

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22110

研究課題名（和文）量子構造の急峻電子状態と良伝導電子状態の混成に基づく熱電性能向上方法論の創成

研究課題名（英文）Methodology of thermoelectric performance enhancement by hybridization of electronic quantum states and high conductivity states

研究代表者

中村 芳明（Nakamura, Yoshiaki）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：60345105

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人工的急峻電子状態を有する量子閉じ込めナノ構造を、良電子伝導を担うナノワイヤの側面にもつコアシェルナノワイヤの埋め込み薄膜を創製することで、ナノワイヤ中の良伝導電子状態と人工的急峻電子状態の混成による出力因子増大と界面フォノン散乱による熱伝導率低減を同時に実現し、透明熱電材料開発に向けて本学理に基づく熱電性能向上方法論を創成することを目的とした。本研究では、ZnO/Mg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub>コアシェルナノワイヤ構造薄膜を形成し、ゼーベック係数の増大を観測した。このメカニズム解明にはさらに詳細に調べる必要があるが、本増大の観測の成功は、本ナノ構造戦略による有用性の可能性を示す結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、ナノ構造を用いて量子状態を操作することで熱電変換効率を増大させるという新しい性能向上の方法論を打ち出すものであり、高い学術的意義を有する。また、この手法は、コピキタス元素からなる酸化物に適用できるため、将来、環境調和型の透明熱電材料実現への道を拓くという社会的インパクトを与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we are aiming at developing a methodology of thermoelectric performance enhancement using the proposed nanostructure, namely a film including epitaxial core-shell nanowires. Therein, the shell layers are quantum-confined low dimensional structures with sharp density of states having high Seebeck coefficient and nanowires have high electrical conductivity and low thermal conductivity. It is expected that the confined states penetrate into the nanowires, leading to the high Seebeck coefficient and high electrical conductivity. We succeeded in the formation of films including ZnO/Mg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub> core-shell nanowires, which shows higher Seebeck coefficient than ZnO films without nanowires. Although the detail study is needed to elucidate the mechanism, this result gives the clue to new methodology of thermoelectric performance enhancement by nanostructuring

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：熱電材料 透明材料 ナノワイヤ ナノ構造物理 量子閉じ込め構造

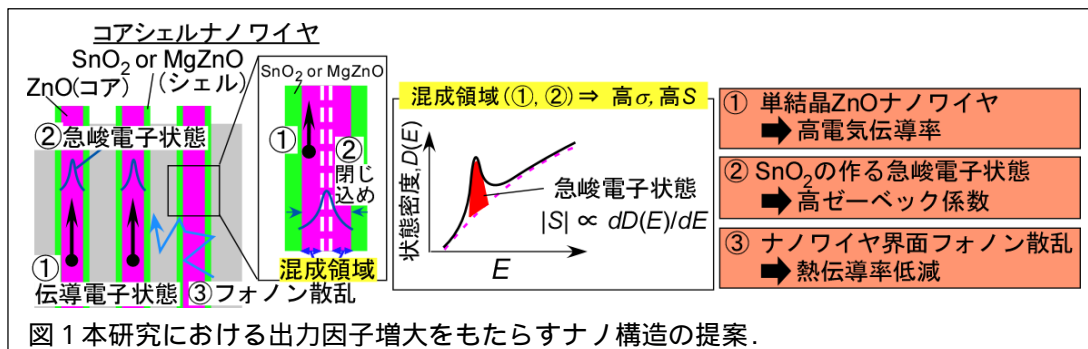
### 1. 研究開始当初の背景

現在、未利用熱を積極的に扱う高度熱利用社会実現に向けた取り組みの一つとして、廃熱から電気を取り出す熱電変換が注目を浴びている。低温廃熱 (<200 ) は全廃熱の約七割を占めるのに対し、低温での熱電変換効率が低いことが問題となっている。申請者は、窓ガラス室内外の温度差や透明電子デバイスの熱源をターゲットとした透明熱電材料に注目した。熱電変換効率は、無次元性能指数  $ZT = S^2 T / (\rho \kappa)$  (S: ゼーベック係数、 $\rho$ : 電気伝導率、T: 絶対温度、 $\kappa$ : 熱伝導率) の単調増加関数であり、高い S と、低い  $\rho$  が求められるが、この三物性値には相関があり、ZT 向上は難しい。近年、ナノ構造導入による低減効果が報告されて以降、実用的熱電材料として低コスト・環境調和型の元素を用いたナノ構造材料が注目されるようになった。その後、実用化を念頭に入れた熱電性能向上のために、低減だけでなく出力因子 ( $S^2$ ) 増大が求められ、数多くの試みがなされているが、ナノ構造を用いても十分な  $S^2$  増大は未だ難しい。

