

一般セッション(口頭講演) | 16 非晶質・微結晶：16.2 エナジーハーベスティング

■ 2023年9月23日(土) 13:30 ~ 15:00 | 会 A311 (熊本城ホール)

[23p-A311-1~6] 16.2 エナジーハーベスティング

藤田 孝之(兵庫県立大)

13:30 ~ 13:45

[23p-A311-1] [分科内招待講演] カリウムイオンエレクトレット帯電劣化メカニズムの第一原理計算による研究

○大畑 慶記¹、洗平 昌晃²、石黒 巧真³、三屋 裕幸³、年吉 洋⁴、芝田 泰⁵、橋口 原⁵、白石 賢二² (1.名大院工、2.未来材料研、3.鷺宮製作所、4.東大生産研、5.静大院工)

13:45 ~ 14:00

[23p-A311-2] 反発トルクにより共振周波数チューニングをした手首装着用回転型エレクトレット発電機の広帯域発電

○三好 智也¹、鈴木 雄二¹ (1.東大)

◆奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[23p-A311-3] 金ナノワイヤを用いた摩擦発電素子の開発

○大島 元太^{1,2}、野田 祐樹²、豊嶋 尚美²、高根 慧至^{1,2}、関谷 毅^{1,2} (1.阪大院工、2.阪大産研)

14:15 ~ 14:30

[23p-A311-4] 非対称 SrTiO₃/PDMS 複合膜を用いたトライボ発電出力の改善

○(M2)周 青陽¹、生野 孝¹ (1.東京理科大)

14:30 ~ 14:45

[23p-A311-5] 広範囲の振動加速度域における磁歪式振動発電の電源制御手法

○伊藤 雅彦¹、小野 新平¹ (1.電中研)

14:45 ~ 15:00

[23p-A311-6] Pドーパ/Bドーパ poly-Si薄膜の熱電特性評価

○(M2)柴田 啓介¹、加藤 慎也²、黒澤 昌志¹、後藤 和泰^{1,3,4}、宮本 聡¹、伊藤 孝至¹、宇佐美 徳隆^{1,5}、黒川 康良¹ (1.名大院工、2.名工大院工、3.新潟大工、4.新潟大IRCNT、5.名大未来社会創造機構)

カリウムイオンエレクトレット帯電劣化メカニズムの第一原理計算による研究

First-principles study of charge decay mechanism of potassium-ion electrets

名大院工¹, 未来材料研², 鷺宮製作所³, 東大生産研⁴, 静大院工⁵○大畑 慶記¹, 洗平昌晃², 石黒巧真³, 三屋裕幸³, 年吉洋⁴, 芝田泰⁵, 橋口原⁵, 白石賢二²Nagoya Univ.¹, IMaSS², Saginomiya Seisakusho³, IIS⁴, Shizuoka Univ.○Yoshiki Ohata¹, Masaaki Araidai², Takuma Ishiguro³, Hiroyuki Mitsuya³,Hiroshi Toshiyoshi⁴, Yasushi Shibata⁵, Gen Hashiguchi⁵, Kenji Shiraishi²

E-mail: ohata.y.118@gmail.com

近年注目されている環境発電技術の中でも振動発電は、発電量が自然環境に依存しない。そのため、橋梁や道路などのインフラの監視システムで、自立発電デバイスとしての活用が期待される。カリウムイオンエレクトレット(KiE)と呼ばれる材料は、強力な Si-O 結合により系が形成されている堅固な帯電材料であるため、新規振動発電デバイス材料として注目を集めている。¹⁾

この材料はアモルファス SiO₂(a-SiO₂)に K 原子を挿入し、その後高温下で電圧を印加して K⁺イオンを除去することで得られる材料であり、系内の SiO₅ 構造に負電荷が蓄積される。しかしながら、時間をかけて KiE の帯電劣化が起こってしまうことが、実用化への課題となっている。帯電劣化の原因の1つとして、劣化後に材料内で濃度の増加が観測されている水素が挙げられる。²⁾ 本研究では、第一原理計算により KiE の計算モデルを作製し、系に水素を加えることで水素による帯電劣化のメカニズムの解析を行った。

