様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　３０　年　　６　月　２０　日現在

機関番号：　１７１０２
研究種目：　挑戦的萌芽研究
研究期間：　2016～2017
課題番号：　１６Ｋ１４２３４

研究課題名（和文）直接遷移型GeSnを用いた高性能トンネル型トランジスタの創製

研究課題名（英文）Development for High-Performance Tunnel Transistors with Direct-Transition-Type GeSn

研究代表者
佐道　泰造（SADOH, Taizoh）

九州大学・システム情報科学研究院・准教授

研究者番号：２０２７４４９１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,700,000円

研究成果の概要（和文）：シリコン・トランジスタの微細化により集積回路の高速化・多機能化が実現されてきたが、微細化に伴うトランジスタのオフ時のリーク電流の増加が、集積回路の高性能化を阻む課題となっている。トランジスタのオフ時のリーク電流の削減のため、量子力学的なトンネル効果を用いて、ドレイン電流をオン/オフする新しいデバイスの創出が求められている。本研究では、トンネル型トランジスタの基盤技術の開発を目指し、絶縁膜上における直接遷移型半導体GeSnの結晶成長とドーピングプロセスを開発した。

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, leakage current of transistors under off-state is increased by scaling, which makes difficult to further improve the performance of the large-scale integrated circuits. To suppress the leakage current of transistors under off-state, a novel device structure, which turn on/off the drain current by the quantum mechanics tunneling effect, should be developed. In the present study, techniques for growth of direct-transition-type GeSn crystals on insulator and doping have been developed to realize the tunnel transistors.

研究分野：　工学

キーワード：　トランジスタ　結晶成長

１．研究開始当初の背景

シリコン(Si)トランジスタの微細化による集積回路の性能向上のアプローチが、Si の材料特性の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、新しい動作原理に基づくトランジスタの採用が有効と期待される。

その候補として、量子力学的トンネル効果によりドレイン電流をオン/オフするトンネル型トランジスタの研究が内外で活発化しているが、Si を用いた試作デバイスでは、オン電流値が低い課題がある。オン電流値の向上には、直接遷移型半導体を用い、トンネル確率を向上することが有利である。

近年注目されつつある新しい IV 族系ヘテロ材料(GeSn)は、直接遷移型バンド構造を有するため、GeSn を用いることで、トンネル型トランジスタのオン電流が向上すると期待される。

２．研究の目的

本研究では、直接遷移型バンド構造を有し、かつ従来の集積回路製造プロセスと整合性の良好な新材料(GeSn)の結晶成長およびドーピングのプロセスを開発することにより、高性能なトンネル型トランジスタの基盤技術を創成する。

３．研究の方法

Ge に高濃度 Sn(≧8%)を導入すると、バンド構造が直接遷移化する。しかし、Ge 中の Sn の熱平衡固溶度は約 1%と低い。そこで、急速溶融成長法を検討し、熱平衡固溶度を超える高濃度 Sn を有する GeSn の実現を目指す。

研究代表者は、GeSn と同族の SiGe の液相成長において、冷却速度の高速化により固化時の偏析現象が抑制され、均一組成を有する SiGe 結晶が形成できることを見いだしている。この現象は、融液の固化速度を高速化することで、異種原子の偏析が追随できなくなることに起因している。したがって、高 Sn 濃度の GeSn 融液の固化速度を上昇すれば、固化時の GeSn 偏析が抑制され、熱平衡固溶度を超える高 Sn 濃度を有する GeSn 結晶を実現できる可能性がある。そこで、GeSn の液相成長における固化速度を上昇して結晶成長を検討し、高 Sn 濃度 GeSn 結晶を形成するためのプロセスの指針を明らかにする。

さらに、高性能なトランジスタ動作の実現に必要となる寄生抵抗の低いソース/ドレインの低温形成プロセスの検討も行う。

４．研究成果

高 Sn 濃度(≧10%)を有する GeSn の結晶成長プロセスを探索し、成長層中の置換 Sn 濃度に与える固化速度の効果を試料の熱処理条件の関数として検討した。その結果、GeSn の結晶成長速度と、熱平衡固溶度を超える置換位置 Sn 原子の格子間位置への移動反応の活性化エネルギーには差があることを明らかにし、熱処理条件を適正化することで、熱平衡固溶度を超える高濃度(≧12%)の置換位置 Sn 原子を Ge 結晶中に導入することに成功した。

さらに、寄生抵抗の低いソース/ドレインの低温形成プロセスとして、ドーパント不純物元素(III 族元素、V 族元素)を触媒として用いる低温成長プロセスを検討した。特に、V 族元素の Sb を用いた新しい触媒成長法を開発し、触媒成長法による n 型領域の低温形成を実現した。

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 14 件）

①“Novel growth techniques of group-IV based semiconductors on insulator for next-generation electronics”
M. Miyao and T. Sadoh
Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, pp. 05DA06-1-14 (2017) (査読有)
https://doi.org/10.7567/JJAP.56.05DA06

② “Low-temperature (<200□C) solid-phase crystallization of high substitutional Sn concentration (~10%) GeSn on insulator enhanced by weak laser irradiation”
K. Moto, T. Sugino, R. Matsumura, H. Ikenoue, M. Miyao, and T. Sadoh
AIP Advances 7, 075204-1-6 (2017) (査読有)
http://dx.doi.org/10.1063/1.4993220