申請者は、ナノ構造を用いた  $S^2$  増大の新しい手法として、高  $\sigma$  の電子伝導層周囲に、人工的に急峻電子状態をもつ量子閉じ込めナノ構造を形成し、両構造の "伝導電子状態" と "高 S をもたらす急峻電子状態" とを界面近傍で混成させることにより、高  $\sigma$  と高 S の同時実現 ( $S^2$  増大) できるのではないかと着想した。この  $S^2$  増大手法を実現するために、透明熱電材料の中でも高電子移動度をもつ環境調和型 ZnO を電気伝導層としたナノワイヤコア部に対して、その側面に量子閉じ込めシェル部を形成したコアシェルナノワイヤでこれが実現できるのではないかと考えた。そこでは、量子閉じ込めシェル部は、シェル半導体層を形成して側面方向に量子閉じ込めした急峻電子状態を形成し、それがナノワイヤ側に染み出してナノワイヤ伝導電子状態と混成した結果、ナノワイヤ中に急峻な傾きを持つ伝導電子状態が形成することを狙っている。これにより電子状態の傾きに比例する S が増大し、また、ナノワイヤ中のスムーズな電子伝導も予想される。さらに、ナノワイヤ界面でのフォノン散乱効果のため、低減も生じ、その結果、ZT 向上が期待される。本研究では、この申請者独自の着想に基づき研究を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記着想に基づいて図 1 に示すように、人工的急峻電子状態を有する量子閉じ込めナノ構造を、良電子伝導を担うナノワイヤの側面にもつコアシェルナノワイヤの埋め込み薄膜を創製することで、ナノワイヤ中の良伝導電子状態と人工的急峻電子状態の混成による  $S^2$  増大と界面フォノン散乱による低減を同時に実現し、本学理に基づく熱電性能向上方法論を創成することを目的とする。



### 3. 研究の方法

#### (1) コアシェルナノワイヤ含有薄膜の形成

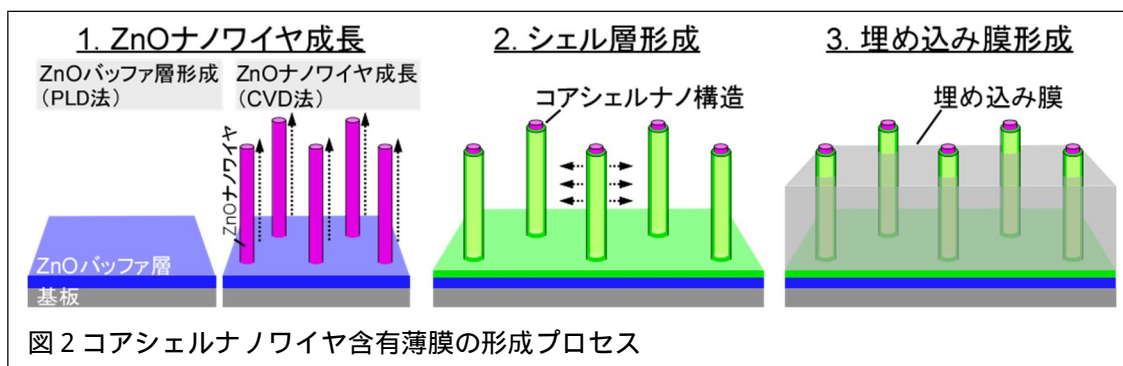
本研究は、上記の着想に基づいたコアシェルナノ構造を形成することが主軸となる。また、その構造だけでは、利用できないために、コアシェルナノ構造をエピタキシャル関係をもって埋め込んだ薄膜の形成を行った。本研究では、このナノ構造の形成技術開発を行った。

材料系としては、まず、ナノワイヤとして高移動度を持ちうる ZnO、シェル層としては、SnO<sub>2</sub> を対象とした。また、後述するように、シェル層として MgZnO 系材料への展開も行った (図 1)。