本研究は密度汎関数理論に基づく第一原理計算により行われた。KiE の計算モデルとして MD 計算・構造最適化計算を用いて、系内に SiO₅ 構造が1つ形成された a-SiO₂(Si:48 原子, O:97 原子, H:1 原子)スーパーセルを作製した。ここへ帯電した水素原子(H⁺, H⁰, H⁻)を加え、構造最適化計算・形成エネルギー計算を行うことで、水素による影響を調査した。

計算により水素を加えた系では、KiE が負に帯電する材料であるという事実に対し、電荷中性状態(q=0)が最安定であった。また、水素はその初期座標によって 2 種類の局所構造を形成することが判明した。1 点目は、水素が SiO₅ 構造に近接しない座標に挿入された場合に形成される Si-(OH⁺)-Si 構造、2 点目は、水素が SiO₅ 構造に近接した座標に挿入された場合に形成される SiO₃(OH)構造である。なお、2 点目の構造が形成される際に SiO₅ 構造は崩れた。よって、どちらの構造を形成しても KiE の負電荷蓄積能力の劣化の原因となると考えることができる。次に、系内の水素の拡散経路を NEB(Nudged Elastic Band)法³⁾により調査した。なお、準安定状態の決定には最安定な電荷中性状態での構造最適化計算を用いた。経路として1点目に Si-O-Si 構造間の拡

散(Initial state→Middle state)、2 点目に Si-O-Si 構造から SiO₅ 構造までの経路(Middle state→Final state)を計算した。結果を Fig. 1 に記す。1 点目の拡散経路の活性化障壁は 1.1eV、拡散によって 0.4eV 安定化した。2 点目の拡散経路での活性化障壁は 0.7eV、拡散によって Initial state より 1.5eV 安定化した。これらの結果から、H⁺が SiO₅ 構造に近づくにつれて系が安定化していくことがわかる。よって、KiE 内で水素原子は、Si-O-Si ネットワークの O 原子の 3 配位目として結合しながらホッピングし、最終的に SiO₅ 構造を崩すことで安定化することで、KiE の帯電劣化の原因になっているということが明らかになった。また、強力な Si-O 結合で形成される SiO₅ 構造が崩れる原因としては、5 配位構造の幾何学的配置や O-H⁺ 結合による Si-O 極性結合の弱体化などが挙げられる。

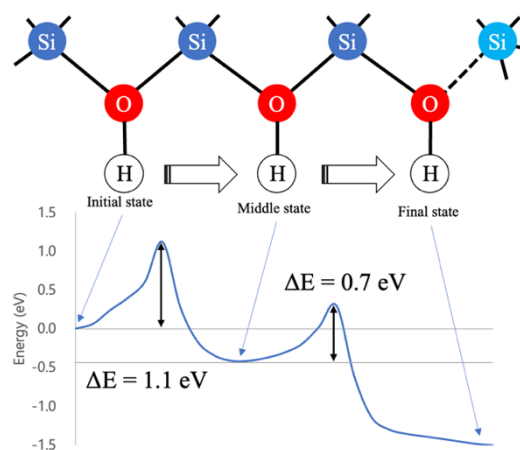


Fig1. Diffusion pathway of hydrogen in the calculation model and activation barriers.

謝辞

本研究は、JST-CREST (JPMJCR15Q4 と JPMJCR19Q2) の支援を受けて行われた。

References

- [1] T. Nakanishi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 193902 (2020).
- [2] Y. Ohata, *et al.*, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **157**, 107306 (2023).
- [3] G. Henkelman *et al.*, *J. Chem. Phys.* **113**, 9901(2000).

