

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21976

研究課題名（和文）絶縁膜上における高キャリア移動度半導体の非熱平衡プロセスと超高速集積回路への応用

研究課題名（英文）Development of Non-Equilibrium Processing of High Carrier Mobility Semiconductors on Insulator for High Speed Large Scale Integrated Circuits

研究代表者

佐道 泰造 (Taizoh, SADOH)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：20274491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：集積回路はシリコン・トランジスタの微細化により高速化・多機能化が実現されてきたが、トランジスタの微細化による集積回路の性能向上が物理的限界に直面しつつある。さらなる集積回路の性能向上には、新しい手法を採用し、トランジスタを高性能化することが必須である。本研究では、絶縁膜上に形成したGeSnをチャンネルとした高性能トランジスタの実現を目指し、絶縁膜上にGeSnを高品位形成する新しい結晶成長技術、良好なデバイス動作を可能とするための高濃度不純物ドーピング技術を創出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報通信技術の発展には、集積回路の高性能化が必須である。従来、集積回路の高性能化は、集積回路を構成するシリコン・トランジスタの微細化により実現されてきた。しかし、微細化が進んだ結果、トランジスタのリーク電流が増加し、消費電力の増大、動作特性の劣化などの課題が健在化している。本研究では、微細化ではなく、シリコンよりも特性が優れる新しい材料（ゲルマニウム・スズ）を用いて集積回路を高性能化する研究を行った。その結果、絶縁膜上に高品質なゲルマニウム・スズ薄膜を形成する技術、寄生抵抗の低い良好な電極を形成する技術を創出した。これらの成果により、集積回路のさらなる高性能化が実現する。

研究成果の概要（英文）：Improvement of operation speed and functionality of large-scale integrated circuits has been achieved by scaling of silicon transistors. However, this approach of improvement of large-scale integrated circuit performance by scaling of silicon transistors is facing to the physical limit. For further improvement of large-scale integrated circuit performance, a new approach is required to obtain high-performance transistors. In the present study, techniques for growth of high-quality GeSn crystals on insulator and high-concentration doping have been developed to realize high-performance transistors having GeSn channel on insulator.

研究分野：工学

キーワード：トランジスタ 結晶成長

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スマート化社会の実現には情報通信機器の性能向上が不可欠であり、情報通信機器を構成する集積回路の高性能化が社会的な要請となっている。集積回路の高性能化(高速化)は、集積回路を構成する Si トランジスタの微細化(スケールング)により実現されてきた。しかし、微細化による集積回路の性能向上のアプローチは、Si の物性制約から限界を迎えている。集積回路性能のさらなる向上には、新しいアプローチを採用し、トランジスタを高性能化することが必須である。

2. 研究の目的

我々は、集積回路のさらなる高性能化を目指し、絶縁膜上に形成した GeSn をチャネルとしたトランジスタ構造に着目している。Ge のキャリア移動度は Si より高いが、Sn 添加することで平均的な原子間結合エネルギーが低下することで、結晶性の向上が期待できる。良好なデバイス動作を実現するには、絶縁膜上に結晶性の高い GeSn 薄膜を形成すること、寄生抵抗の低いソース/ドレインを形成することが必要である。

そこで本研究では、絶縁膜上における GeSn の結晶成長と GeSn への高濃度ドーピング技術の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 絶縁膜上における GeSn 薄膜の高品質形成

基板材料には石英を用いた。石英基板上に、分子線堆積法を用いて非晶質 Si (膜厚: 0 ~ 20nm) と非晶質 GeSn (膜厚: 50nm, Sn 濃度: 2%) の積層構造を形成した。試料構造の模式図を図 1 に示す。その後、N₂ 雰囲気中で熱処理(450°C, 20 h)を行って固相成長を誘起した。

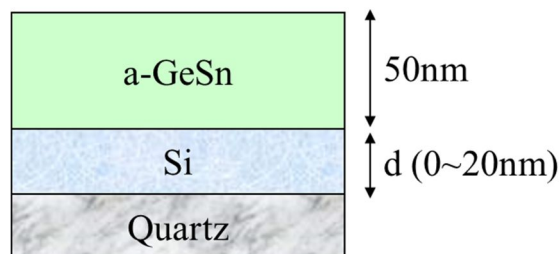


図 1. 試料構造の模式図 .

(2) 絶縁膜上における GeSn 薄膜への高濃度ドーピング

Ge 中への p 型ドーピングについては、例えば、III 族元素(Al)を触媒とした層交換成長法を用いることで、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度の高濃度ドーピングが実現する。一方、層交換法を用いた n 型ドーピングについては、ほとんど調べられていない。そこで、V 族元素(Bi)を触媒とした層交換成長を検討した。

実験には、石英基板を用いた。石英基板上に、Bi 層(33nm)、a-GeSn 層(100nm, Sn 濃度: 0% ~ 15%)を堆積した。Bi 層の堆積には抵抗加熱法を用い、GeSn 層の堆積には分子線堆積法を用いた。これらの試料を N₂ 雰囲気中で熱処理(220°C ~ 280°C, 20h)し、層交換成長を誘起した。熱処理前の試料構造と、熱処理後に予想される試料構造を図 2 に示す。

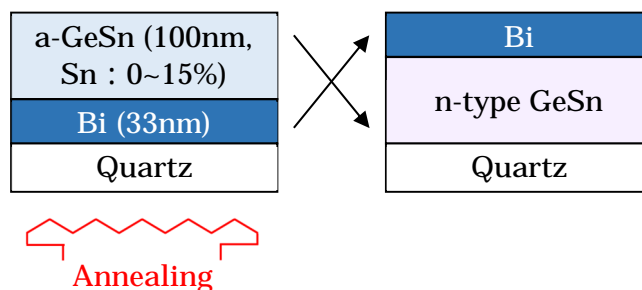


図 2. 熱処理前後の試料構造の模式図 .

4. 研究成果

(1) 絶縁膜上における GeSn 薄膜の高品質形成

熱処理後の試料(a-Si 膜厚:0.5nm)の表面層の EBSD 像を図 3(a)、(b)に示す。Si 下地層が無い試料では、粒径は約 5 μm であり、(100)配向が多かった。一方、Si 下地層を挿入した試料では粒径

は減少($\sim 1.5\mu\text{m}$)し、ランダム配向となった。この結果は、Si 下地層により、基板界面での核発生が抑制され、ランダムなバルク核発生が支配的になったことを示唆している。なお、GeSn 層中の Sn 濃度(2%)は、Ge 中における Sn の熱平衡固溶度の最大値(約 1%)の約 2 倍であるが、成長層を透過型電子顕微鏡観察したところ Sn の析出等は観測されず、Ge 中に Sn が均一に固溶していることが明らかとなった。したがって、低温(450)での固相成長法で得られた GeSn 結晶は非熱平衡状態にあることが判った。

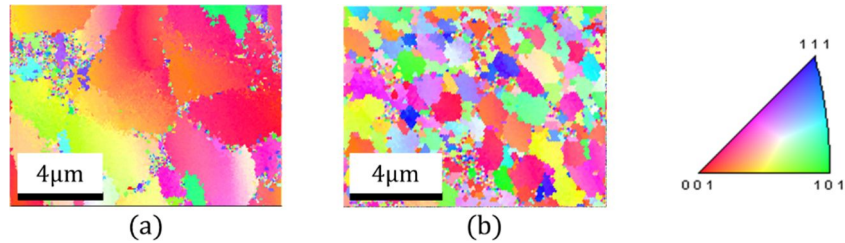


図 3 . 成長層の EBSD 像 . (a)は Si 下地層なし , (b)は Si 下地層(膜厚:5nm)有り .

成長層をホール効果法で測定したところ、P 型伝導を示した。ホール効果測定により求められた成長層の正孔移動度と、EBSD 測定で得られた表面層の平均結晶粒径を Si 下地層厚の関数として図 4 に示す。移動度の解析では Si 層での平行伝導は無視した。Si 下地層厚(5~20nm)では粒径は $1.5 \sim 2\mu\text{m}$ に減少するものの、移動度は向上($\sim 150\text{cm}^2/\text{Vs}$)することが明らかとなった。

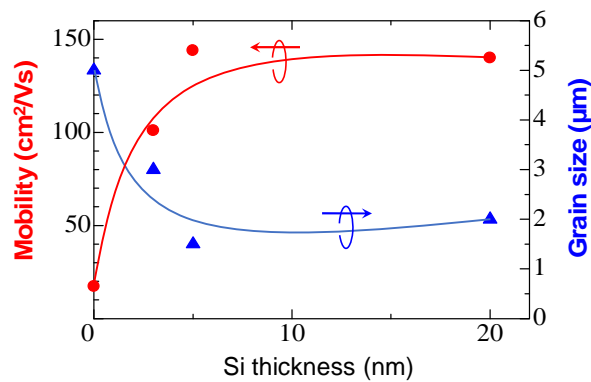


図 4 . キャリア移動度と結晶粒径の Si 下地層厚依存性 .

Si 下地層厚 0~20 nm の試料のキャリア移動度の温度依存性を図 5 に示す。Si 下地層の挿入により、キャリア移動度の温度依存性(データの傾き)の符号が逆転することがわかる。これらのデータより、Seto モデルを用いて結晶粒界における障壁高さを見積もったところ、Si 下地層の挿入により、粒界の障壁高さが約半分に減少することが明らかとなった。すなわち、Si 下地挿入によるキャリア移動度の向上は、キャリアに対する粒界障壁の低減に起因することが明らかとなった。

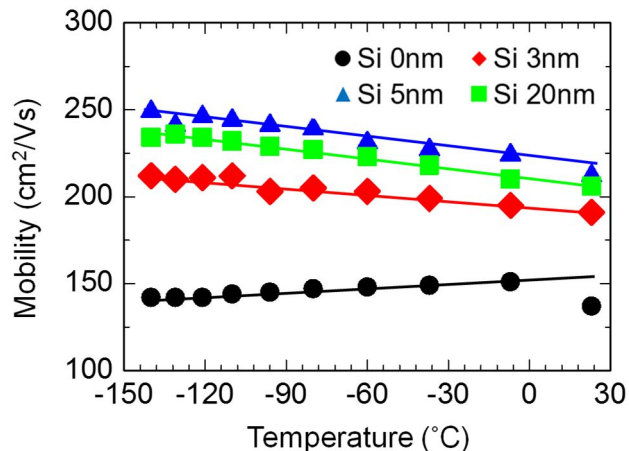


図 5 . キャリア移動度の温度依存性 .

(2) 絶縁膜上における GeSn 薄膜への高濃度ドーピング

熱処理(280 , 20h)後の試料の裏面から測定したラマンスペクトルを図 6 に示す。熱処理後、すべての試料で c-Ge または c-GeSn の Ge-Ge 結合に起因するシャープなラマンピークが観測されており、層交換成長の開始が示唆された。熱処理後の試料の電気特性をホール効果法で測定したところ、成長層は n 型伝導であることが明らかとなった。自由電子密度は、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上と、Ge 中 Bi の熱平衡固溶度を超える値を示した。Bi を用いた層交換成長法による高濃度 n 型不純物の非熱平衡ドーピング技術の創出である。

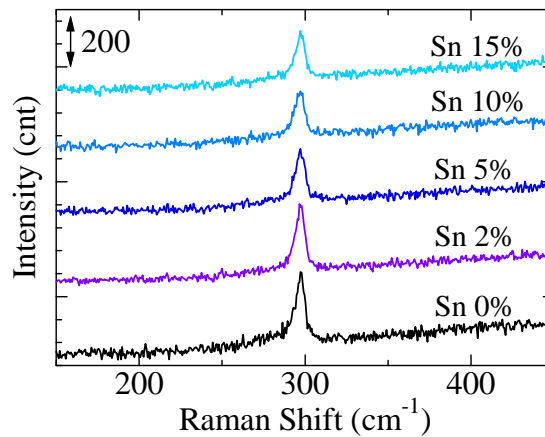


図 6 . 熱処理(280 , 20h)後の試料のラマンスペクトル .

(3) まとめ

超高速集積回路の実現を目指し、新しい非熱平衡プロセスの検討を行った。まず、絶縁膜上における GeSn 膜の低温固相成長を検討し、Ge に熱平衡固溶度の 2 倍程度の Sn を添加するとともに Si 下地を挿入することで、高キャリア移動度を有する GeSn 薄膜を実現した。つぎに、族元素(Bi)を用いた GeSn の層交換成長を検討し、Ge 中における Bi の熱平衡固溶度を凌駕する高濃度 n 型ドーピングを実現した。本研究により、絶縁基板上における GeSn 薄膜の高キャリア移動度化と高濃度ドーピングを実現する新しいプロセス技術が創出された。今後は、本研究で得られたプロセス手法を統合してトランジスタを試作し、高性能なデバイス動作を実証することで超高速集積回路の技術基盤を確立する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Gao Hongmiao, Sadoh Taizoh	4. 巻 117
2. 論文標題 Layer-exchange crystallization for low-temperature (<math><450^{\circ}\text{C}</math>) formation of n-type tensile-strained Ge on insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 172102 ~ 172102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020489	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 Xu Chang, Gong Xiangsheng, Miyao Masanobu, Sadoh Taizoh	4. 巻 115
2. 論文標題 Enhanced mobility of Sn-doped Ge thin-films (50 nm) on insulator for fully depleted transistors by nucleation-controlled solid-phase crystallization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042101 ~ 042101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5096798	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 Sadoh Taizoh, Sakai Takatsugu, Matsumura Ryo	4. 巻 8
2. 論文標題 Low-Temperature (~250 °C) Gold-Induced Lateral Growth of Sn-Doped Ge on Insulator Enhanced by Layer-Exchange Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 P609 ~ P614
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.0281910jss	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 -

〔学会発表〕 計40件（うち招待講演 2件/うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Taizoh SADOH
2. 発表標題 Low-Temperature Crystallization of Group-IV Semiconductors on Insulator for Advanced Electronics
3. 学会等名 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation & 4th International Conference on Consumer Electronics and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Hara, M. Chiyozone, and T. Sadoh
2. 発表標題 Improved Carrier Mobility of Poly-Ge Ultrathin Films on Insulator by Solid-Phase Crystallization
3. 学会等名 28th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices -TFT Technologies and FPD Materials- (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Okamoto, T. Kosugi, and T. Sadoh
2. 発表標題 Low-Temperature Solid-Phase Crystallization of High-Sn Concentration SiSn on Insulator
3. 学会等名 28th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices -TFT Technologies and FPD Materials- (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Otokichi Shimoda, Yuki Sawama, C. J. Koswaththage, Takashi Noguchi, Takashi Kajiwara, Taizoh Sadoh, and Tatsuya Okada
2. 発表標題 Crystallization of SiN Capped InSb Films on Glass by Rapid Thermal Annealing
3. 学会等名 The 21st International Meeting on Information Display (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Kosugi, Kota Okamoto, and Taizoh Sadoh
2. 発表標題 Effect of Sn doping to Solid-Phase Crystallization of Si thin film on Insulator
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryutaro Hara, Masanori Chiyozono, and Taizoh Sadoh
2. 発表標題 High Carrier Mobility of Sn-Doped Ge Ultrathin Films on Insulator by Capping-Enhanced Solid-Phase Crystallization
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶原 隆司, 霜田 音吉, 岡田 竜弥, チャリット ジャヤナダ コスワッタゲー, 野口 隆, 佐道 泰造
2. 発表標題 急速熱処理法によるInSb薄膜/ガラス基板の結晶成長
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 原 龍太郎, 千代園 修典, 茂藤 健太, 山本 圭介, 佐道 泰造
2. 発表標題 a-Si キャップ付加による界面変調Sn添加Ge極薄膜/絶縁基板のキャリア移動度向上
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 佐道泰造, 片山慶太, 池上浩, 白谷正治
2. 発表標題 レーザープロセスを用いたIV族系半導体の結晶成長とドーピング
3. 学会等名 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第231回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永野貴弥, 河原聡, 劉森, 佐道泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換成長法によるSiGe/絶縁膜基板の低温成長
3. 学会等名 2021年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 霜田 首吉, コスワツタゲー チャリット ジャヤナダ, 野口 隆, 梶原 隆司, 佐道 泰造, 岡田 竜弥
2. 発表標題 Neを用いてガラス上にスパッタ堆積したInSb膜のRTAによる結晶化
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 永野 貴弥, 原 龍太郎, 千代園 修典, 佐道 泰造
2. 発表標題 界面変調Sn添加Ge極薄膜/絶縁基板の固相成長特性
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 M. Chiyozone, X. Gong, and T. Sadoh
2. 発表標題 Improved Carrier Mobility of Sn-Doped Ge Thin-Films (50 nm) by Interface-Modulated Solid-Phase Crystallization Combined with Thinning
3. 学会等名 27th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kosugi, K. Yagi, T. Sadoh
2. 発表標題 SiSn Film on Insulator by Low-Temperature Solid-Phase Crystallization
3. 学会等名 27th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Kosugi, Kazuki Yagi, and Taizoh Sadoh
2. 発表標題 Low-Temperature Solid-Phase Crystallization of SiSn on Insulator - Effects of Sn Concentration and Film Thickness -
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Tan, Daiki Tsuruta, Taizoh Sadoh
2. 発表標題 Low-Temperature Solid-Phase Crystallization Combined with a-Si Under-Layer for High Sn Concentration GeSn Film without Sn-Segregation
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanori Chiyozone, Xiangsheng Gong, Taizoh Sadoh
