

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14796

研究課題名（和文）GeSn/Ge縦型ヘテロ接合ナノワイヤの実現と次世代トランジスタへの応用

研究課題名（英文）Realize of GeSn/Ge vertical nanowire and its application to next generation transistor

研究代表者

松村 亮（MATSUMURA, Ryo）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・研究員

研究者番号：90806358

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：次世代エレクトロニクス実現のため、Ge系薄膜やヘテロ構造成長とデバイス応用への周辺技術開発を行った。Ge系ヘテロ接合のボトムアップ成長を実現するとともに、非熱平衡高速CWレーザーアニール法を開発し、高伸張歪のGe系薄膜を実現した。フォトルミネッセンス法や光吸収測定でバンド構造解析を行い、発光効率増大とバンドギャップ変調を実証した。また、デバイス技術として、急峻な縦型p/n接合を実現するとともに、高品質なAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ゲートスタックを原子層堆積法を用いて実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、次世代エレクトロニクスに必要な高性能トランジスタ等の電子デバイスの基盤材料を開発することを目的に研究を行った。実現した材料は、良好な電子特性のみならず、良好な光学特性も有することが明らかになったため、電子デバイスだけでなく、光学デバイスにも応用可能と期待できる。GeはSiと同じIV族材料であり、従来のSi-LSI技術との整合性も高く、光学材料を組み込んだ光電融合LSIへの応用も可能となることから、幅広い応用範囲に波及する意義ある研究成果である。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve the next generation of electronics, peripheral technology development for Ge-based thin film and heterostructure growth and device application was conducted. Bottom-up growth of Ge-based heterojunctions was achieved, along with the development of a non-equilibrium high-speed CW laser annealing method, which enabled the realization of Ge-based thin films with high crystal quality and strain. Band structure analysis was carried out using photoluminescence and optical absorption measurements, and an increase in luminescence efficiency and modulation of the bandgap were demonstrated.

Furthermore, in terms of device technology, a steep vertical p/n junction was realized, and a high-quality Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate stack was achieved using atomic layer deposition.

研究分野：電気電子材料

キーワード：結晶成長 電子デバイス 光学デバイス

1. 研究開始当初の背景

シリコン(Si)基板上の大規模集積回路(LSI)はこれまで、電界効果トランジスタ(MOSFET)の微細化(スケーリング則)を指導原理として高集積化と高性能化を実現してきた。しかし、プロセス技術ノードが 10 nm を切るまで微細化が進んだ昨今、MOSFET の高集積化や短チャネル化による消費電力の増大は無視できなくなり、スケーリング則は限界を迎えつつある[図1]。また、MOSFET 自体の問題のみならず、高集積化に伴う LSI 内での金属配線の寄生容量や電気抵抗の増大は、発熱や動作クロックの制限等、大きな問題をもたらしている。そのため新材料や新構造を用いた、スケーリング則に代わる新たなアプローチが求められてきた。LSI の持続的な性能向上を実現するため、Si に比べて高い移動度を持つ新材料を演算素子として LSI 上に搭載するというアプローチが注目されている。 [図2]

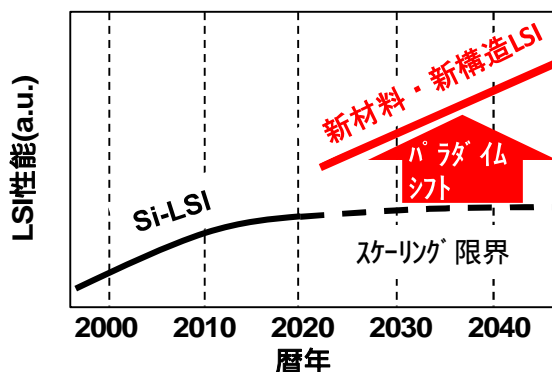


図1. Si-LSIのスケーリング限界

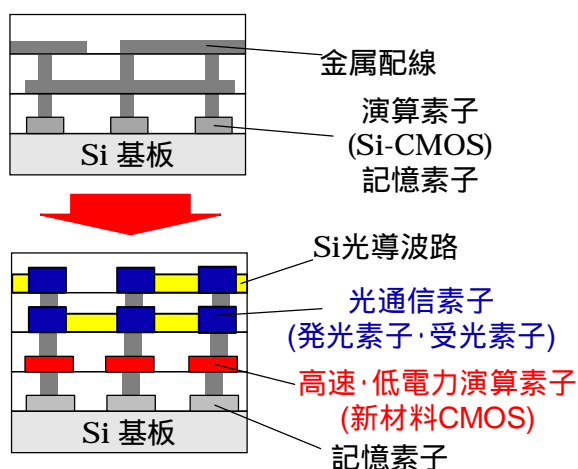


図2. 従来型Si-LSIと次世代三次元混載LSI

2. 研究の目的

ゲルマニウム(Ge)中にスズ(Sn)を導入したゲルマニウム・スズ混晶(GeSn)半導体は、次世代半導体材料として非常に有望視されている。Ge は Si の約 3 倍のキャリア移動度を持つが、結晶の格子置換位置に Sn(> 6%)を導入して GeSn 化すると、伝導体のバンドミニマムが点に移動すると理論予測されている。その結果、バンド構造が直接遷移化し、良好な光特性を示すのみならず、キャリアの有効質量が大幅に低減し、キャリア移動度がさらに 10 倍以上上昇するため、光通信デバイスや高速トランジスタ等、次世代デバイスへの応用が期待されている。すなわち、このような特性を有する GeSn 結晶を高品位形成することができれば、次世代三次元 LSI 実現に直結する重要な基盤技術になると言える。以上のことから申請者は、GeSn 結晶の高品質形成、GeSn/Ge 接合のボトムアップ成長による実現、およびその縦型ナノワイヤ応用へ向けた周辺技術の確立を目的として研究を開始した。

3. 研究の方法

GeSn 結晶の実現には大きな問題として、Sn の Ge 結晶中への導入が非常に難しい点が挙げられる。これは Sn の熱平衡固溶度が Ge 中だと 1%程度であることに起因し、実際に申請者が以前実現した液相成長法による GeSn 薄膜の結晶成長では、殆どの Sn が結晶外に析

出してしまうという結果が得られている[Appl. Phys. Lett.,101,9,091905 (2012)]. [図 3]そのため、高濃度かつ高品質な GeSn 結晶の実現のためには、熱的に非平衡なアプローチが求められる。申請者はその方法として、高速レーザーアニール法を開発した。これは高速に回転するステージ上に試料を設置し、20 $\mu\text{m}$  に絞ったレーザー光を照射することで試料の短時間( $\sim 1\ \mu\text{s}$ )熱処理を可能にするものである[図 4]。これにより、熱平衡状態を打破した非熱平衡な結晶成長が可能となり、熱平衡固溶度を大きく超える組成の Ge 系薄膜の結晶成長が実現する。本研究では、この高速 CW レーザーアニールを軸とし、VLS 法や分子線堆積法、in-situ ドーピングなどを組み合わせることで、目的とする薄膜結晶や接合の実現を目指した。

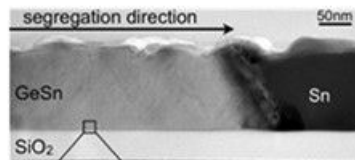


図3. (申請者による先行研究)  
GeSn<sub>1-x</sub>液相成長によるSn(偏析)

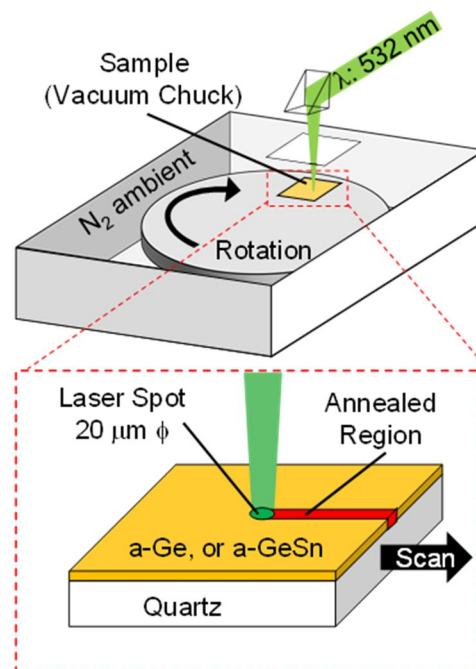


図 4. 高速 CW レーザーアニール装置の概要と試料構造

#### 4. 研究成果

##### 1. 高速 CW レーザーアニール法による高濃度 GeSn 薄膜の実現

レーザーアニール後の試料表面の顕微鏡像を図5に示す。レーザー照射した領域(LA region)においてコントラストの変化が見られることから、薄膜の改質が示唆される。顕微ラマン分光法により薄膜を評価したところ、レーザー照射した領域でのみ Ge-Ge 結合に起因するラマンピークが観測されたことから、高速レーザーアニール法により GeSn 薄膜の結晶化に成功したことがわかる。

一方、実現した GeSn 膜中の Sn 濃度はレーザー照射条件に強く依存することも明らかとなった。レーザーの照射時間とレーザーエネルギーを最適化することで、熱平衡固溶度を大きく超える Sn 濃度を有する GeSn 薄膜結晶の実現に成功した。

また、同様の手法を Ge 中の不純物の高活性化や、それに伴う PL 発行の増大などへも応用することにも成功しており、申請者の開発した高速 CW レーザーアニール法が様々な Ge 系薄膜結晶成長において有用であることが示された。

これらの成果は ECS Journal of Solid State Science and Technology 誌を始めとする複数の論文として発表することができた。

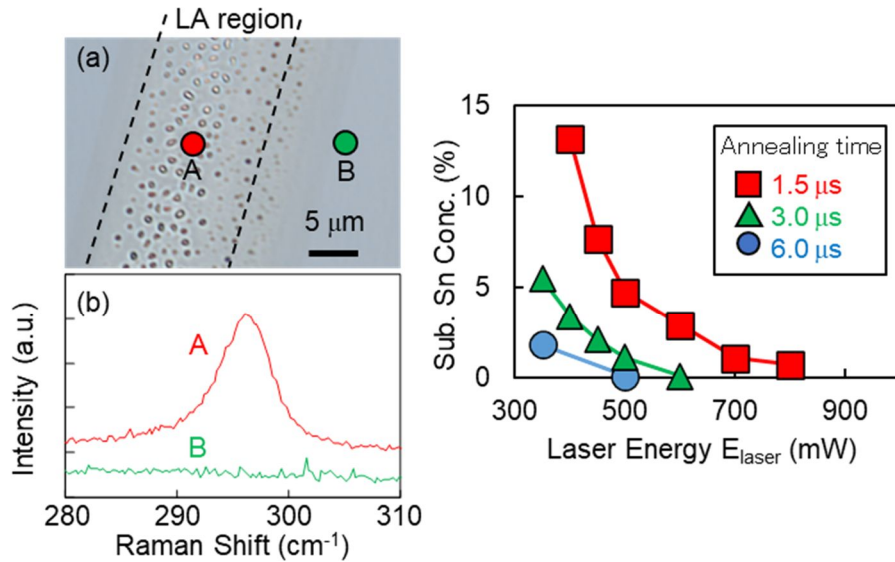


図5 GeSn薄膜の結晶化とLA条件最適化によるSn濃度の向上

## 2. MBE 法による GeSn/Ge 接合や n-p 接合の実現

分子線堆積法 (MBE 法) により、Ge 基板上での GeSn 結晶や非常に高濃度な n 型ドーパントを有する n-Ge 結晶のエピタキシャル成長を行った。その結果、非常に急峻な GeSn/Ge の縦型接合や縦型 n-p 接合の実現に成功した。また PL 測定や XRD 測定をおこなうことで、Sn や n 型ドーパント等の活性化を評価したところ、非常に高い活性化率を有する事も示すことができた。これらの結果はトランジスタのソース・ドレイン接合に応用できるのみならず、次世代発光材料としても応用が利く、非常に汎用性の高い技術である。

これらの成果は、ACS Crystal Growth and Design 誌を始めとする複数の論文誌にまとめ、発表することができた。

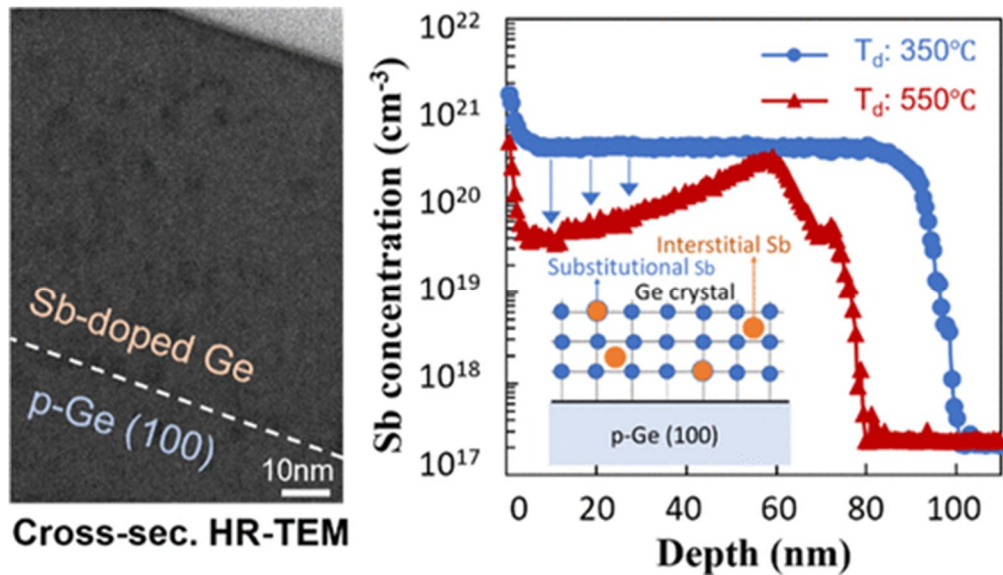


図6. 実現した高品質な Ge の縦型 n-p 接合の断面 TEM 像と SIMS 測定結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|                                                                                                                                                                                        |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                                                                  | 4. 巻<br>14                |
| 2. 論文標題<br>Direct Detection of Free H <sub>2</sub> Outgassing in Blisters Formed in Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Atomic Layers Deposited on Si and Methods of Its Prevention         | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Materials and Interfaces                                                                                                                                         | 6. 最初と最後の頁<br>1472 ~ 1477 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1021/acsami.1c20660                                                                                                                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Saputro Rahmat Hadi, Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                                             | 4. 巻<br>108               |
| 2. 論文標題<br>Crystallization Of Tensile Strained n-Type Ge By Continuous Wave Laser Annealing                                                                                            | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions                                                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>79 ~ 82     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1149/10805.0079ecst                                                                                                                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                                                                  | 4. 巻<br>108               |
| 2. 論文標題<br>Formation of Free Hydrogen Gas By Annealing ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Si Stacked Structure                                                                        | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions                                                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>57 ~ 61     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1149/10805.0057ecst                                                                                                                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Zhang Qinqiang, Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                                                  | 4. 巻<br>6                 |
| 2. 論文標題<br>Synthesis of Large-Area GeS Thin Films with the Assistance of Pre-deposited Amorphous Nanostructured GeS Films: Implications for Electronic and Optoelectronic Applications | 5. 発行年<br>2023年           |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Nano Materials                                                                                                                                                   | 6. 最初と最後の頁<br>6920-6928   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1021/acsanm.3c00669                                                                                                                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                                                                                                                                    |                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Saputro Rahmat Hadi、Maeda Tatsuro、Matsumura Ryo、Fukata Naoki                                                                             | 4. 巻<br>162                   |
| 2. 論文標題<br>Highly strained and heavily doped germanium thin films by non-equilibrium high-speed CW laser annealing for optoelectronic applications | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Materials Science in Semiconductor Processing                                                                                            | 6. 最初と最後の頁<br>107516 ~ 107516 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.mssp.2023.107516                                                                                             | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|                                                                                        |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Saputro Rahmat Hadi、Matsumura Ryo、Fukata Naoki                               | 4. 巻<br>21                |
| 2. 論文標題<br>Dopant Redistribution in High-Temperature-Grown Sb-Doped Ge Epitaxial Films | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Crystal Growth and Design                                                    | 6. 最初と最後の頁<br>6523 ~ 6528 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acs.cgd.1c00966                                    | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                                                                                                                                                    |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo、Ishii Satoshi、Fukata Naoki                                                                                                                 | 4. 巻<br>134                   |
| 2. 論文標題<br>Growth of SiGe thin films with uniform and non-uniform Si concentration profiles on insulating substrates by high-speed continuous wave laser annealing | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Materials Science in Semiconductor Processing                                                                                                            | 6. 最初と最後の頁<br>106024 ~ 106024 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.mssp.2021.106024                                                                                                             | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|                                                                                                      |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Saputro Rahmat Hadi、Matsumura Ryo、Fukata Naoki                                             | 4. 巻<br>102             |
| 2. 論文標題<br>Epitaxial Growth of Highly Sb-Doped Ge on p-Ge (100) for Vertical Transistor Applications | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions                                                                           | 6. 最初と最後の頁<br>147 ~ 150 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/10202.0147ecst                                                   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|                                                                                                             |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                       | 4. 巻<br>102             |
| 2. 論文標題<br>Growth of High Sn Concentration Germanium-Tin Films on Insulators by Microsecond Laser Annealing | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions                                                                                  | 6. 最初と最後の頁<br>141 ~ 146 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/10202.0141ecst                                                          | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|                                                                                                                                                                        |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                                                  | 4. 巻<br>9                     |
| 2. 論文標題<br>Growth of Tensile Strained Poly Germanium Thin Film on Glass Substrates by High Speed Continuous Wave Laser Annealing, and its Application to Germanium-Tin | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>ECS Journal of Solid State Science and Technology                                                                                                            | 6. 最初と最後の頁<br>063002 ~ 063002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/2162-8777/aba4f1                                                                                                                   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|                                                                                                                                        |                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumura Ryo, Fukata Naoki                                                                                                  | 4. 巻<br>288                   |
| 2. 論文標題<br>Self-organized 1 0 0 direction growth of germanium film on insulator obtained by high speed continuous wave laser annealing | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Materials Letters                                                                                                            | 6. 最初と最後の頁<br>129328 ~ 129328 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.matlet.2021.129328                                                                               | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|                                                       |                     |
|-------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名<br>松村 亮, 深田 直樹                                 | 4. 巻<br>-           |
| 2. 論文標題<br>高速CWレーザーアニール法を用いたGeおよびGeSn材料の結晶成長          | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>電子デバイス界面テクノロジー研究会材料・プロセス・デバイス特性の物理プロシーディング集 | 6. 最初と最後の頁<br>63-66 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                        | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|                                                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名<br>ラハマト ハディ サプトロ, 松村 亮, 深田 直樹                  | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>Sb 添加Ge 縦型pn ダイオードの電気特性に及ぼす基板加熱堆積の効果       | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>電子デバイス界面テクノロジー研究会材料・プロセス・デバイス特性の物理プロシーディング集 | 6. 最初と最後の頁<br>133-136 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                        | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

|                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>R Hadi Saputro, Ryo Matsumura, Naoki Fukata                                 |
| 2. 発表標題<br>Realization of Highly-Strained n-type Ge-on-Insulator by CW Laser Annealing |
| 3. 学会等名<br>SSDM (国際学会)                                                                 |
| 4. 発表年<br>2022年                                                                        |

|                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>R Hadi Saputro, Ryo Matsumura, Naoki Fukata                                  |
| 2. 発表標題<br>Optical properties of highly strained n-Ge films grown by CW laser annealing |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会                                                                       |
| 4. 発表年<br>2022年                                                                         |

|                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>MATSUMURA, Ryo, FUKATA, Naoki                                                                    |
| 2. 発表標題<br>Growth of high Sn concentration Germanium-tin films on insulators by microsecond laser annealing |
| 3. 学会等名<br>239th ECS Meeting (国際学会)                                                                         |
| 4. 発表年<br>2021年                                                                                             |



|                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Saputro Rahmat Hadi, MATSUMURA, Ryo, FUKATA, Naoki                                     |
| 2. 発表標題<br>Epitaxial Growth of Highly Sb-Doped Ge on p-Ge (100) for Vertical Transistor Formation |
| 3. 学会等名<br>239th ECS Meeting (国際学会)                                                               |
| 4. 発表年<br>2021年                                                                                   |

|                                                          |
|----------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>松村 亮, 深田 直樹                                   |
| 2. 発表標題<br>高速CWレーザーアニール法を用いたGeおよびGeSn材料の結晶成長             |
| 3. 学会等名<br>電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 (第26回研究会) |
| 4. 発表年<br>2021年                                          |

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>サブトロ ラハマト ハディ, 松村 亮, 深田 直樹              |
| 2. 発表標題<br>Sb添加Ge縦型pnダイオードの電気特性に及ぼす基板加熱堆積の効果       |
| 3. 学会等名<br>第26回電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 |
| 4. 発表年<br>2021年                                    |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|                           |                       |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|