反発トルクにより共振周波数チューニングをした
手首装着用回転型エレクトレット発電機の広帯域発電

Broadband power generation of wrist-worn rotational electret energy harvester by
resonance frequency tuning with repulsive torque

東京大学¹ °三好 智也¹, 鈴木 雄二¹

Univ. of Tokyo¹, °Tomoya Miyoshi¹, and Yuji Suzuki¹

E-mail: miyoshi@mesl.t.u-tokyo.ac.jp

ウェアラブルデバイスの自立電源として人体運動からの振動発電が注目されている中で、特に歩行時の腕振り運動エネルギーの高効率な電力変換は手首装着型デバイスの電池レス化に有望だと考えられる。ヒトの日常的な歩行速度帯(4~6 km/h)における腕振り周波数は1 Hz程度であり、このような低周波数振動からの高出力発電にはエレクトレットを用いた静電誘導発電が原理的に有利である[1]。

課題は低速歩行時における発電出力の低下である。これを解決するために著者らは発電機回転子の固有周波数調整手法を提案したが、腕振りからの加振トルク入力が増加と共振周波数調整による広帯域化の両立は困難であった[2]。最近、著者らは重力方向に対する反発トルクを導入する新しい設計手法を提案し、ロボットにより腕振り運動を再現する発電実験のもとで、加振トルク入力と共振調整の両立による広帯域かつ高出力な発電特性を報告した[3]。しかし、発電デバイスを実際にヒトの手首に装着したときの歩行時の腕振り発電特性の実験的評価は十分に行えていない。

本研究では手首装着型回転型エレクトレットエネルギーハーベスタの広帯域発電特性を実際の歩行運動により評価した。発電実験には従来型設計と反発トルク設計の2種類の試作機を用いた。腕装着型エレクトレット発電機の概要図を図

1に示す。発電機回転子の質量と直径はともに18 g, ø39 mmである。15 μm厚のCYTOPエレクトレット[4]を回転子の櫛歯電極上に成膜し、軟X線により±0.8 kVのバイアス電圧のもと両極性荷電を行った[5]。また軸方向着磁のC型ネオジム磁石を回転子と固定子に搭載し、腕振りオフセット角度25.8°において共振周波数が1 Hzとなるように調整した[3]。

ウェアラブル無線発電計測システムを手首に装着した7名の被験者が歩行運動したときの発電出力と3軸手首加速度を計測した。反発トルクによりカットオフ歩行速度が顕著に低下し、時速3 kmの低速歩行域において平均発電出力0.2~0.3 mWを得た。

本研究の一部は、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ JPMXP1222UT1051の支援を受けた。

- [1] Suzuki, Y., IEEJ Trans. Electr. Electr. Eng., Vol. 6, No. 2, pp. 101-111 (2011).
[2] Miyoshi, T., et al., PowerMEMS 2019, Krakow, P2-12 (2019).
[3] Miyoshi, T., et al., PowerMEMS 2022, Salt Lake City, W3A-03 (2022).
[4] Kim, S., et al., J. Phys. Chem. B, Vol. 124, No. 46, pp. 10507-10513 (2020).
[5] Kashiwagi, K., et al., J. Micromech. Microeng., Vol. 21, Issue 12, No. 125016, (2011).

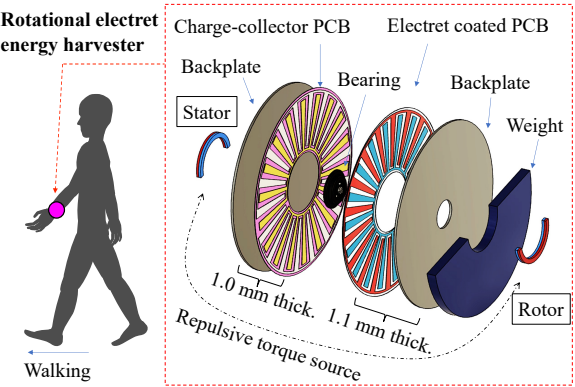


Fig. 1 (a) Schematic of wrist-worn rotational energy harvester for arm swing during human walking.

