

補助事業番号 28-107
補助事業名 平成28年度 低温熱電子発電のためのシリコンナノギャップ電気伝導
特性測定評価 補助事業
補助事業者名 京都大学 工学研究科 土屋智由

1 研究の概要

半導体微細加工技術を用いて単結晶シリコンのMEMSデバイス構造で作製した熱膨張アクチュエータにより、梁構造にへき開破壊を生じ、数ミクロン角の均一でかつ原子レベルで平滑なナノギャップ構造を作製する技術を確認し、そのナノギャップ間の電子放出、電気伝導特性を測定した。この技術は低温度差で動作可能な熱電子発電に応用されることが期待される。

2 研究の目的と背景

自律センサ向けに、環境から電気エネルギーを抽出する手法として高効率熱電材料が期待されている。しかし、電気伝導率と熱伝導率が正の相関を持つ、材料の本質的な性質が熱電材料の限界を示している。さらに、熱源とヒートシンクの温度差の低下の問題があり、熱発電素子の飛躍的性能向上に必要な高い熱絶縁性＝温度差の実現は困難である。高い熱絶縁性を実現する方法としては真空が最も優れた熱絶縁層である。そこで、真空ギャップを利用する熱電子発電あるいは熱電子冷却がそれぞれ温度差を用いた発電素子、あるいは温度差を発生する冷却素子の候補となる。しかし、導体からの熱電子放出は1,000°C以上の高温で生じる現象であり、100°C以下の動作温度のデバイスには適用できないとされてきた。一方、真空ギャップの間隔をナノメートルオーダーまで小さくし、トンネル効果が顕著になるスケールにすると、容易に電子が放出され、低温でも熱電子伝導が可能となるという報告があるが、これまでに発電、明確な冷却を観察した例はない。これは必要とされる数nmのギャップを大面積で実現することが難しく、さらには大面積ナノギャップの物理現象が理論計算のみによって行われ、実測されておらず、適切な素子設計ができないことも原因である。そこでこれらの課題を解決する大面積ナノギャップの創製と創製したナノギャップでの電気特性評価を目的とする。

3 研究内容

へき開によって創製したナノギャップ間のトンネル電流計測

[\(http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/2017/03/jka-nanogap/\)](http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/2017/03/jka-nanogap/)

面方位が(110)で活性層厚み5 μ mのSOI(Silicon on Insulator)ウェハに図1に示すデバイスを作製した。全体が約35度傾けて形成されて中央のギャップ形成部が<111>結晶方位を

向いている。左下のシェブロン型熱膨張アクチュエータを用いて中央のギャップ形成部において(111)面でへき開破壊し、ギャップ形成後は櫛歯型静電アクチュエータでギャップ間隔を精密に制御するように設計されている。ギャップ形成部の断面は $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ である。アクチュエータでの駆動でへき開は確認されたが、現段階では図1の右にあるようにへき開後にギャップが形成されたまま意図せず固定されてしまったデバイスでの測定を行っている。このときの走査電子顕微鏡 (SEM) で観察されたギャップの間隔は110nm程度であった。観察されたへき開面は平滑であり、ギャップの間隔も一様であることが確認でき、狙ったナノギャップ構造が形成できていると判断している。

