な、SiCを利用したマイクロギャップを有する熱電発電デバイスを試作し評価し、830℃という比較的低温で動作させることに成功した。また、最大の出力密度として、11.5 mW/cm<sup>2</sup>を得た。さらに、エミッタからの熱損失を実験と理論の両面で評価した。熱損失を見積もるために、エミッタとコレクタ間の熱抵抗を測定した結果、約2.4 K/Wであった。この結果、最も大きな熱損失は、酸化膜スペーサーによるエミッタ・コレクタ間の熱損失であった。スペーサーのサイズを小さくすることで、熱損失を減らし効率を上げることが可能である。

研究成果の概要(英文)：Thermionic power generation is one of clean sources, which directly converts heat into electrical energy using thermionic electrons. We developed a micro-gap thermionic power generator, which operates at relatively low temperature using SiC as an emitter. In this work, we have firstly demonstrated low temperature operation at 830 degree C as a result of micro-gap between the emitter and collector electrodes. An output power density of 11.5 mW/cm<sup>2</sup> is obtained. Besides, the heat losses from the emitter electrode are evaluated and calculated. The thermal resistance of the micro-gap is measured to be 2.4 K/W. As a result, thermal conduction to the collector is by far the predominant thermal loss. It is needed for downsizing the silicon dioxide columns of the micro-gap in order to increase the power conversion efficiency.

研究分野：ナノ電気機械システム

キーワード：熱電子発電 排熱 マイクロ発電 クリーンエネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年、温暖化や資源の枯渇などの背景からクリーンエネルギーの需要が高まっている。太陽エネルギー、風力発電などの研究が盛んに行われている。熱を電気に変換する熱-電気変換は、排熱を回収して発電したり、太陽光を集光したりして一旦、熱に変換する発電など、重要な技術であると言える。その熱電発電では、半導体のゼーベック効果を利用した熱電発電や熱した導電体からの熱電子放出を利用した発電などが知られている。しかし、熱電発電は、その特性が材料に強く依存し、現在、最大の発電効率は10%程度しかない。一方、熱電子発電は、熱エネルギーを電気エネルギーに変換する高い効率を有するにも関わらず、高温でしか動作しないことから殆ど使われていない。

2. 研究の目的

熱電子発電とは、図1に示したように、導電体であるエミッタとコレクタの2極から構成され、エミッタが高温に加熱された時に熱電子がコレクタ側に放出されることで、エミッタ-コレクタ間に電流が流れきることを利用したものである。一般には、1200℃以上の高温でなければ動作しないことから、応用が限られている。近年、マイクロ加工技術を用いて、エミッタ-コレクタ間のギャップを小さくし、電子の空間電荷効果(電子-電子相互作用)を低減し、高効率の熱電子素子を作ることが提案されている。しかし、実験的に得られた効率は極めて低いという問題点があった。本研究では、このマイクロ熱電子発電を試作・評価し、その問題点を抽出し、高効率化のために必要な要件を見つけることである。

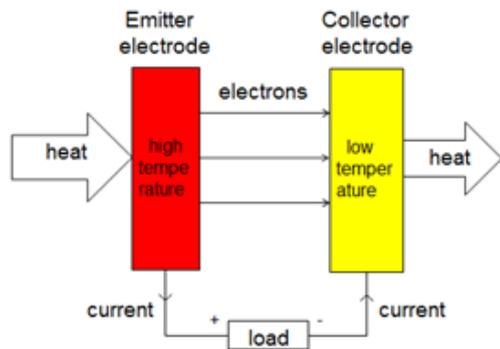


図1. 熱電子発電の原理

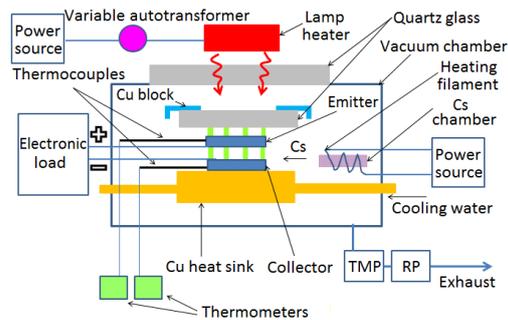


図2. 熱電子発電の発電実験

3. 研究の方法

小型の熱電子発電素子を試作した。熱電子発電素子は、エミッタとコレクタ電極を、コレクタ表面に形成した酸化膜の微小突起で絶縁したものである。酸化膜の高さは数ミクロン程度であり、このため、ギャップ長も数ミクロンのものを用いている。コレクタはSi基板の上にPtを堆積したものを用いた。また、エミッタの材料としては、SiCおよびWを用いた。低温で動作し効率を上げるにはコレクタ電極の仕事関数を下げる必要がある、このため実験中はCsを蒸発させて、電極表面に吸着させた。Ptの仕事関数はこれにより1.4eV程度に小さくなる。また、Csはプラスにイオン化しており、電子放出によるギャップ中での空間電荷を中和し、電子放出に必要なポテンシャルを下げる効果もある。図2に実験の概要を示したように、素子を真空チャンバーに導入し、エミッタを石英ガラスと冷却ステージ間に挿入してクランプした。エミッタを赤外線ランプを集光して加熱し、同時にコレクタは循環水で冷却した。出力に接続する負荷を変化させ、その時の電圧、電流を測定した。

4. 研究成果

(a) 理論体系

熱電子発電の発電効率  $\eta$  は、エミッタへの熱量  $Q_E$  と発電出力  $W$  の比で与えられる。

$$\eta = W/Q_E$$

発電出力は、エミッタ-コレクタ間に流れる電流  $I$  およびエミッタ電位  $V_E$ 、コレクタ電位  $V_C$  から以下のように与えられる。

$$W = I(V_E - V_C)$$

エミッタの温度が  $T_E$  の時、エミッタからコレクタからの熱の流れ  $E$  は、

$$E = I(V_E + 2kT_E/e)$$

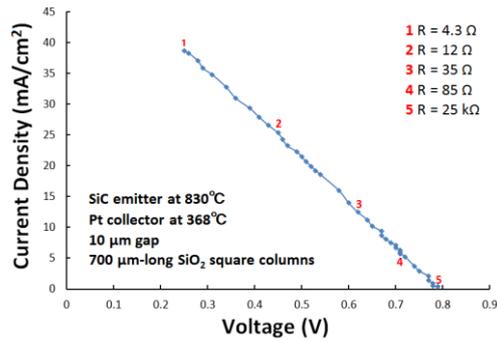


図3. 830°CにSiCエミッタを加熱した時の電流 - 電圧特性。

となる。ただし、 $k$ はボルツマン定数、 $e$ は素電荷である。これに加えて、熱の損失は、エミッタからコレクタへの熱伝導、エミッタ表面からの輻射、配線や支持部などを通しての外部への熱損失などがあげられる。それぞれについて定式化して体系化した。

#### (b) 発電実験

SiCのエミッタにおいて、830°Cにて実験した電流 - 電圧特性を図3に示す。出力に加える負荷を変化させることで、このように電流 - 電圧特性が得られる。

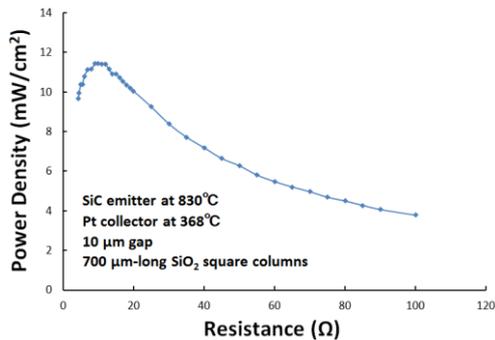


図4. 830°CにSiCエミッタを加熱した時の出力密度と負荷抵抗の関係。

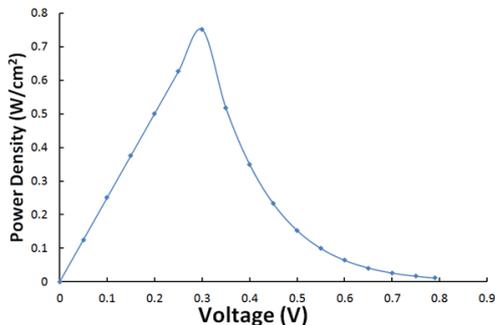


図5. 830°CのSiCエミッタでの理想的な理論出力密度

また、図4は負荷抵抗と出力密度の関係を示したものである。

出力解放電圧が0.8V程度と小さいのは、

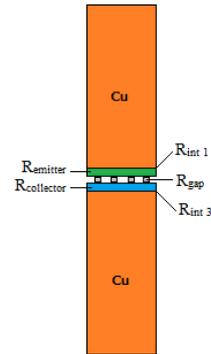


図6. 熱抵抗の見積もり方法

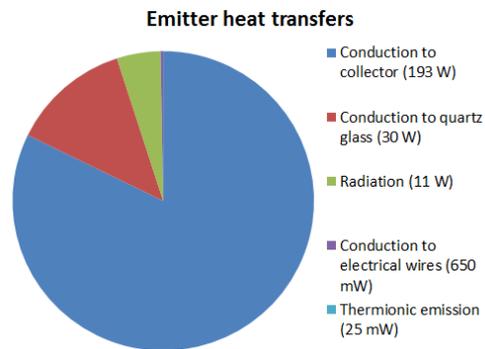


図7. 熱損失の見積り

SiC表面にCsが吸着し、その仕事関数を低下させたからだと考えられる。図からわかるように実験から得られた出力電力密度は11.5 mW/cm<sup>2</sup>程度である。