薄膜形成には、背圧  $5.0 \times 10^{-6}$  Pa の高真空層において、エキシマレーザー (193 nm, 50 mJ) を用いたパルスレーザー堆積法 (PLD) により行った。ナノワイヤ形成には、物理気相輸送法 (PVT) を用いて形成した。ZnO ナノワイヤ形成には、まず、基板に ZnO バッファ層の形成が必要であり、そのバッファ層は PLD 法を用いて行い、その後、PVT 法によりナノワイヤを成長させるというプロセスを行った。

図 2 に示すように、コアシェルナノワイヤ含有薄膜の形成は、(1) ナノワイヤ成長、(2) シェル層形成、(3) 埋め込み膜形成のプロセスで行った。(1) の段階で、ナノワイヤ用バッファ層を通じた電気伝導があると、ナノ構造の物性を直接観察することが難しいため、キャリア供給をする酸

素空孔、Zn 格子間欠陥を消失するためにアニール処理を施して、電気伝導がこの段階では、ないことを確かめた。



## (2) 構造評価

ナノワイヤ及びコアシェルナノワイヤの形成は、走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて観測し、埋め込み薄膜においては、SEM 観察のほかに、X 線回折法 (XRD) 透過電子顕微鏡法 (TEM) を用いて観察を行う。表面形状は原子間力顕微鏡法 (AFM) を用いて観測する。

## (3) 物性評価

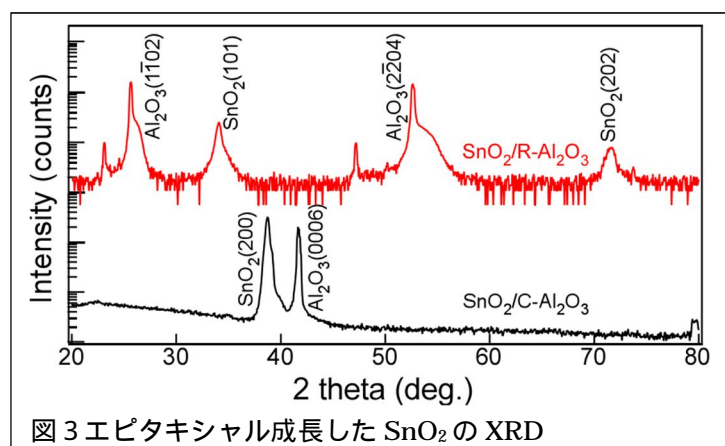
電気特性評価として四端子法とホール効果測定を行い、ゼーベック係数測定は、ZEM 3 を用いて行った。熱伝導率測定には、2 法及び時間領域サーモフレクタンクス法 (TDTR 法) を用いて行った。

## 4. 研究成果

### (1) SnO<sub>2</sub> 薄膜の面方位依存性

ZnO ナノワイヤに SnO<sub>2</sub> コアシェルを形成したコアシェルナノワイヤの創製を目指す、ナノワイヤの側面に成長するために、SnO<sub>2</sub> の熱電特性の面方位依存性を調べておく必要がある。様々な面方位でエピタキシャル成長した SnO<sub>2</sub> 薄膜の熱電特性は未だ明らかにされていない。そのため、最初に透明熱電材料としてのエピタキシャル SnO<sub>2</sub> 薄膜の性能を調べた。

面方位依存性を調べるために SnO<sub>2</sub> を C 面と R 面再ファイア基板上に形成し、その構造、熱物性を調べた。図 3 に示すように、サファイア基板のピークのほかに SnO<sub>2</sub> 薄膜由来の SnO<sub>2</sub>(101) と SnO<sub>2</sub>(200) のピークが各々 C 面、R 面成長薄膜上に見られ、配向していることが分かった。また、極点図からも結晶構造に対応したピークが観察され、エピタキシャル成長に成功していることが分かった。