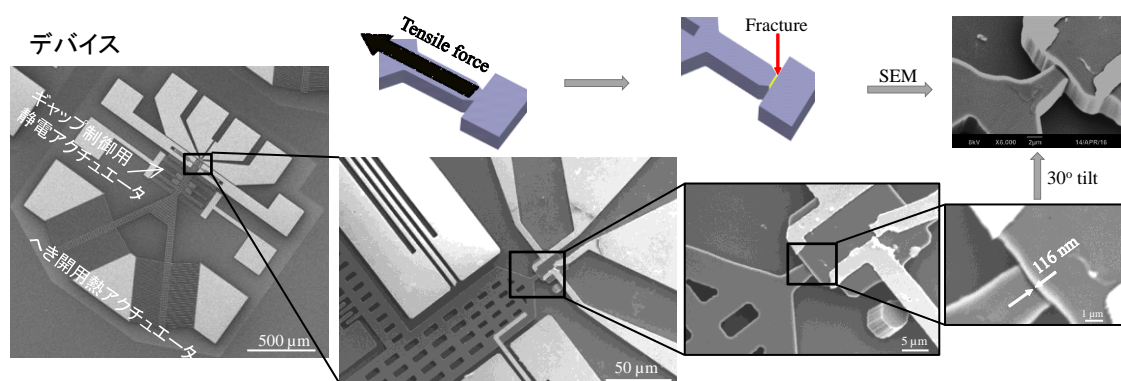


図1 ナノギャップ創製デバイスと作製したナノギャップ

このギャップを真空中 (SEM試料チャンバー中) でバイアス電圧を印加し電圧電流特性を測定した。図2の挿入図に示すように10V付近から急激に電流が増加する特性を得た。横軸を印加電圧の逆数、縦軸を電流/電圧の2乗の対数でプロットしたグラフ (図2) から、高電圧側の電流特性はギャップの障壁がバイアス電圧によって変化しトンネル電流が増大する、Fowler-Nordheim 電界電子放出に一致する特性を示しており、ナノギャップ間における電界電子放出を観測したと考察している。また、この電圧-電流特性を理論式と比較することで電子放出に関わっている電極面積を推定したところ 20nm^2 程度であり、作製したギャップの面積よりも大幅に小さく、また、電界集中による影響を考慮する必要があることを示唆している。このため今後はギャップを変化させながら測定する必要があり、これまでの成果をもとにデバイスを再設計して試作評価を準備している。

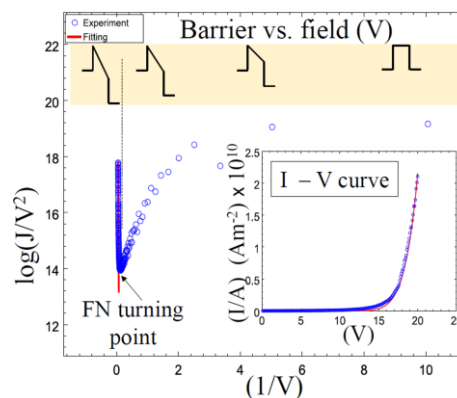


図2 ナノギャップの電気伝導特性

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本提案では最終的にナノギャップ熱電子発電デバイスが室温程度の環境排熱をワイヤレスセンサの駆動電源に適用可能であることを示す。具体的には100°C程度の熱源から10°Cの程度の温度差環境を利用して、100 μ W/cm²の発電を実現したい。このような条件下で高信頼かつ自由度の高いエネルギーハーベスティングデバイスが実現されると、ワイヤレスセンシングによる環境、人体、構造物モニタリングの応用範囲が大幅に広がる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

提案者はシリコンMEMSデバイスの研究を推進し、MEMSの信頼性に関わる構造材料の強度、特に単結晶シリコンの破壊や疲労特性の評価を実施してきた。また、MEMSセンサ技術を応用しナノ材料、特にカーボンナノチューブ、フラーレン、シリコンナノワイヤに対する機械特性評価のため、nmオーダーで変位負荷・計測、nNオーダーで荷重負荷、計測が可能なMEMS材料試験デバイスを開発した。これらの独自技術、知識のもとに単結晶シリコンのへき開を利用してMEMSデバイス上でナノギャップを創製し、MEMSデバイスでギャップ間隔を変化させながら、様々な条件下でギャップの物性を計測し、熱電子発電素子実現の礎とするという着想を得た。今回提案、実現した手法は熱電子発電だけでなく、ナノギャップ間の熱放射、ナノギャップ間に作用する力学現象を測定することが可能であり、研究面での幅広い展開が期待される。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【発表論文等】