一方、図5に示したように、理想的な状態での理論的な出力密度の電圧依存性を示した。最大で、750 mW/cm<sup>2</sup>の出力密度が得られており、実験結果とは大きく異なり、前述した熱的な損失が実際の出力密度の低下に影響していると考えられる。

#### (c) 熱損失の見積もり

エミッタ - コレクタ間の熱損失を見積もる際に、SiO<sub>2</sub>の絶縁スペーサーの影響を考慮する必要がある。熱抵抗で大きく影響するのは、界面、接触面抵抗であり、これは実験的に明らかにする必要がある。そこで、熱抵抗を測定する装置を自作した。熱抵抗測定装置はCuの棒を2個準備し、その間に試料を図6に示したように挟み込み、Cuを通して熱流を流した時の2つのCu棒の温度変化から熱抵抗を算出した。接触圧に熱抵抗は依存するが、およそ2.4 K/Wの熱抵抗であることがわかった。この値を考慮して計算した前述した熱電子発電の損失を図7に示した。酸化膜スペーサーを通しての熱損失が193W、デバイスを固定している石英ガラスへの損失が30W、輻射損失が11W、配線を通しての損失が650mW、熱電子による発電が25mWである。つまり、小型の熱電子発電では、外部への熱損失が極めて大きく、その中でも小さな

ギャップを形成するための酸化膜スペーサーを通しての熱損失が最大である。

一方、実験では 700 $\mu\text{m}$  角のサイズのスペーサーを用いたが、もし 10 $\mu\text{m}$  角のサイズまで縮小した場合、熱損失は 78mW まで小さくできると見積もれる。

以上のように、本研究では、マイクロギャップをもつ熱電子発電を試作し、その低温動作を確認した。この発電効率の理論を構築し、実験における熱損失を見積もった。ギャップを維持している酸化膜スペーサーを小さくすることで、効率を大きくすることができる

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Mohd Faizul Mohd Sabri, Takahito Ono, Suhana Mohd Said, Yusuke Kawai, and Masayoshi Esashi, Fabrication and Characterization of microstacked PZT actuator for MEMS applications, 査読有, Journal of Microelectromechanical Systems 24, (2015) 80-90.  
DOI: 10.1109/JMEMS.2014.2317495
2. Masanori Kobayashi, Hidetoshi Miyashita, Naoki Inomata and Takahito Ono, Synthesis of cubic boron nitride films on Si tips via chemical vapor deposition and the field emission properties, 査読有, Journal Vacuum Science Technologies B, 32 (2014) 02B102-1-02B102-5.  
<http://dx.doi.org/10.1116/1.4843075>
3. Remi Yacine Belbachir, Zhonglie An, and Takahito Ono, Thermal investigation of a micro-gap thermionic power generator, 査読有, Journal of Micromechanics and Microengineering, 24, (2014) 085009-1~085009-9.  
DOI:10.1088/0960-1317/24/8/085009
4. 宮下英俊, 陳帥, 小野崇人, 狭ギャップマイクロ熱電子発電の基礎実験, 査読有, 電気学会論文誌 E, 133, 9 (2013) 267-271.

DOI: 10.1541/ieejsmas.133.267

[学会発表] (計 4 件)

1. Remi Yacine Belbachir, Zhonglie An, and Takahito Ono, Thermal Investigation of Micro-Gap Thermionic Power Generator operated at Low Temperature, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 10月20日, 松江, くにびきメッセ (2014), 20pm3-PS33.
2. R. Y. Belbachir, and T. Ono, Micro Thermionic Power Generator with Low Operation Temperature, The 7th

Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies, 29 June-2 July, Daegu, Korea (2014) 13-1.

3. 小林正典, 宮下英俊, 猪股直生, 小野崇人, c-BN 薄膜を用いたゲート電極付き電界放出電子源アレイ, 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 11月5日, 仙台, 国際センター (2013), 5PM3-PSS-41.
4. Masanori Kobayashi, Hidetoshi Miyashita, and Takahito Ono, Cold Cathode Array with Cubic Boron Nitride, 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference, July 8-12, Roanoke, Virginia, USA, (2013) 104-105.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.nme.mech.tohoku.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 崇人 (ONO, Takahito)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 90282095

(2) 研究分担者

戸田 雅也 (TODA, Masaya)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 40509890