

2024 年度年次報告書

情報担体を活用した集積デバイス・システム

2021 年度採択研究代表者

中塚 理

名古屋大学 大学院工学研究科
教授

狭ギャップIV族混晶による赤外多帯域受発光集積デバイス

主たる共同研究者：

末岡 浩治（岡山県立大学 情報工学部 教授）

田中 朋（日本電気(株) グローバルイノベーションビジネスユニット 主任研究員）

野田 祐輔（九州工業大学 大学院情報工学研究院 准教授）

前田 辰郎（産業技術総合研究所 先端半導体研究センター 研究主幹）

王 冬（九州大学 総合理工学研究院 教授）

研究成果の概要

本年度は、狭ギャップ半導体赤外撮像素子の基盤材料として活用する高 Sn 組成 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル層の創製技術の高精度化、その結晶・電子物性解明を進めた。さらに、前田グループ (G)、王 G に $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 試料を提供し、薄膜および界面電子物性の評価と解明、ダイオードデバイスの試作、異種基板転写技術の構築に関する研究を共同で推進した。また、田中 G とも連携して、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 光電デバイス試料評価を推進し、ROIC センサデバイスの試作準備も進めた。更に末岡 G・野田 G では本課題で扱う IV 族混晶について、機械学習も活用した結晶構造や欠陥予測に関する理論計算を進めた。主要な成果を以下にまとめる。

大格子定数 GaSb 基板上の Sn 組成 50% に達する $\text{Ge}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ エピタキシャル層の形成とその結晶物性の解明[1]、表面・界面の電気伝導特性の制御技術構築[2]に取り組んだ。その結果、GaSb 基板上に従来組成を大きく超える 50% 以上の世界最高水準の Sn 組成を有する $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル薄膜の創製に成功した。その結晶物性評価からは、乱雑 (disordered) 構造ではない、閃亜鉛鉱型のような規則系 IV 族混晶の形成を示唆する結果が得られた。

さらに、学官産の共同研究によって、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ のフォトダイオードを試作し、その動作特性検証を進展させるとともに、ROIC とセンサアレイとの接合プロセス開発も進めた。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ の暗電流、分光感度、検出能分光特性など、センサデバイスとしての詳細・実用的な特性評価が実現し、Sn 組成依存性の明確化にも繋がる成果が得られた。

また、ダイオードデバイスの評価などから、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}$ 構造に含まれる欠陥を調査すると共に、金属と $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ の間への極薄絶縁膜挿入によるキャリアのトンネリング障壁高さの制御を実証した[3-6]。さらに、理論計算に基づく、IV 族混晶の結晶物性・欠陥構造／準位の解明に取り組み、現実の組成に対応した IV 族混晶の新規計算手法開発を進めた。また、Ge ベース IV 族混晶の大規模計算モデルを対象とする物性・欠陥構造の解析を実施した[8-12]。

【代表的な原著論文情報】

- [1] “Epitaxial growth of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ thin film with Sn composition of 50% and possibility of Ge-Sn ordered bonding structure formation”, S. Shibayama, K. Shibata, M. Sakashita, M. Kurosawa, and O. Nakatsuka, *Appl. Phys. Express* **17**, 115503 (2024).
- [2] “ALD- GeO_2 界面層を用いた GeSn/Ge pn ダイオードの表面パッシベーション”, 加藤芳規, 坂下満男, 黒澤昌志, 中塚理, 柴山茂久, 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 30 回) (5 pages) (2025).
- [3] “Study of the Dependence of Effective Barrier Height on Thickness of HfO_2 , SiO_2 , Y_2O_3 , and Al_2O_3 Films in Metal-Ultra-Thin-Insulator-Germanium Structures”, Y. Feng, N. Shimizu, K. Yamamoto, and D. Wang, *Extended Abstracts of the 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2024)*, pp. 505-506.
- [4] “Low-temperature annealing effect on electrical/structural characteristics for $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2/\text{Ge}$ gate stack”, H. Kuwazuru, T. Aso, D. Wang, and K. Yamamoto, *Extended Abstracts of the 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2024)*, pp. 35-36.
- [5] “Germanium Gate Stack Fabrication at Low Temperature using Nonheated Atomic Layer

- Deposition”, T. Aso, H. Kuwazuru, D. Wang, and K. Yamamoto, Extended Abstracts of the 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2024), pp. 585-586.
- [6] “Al₂O₃ growth on Ge by low-temperature (~90 °C) atomic layer deposition and its application for MOS devices”, T. Aso, H. Kuwazuru, D. Wang, K. Yamamoto, Materials Science in Semiconductor Processing, Vol. 190, No. 5, 109372 (2025).
- [7] “Density functional theory study on formation energy, formation entropy, and thermal equilibrium concentration of tin and vacancy in germanium layer”, Koji Sueoka and Yusuke Noda, ECS Fall meeting PRiME 2024, SiGe, Ge, and Related Compounds: Materials, Processing, and Devices 11.
- [8] 「理論計算による SiGe 混晶の安定原子配置の特徴分析」, 別宮響, 野田祐輔, 末岡浩治, 第 1 回半導体結晶技術に関する産学連携ワークショップ, 大阪大学(大阪), October 31st, 2024[ポスター].
- [9] 「遺伝的アルゴリズムを用いた SiGe 混晶の安定原子配置探索と特徴分析」, 別宮響, 野田祐輔, 末岡浩治, 第 37 回計算力学講演会 (CMD2024), トークネットホール仙台(宮城), October 18th, 2024.
- [10] 「理論計算による SiGe 混晶の安定原子配置の特徴分析」, 別宮響, 野田祐輔, 末岡浩治, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟), September 17th, 2024.
- [11] “Defect behavior during growth of heavily phosphorus doped Czochralski silicon crystals (II): Theoretical study”, K. Sueoka, Y. Narushima, K. Torigoe, N. Nonaka, K. Koga, T. Ono, H. Horie, and M. Hourai, J. Appl. Phys. **136**, 055705 (2024).
- [12] 「機械学習モデルと遺伝的アルゴリズムの連携による Ge-Sn 合金の安定構造探索」, 野田祐輔, 末岡浩治, 日本機械学会 第 37 回計算力学講演会 (CMD2024), トークネットホール仙台(宮城), 2024 年 10 月.