

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：21H01809

研究課題名（和文）非平衡系 族混晶薄膜の規則／不規則構造制御に基づくバンドデザイン

研究課題名（英文）Energy band design based on controlling ordered/disordered structure of non-thermal equilibrium group-IV alloy thin films

研究代表者

中塚 理（Nakatsuka, Osamu）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20334998

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、我々が有するSn系IV族混晶成長技術をさらに発展させて、一般的な熱平衡状態では存在し得ない非平衡的な新奇超高Sn組成IV族混晶薄膜を創製し、その電子物性の解明・制御に基づいて、新世代固体素子発展に資する工学基盤の構築を目指した。InPやGaSbなどの大格子定数基板の活用によってSn組成25～50%、膜厚10～100 nmのGeSnエピタキシャル層の形成を実証できた。また、フォトルミネッセンス法によりGeSn/GeSiSn積層構造や多積層GeSnナノドット/SiO₂構造などの光電変換特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、自然界には存在しない平衡固溶限界を数十倍超えて、デバイス応用にも期待できる実効的な膜厚を有する超高Sn組成IV族混晶の創製が達成された。この新奇のIV族混晶は特異なエネルギーバンド構造、電子・光電・熱電物性を有する可能性があり、またもし閃亜鉛鉱型のような規則系の結晶構造が優先的に形成される場合は、擬平衡的な安定性も有している可能性がある。今後、これらの特性がさらに解明されれば、新世代の半導体集積エレクトロニクスにも貢献する波及的応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed the growth technology of Sn-based group-IV alloy thin films to create novel non-thermal-equilibrium ultra-high Sn-content group-IV alloys that cannot exist in natural thermal equilibrium conditions. We have demonstrated the formation of ultra high-Sn-content GeSn epitaxial layers with Sn contents of 25-50% and a thicknesses of 10-100 nm using InP and GaSb substrates those have lattice constants larger than Ge. In addition, photoluminescence measurements revealed the photoelectric conversion properties of GeSn/GeSiSn stacked structures and multilayered GeSn nanodots/SiO₂ structures.

研究分野：半導体工学

キーワード： 族半導体 エピタキシャル成長 エネルギーバンド 界面 ゲルマニウム錫 結晶成長 薄膜

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

研究開始当初、ゲルマニウム錫 ($\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$) やシリコンゲルマニウム錫 ($\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{Sn}_y$) などの IV 族系混晶材料は、直接遷移化・エネルギーバンドギャップ狭小化・高キャリア移動度・低結晶成長温度などの特長から、活発な研究が進められていた。Sn を含む IV 族混晶は本来、共晶系材料であり、二元系熱平衡状態においては Ge や Si の母相中に、それぞれ 1%あるいは 0.1%の極微量しか固溶しない。一方で、我々や他の研究から、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ を薄膜化・ナノ構造化し、非平衡的な状態を維持できる低温成長を行うことで、平衡固溶限界を超えて数%から 10%程度までの Sn 高組成化混晶の形成が可能であることが見出されていた。このような Sn 系 IV 族混晶半導体は次世代の電子・光電・熱電デバイス材料として大きな期待を受けている。近年、研究代表者らは、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ や $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ 混晶に対して、その結晶成長の基材となる基板格子定数や薄膜中のひずみエネルギーの制御によって、従来の固溶限界を数十倍から数百倍超える 27~46%の過大な Sn 組成を持つ $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ あるいは $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ 混晶の形成を実証していた。

2. 研究の目的

本研究では、我々が有する Sn 系 IV 族混晶成長技術をさらに発展させて、一般的な熱平衡状態では存在し得ない非平衡的な規則系あるいは不規則系の新奇超高 Sn 組成 IV 族混晶薄膜を創製し、その電子物性の解明・制御に基づいて、新世代固体素子発展に資する工学基盤の構築を目指した。Sn 組成が熱平衡固溶限界の数十倍の 25%を超えて 50%にまで達する超高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 薄膜などの創製、およびその結晶・電子物性を解明し、次世代ナノエレクトロニクスの発展に資する、新奇 IV 族混晶半導体薄膜の物質科学の深耕を図った。

3. 研究の方法

分子線エピタキシー (MBE) 法やスパッタリング法を用いて、超高真空中において $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ など Sn 系 IV 族混晶の成膜を行った。基板には、Ge ウェハや Ge よりも大きな格子定数を持つ III-V 族化合物半導体である InP や GaSb ウェハを用い、格子定数の大きな高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層が格子整合する形でエピタキシャル成長する可能性を探求した。ウェハを化学洗浄後、成膜装置に導入し、高真空雰囲気下で 400°C以上、1 時間程度の熱処理を行い、清浄表面を形成した。表面の清浄化は、反射高速電子線回折 (RHEED) によって確認した。Sn 組成 25~50%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層などを成長温度 50~200 °C程度で、膜厚 10~200 nm 堆積した。

作製した試料の結晶構造や表面状態を X 線回折 (XRD) 法、顕微ラマン散乱分光、原子間力顕微鏡 (AFM)、光学顕微鏡などで観察した。薄膜中の元素分布を二次イオン質量分析 (SIMS) により評価した。また、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の電気的特性を Hall 効果測定装置、光電特性をフォトルミネッセンス (PL) 法で評価した。

4. 研究成果

本研究から得られた主要な成果を以下に記す。

(1)大格子定数 InP 基板上における Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル層形成

大格子定数 InP(001)基板上において様々な条件で、Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 混晶のエピタキシャル成長を試みた。XRD2 次元逆格子空間マップ測定 (XRD-2DRSM) の結果、膜厚 15 nm の薄膜 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の 100°Cの低温成長後、Sn 析出のない均一平坦な Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキ

シャル層の形成を実証した。また、膜厚が 100 nm まで増加するとともに、面内で局所・散発的に Sn 析出が生じ、Sn 組成 10%程度 of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層領域が形成されることが XRD および顕微ラマン分光測定から明らかになった (図 1 および図 2)。

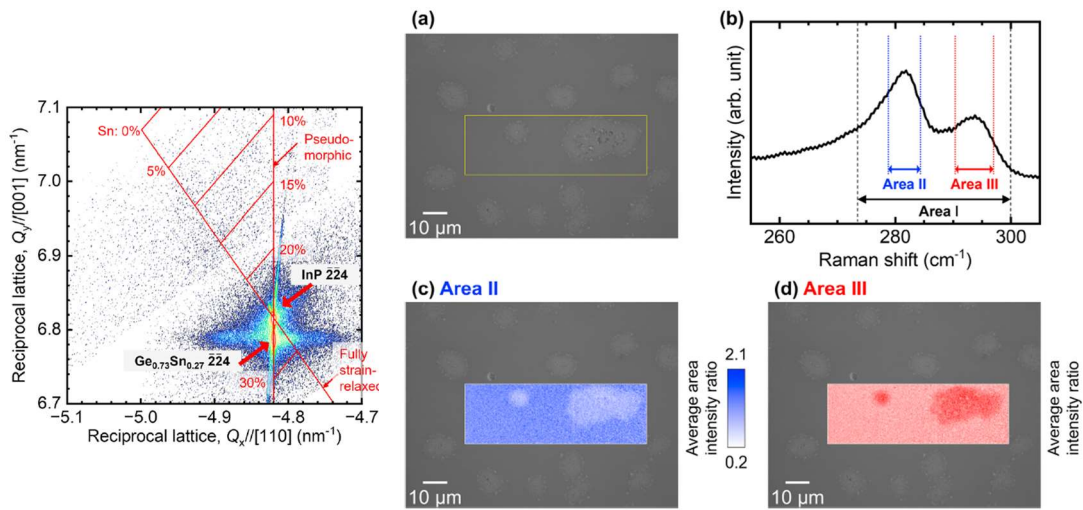


図 1. 成長温度 70 °C、膜厚 100nm の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{InP}$ 試料の XRD-2DRSM 測定結果。

図 2. (a) $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{InP}$ 試料の光学顕微鏡像。(b) 同領域のラマン分光スペクトル。(c) 高 Sn 組成領域 (Area II) および (d) 低 Sn 組成領域 (Area III) の顕微ラマン強度マップ。

また、InP(001)基板上において、Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 混晶のエピタキシャル成長について、基板清浄化条件や成長温度が形成層の結晶性に及ぼす影響を調査した。顕微ラマン分光、透過電子顕微鏡 (TEM) /エネルギー分散型 X 線分光 (EDX) による詳細分析から、InP 層清浄化時に形成される表面析出 In ドットが、低 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 領域の形成原因であることを見出し、In ドット形成を抑止した清浄表面形成が高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル層実現に有効であることを示した。その結果、双晶形成や積層欠陥のない高品質で均一な高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の形成を実証できた (図 3)。

さらに、InP(001)基板上において、MBE に比較して高速成長可能なスパッタリング法を用いて、Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 混晶のエピタキシャル成長を試みた。MBE 法より約 4 倍早い堆積速度の成長により、Sn 析出を抑止した膜厚 100 nm の高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層のエピタキシャル成長を実証した。加えて、スパッタリング法で成長した Sn 組成 25%の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層のキャリア物性を Hall 効果測定により評価した。MBE 法より高温の 170°Cの成長でも、比較的低い 10^{19} cm^{-3} 台の正孔密度を有するエピタキシャル層を形成できることがわかった (図 4)。正孔生成の起源となる空孔欠陥形成を高温成長によって抑制できるためと推測される。

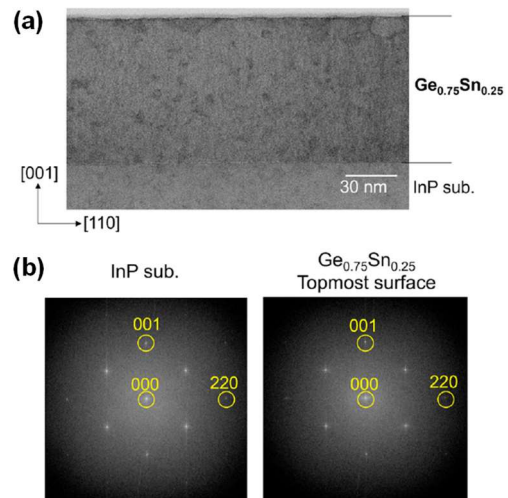


図 3. (a) $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{InP}$ 試料の断面 TEM 像。(b) InP 基板および $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層領域から得られた制限視野透過電子線回折パターン。

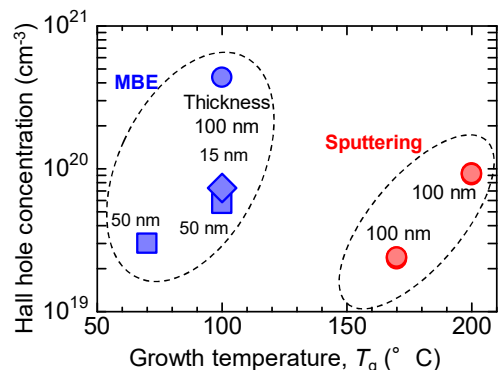


図 4. スパッタリング法および MBE 法で作製した $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{InP}$ 試料から得られた Hall 正孔濃度の成長温度依存性。

(2) 大格子定数 GaSb 基板上への Sn 組成 50% の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル層形成

大格子定数 GaSb(111)基板上への Sn 組成 52% の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層を試みた。最適な化学洗浄法を検証後、MBE 法により、成長温度 70 °C で膜厚 15 nm の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の成長を行った。RHEED、XRD、顕微ラマン散乱分光法による評価の結果、Sn 組成 52% の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層のエピタキシャル成長を示唆する結果が得られた。また、XRD 逆格子空間マッピングからは、急峻な界面形成を示唆する膜厚フリッジも観測された。格子整合系の結晶成長によって、平衡固溶限界の 50 倍前後に達し、デバイス応用にも期待できる実用的な膜厚を有する超高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層のエピタキシャル成長の可能性を実証できた。

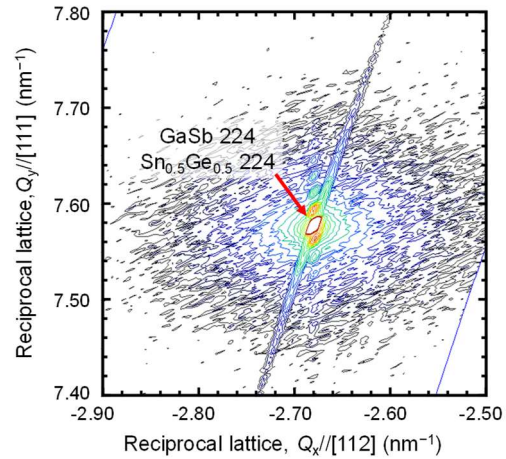


図 5. $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{GaSb}$ 試料の GaSb224 逆格子点近傍の XRD-2DRSM 測定結果。

(3) $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ ヘテロ構造の形成とその結晶・光電物性解明

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ ヘテロ構造による多重量子井戸構造の形成とその結晶・光電物性を評価した。Sn 組成 8% の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層を有する二重量子井戸構造のフォトルミネッセンス測定から、複数の準位間遷移過程に対応すると推測される発光ピークを観測し、キャリア閉じ込めが効果的に機能することを実証した。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ ヘテロ構造による多重量子井戸構造の形成とその結晶・光電物性を評価した。Sn 組成 9% の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層を有する二重量子井戸構造の PL 測定の詳細評価から、伝導帯 Γ 点および L 点それぞれに起因する発光を観測できた。また、350°C 以下の適切な熱処理による量子構造試料の PL 特性の改善を実証できた。

(4) 絶縁膜上高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ナノ構造の形成と光電特性解明

絶縁膜上への 30% 以上の高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の堆積を試みた結果、設計 Sn 組成 40% において、室温においても $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の多結晶化が生じ、XRD 測定から 30% を超える高格子置換位置 Sn 組成を有する $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 多結晶層の形成が明らかとなった。また、設計 Sn 組成 40%、膜厚 5nm の極薄 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層を 100 °C で堆積した結果、顕微ラマン散乱分光および AFM 測定から格子置換位置 Sn 組成が 38% に達する粒径 15 nm 程度の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ナノドット構造の形成を実証できた。

絶縁膜上への 30% 以上の高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 層の堆積と SiO_2 堆積の積層によって、Sn 組成 25% を超える多積層 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ナノドット層を形成できることを顕微ラマン散乱分光法などから実証した。さらに、これら多積層 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ナノドット試料の PL 特性から、波長 2 μm 、半値幅 0.7 μm の PL 発光を検出し、ナノドット化による PL 波長制御を実証できた (図 6)。

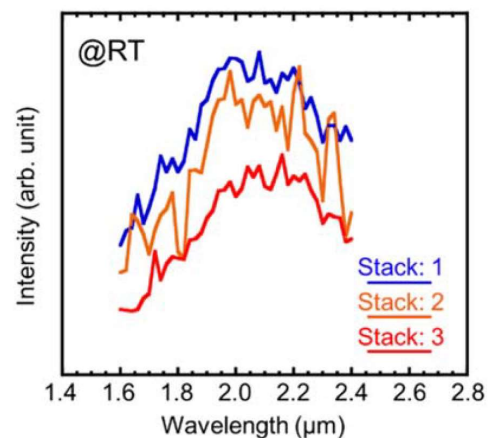


図 6. 1、2、および 3 層の $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ナノドット/ SiO_2 積層した試料から得られた室温 PL スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6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 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 ($x=0.1$) Si _{1-x} Sn _x layers on Si _{1-y} Ge _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 Hashimoto Kaoru, Shibayama Shigehisa, Asaka Koji, Sakashita Mitsuo, Kurosawa Masashi, Nakatsuka Osamu	4. 巻 62
2. 論文標題 Self-organized Ge _{1-x} Sn _x quantum dots formed on insulators and their room temperature photoluminescence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075506 ~ 075506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ace5f9	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 Shibayama Shigehisa, Takagi Komei, Sakashita Mitsuo, Kurosawa Masashi, Nakatsuka Osamu	4. 巻 176
2. 論文標題 Ge _{1-x} Sn _x layers with $x=0.25$ on InP(001) substrate grown by low-temperature molecular beam epitaxy reaching 70 °C and in-situ Sb doping	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 108302 ~ 108302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2024.108302	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 柴山茂久, 高木孝明, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理	4. 巻 1
2. 論文標題 In-situ Sb ドーピングによるInP上n型Ge _{0.75} Sn _{0.25} エピタキシャル膜の形成	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 第29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 予稿集	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 橋本薫, 柴山茂久, 安坂幸師, 中塚理	4. 巻 84
2. 論文標題 多層量子ドット構造実現に向けた絶縁体上へのGe _{1-x} Sn _x ナノドットの自己形成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 5-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 K. Kasahara, K. Senga, M. Sakashita, S. Shibayama, and O. Nakatsuka	4. 巻 10
2. 論文標題 Interface structures and electrical properties of micro-fabricated epitaxial Hf-digermanide/n-Ge(001) contacts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of the Electron Devices Society	6. 最初と最後の頁 744-750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JEDS.2021.3139728	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 S. Zhang, S. Shibayama, and O. Nakatsuka	4. 巻 38
2. 論文標題 Crystalline and optoelectronic properties of Ge _{1-x} Sn _x /high-Si-content-Si _y Ge _{1-x-y} Sn _x double-quantum wells grown with low-temperature molecular beam epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015018-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6641/aca7d9	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 S. Zhang, M. Fukuda, J. Jeon, M. Sakashita, S. Shibayama, and O. Nakatsuka	4. 巻 61
2. 論文標題 Photoluminescence properties of heavily Sb doped Ge _{1-x} Sn _x and heterostructure design favorable for n+-Ge _{1-x} Sn _x active layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SA1004 (8 page)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac25da	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 柴山茂久, G. R. Suwito, 中塚理	4. 巻 第27回研究会
2. 論文標題 極薄GeSiSn/GeSn/GeSiSn二重障壁構造の形成およびその電気的特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 / シリコンテクノロジー分科会 共催 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- 特別研究会研究報告	6. 最初と最後の頁 187-190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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32件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 O. Nakatsuka, M. Kurosawa, S. Shibayama, and M. Sakashita
2. 発表標題 Epitaxy and heterostructure of germanium tin-related group-IV alloy semiconductors for future electronic and optoelectronic applications
3. 学会等名 2023 International Conference on Semiconductor Technology for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors (ULSIC VS TFT 8) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 O. Nakatsuka, K. Takagi, S. Shibayama, M. Kurosawa, and M. Sakashita
2. 発表標題 Heteroepitaxial Growth of High Substitutional Sn-content Ge _{1-x} Sn _x Layer Lattice-matched on InP Substrate
3. 学会等名 International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures International SiGe Technology and Device Meeting (ICSI-ISTDM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hiraide, M. Kurosawa, S. Shibayama, M. Sakashita, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Seed-layer driven solid phase epitaxy of amorphous Ge _{1-x} Sn _x layers on Si(001) substrates toward in-plane strain control
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Shibayama, S. Zhang, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Optoelectronic properties of Ge _{1-x} Sn _x /high-Si-content Si _y Ge _{1-y-z} Sn _z double quantum wells formed by low-temperature MBE growth and post deposition annealing
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本泰河, 柴山茂久, 大田晃夫, 横川凌, 黒澤昌志, 坂下満男, 中塚理
2. 発表標題 Al/GeSn(111)エピタキシャル層構造からの偏析による極薄GeSn形成
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 壁谷汰知, 柴山茂久, 高木孝明, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 スパッタリング法によるInP基板上のGe _{0.75} Sn _{0.25} エピタキシャル成長
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 壁谷汰知, 柴山茂久, 高木孝明, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 スパッタリング法による InP 基板上へのエピタキシャル Ge _{0.75} Sn _{0.25} 形成
3. 学会等名 第10回応用物理学会名古屋大学スチューデントチャプター東海地区学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本泰河, 大田晃生, 横川凌, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理, 柴山茂久
2. 発表標題 Al/GeSn(111)構造からの偏析を用いた極薄・高 Sn 組成 GeSn の形成
3. 学会等名 第10回応用物理学会名古屋大学スチューデントチャプター東海地区学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柴山茂久, 高木孝明, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 In-situ SbドーピングによるInP上n型Ge _{0.75} Sn _{0.25} エピタキシャル膜の形成
3. 学会等名 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノロジー分科会共催特別研究会「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29回)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柴山茂久, 松本泰河, 大田晃生, 横川凌, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 Al/GeSn(111)構造上への熱処理による極薄・高Sn組成GeSn表面偏析
3. 学会等名 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノロジー分科会共催特別研究会「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29回)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柴山茂久, 高木孝明, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 In-situ Sbドーピングによるn型Ge _{0.75} Sn _{0.25} エピタキシャル層の形成
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名 O. Nakatsuka, S. Shibayama, M. Kurosawa, and M. Sakashita
2 . 発表標題 Substrate engineering for strain-controlled high-Sn-content Ge _{1-x} Sn _x epitaxy
3 . 学会等名 The 6th Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials, 2022 (APAC-Silicide 2022) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Hashimoto, S. Shibayama, K. Asaka, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2 . 発表標題 Sn-driven self-formation of Ge _{1-x} Sn _x nanodots on insulator for multi-layered quantum dots structure
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-IX) (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 _{1-x} Sn _x layers with 10%-Sn content on Si _{1-y} Ge _y buffers
3 . 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 O. Nakatsuka, S. Shibayama, M. Kurosawa, and M. Sakashita
2 . 発表標題 Research and Development of GeSn-related Group-IV Semiconductor Heterostructures for Optoelectronic Applications
3 . 学会等名 Symposium on Light Emission and Photonics of Group IV Semiconductor Nanostructures (LPGN) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Shibayama, S. Zhang, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Challenge and new opportunity of Ge _{1-x} ySixSny/Ge _{1-x} Sn _x heterostructures for optoelectronic and electronic device applications
3. 学会等名 13th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Takagi, S. Shibayama, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Heteroepitaxy of Ge _{1-x} Sn _x with a high Sn content over 25% on InP(001) toward group-IV infrared detector
3. 学会等名 13th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本薫, 柴山茂久, 安坂幸師, 中塚理
2. 発表標題 多層量子ドット構造実現に向けた絶縁体上へのGe _{1-x} Sn _x ナノドットの自己形成
3. 学会等名 電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会 (SDM) 「MOSデバイス・メモリ・パワーデバイス高性能化 - 材料・プロセス技術」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木孝明, 柴山茂久, 黒澤昌志, 坂下満男, 中塚理
2. 発表標題 InP基板上の超高Sn組成Ge _{1-x} Sn _x ヘテロエピタキシャル層の結晶性改善
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 森俊輔, 柴山茂久, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 Si(111)上における直接遷移Ge _{1-x} Sn _x ヘテロエピタキシャル層の形成
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 橋本薫, 柴山茂久, 安坂幸師, 黒澤昌志, 坂下満男, 中塚理
2. 発表標題 熱安定性の高いGe _{1-x} Sn _x 量子ドットの自己形成
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 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Ge _{1-x} Sn _x 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 森俊輔, 柴山茂久, 加藤芳規, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 高Sn組成Ge _{1-x} Sn _x (111)エピタキシャル薄膜の高品質形成
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 S. Zhang, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Optoelectronic properties of heterostructures based on pseudo-direct-bandgap transition n+-Ge _{1-x} Sn _x active layer
3. 学会等名 The 2nd International Workshop on Advanced Nanomaterials for Future Electron Devices 2021 (IWAN2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Zhang, M. Sakashita, S. Shibayama, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Optoelectronic properties of pseudo-direct transition n+-Ge _{1-x} Sn _x and heterostructures composed of n+-Ge _{1-x} Sn _x and n-Si _y Ge _{1-y} thin layers
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (ICMaSS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Zhang, S. Shibayama, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Formation of non-equilibrium Ge _{1-x} Sn _x /SixGe _{1-x-y} Sn _y double-quantum wells and its photoluminescence property
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and Its Applications for Nitrides Nanomaterials (ISPlasma 2022) (国際学会)
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 GaAs基板上におけるSi _{1-x} Sn _x 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 柴山茂久, G. R. Suwito, 中塚理
2. 発表標題 極薄GeSiSn/GeSn/GeSiSn二重障壁構造の形成およびその電気的特性
3. 学会等名 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノロジー分科会共催特別研究会「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27回)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本薫, 柴山茂久, 安坂幸師, 中塚理
2. 発表標題 量子ドット実現に向けた超高Sn組成GeSnの自己組織化形成
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

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 _{1-x} Sn _x 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

1. 発表者名 藤本一彰, 黒澤昌志, 中塚理
2. 発表標題 Si _{1-x} Ge _x バッファ上におけるSi _{1-x} Sn _x 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 S. Zhang, S. Shibayama, and O. Nakatsuka
2. 発表標題 Formation of Ge _{1-x} Sn _x /SixGe _{1-x-y} Sny double quantum wells structure and its photoluminescence mechanism
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〕

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻物質デバイス機能創成学講座ナノ電子デバイス工学研究グループ
<http://alice.xtal.nagoya-u.ac.jp/nanoleddev/>

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	柴山 茂久 (Shibayama Shigehisa) (00774126)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	
研究協力者	黒澤 昌志 (Kurosawa Masashi) (40715439)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	
研究協力者	坂下 満男 (Sakashita Mitsuo) (30225792)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

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