

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01366

研究課題名（和文）IV族混晶バンドエンジニアリングを基軸とした巨大熱電能の制御とデバイス応用

研究課題名（英文）Control of giant thermoelectric properties based on group-IV band engineering and its device applications

研究代表者

黒澤 昌志（Kurosawa, Masashi）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40715439

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：これまでに代表者（黒澤）が中心となり開発してきたIV族混晶（ゲルマニウムスズ）におけるバンドエンジニアリング技術を基軸とし、分担者（片瀬）と共同で見出した低温・巨大熱電能の発現温度を室温化する、そのガイドラインを構築することを目的に研究を推進した。これまでの先行研究では、導電性基板上への合成しか行われておらず、当該材料の電子や熱電物性は必ずしも明らかになっていなかった。そこで、本研究では高抵抗ウエハを結晶成長基板に採用した。その結果、様々なIV族混晶（ゲルマニウムスズ、シリコンスズ、ゲルマニウムシリコンスズ）薄膜の高品質形成ならびに低温熱電物性の解明に結実した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の推進により、IV族混晶半導体薄膜の基礎的な低温熱電物性や電子物性の計測に成功し、半導体/異種材料ヘテロ構造の高品位形成に関する知見も蓄積できた。これらは様々な半導体デバイスへの応用が可能であり、IV族混晶材料の新しい展開を拓く基礎となりうる。加えて、当該材料はシリコン集積回路プロセスとの親和性に優れるIV族元素から構成されており、半導体産業応用の観点からも先進的な研究領域になると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This project aimed to establish a guideline that shifts the temperatures of the giant phonon-drag effect, which appeared at low temperatures around 20 K, to higher temperatures based on the band engineering technology in group-IV alloys (germanium tin). Previous studies have grown the alloy films on conductive substrates; hence, their electronic and thermoelectric properties have not been fully understood. Therefore, this study used high-resistivity wafers as the crystal growth substrates. As a result, the high-quality formation of various group-IV alloys (germanium tin, silicon tin, and germanium silicon tin) thin films and clarification of their low-temperature thermoelectric properties were achieved.

研究分野：半導体工学

キーワード：IV族混晶 半導体 ゲルマニウムスズ シリコンスズ 薄膜 結晶成長 フォノンドラッグ 熱電変換

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

室温付近の未利用廃熱のエネルギーハーベスティングを目指し、BiTe系に代わる新たな熱電変換材料の開発が求められている。材料設計指針となる熱電性能指数 $ZT$ は、 $S^2\sigma T\kappa^{-1}$  ( $S$ :ゼーベック係数,  $\sigma$ :電気伝導率,  $\kappa$ :熱伝導率,  $T$ :絶対温度)で表される。つまり、高い $\sigma$ および $S$ かつ、低い $\kappa$ が求められる。代表者らは新規熱電変換材料としてゲルマニウムスズ( $Ge_{1-x}Sn_x$ )に注目した。その理由は以下の通りである。(1) $Ge_{1-x}Sn_x$ はシリコン(Si)と同じIV族の元素を用いているためSi集積回路プロセスとの親和性に優れる、(2)SiやGeに比べ高いキャリア移動度(即ち、高い $\sigma$ )を有する[1]、(3)Geに比べ低い熱伝導率を有する(理論[2]、実験[3-5])。

$Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の低温物性を計測したのが本申請に至ったきっかけである。従来のモデルでは説明できない巨大なフォノンドラッグ(格子振動が電子を引きずって発電する)効果が100K以下の温度で発現し、そのパワーファクタ( $PF=S^2\sigma$ )は他の熱電変換材料を凌駕すること(BiTe系の約1万倍@20K)が予備実験で判明した。高温でもフォノンドラッグを発現させるには、フォノン同士の散乱を抑えること(つまりデバイ温度が高いこと)が望ましい[6]。したがって、 $Ge_{1-x}Sn_x$ よりデバイ温度の高いSi等を添加すれば、より高温でのフォノンドラッグ効果発現が期待できる。このような多大なアドバンテージが期待されているが、 $Ge_{1-x}Sn_x$ に関わらずIV族混晶のフォノンドラッグに関する報告は皆無であり、その詳細は全く明らかにされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、様々なIV族混晶薄膜の基礎的な低温熱電物性を実験的に明らかにすることである。これまでの先行研究では、導電性基板上への合成しか行われておらず、当該材料の電子物性についても必ずしも明らかになっていない。低温物性評価で明らかとなる知見を結晶成長にフィードバックし、フォノンドラッグ熱電能の出現可能性を探求した。とりわけ、超高品質IV族混晶薄膜の形成(結晶成長技術の先鋭化)、室温・巨大フォノンドラッグ熱電能に向けたガイドラインの構築の2点に注力し、研究を推進した。

## 3. 研究の方法

薄膜試料作製には、分子線エピタキシー法あるいはスパッタリング法を用いた。IV族混晶( $Ge_{1-x}Sn_x$ ,  $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ ,  $Si_{1-x}Sn_x$ )薄膜自身の熱電物性を評価するため、下地には高抵抗基板(FZ-Si(001)、半絶縁性GaAs(001)またはInP(001))を用いた。これらの基板を化学清浄後、これらIV族混晶薄膜をエピタキシャル成長した。試料を10mm角のチップ状にカット後、熱起電力・電気伝導率同時計測システムにより熱電物性評価を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 高抵抗基板上 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の形成および低温熱電物性の解明

薄膜試料作製には、分子線エピタキシー法を用いた。 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜自身の熱電物性を評価するため、下地には高抵抗基板(半絶縁性GaAs(001)またはInP(001))を用いた。これらの基板を表面清浄化後、 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜( $Sn$ 組成:4.3~25%,ドーパント:GaまたはSb)をエピタキシャル成長した。室温以下に冷却してゼーベック係数 $S$ を測定したところ、 $Sn$ 組成が5%より低い試料においてフォノンドラッグ起因と思われるピークが15K付近に観測された(図1)。薄膜の高品質化によりフォノンドラッグ効果を増強できることも判明した。最終的には、巨大なパワーファクタ(単位長さに温度差1Kを印加した際の発電量、 $\sim 10^3 \mu W cm^{-1} K^{-2}$ @20K)がSbドープ $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜(n型半導体)で得られることを見出した。Gaドープの薄膜試料(p型半導体)でも同様のフォノンドラッグ効果が観測された。

### (2) 高抵抗基板上 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜の形成および低温熱電物性の解明

分子線エピタキシー法を用い、半絶縁性GaAs(001)基板上に $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜(膜厚:50nm,ドーパント:Sb)をエピタキシャル成長した。なお、設計組成は、GaAs基板と格子整合条件( $x/y\sim 3.7$ )に設定している。Hall電子濃度が $9\times 10^{18}\sim 1\times 10^{20} cm^{-3}$ の $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜を選別し、ゼーベック係数 $S$ を様々な温度にて計測した。一例として、Hall電子濃度が $2\times 10^{19} cm^{-3}$ の試料の測定結果を図2(左)に示す。 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜においても、フォノンドラ

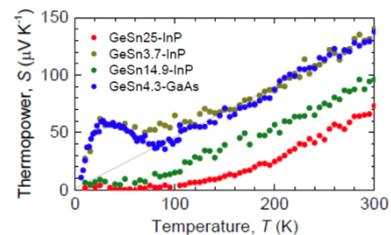


図1  $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜( $Sn$ 組成:4.3%~25%)のゼーベック係数の温度依存性。

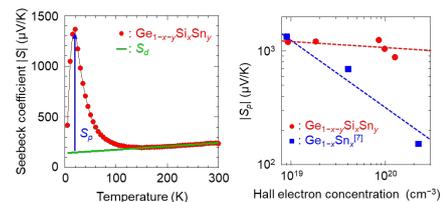


図2 (左) $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜のゼーベック係数の温度依存性。(右)ゼーベック係数のフォノンドラッグ成分 $|S_p|$ のキャリア濃度依存性。

ック起因と考えられる巨大な $|S|$ のピークが20 K付近に出現した。興味深いことに、GaAs基板上 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜で得られた $|S|$ のピーク位置(～20 K)とほぼ一致していた。次に、ゼーベック係数の拡散成分 $|S_d|$ を見積もり、 $|S|$ との差からフォノンドラッグ成分 $|S_p|$ を抽出した。Hall電子濃度の関数としてまとめた結果を図2(右)に示す。 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜ではHall電子濃度が増大するにつれて $|S_p|$ が減少している一方、 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜では電子濃度が増大しても $|S_p|$ が高い値を維持していた。その結果、 $Ge_{1-x}Sn_x$ のパワーファクタより2倍程度大きな値( $2.3 \times 10^3 \mu W/cmK^2$ )が $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ で得られた。

### (3) 高抵抗基板上 $Si_{1-x}Sn_x$ 薄膜の形成および低温熱電物性の解明

Si中のSn固溶限は0.1%と非常に低く、結晶成長過程にSnが析出しやすい課題があった。リスクヘッジとして2つの結晶成長法(分子線エピタキシー法、スパッタリング法)を試みた。成膜レートの高速化によりSn析出をある程度抑制できることを見出した。特に、格子マッチング系(SiGeバッファ上の $Si_{1-x}Sn_x$ )においては、Sn析出せずに結晶成長が進行した結果、設計通りのSn導入(10%)を達成した[7]。

イオン注入を用いたn型ドーピングも行い、Hall電子濃度を $10 \times 10^{18} \sim 10 \times 10^{20} cm^{-3}$ の間で制御することにも成功した。Hall電子濃度が $10^{19} cm^{-3}$ 程度の $Si_{1-x}Sn_x$ 薄膜を選別し、ゼーベック係数測定( $T = 5 \sim 300 K$ )を行った(図3)。図中には比較のために、電子濃度が同程度のSiバルク単結晶[8]および $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の結果も示している。これまでの報告では、高濃度にドーピングされたSiバルク単結晶では、 $|S|$ が温度の減少と共に単調減少している。一方、 $Si_{1-x}Sn_x$ 薄膜では、フォノンドラッグ起因と考えられる巨大な $|S|$ のピークが25 K付近に得られ、その裾野は300 Kにまで及ぶ。また、興味深いことに、 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜で得られた $|S|$ のピーク位置と比較し、約10 K室温側にシフトしている。これは、 $Si_{1-x}Sn_x$ 薄膜あるいは下地に用いたSi基板がより高いデバイ温度を有することを反映しているためだと考えられる。

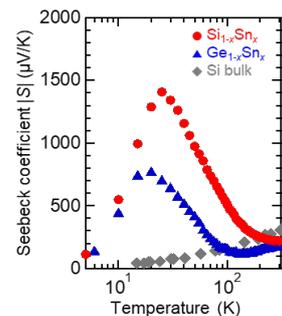


図3  $Si_{1-x}Sn_x$  薄膜、 $Ge_{1-x}Sn_x$  薄膜およびSi薄膜のゼーベック係数の温度依存性。

### (4) 高抵抗Si基板上への $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の固相エピタキシャル成長

電子物性と同様、熱電物性も歪み依存性を有する可能性があるが、実験的検証には様々な歪み率の単結晶薄膜を高抵抗基板上に形成する必要がある。物理蒸着法では、高品位形成のために $Ge_{1-x}Sn_x$ に近い格子定数の基板(例えば、GeやGaAs)を用いることが多く、面内圧縮歪みの薄膜が形成されやすい。そこで、本項目では固相エピタキシャル成長法を用い、伸長歪み印加の可能性を探究した。Si基板と非晶質 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の間にシード層を挿入することで、本手法の課題であった多結晶化の抑制およびエピタキシャル成長の促進を実現した(図4)。熱処理時の温度および試料冷却速度とともに伸長歪みが增大する傾向が見られたことから、Si基板と $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜との熱膨張

係数差に起因するものと示唆される。今後、ドーピングも行い、(1)で述べたGaAs基板上 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の結果も交え、フォノンドラッグに与える効果を明らかにすることが望まれる。

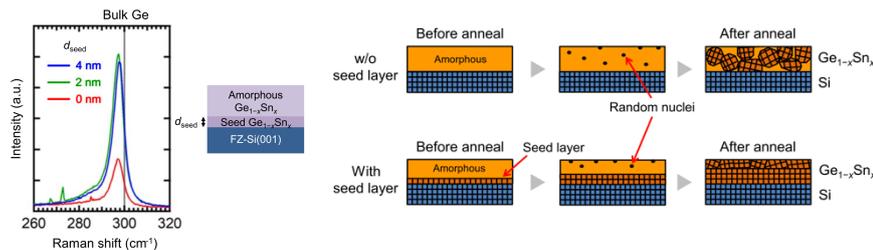


図4  $Ge_{1-x}Sn_x$  薄膜の固相エピタキシャル成長：(左)シード層挿入効果、(右)結晶成長モデル[8]。

### <引用文献>

- [1] 理論予測として例えば：K. L. Low et al., J. Appl. Phys. **112**, 103715 (2012).
- [2] S. N. Khatami and Z. Aksamija, Appl. Phys. Rev. **6**, 014015 (2016).
- [3] N. Uchida et al., Appl. Phys. Lett. **107**, 232105 (2015).
- [4] D. Spirito et al., ACS Appl. Energy Mater. **4**, 7385 (2021).
- [5] M. Kurosawa, and O. Nakatsuka, ECS Trans. **104**, 183 (2021).
- [6] C. Herring, Phys. Rev. **96**, 1163 (1954).
- [7] K. Fujimoto et al., Appl. Phys. Express **16**, 045501 (2023).
- [8] T. H. Geballe et al., Phys. Rev. **98**, 940 (1955).
- [9] T. Hiraide et al., Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 045505 (2024).

## 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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujimoto Kazuaki, Kurosawa Masashi, Shibayama Shigehisa, Sakashita Mitsuo, Nakatsuka Osamu	4. 巻 16
2. 論文標題 Lattice-matched growth of high-Sn-content ( $x=0.1$ ) $\text{Si}_1\text{-xSn}_x$ layers on $\text{Si}_1\text{-yGe}_y$ buffers using molecular beam epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045501 ~ 045501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acc3da	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 Mahfuz Md Mehdee Hasan, Katayama Kazuaki, Ito Yoshitsune, Fujimoto Kazuaki, Tomita Motohiro, Kurosawa Masashi, Matsuki Takeo, Watanabe Takanobu	4. 巻 62
2. 論文標題 Superior power generation capacity of GeSn over Si demonstrated in cavity-free thermoelectric device architecture	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1058 ~ SC1058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acaed1	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 Sahara Keita, Yokogawa Ryo, Shibayama Yuki, Hibino Yusuke, Kurosawa Masashi, Ogura Atsushi	4. 巻 109
2. 論文標題 Investigation of Band Structure in Strained Single Crystalline $\text{Si}_1\text{-xSn}_x$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 359 ~ 366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10904.0359ecst	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 Kurosawa Masashi, Nakata Masaya, Zhan Tianzhuo, Tomita Motohiro, Watanabe Takanobu, Nakatsuka Osamu	4. 巻 61
2. 論文標題 Sn-incorporation effect on thermoelectric properties of Sb-doped Ge-rich $\text{Ge}_{1-x}\text{ySixSny}$ epitaxial layers grown on GaAs(001)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085502 ~ 085502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac7bc7	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 Lai Huajun, Peng Ying, Gao Jie, Song Haili, Kurosawa Masashi, Nakatsuka Osamu, Takeuchi Tsunehiro, Miao Lei	4. 巻 119
2. 論文標題 Reinforcement of power factor in N-type multiphase thin film of Si <sub>1-x</sub> yGexSny by mitigating the opposing behavior of Seebeck coefficient and electrical conductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 113903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0062339	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 該当する

1. 著者名 Kurosawa Masashi, Nakatsuka Osamu	4. 巻 104
2. 論文標題 (Invited) Thermoelectric Properties of Tin-Incorporated Group-IV Thin Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 183 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10404.0183ecst	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 Peng Ying, Miao Lei, Liu Chengyan, Song Haili, Kurosawa Masashi, Nakatsuka Osamu, Back Song Yi, Rhyee Jong Soo, Murata Masayuki, Tanemura Sakae, Baba Takahiro, Baba Tetsuya, Ishizaki Takahiro, Mori Takao	4. 巻 12
2. 論文標題 Constructed Ge Quantum Dots and Sn Precipitate SiGeSn Hybrid Film with High Thermoelectric Performance at Low Temperature Region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 2103191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.202103191	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 該当する

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 今井志明, 中田壮哉, 木村公俊, 片瀬貴義, 神谷利夫, 柴山茂久, 坂下満男, 中塚理, 黒澤昌志
2. 発表標題 半絶縁性基板上Ge <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> 薄膜の低温熱電物性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大岩樹, 柴山茂久, 坂下満男, 中塚理, 片瀬貴義, 黒澤昌志
2. 発表標題 高濃度n型ドーブSi1-xSnx薄膜で観測された巨大熱電能
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平出達磨, 大岩樹, 柴山茂久, 坂下満男, 中塚理, 黒澤昌志
2. 発表標題 固相成長法による Si (001)基板上の伸長歪み Ge1-xSnx薄膜の形成
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Kurosawa, S. Shibayama, M. Sakashita, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Potential of Silicon-Germanium-Tin Thin Films for Future Thermoelectric Device Applications
3. 学会等名 ISPlasma2023/IC-PLANTS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. M. H. Mahfuz, M. Tomita, M. Kurosawa, T. Matsuki, and T. Watanabe
2. 発表標題 Investigating the superiority of the cavity-free architectural GeSn and Si wires-based thermoelectric generators
3. 学会等名 第28回 電子デバイス界面テクノロジー研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. M. H. Mahfuz, M. Tomita, M. Kurosawa, T. Matsuki, and T. Watanabe
2. 発表標題 Determination superiority of the cavity-free thermoelectric generators consisting of GeSn and Si wires
3. 学会等名 Integrated Nanocomposites for Thermal and Kinetic Energy Harvesting (INTAKE) Seminar 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒澤昌志
2. 発表標題 14 族半導体ナノシートの結晶成長とデバイス応用
3. 学会等名 2022年度 東海NFRW・若手チャプタージョイントワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sahara, R. Yokogawa, Y. Shibayama, Y. Hibino, M. Kurosawa, and A. Ogura
2. 発表標題 Investigation of Band Structure in Strained Single Crystalline Si <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub>
3. 学会等名 242nd ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Fujimoto, S. Shibayama, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Molecular beam epitaxy of Si <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> layers with 10%-Sn content on Si <sub>1-y</sub> Ge <sub>y</sub> buffers
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2022 (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Oiwa, S. Shibayama, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Study on doping by ion implantation to Si <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> epitaxial layers
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2022 (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. M. H. Mahfuz, K. Katayama, Y. Ito, K. Fujimoto, M. Tomita, M. Kurosawa, T. Matsuki, and T. Watanabe
2. 発表標題 Experimental Demonstration of The Cavity-Free GeSn and Si Wire Thermoelectric Generators
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2022 (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊孝信, 富田基裕, ハサン マフス, 黒澤昌志, 松木武雄, シルビア チュン, 王 海東
2. 発表標題 シリコン系マイクロ熱電発電デバイスの開発
3. 学会等名 M&M2022 材料力学カンファレンス (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐原敬太, 横川凌, 柴山裕貴, 日比野祐介, 黒澤昌志, 小椋厚志
2. 発表標題 単結晶歪Si <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> のバンド構造評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Watanabe, M. Tomita, M. M. H. Mahfuz, M. Kurosawa, and T. Matsuki
2. 発表標題 Silicon Thermoelectric Energy Harvester Compatible with CMOS Technology
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kurosawa and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Group-IV materials grown on insulator for advanced thin-film thermoelectric applications
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2021 (SSDM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kurosawa and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Thermoelectric properties of tin-incorporated group-IV thin films
3. 学会等名 240th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Katayama, M. M. H. Mahfuz, M. Nakata, Y. Ito, K. Fujimoto, M. Tomita, M. Kurosawa, T. Matsuki, and T. Watanabe
2. 発表標題 Demonstration of Cavity-free GeSn Thermoelectric Generator
3. 学会等名 2021 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices: Science and Technology (2021 IWDTF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本一彰, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 GaAs基板上におけるSi <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> 薄膜の結晶成長
3. 学会等名 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 M. M. H. Mahfuz, K. Katayama, Y. Ito, K. Fujimoto, M. Tomita, M. Kurosawa, T. Matsuki, and T. Watanabe
2. 発表標題 Comparative Thermoelectric Performance Demonstration Between Cavity-free GeSn and Si Thermoelectric Generators
3. 学会等名 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 藤本一彰, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> バッファ上におけるSi <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> 薄膜の結晶成長
3. 学会等名 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 大岩樹, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 固相エピタキシャル成長法によるPドーブSi <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> 薄膜の形成
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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 分担 者	片瀬 貴義  (Katase Takayoshi)  (90648388)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	

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
---------	---------