次に、電気特性の面方位依存性を調べた。SnO<sub>2</sub> 薄膜の電気伝導率の測定結果 (電子密度:  $\sim 7.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) を図 4 に示す。SnO<sub>2</sub> 薄膜の電気伝導率は、面方位に強く依存性し、R 面方位成長したほうが、C 面成長した場合より  $\sim 2$  倍大きいことが分かった。これは、移動度の差に起因すると考え、移動度の測定を行った (図 4)。この結果より、電気伝導率の面方位依存性は、移動度の差によるものと考え [文献]。このことは、SnO<sub>2</sub> は、面方位依存性が大きく、ナノワイヤ側面での成長の仕方により性能が異なることを意味している。

次に、SnO<sub>2</sub> 薄膜のゼーベック係数の面方位依存性を測定した。その結果を図 5 に示す。ゼーベック係数は面方位にほとんど依存せず、 $-82$  の値を示した (電子密度:  $7.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )。また、出力因子も同時に図 5 に示す。ゼーベック係数に面方位依存性がほぼないことから、R 面方位に

成長した薄膜のほう約 3 倍出力因子が高いことがわかり、この値は、従来他材料薄膜 (ZnO, アモルファス IGZO) と比べて比較的高いことがわかる。

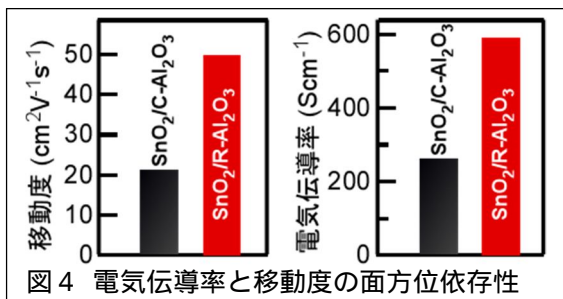


図4 電気伝導率と移動度の面方位依存性

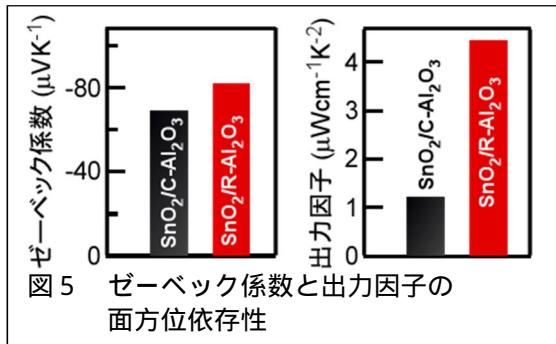


図5 ゼーベック係数と出力因子の面方位依存性

図1に示すコンセプトとしては、SnO<sub>2</sub>は量子閉じ込めを行うことで、高ゼーベック係数をもたらす役割をもつため、電気伝導率の強い面方位依存性は、それほど悪影響を与えないと思われる。また、SnO<sub>2</sub>のゼーベック係数が面方位にあまり依存しないため、ナノワイヤ側面にSnO<sub>2</sub>を成長させたコアシェルナノワイヤ構造は、熱電性能の観点で側面の成長方位に関係なく作製できることを意味している。

### (2) SnO<sub>2</sub>/ZnOヘテロ構造の形成

ZnOとSnO<sub>2</sub>には格子不整合があるため、きれいに側面に形成できない可能性があるが、どれくらい問題になるかはわかっていない。そこで、知見をえるために、ZnOナノワイヤ上にSnO<sub>2</sub>を形成したところ、ある成長条件ではナノワイヤの頂上あたりでSnO<sub>2</sub>がアイランド成長することが分かった(図6)。そのため、蒸着原子がZnOナノワイヤ間に入ることができず、側面への形成が難しいことが判明した。

そこで、SnO<sub>2</sub>/ZnOのヘテロ界面における成長様式を調べるために、まずSnO<sub>2</sub>薄膜上へZnO薄膜を形成したところ、図7に示すようにある成長条件によってはZnOはSnO<sub>2</sub>上にアイランド成長することが分かった。格子不整合が関係しているため平坦なSnO<sub>2</sub>/ZnOヘテロ構造を得るためには、成長温度、蒸着速度、組成、蒸着角度、ガス混合比を変えることで、適当な条件を見つける必要がある。しかし、この条件探索より格子不整合差が少なく、ZnOと平坦なヘテロ界面を形成しやすい材料を用いたシェル層形成に舵を切るほうが成功する可能性が高いと判断し、MgZnO系材料に注目した。