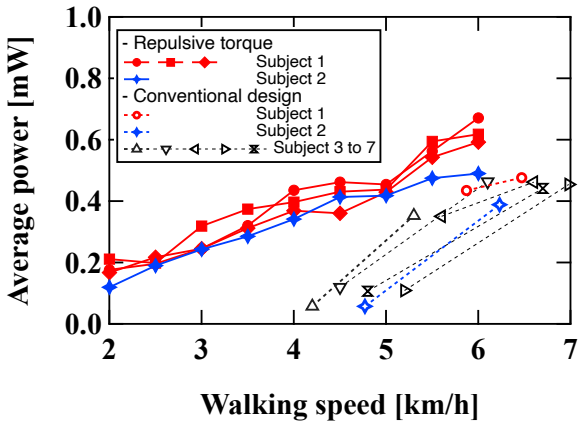


Fig. 2 Output power of the rotational electret energy harvesters with/without the repulsive torque.

金ナノワイヤを用いた摩擦発電素子の開発

Development of triboelectric nanogenerator using gold nanowires

大阪大学大学院工学研究科¹, 大阪大学産業科学研究所²

○大島 元太^{1,2}, 野田 祐樹², 豊嶋 尚美², 高根 慧至^{1,2}, 関谷 毅^{1,2}

Graduate School of Engineering, Osaka University¹, ISIR, Osaka University.²

○Genta Oshima^{1,2}, Yuki Noda², Naomi Toyoshima², Satoshi Takane^{1,2}, Tsuyoshi Sekitani^{1,2}

E-mail: oshima-genta31@sanken.osaka-u.ac.jp

エネルギーハーベストは現在 IoT 技術の発展に伴う膨大な数のセンサを駆動するための電力供給の手段として注目を集めており、そこでは環境中の振動現象や輸送現象に伴う微小な機械エネルギーを電気エネルギーに変換するプロセスの効率化が課題である。摩擦帯電型素子においては、発電効率を向上させる目的で、電極と絶縁体の接触面積、もしくは絶縁体表面積を増加させるために低次元金属を電極として利用した素子が報告されている[1]。本研究では一次元金属である金ナノワイヤ(gold nanowire: AuNW)からなるネットワーク構造電極と有機高分子を用い、電極-絶縁体間の接触面積および絶縁体表面積を最大限に向上させる新規構造を開発したので報告する。

溶液法により直径約 100 nm の AuNW を合成し、ろ過法を用いて AuNW ネットワーク電極を作製した[2]。さらにその表面上に絶縁体材料として PDMS 溶液を塗布して試料を作製した。AuNW ネットワーク電極においてはアニール処理を行うことでシート抵抗を最大約 78%低減させることに成功した(Fig.1)。一方で SEM-EDS 計測より AuNW 表面上に PDMS に含まれる Si が均一に分布されていることを確認し(Fig.2)、さらに FTIR-RAS 計測により AuNW 表面上に PDMS に由来する振動スペクトルが確認できたことから(Fig.3)、PDMS は分子構造を維持したまま AuNW ネットワーク電極表面にコーティングされていることが示唆された。当日は PDMS 以外的高分子からなる素子、および発電特性について議論する。

[1] Sci. Rep. 5, 13866 (2015). , Nano Lett. 13, 847 (2013).

[2] Appl. Phys. Lett. 118, 243102 (2021).

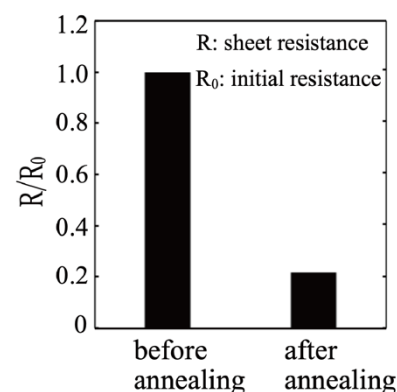


Figure 1. Annealing effect on sheet resistance of AuNWs.

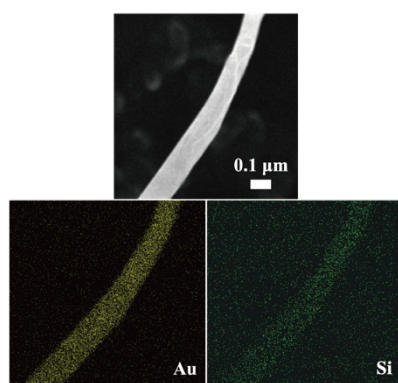


Figure 2. SEM-EDS elemental mappings of a AuNW coated with PDMS.