2. 発表標題 High Carrier Mobility of Sn-Doped Ge Thin-Films (~20 nm) on Insulator by Interface-Modulated Solid-Phase Crystallization
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Kosugi, Kazuki Yagi, Taizoh Sadoh
2. 発表標題 Growth Characteristics of SiSn on Insulator by Solid Phase Crystallization
3. 学会等名 5th Asian Applied Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉 森, 公 祥生, 高 洪ミヨウ, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換成長法によるn型Ge/絶縁基板の低温形成
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千代園 修典, 公 祥生, 徐 暢, 佐道 泰造
2. 発表標題 界面変調型固相成長法で形成したSn添加多結晶Ge極薄膜/絶縁基板の粒界障壁解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小杉 智浩, 八木 和樹, 佐道 泰造
2. 発表標題 絶縁基板上におけるSiSn薄膜の低温固相成長特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹 優太, 鶴田 太基, 佐道 泰造
2. 発表標題 高Sn濃度GeSn/絶縁基板の低温固相成長 (~ 200) に与える下地変調効果
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉 森, 公 祥生, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi触媒によるn型Ge薄膜の低温形成
3. 学会等名 第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河原 聡, 劉 森, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換成長法によるGeSn/絶縁基板の低温形成
3. 学会等名 2020年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原 龍太郎, 千代園 修典, 佐道 泰造
2. 発表標題 Sn添加Ge極薄膜/絶縁基板の界面変調型固相成長に与えるa-Si キャップ効果
3. 学会等名 2020年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河原 聡, 劉 森, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換成長法によるn型GeSn低温形成
3. 学会等名 第26回電子デバイス界面テクノロジー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原 龍太郎, 千代園修典, 佐道 泰造
2. 発表標題 a-SiキャップによるSn添加Ge極薄膜/絶縁基板のキャリア移動度向上
3. 学会等名 第26回電子デバイス界面テクノロジー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千代園 修典, 原 龍太郎, 佐道 泰造
2. 発表標題 界面変調固相成長法で形成したSn添加多結晶Ge極薄膜/絶縁基板の電気特性に与えるアニール効果
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原 聡, 劉 森, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換法によるSn添加n型Geの低温形成
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 紘汰, 小杉 智浩, 佐道 泰造
2. 発表標題 高Sn濃度SiSn薄膜/絶縁膜の低温固相成長特性の膜厚依存性
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小杉 智浩, 岡本 紘汰, 佐道 泰造
2. 発表標題 絶縁基板上におけるSi薄膜の固相成長に与えるSn添加効果
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiangsheng Gong, Chang Xu, and Taizoh Sadoh
2. 発表標題 High Carrier Mobility Sn-Doped Ge Thin-Films (50 nm) on Insulator by Interface-Modulated Solid-Phase Crystallization at Low-Temperature
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiangsheng Gong, Sen Liu, Hongmiao Gao, and Taizoh Sadoh
2. 発表標題 Low-Temperature Bi-Induced Layer Exchange Crystallization for Formation of n-Type Ge on Insulator
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 公 祥生, 徐 暢, 佐道 泰造
2. 発表標題 非晶質シリコン層挿入によるスズ添加ゲルマニウム薄膜の特性向上
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 公 祥生, 徐 暢, 佐道 泰造
2. 発表標題 界面変調によるSn添加極薄Ge薄膜/絶縁基板のキャリア移動度向上
3. 学会等名 電子情報通信会九州支部 学生会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹 優太, 鶴田 太基, 公 祥生, 佐道 泰造
2. 発表標題 GeSn/絶縁基板の低温固相成長に与える下地変調効果
3. 学会等名 半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉 森, 公 祥生, 高 洪ミヨウ, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換法によるn型Ge/絶縁基板の低温成長
3. 学会等名 半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉 森, 公 祥生, 高 洪ミヨウ, 佐道 泰造
2. 発表標題 Bi誘起層交換成長法によるn型Ge/絶縁基板の低温形成
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千代園 修典, 公 祥生, 徐 暢, 佐道 泰造
2. 発表標題 界面変調型固相成長法で形成したSn添加多結晶Ge極薄膜/絶縁基板の粒界障壁解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小杉 智浩, 八木 和樹, 佐道 泰造
2. 発表標題 絶縁基板上におけるSiSn薄膜の低温固相成長特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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