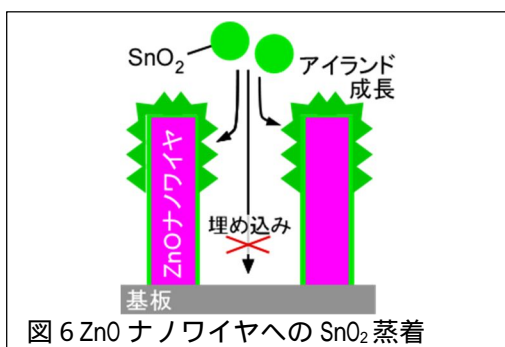


図6 ZnOナノワイヤへのSnO<sub>2</sub>蒸着

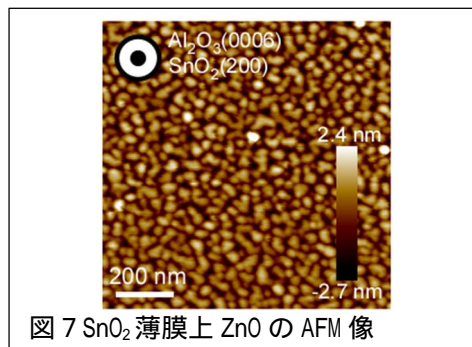


図7 SnO<sub>2</sub>薄膜上ZnOのAFM像

### (3) C面サファイア上ZnO薄膜上へのMg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub>O層形成

前節で述べたように、平坦なヘテロ界面を得るためには格子不整合差が少なく、かつ本戦略を実現可能な材料の選定を改めて行い、その結果ZnOナノワイヤ上へのシェル層材料としてMgZnO系材料が適切であると着想した。MgZnOはMg添加量によって、格子不整合差を調整できる。また、MgZnO/ZnO間のエネルギー障壁も制御であり、このヘテロ界面には二次元電子ガス層が形成されることもよく知られている。

そこで、まず、C面サファイア上にZnO薄膜を形成し、その上にMg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub>O層を成膜したところ、原子レベルで平坦な薄膜を形成することに成功した。これは、SnO<sub>2</sub>の時に起きた問題を回避できることを意味している。このことから、ナノワイヤのコア層としてZnO、シェル層としてMgZnOとすることにした。

この材料系の熱電性能の予備的知見を得るために、コアシェルナノワイヤ形成の前に、Mg添加量を10%、基板をC面サファイアとして、Mg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub>O/ZnOの積層構造薄膜の形成を行った。図8に示すように、平らな界面をもつMg<sub>0.1</sub>Zn<sub>0.9</sub>O/ZnO積層構造の形成に成功したことがわかる。次に、その熱電性能を測定した結果を図9に示す。電気伝導率は367 Scm<sup>-1</sup>、ゼーベック係数は-99 μVK<sup>-1</sup>、その結果、超格子の出力因子が薄膜のそれと比べて、二倍増大していることが明らか

となった（キャリア密度  $\sim 1.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  の時）。これはナノワイヤを用いていない段階であるにもかかわらず熱電性能の向上が観測されたことを意味する。これを証明するには、Mg の添加量依存性、キャリア密度依存性、温度依存性を詳細に調べ、メカニズムの解明を行い、性能の最高値を求める必要がある。しかし、本研究の目的であるコアシェルナノワイヤ形成による熱電性能向上の観察が期待できる予備的知見を得ることに成功したといえる。

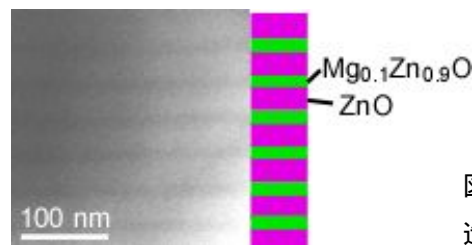


図 8  $\text{Mg}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{O}/\text{ZnO}$  積層構造の断面 SEM 像

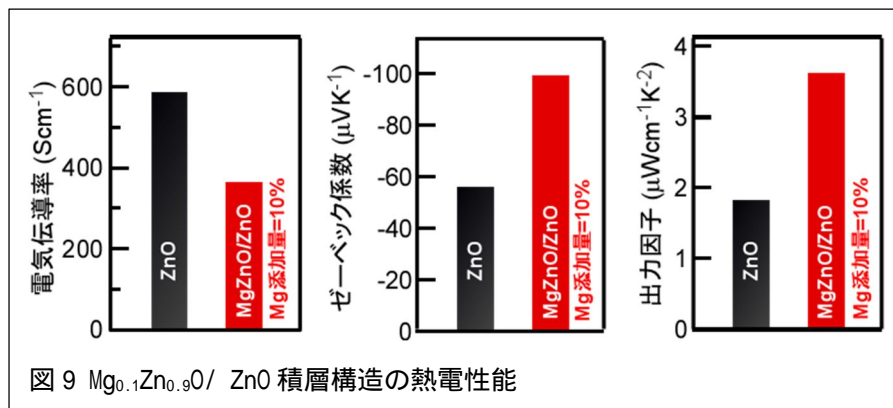


図 9  $\text{Mg}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{O}/\text{ZnO}$  積層構造の熱電性能

#### (4) $\text{Mg}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{O}/\text{ZnO}$ コアシェルナノワイヤ含有薄膜の形成とその熱電特性

最終目標である  $\text{Mg}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{O}/\text{ZnO}$  コアシェルナノワイヤ含有薄膜を形成した。その SEM 像（図 10）からコアシェル構造が形成されていることがわかる。また、その熱電特性を図 11 に示す。ゼーベック係数が薄膜のそれと比べて約 1.5 倍ゼーベック係数が増大していることがわかる（ $n \sim 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ）。これは、コアシェルナノワイヤ導入により出力因子を 1.9 倍増大できることを意味している。

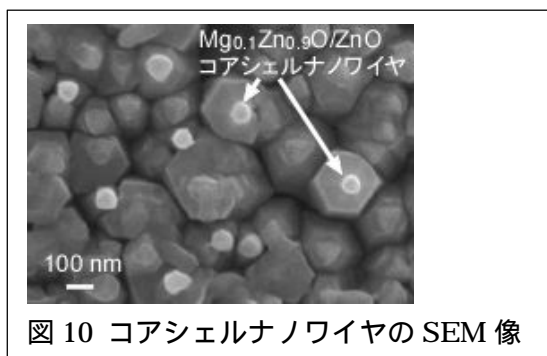


図 10 コアシェルナノワイヤの SEM 像

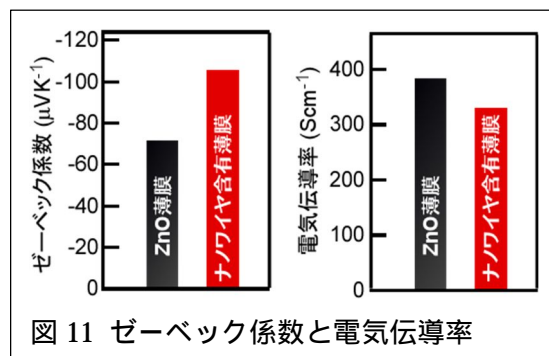


図 11 ゼーベック係数と電気伝導率

この増大メカニズムとして、二次元量子効果に起因したものであるかどうかを明らかにするためには、今後 Mg 含有量、キャリア密度依存性、温度依存性、ワイヤ密度依存性などを詳細に調べる必要があるが、本研究におけるゼーベック係数増大の観測の成功は、本ナノ構造戦略による出力因子増大の可能性を示すインパクトのある結果である。

#### < 引用文献 >

Takafumi Ishibe, Atsuki Tomeda, Yuki Komatsubara, Reona Kitaura, Mutsunori Uenuma, Yukiharu Uraoka, Yuichiro Yamashita, and Yoshiaki Nakamura, "Carrier and phonon transport control by domain engineering for high-performance transparent thin film thermoelectric generator", Applied Physics Letters 118, 151601-1-6 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishibe Takafumi, Uematsu Yuto, Naruse Nobuyasu, Mera Yutaka, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 116
2. 論文標題 Impact of metal silicide nanocrystals on the resistance ratio in resistive switching of epitaxial Fe304 films on Si substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 181601 ~ 181601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5143960	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taniguchi Tatsuhiko, Ishibe Takafumi, Naruse Nobuyasu, Mera Yutaka, Alam Md. Mahfuz, Sawano Kentarou, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 12
2. 論文標題 High Thermoelectric Power Factor Realization in Si-Rich SiGe/Si Superlattices by Super-Controlled Interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 25428 ~ 25434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c04982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mitarai Kosuke, Okuhata Ryo, Chikada Jinichiro, Kaneko Tatsuya, Uematsu Yuto, Komatsubara Yuki, Ishibe Takafumi, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 128
2. 論文標題 An advanced 2 method enabling thermal conductivity measurement for various sample thicknesses: From thin films to bulk materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015102 ~ 015102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishibe Takafumi, Chikada Jinichiro, Terada Tsukasa, Komatsubara Yuki, Kitaura Reona, Yachi Suguru, Yamashita Yudai, Sato Takuma, Suemasu Takashi, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 119
2. 論文標題 Low thermal conductivity of complex thermoelectric barium silicide film epitaxially grown on Si	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 141603 ~ 141603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0063531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishibe Takafumi, Okuhata Ryo, Kaneko Tatsuya, Yoshiya Masato, Nakashima Seisuke, Ishida Akihiro, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Heat transport through propagon-phonon interaction in epitaxial amorphous-crystalline multilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00653-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kitaura Reona, Ishibe Takafumi, Sharma Himanshu, Mizuguchi Masaki, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Nanostructure design for high performance thermoelectric materials based on anomalous Nernst effect using metal/semiconductor multilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075002 ~ 075002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac05db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishibe Takafumi, Tomeda Atsuki, Komatsubara Yuki, Kitaura Reona, Uenuma Mutsunori, Uraoka Yukiharu, Yamashita Yuichiro, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 118
2. 論文標題 Carrier and phonon transport control by domain engineering for high-performance transparent thin film thermoelectric generator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 151601 ~ 151601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0048577	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件(うち招待講演 3件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 南 鼓太郎、小松原 祐樹、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 アモルファスZnSnO薄膜の作製とその熱電特性
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北浦 怜旺奈、石部 貴史、Himanshu Sharma、水口 将輝、中村 芳明
2. 発表標題 半導体/強磁性金属積層構造における横ゼーベック係数増大とその機構
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石部 貴史、吉矢 真人、中嶋 聖介、石田 明広、中村 芳明
2. 発表標題 アモルファス GeS/単結晶 PbTe 界面における熱輸送機構
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧川 将、石部 貴史、大石 佑治、中村 芳明
2. 発表標題 GeTe 熱電材料における Ge, Sn 含有量と熱電特性の関係
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 純也、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 アモルファスSiGe系超格子におけるフォノン輸送物理
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 石垣 信太郎、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 Dirac bandを有するエピタキシャル $\text{-CoSi/Si}$ の作製とその熱電特性
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蘆田 湧一、石部 貴史、成瀬 延康、楊 金峰、中村 芳明
2. 発表標題 VO <sub>2</sub> 構造相転移を駆動するナノスケール歪みの可視化
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北浦 怜旺奈、石部 貴史、 Himanshu Sharma、 水口 将輝、 中村 芳明
2. 発表標題 半導体/強磁性体積層構造における熱伝導率低減と横ゼーベック係数増大の同時実現
3. 学会等名 2021年 第84回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石部貴史、小松原祐樹、上沼睦則、浦岡行治、中村芳明
2. 発表標題 熱電発電応用に向けた透明SnO <sub>2</sub> 薄膜のデバイス特性評価
3. 学会等名 2021年 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山虎之介、石部貴史、中村芳明
2. 発表標題 EDLTを用いたIV族熱電材料における熱電特性操作
3. 学会等名 2021年 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北浦 怜旺奈、石部 貴史、Himanshu Sharma、水口 将輝、中村 芳明
2. 発表標題 半導体/強磁性体積層構造における横ゼーベック係数の増大
3. 学会等名 第45回 日本磁気学会学術講演会 (MSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北浦 怜旺奈、石部 貴史、Himanshu Sharma、水口 将輝、中村 芳明
2. 発表標題 Co/Si積層構造における横ゼーベック係数増大とその機構
3. 学会等名 第18回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石部 貴史、小松原 祐樹、山下 雄一郎、中村 芳明
2. 発表標題 ドメイン制御による透明 SnO <sub>2</sub> 薄膜の熱電性能向上
3. 学会等名 第18回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 純也、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 パリスティック熱伝導観測に向けたアモルファスSiGe系超格子の伝熱特性評価
3. 学会等名 第19回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石垣 信太郎、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 高熱電出力因子化に向けたSi基板上 -CoSi薄膜のエピタキシャル成長とその熱電特性
3. 学会等名 第19回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北浦 怜旺奈、石部 貴史、 Himanshu Sharma、水口 将輝、中村 芳明
2. 発表標題 半導体/強磁性体積層構造における横ゼーベック係数に対する界面効果
3. 学会等名 第19回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石部貴史
2. 発表標題 ナノドット含有Si系薄膜におけるフォノン輸送機構
3. 学会等名 第5回フォノンエンジニアリング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石部貴史、上松悠人、竹中良介、鈴木雄大、佐藤和則、藤田武志、小林英一、中村芳明
2. 発表標題 高熱電出力因子に向けたe-CoSi 薄膜/Si における電子輸送機構
3. 学会等名 2021年 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺田 史、谷口 達彦、石部 貴史、鴻池 健人、真田 篤志、成瀬 延康、目良 裕、中村 芳明
2. 発表標題 極小エピタキシャルGeナノドット含有薄膜における熱伝導機構
3. 学会等名 2021年 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ishibe, Y. Yamashita, and Y. Nakamura
2. 発表標題 Carrier and phonon transport control in oxide thermoelectric film by introducing nanoscale interface
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ishibe and Y. Nakamura
2. 発表標題 Thermoelectric power factor enhancement using ZnO film including nanowires with well-controlled interface
3. 学会等名 PACRIM-232-2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 芳明
2. 発表標題 ナノ構造を用いた熱流制御に基づく熱電変換性能向上の方法論とSiGe材料への応用 ~3物性のトレードオフの関係を最適化する方法論~
3. 学会等名 進展する熱電変換材料技術の最先端と応用展望 セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiaki Nakamura, Takafumi Ishibe
2. 発表標題 Phonon Transport Physics in Well-Controlled Various Nanomaterials
3. 学会等名 2021 Virtual MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石部 貴史
2. 発表標題 界面制御した透明ZnO薄膜における熱電出力因子増大
3. 学会等名 2020年 第81回 応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松原 祐樹
2. 発表標題 界面エネルギー障壁制御による透明ZnO/MgZnO超格子薄膜の出力因子増大
3. 学会等名 第17回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松原 祐樹, 宮戸祐治, 石部 貴史, 中村 芳明
2. 発表標題 熱起電力顕微鏡法により検出したZnO薄膜の微視的熱電物性
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口達彦, 石部貴史, Md. Mahfuz Alam, 澤野 憲太郎, 中村芳明
2. 発表標題 Si-rich SiGe/Si超格子における高熱電出力因子の要因
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松原 祐樹、宮戸 祐治、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 熱起電力顕微鏡の開発
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2019年度第2回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口 達彦、寺田 吏、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 独自エピタキシャルGeナノドット含有SiGe薄膜による低熱伝導率化
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松原 祐樹、宮戸 祐治、石部 貴史、中村 芳明
2. 発表標題 熱起電力顕微鏡の開発とナノコンポジット材料への適用
3. 学会等名 第16回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuhiko Taniguchi, Takafumi Ishibe, Md. Mahfuz Alam, Kentarou Sawano, Nobuyasu Naruse, Yutaka Mera, and Yoshiaki Nakamura
2. 発表標題 Controlling composition for high thermoelectric power factor in Si-rich SiGe/Si superlattices
3. 学会等名 The 38th International Conference on Thermoelectrics and The 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 中村芳明, 坂根駿也	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本工業出版	5. 総ページ数 111
3. 書名 クリーンエネルギー	

1. 著者名 中村芳明	4. 発行年 2021年
2. 出版社 一般社団法人生産技術振興協会	5. 総ページ数 79
3. 書名 生産と技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	石部 貴史  (Ishibe Takafumi)  (50837359)	大阪大学・基礎工学研究科・助教    (14401)	
研究協力者	森 伸也  (Mori Nobuya)  (70239614)	大阪大学・工学研究科・教授    (14401)	
研究協力者	宮戸 祐治  (Miyato Yuji)  (80512780)	龍谷大学・先端理工学部・准教授    (34316)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関