- 1) Amit Banerjee, Yoshikazu Hirai, Toshiyuki Tsuchiya, Osamu Tabata, Measurement and potential barrier evolution analysis of cold field emission in fracture fabricated Si nanogap, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, No. 6S1, 2017, 06GF06. <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.06GF06>

【学会発表】

- 1) Amit Banerjee, Yoshiakazu Hirai, Toshiyuki Tsuchiya, and Osamu Tabata, “MEMS based fabrication of conformal electrode pairs for thermotunneling cooling,” The 2017 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Kyoto, Japan (June 29–30, 2017), accepted.
- 2) Amit Banerjee, Yoshiakazu Hirai, Toshiyuki Tsuchiya, and Osamu Tabata, “MEMS Fabricated Conformal Electrodes Attempting Thermotunnelling Refrigeration,” The 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), Kyoto, Japan (November 8–11, 2016), 11C–10–5.
- 3) 【招待講演】 T. Tsuchiya, MEMS Based Test-Stand Device for “Nano” Characterization, The 11th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE–NEMS 2016), Sendai & Matsushima-bay, Miyagi, Japan (17–20 Apr. 2016), B4L–A–1

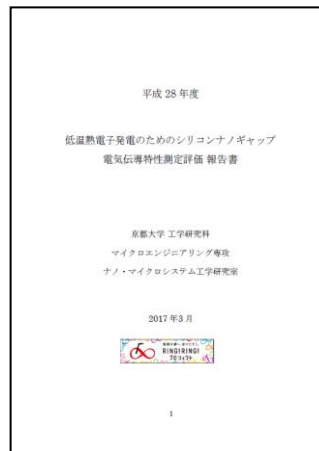
- 4) Amit Banerjee, Yoshikazu Hirai, Toshiyuki Tsuchiya, Osamu Tabata, Electromechanical Fabrication of Conformal Nanogap Electrodes for Thermotunnelling Cooling, The 11th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), Sendai & Matsushima-bay, Miyagi, Japan (17-20 Apr. 2016), B3P-B-61
- 5) 【招待講演】土屋 智由, Fracture Fabrication: 破壊を制御しデバイスを創製する, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 電気学会, 平戸, 2016年10月24-26日, 24pm3-E-1.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの
シリコンナノギャップの電気伝導

特性測定報告書

<http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/wp-content/uploads/2017/05/nanogap-JKA-report.pdf>

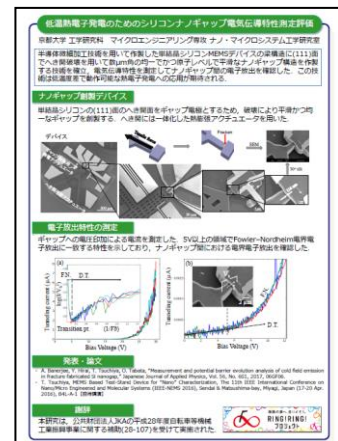


目次	
1 はじめに	3
1.1 背景	3
1.2 目的	3
1.3 概要	3
2 一企業により創製したナノギャップとその電気伝導特性測定	4
2.1 基本概念	4
2.2 デバイスの概要	6
3 デバイス設計図	8
3.1 ギャップ形成部	8
3.2 熱型アブダクター	8
3.3 マスク設計	9
4 デバイス作製	11
5 実験	13
6 結果と考察	14
6.1 デバイス作製	14
6.2 一企業によるナノギャップ作製	14
6.3 ナノギャップの電気伝導特性測定	15
7 おわりに	16
謝辞	16
参考文献	16
発表論文等	17

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

研究紹介チラシ

<http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/wp-content/uploads/2017/05/nanogap-JKA-flyer.pdf>



8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻ナノ・マイクロシステム工学研究室

住所： 〒615-8540

京都市西京区京都大学桂C3

申請者： 准教授 土屋智由 (ツチャ トシユキ)

E-mail: tutti@me.kyoto-u.ac.jp

URL: <http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp>