

先端国際共同研究推進事業

2024 年度採択

「Top のための ASPIRE」

半導体分野

2024 年度

年次報告書（公開版）

研究課題名 半導体ヘテロジニアス集積デバイスのための IV 族混晶材料
の汎用量子物性制御

日本側研究代表者 中塚 理 名古屋大学 教授

相手側研究代表者 ・Roger Loo, Principal Member of Technical Staff, imec
・Dan Mihai Buca, Group Leader,
Forschungszentrum Juelich
・Yuji Yamamoto, Scientist, Innovations for High
Performance Microelectronics

研究期間 2024 年 12 月 1 日～2030 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

本研究においては、実用的な高温動作・大強度・素子集積可能で、幅広い産業応用が可能な半導体ヘテロ集積技術の開拓を目指して、Si を中心に日欧多機関の共同研究推進により、IV 族混晶材料に係る最先端結晶成長・プロセス技術の駆使に基づいて、電子のみならず、フォノン・フォトン・スピンなどの異種量子を汎用的に制御・操作できる各種ナノ量子デバイスの創成、およびこれら新規量子デバイスを Si-ULSI プラットフォームへ搭載し、ヘテロジニアス機能集積を実現するための、統合的な材料・プロセス・デバイス技術の構築を進めている。以下、本年度に実施した主要な成果について記す。

①研究構想にかかる実施内容・成果

<実施したこと>

- (1) IHP (Innovations for High Performance Microelectronics) の研究者を東北大学に招聘し、エピタキシャル成長した SiGe の電気機械特性の評価に関する共同研究を進め、SiGe の電気機械特性の温度依存性などの新たなデータが得られた。2 名の大学院博士前期課程学生が SiGe の電気機械特性の評価を行っている。
高品質のエピタキシャル SiGe 膜は、高速・高性能半導体を実現するうえで極めて重要な技術である。また、SiGe の機能化により、半導体素子として新たな応用展開が期待できる。東北大学と IHP との共同研究において、Si 及び Ge 表面への不純物を含む原子層成長制御により、Si-Ge 系集積構造を作製した。また、原子層制御は高真空減圧化学気相成長 (CVD) 法を利用し、高品質の SiGe 膜が形成できることを確認した。さらに、電気機械特性の評価や各種機能性半導体の製膜実験を進めた。
加えて、高品質の SiGe 膜の原子層技術の開発を進め、Si や Ge 基板上で各種ドーピングにおいて良質な SiGe 膜を作る技術を開発した。また、作製した SiGe 膜における電気機械特性を評価した。特に、応力に対する SiGe 膜の応答を評価し、新たな電気機械素子の設計のための基礎パラメーターを取得した。
- (2) IHP の研究者 2 名と名古屋大学の研究者とで、Si 系ナノドットの活用に向けた対面の打ち合わせを実施し、Si ナノシート形成に関する議論および今後の研究に向けた打ち合わせを行った。
- (3) 台湾 Kaohsiung で開催された The 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2025) に東北大学の若手研究者や大学院生が参加し、高性能半導体集積技術に関する発表を行った。
- (4) 九州大学と imec、IHP による顕微フォトルミネッセンス法を用いた低次元 IV 族半導体構造の高感度光学評価に関する共同研究として、imec が提供した SiGe/Si マルチスタックのフォトルミネッセンス測定を行い、SiGe/Si マルチスタックの光学性能を評価した。
- (5) 広島大学において、大気圧熱プラズマジェットを用いた熱処理中の SiC ウエハ温度の非接触測定に関する新たな研究手法の導入について検討を行った。

<得られた成果>

本年度内に得られた主要な成果を示す。

- (1) 研究業績に挙げる例をはじめとして、多数の国際会議、学会発表を行った。
- (2) 東北大学と IHP との電気機械特性評価に関する共同研究として、単結晶 SiGe の圧力センサーへの応用を見込み、SiGe のピエゾ抵抗の特性について、小野研究室の修士課程の学生と共に同研究室保有のピエゾ抵抗測定装置を用いて温度依存性のデータを測定した。SiGe のピエゾ抵抗の温度特性の B-濃度および Ge 比率の影響について信頼に足る新たな知見を得た。
- (3) 大阪大学とユーリヒ総合研究機構 (FZJ) との共同研究として、Ge 系スピントランジスタの微細加工プロセスについて議論し、プロセスの最適化を行っている。現在、派遣学生 1 名が、先方のクリーンルームにおける装置の利用トレーニング中。また、先方の提案により、GeSn 薄膜へのスピン注入研究を実施するための

オンライン会議を実施した。

- (4) 九州大学と imec、IHP による顕微フォトルミネッセンス法を用いた低次元 IV 族半導体構造の高感度光学評価に関する共同研究成果を、ECS J. Solid State Sci. Technol 誌に発表した。その後、imec グループが試作した SiGe/Si マルチスタックの構造を基に、顕微フォトルミネッセンス法の測定条件の最適化および発光機構の解明を検討し、将来の高感度光学評価を準備している。また、IHP グループが試作した SiGe/Si ナノ構造のフォトルミネッセンス測定の注意点や期待される結果について議論し、今後の連携研究を計画している。
- (5) 広島大学において、大気圧熱プラズマジェットを用いた熱処理中の SiC ウエハ温度の非接触測定に関して、従来のデータベース法に加えて AI を用いたリアルタイム温度測定技術の導入について検討をおこない、具体的なアプローチの探索を開始した。

②国際ネットワーク構築・拡大に関する実施内容・成果

＜実施したこと＞

- (1) 2024 年 12 月に、名古屋大学および広島大学から研究代表者を含め 5 名が訪欧し、imec、IHP、FZJ の 3 機関を順次訪問した。本プロジェクトの推進に関する全体像を改めて共有するとともに、それぞれのグループの研究状況などの説明と議論を通して、共同プロジェクト推進に関する具体的研究内容や研究計画についても相談を進めた。また、各機関間の共同研究契約に関する方針を確認した。加えて、各機関の研究施設を見学するとともに、各都市の長期滞在に係る施設、環境などを調査した。
- (2) 2025 年 11 月に東京で開催予定の合同国際会議 The International Conference on Silicon Epitaxy and International SiGe Technology and Device Meeting (ICSI/ISTDM 2025)、The 10th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-X) の開催に関して、本プロジェクトの関係者の貢献について議論と計画を行った。
- (3) 2025 年 10 月に米国シカゴで開催される Electrochemical Society の 248th ECS Meeting の H04 - Semiconductor Process Integration 14 について、本事業との連携を模索し、IV 族半導体材料に関する成果発表及び共同議論の場を活性化する方策を相談、推進した。

＜得られた成果＞

- (1) 各機関からの大学院生、若手研究者の欧州派遣について、合意を得るとともに、具体的な渡航についても相談を進め、一部は本年度内の派遣として着手した。
- (2) ICSI/ISTDM2025 実施に向けて、本事業関係者の協力および参画を得て、具体的な取り組みを開始した。
- (3) 248th ECS Meeting に向けて、本事業関係者の協力および参画を得た。
- (4) 新たな連携先として米国の大学と広島大学との共同研究について協議をおこない、研究テーマと相互の人的交流について推進する方向での合意に至った。

③ 国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する実施内容・成果

＜実施したこと＞

- (1) 大阪大学から FJZ に学生 1 名を派遣し、2025 年にまたがる形で IV 族半導体スピndeバイス用の低温プロセスに関する共同研究を実施することとなった。
- (2) 名古屋大学から、2025 年 5 月より一年間にわたって IHP に滞在する博士後期課程の学生が携わる SiGe 系ナノ構造制御プロセスと少数電子による知能情報処理デバイス開発に関する研究について打ち合わせを実施した。
- (3) 中空ゲルマニウム基板に基づく高品質 GOI と電子・光・スピン集積デバイスの実現に関する研究項目を実施するため、2025 年度に博士学生 1 名を imec グループへの長期派遣を計画した。imec グループとオンラ

イン相談し、GeON 製造プロセスや SiGe 系薄膜の形成・エッチング技術について議論して、当該学生の派遣時期および imec に滞在中の研究内容を協議した。

- (4) 2025 年 3 月に、IHP の若手研究者を名古屋大学に招聘し、名古屋大学の大学院生も交えて、共同研究に関する打ち合わせを実施した。

<得られた成果>

- (1) 大阪大学から FJZ に博士後期学生 1 名を派遣し、IV 族半導体スピndeバイス用の低温プロセスに関する共同研究の実施に着手した。
- (2) 2025 年 5 月から 2026 年 4 月まで名古屋大学の大学院生がドイツの IHP を訪問し、SiGe ナノ構造の規則配列形成と量子デバイス応用に関する研究を実施することが認められた。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
IV 族混晶半導体新材料の創製と物性解明・制御	浜屋 宏平 中塚 理 Dan Buca	大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 名古屋大学・大学院工学研究科・教授 Group Leader, Peter Gruenberg Institute 9, Forschungszentrum Juelich
IV 族混晶半導体デバイスのための先進プロセス構築	王 冬 東 清一郎 Roger Loo	九州大学・大学院総合理工学研究院・教授 広島大学・大学院先進理工科学研究科・教授 Principal Member of Technical Staff, imec
IV 族混晶半導体の先端集積デバイス応用	小野 崇人 Yuji Yamamoto	東北大学・大学院工学研究科・教授 Scientist, Technology Department, IHP

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

<原著論文（欧州機関との共著）>

- (1) R. Loo, A. Akula, Y. Shimura, C. Porret, E. Rosseel, T. Dursap, A. Y. Hikavyya, M. Beggiato, J. Bogdanowicz, A. Merkulov, M. Ayyad, H. Han, O. Richard, A. Impagnatiello, D. Wang, K. Yamamoto, T. Sipócz, Á. Kerekes, H. Mertens, N. Horiguchi and R. Langer, "Epitaxial Si/SiGe Multi-Stacks: From Stacked Nano-Sheet to Fork-Sheet and CFET Devices", ECS J. Solid State Sci. Technol. 14, p. 015003 (2025).

<国際会議発表（欧州機関との共同発表）>

- (1) Nguyen Van Toan, "Nanoporous silicon materials formed by metal-assisted chemical etching for thermoelectric generator",台湾,The 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2025), Jan. 19-23, 2025.
- (2) 田江 涵, "CELLULOSE NANOFIBER- BISMUTH TELLURIDE COMPOSITE FILM FOR MICRO THERMOELECTRIC GENERATOR", 台湾, The 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2025) , Jan. 19-23, 2025.
- (3) K. Ozaki, N. Takada, Y. Imai, T. Tsutsumi, K. Ishikawa, Y. Yamamoto, W.-C. Wen, and K. Makihara, "Evaluation of Lateral Selective Etching with CF4/H2 Plasma of

Si_{0.7}Ge_{0.3}/Si/Si_{0.7}Ge_{0.3} Layers”, ISPlasma2025/IC-PLANTS2025, Chubu Univ. Mar. 3-7, 2025.

- (4) K. Makihara, H. Saito, Y. Yamamoto, M. A. Schubert, and S. Miyazaki, “Formation of b-FeSi₂ Core/Si-Shell Quantum Dots and Their PL Properties”, ISPlasma2025/IC-PLANTS2025, Chubu Univ. Mar. 3-7, 2025.