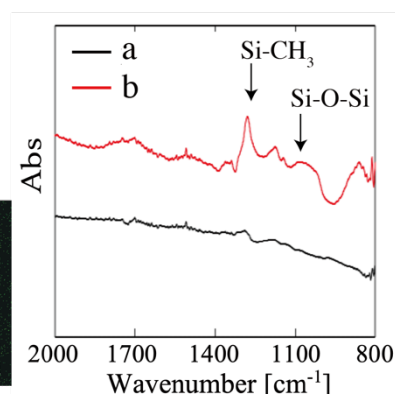


Figure 3. FTIR-RAS spectra of (a) AuNWs and (b) AuNWs coated with PDMS.

非対称 SrTiO₃/PDMS 複合膜を用いたトライボ発電出力の改善

Improving the performance of a triboelectric nanogenerator by using an asymmetric SrTiO₃/PDMS composite layer

東理大先進工、°(M2)周 青陽, 生野 孝

Tokyo Univ. of Science, °Qingyang Zhou, Takashi Ikuno

E-mail: tikuno@rs.tus.ac.jp

【研究背景】環境中の未利用エネルギーから電力を得るエネルギーハーベスティング素子として、シンプルで安価なトライボ発電素子が注目されている[1]。現在のところ、トライボ発電は出力電力が低いという短所がある。トライボ発電素子の出力電力は、原理的には異種物質を接触させ帯電させる誘電体膜の静電容量に依存する。これまで、ポリジメチルシロキサン (PDMS) ベースの TENG の発電出力を向上させるために、非対称 TiO₂/PDMS 複合膜を作製した[2]。この複合膜は、最大発電出力が約 195 mW (78 W/m²) だった[2]。TiO₂ に加えて、SrTiO₃ や BaTiO₃ 粒子などの他の High- k 材料を誘電体膜に添加すると誘電率が効果的に増加する。本研究では、PDMS ベースの発電誘電体膜に高誘電率である SrTiO₃ ナノ粒子 (NPs) を埋め込み発電特性の改善を試みた。さらに発電出力を高めるためにフィルム上に負の表面電荷を固定するためコロナ処理を行なった[3]。

【実験方法】純粋な PDMS 薄膜を SrTiO₃ NPs 埋め込み PDMS 複合膜上にキャッピング層として堆積し、非対称 SrTiO₃/PDMS 複合膜を作製した。対向電極として Al プレートを用い発電特性を評価した。製造方法や分析方法の詳細は当日説明する。

【実験結果】非対称 SrTiO₃/PDMS 複合膜は、SrTiO₃ NPs の含有量が増加するにつれて出力が増加した (Fig. 1)。SrTiO₃ NPs の含有量が 20 vol.% の場合、最大出力電力は約 8.9 mW (電力密度 3.59 W/m²) であった。さらに発電出力を向上させるために、非対称複合膜をコロナ放電処理し、測定周波数 5 Hz で出力を測定した。最大発電出力電力は約 992 mW (396 W/m²) であった。発電出力電力は、以前に報告された TiO₂ NP を含む発電複合膜[2]の発電出力電よりも約 5 倍高かった[3]。

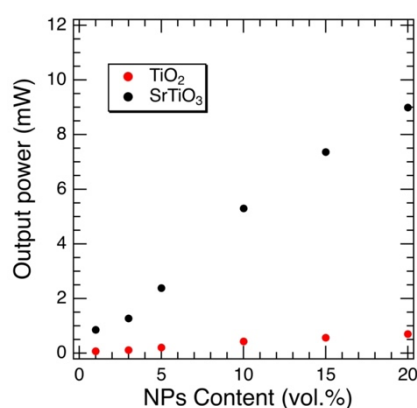


Fig. 1. The relationship between the content of SrTiO₃ and TiO₂ NPs and the output power.

[1] Z. L. Wang, and A. C. Wang: Mater. Today **30**, 34 (2019).

[2] Q. Zhou, R. Takita, and T. Ikuno: Nanomaterials **13**, 832 (2023).

[3] Q. Zhou and T. Ikuno: Jpn. J. Appl. Phys **62**, 058001 (2023).

広範囲の振動加速度域における磁歪式振動発電の電源制御手法

Power Control Methods for Magnetostrictive Vibration Energy Harvester

in a Wide Range of Vibration Acceleration

電中研¹ ○伊藤 雅彦¹, 小野 新平¹

CRIEPI¹, °Masahiko Ito¹, Shimpei Ono¹

E-mail: m-ito@criepi.denken.or.jp

機械装置の振動は、多くの場合、装置の稼働状況に応じて振動加速度が増減する。そのような振動から振動発電で電力を得る場合、振動加速度の増減に応じて変化する発生電圧を、低い時も高い時も適切に取り込み制御して定電圧出力とすることが求められる。一方で、通常、電源制御に用いる IC は入力電圧の許容範囲が設定されており、許容電圧を下回ると動作することが出来ず、反対に許容電圧を上回ると保護回路により入力が遮断されるか、あるいは電源 IC が破損する恐れがある。このため、刻々と変化する振動発電の出力電圧を電源 IC の入力電圧範囲内に合わせられるように双方の特性を考慮した設計が重要となる。

磁歪式振動発電は、様々な振動発電の方式の中では比較的输出インピーダンスが小さく、出力電圧が低い。このため、電源 IC の最低入力電圧以上の電圧を得る為に電圧増倍回路を組み合わせ使用されることが多い[1]。しかしそのような回路では、振動加速度が大きな条件で得られる高電圧の出力を効率良く電源 IC に取り込むことが出来なくなる。そこで今回我々は、振動発電素子から電圧増倍回路を介して電源 IC に接続する回路と、振動発電素子から整流のみをして電源 IC に接続する回路を並列に設置する手法を提案した (図 1)。本手法では、振動発電素子で得られた電力は、低電圧時には電圧増倍回路側を、高電圧時には整流回路側を選択的に流れ、振動加速度が $0.98 \sim 9.8 \text{ m/s}^2$ の広範囲において電源 IC を効率良く動作できることを明らかにした (図 2)。

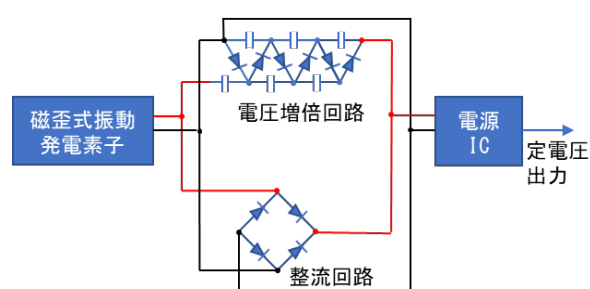


図 1 : 磁歪式振動発電素子の出力を効率良く電源 IC に入力する回路の概要

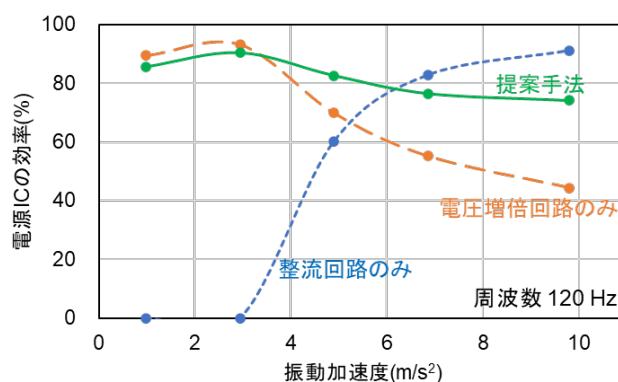


図 2 : 振動加速度条件に対する磁歪式振動発電の出力を制御する電源 IC の効率

[1] 伊藤雅彦: 電力中央研究所報告 Q19001 (2019).

P ドープ/B ドープ poly-Si 薄膜の熱電特性評価

Thermoelectric properties of P-doped and B-doped polycrystalline silicon thin films

名大院工¹, 名工大院工², 新潟大工³, 新潟大 IRCNT⁴, 名大未来社会創造機構⁵

○(M2) 柴田 啓介¹, 加藤 慎也², 黒澤 昌志¹, 後藤 和泰^{1,3,4}, 宮本 聡¹, 伊藤 孝至¹,
宇佐美 徳隆^{1,5}, 黒川 康良¹

Nagoya Univ.¹, Nagoya Inst. Tech.², Niigata Univ.³, IRCNT Niigata Univ.⁴, InFuS Nagoya Univ.⁵

°K. Shibata¹, S. Kato², M. Kurosawa¹, K. Gotoh^{1,3,4}, S. Miyamoto¹, T. Itoh¹,
N. Usami^{1,5}, Y. Kurokawa¹

E-mail: shibata.keisuke.p4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【導入】Si は地球上に豊富に存在する元素の 1 つであり、比較的安価で無毒な材料である。しかし、熱電材料としては非常に高い熱伝導率がボトルネックとなる。試料を薄膜化すると界面熱抵抗や表面でのフォノン散乱の影響により熱伝導率が低下することが知られているが、同時にシート抵抗も高くなるため、膜厚と導電率のバランスが重要となる。本研究では、高濃度ドーピングが可能なプラズマ援用化学気相成長法 (PECVD 法) を用いて製膜した水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) 薄膜を熱処理することにより、高濃度ドーピング多結晶シリコン薄膜を作製し、その熱電特性を測定した。

【実験手法】石英基板上に PECVD 法を用いて、それぞれ P 及び B をドーピングした n 型 a-Si:H (膜厚 480 nm) と p 型 a-Si:H 薄膜 (膜厚 440 nm) をそれぞれ作製した。その後、フォーミングガス雰囲気下で 30 分間 900 °C にて熱処理を行った。結晶化率をラマン散乱分光測定により評価した。また、熱電特性(電気伝導率, ゼーベック係数, 熱拡散率)を、熱電物性測定装置を用いて Ar ガス雰囲気下にて試料温度を室温から 600 °C まで変えて測定した。得られた熱拡散率, 比熱, 密度より、熱伝導率を算出した。

【結果及び考察】図 1 に示すようにゼーベック係数は昇温とともに増加傾向を示し、n 型試料で最大 -231 $\mu\text{V/K}$, p 型試料で最大 301 $\mu\text{V/K}$ が得られた。導電率は昇温とともに n 型試料では減少傾向, p 型試料では増加傾向となった。n 型試料では縮退が生じているものと考えられる。特に n 型試料では、600 °C にて導電率は 629 S/cm, 無次元性能指数 ZT は 1.92 と高い値が得られた。結晶化に伴いドーパントが活性化され、キャリア濃度及び移動度が向上し、高い導電率につながった。また、界面熱抵抗や表面でのフォノン散乱が寄与したことで熱伝導率は石英と同程度の $1.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ まで低減することができた。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 (No. 20K05075) ・ JST(JPMJPF2204)の助成を受けたものである。

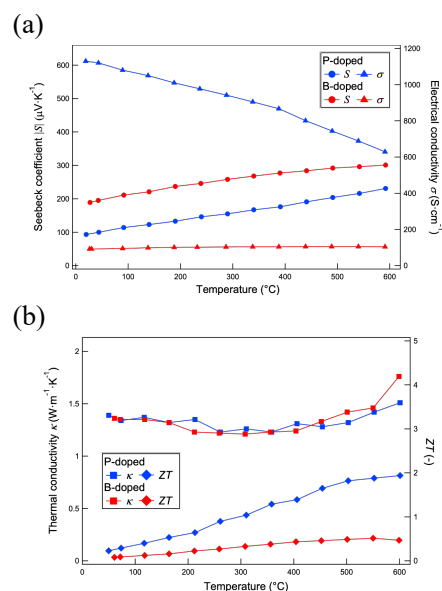


Fig.1. Dependence of (a) electrical conductivity σ , Seebeck coefficient S , (b) thermal conductivity κ , and ZT of P-doped and B-doped poly-Si thin films on temperature.