③ “Large single-crystal Ge-on-insulator by thermally-assisted (~400°C) Si-seeded-pulse-laser annealing”
T. Sadoh, M. Kurosawa, A. Heya, N. Matsuo, and M. Miyao
Materials Science in Semiconductor Processing 70, 8-11 (2017) (査読有)
http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2016.10.033

④“ High Sn-concentration (~8%) GeSn by low-temperature (~150 °C) solid-phase epitaxy of a-GeSn/c-Ge”
T. Sadoh , A. Ooato, J.-H. Park, M. Miyao
Thin Solid Films Vol.602, pp.20–23 (2016) (査読有)
dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2015.09.069

⑤“Pulse number controlled laser annealing for GeSn on insulator structure with high substitutional Sn concentration”
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue and M. Miyao

Applied Physics Letters Vol.108, pp. 262105-1-5 (2016) (査読有)
dx.doi.org/10.1063/1.4955059

⑥"Cooling Rate Dependent High Substitutional Sn Concentration (>10%) in GeSn Crystals on Insulator by Pulsed Laser-Annealing"
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
ECS Transactions, Vol.75, No.10, pp. 109-113 (2016) (査読有)
10.1149/07510.0109ecst

⑦ "High carrier mobility of Sn-doped polycrystalline-Ge films on insulators by thickness- dependent low-temperature solid-phase crystallization"
T. Sadoh, Y. Kai, R. Matsumura, K. Moto, and M. Miyao
Applied Physics Letters Vol.109, pp.232106-1-5 (2016) (査読有)
dx.doi.org/10.1063/1.4971825

〔学会発表〕(計 63 件)
①"(Invited) Low-Temperature Crystallization of Group-IV Semiconductors on Insulator Using Catalysis"
T. Sadoh, M. Miyao, and I. Tsunoda
11th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (2018)

②"Low-Temperature Formation of n-Type Ge on Insulator by Sb-Induced Layer Exchange Crystallization"
H. Gao, M. Miyao, and T. Sadoh
11th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (2018)

③"Sb誘起層交換法によるn型Ge/絶縁膜の低温成長 ―極薄Ge下地層挿入効果―"
高 洪ミョウ, 宮尾 正信, 佐道 泰造
第65回応用物理学会 春季学術講演会 (2018)

④"Sn 添加 Ge/絶縁基板の固相成長に与える Si 下地層挿入効果:キャリア移動度の向上機構"
徐 暢, 高 洪ミョウ, 杉野 貴之, 宮尾 正信, 佐道 泰造
第65回応用物理学会 春季学術講演会 (2018)

⑤"弱レーザー照射による非晶質 GeSn/絶縁基板の固相成長の促進 ― 初期 Sn 濃度依存性 ―"
杉野 貴之, 茂藤 健太, 松村 亮, 宮尾 正信, 池上 浩, 佐道 泰造
第65回応用物理学会 春季学術講演会 (2018)

⑥ "Weak-Laser-Irradiation-Enhanced Solid-Phase Crystallization of GeSn-on-Insulator at Low-Temperature (180°C) - Thickness-Dependent High Substitutional-Sn-Concentration -"
T. Sugino, K. Moto, H. Ikenoue, M. Miyao, and T. Sadoh
17th International Workshop on Junction Technology 2017 (2017)

⑦"Formation of n-Type Ge on Insulator by Low-Temperature Sb-Induced Layer Exchange Crystallization"
H. Gao, R. Aoki, M. Sasaki, M. Miyao, and T. Sadoh
17th International Workshop on Junction Technology 2017 (2017)

⑧ "Low-Temperature Formation of n-Type Ge/Insulator by Sb-Induced Layer Exchange Crystallization"
H. Gao, R. Aoki, M. Sasaki, M. Miyao, and T. Sadoh
24th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (2017)

⑨ "Thickness-Dependent Substitutional-Sn-Concentration in GeSn-on-Insulator by Weak-Laser-Irradiation-Enhanced Solid-Phase Crystallization at Low-Temperature (180°C)"
T. Sugino, K. Moto, H. Ikenoue, M. Miyao, and T. Sadoh
24th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (2017)

⑩ "High Substitutional-Sn-Concentration GeSn-on-Insulator by Weak-Laser-Irradiation-Enhanced Solid-Phase Crystallization at Low-Temperature (~170°C)"
T. Sugino, K. Moto, R. Matsumura, H. Ikenoue, M. Miyao, and T. Sadoh
2017 International Conference on Solid-State Devices and Materials (2017)

⑪ "Low-Temperature Sb-Induced Layer Exchange Crystallization for Slef-Limiting Formation of n-Type Ge/Insulator"
H. Gao, R. Aoki, M. Miyao, and T. Sadoh
2017 International Conference on Solid-State Devices and Materials (2017)

⑫"レーザー照射した非晶質 GeSn/絶縁基板の低温固相成長"
茂藤健太, 杉野 貴之, 松村 亮, 佐道泰造, 池上 浩, 宮尾正信
第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017)

⑬"SiSn/絶縁基板の低温固相成長に与える膜厚効果"
八木 和樹, 高 洪ミョウ, 杉野 貴之, 宮尾 正信, 佐道 泰造
78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017)

⑭“（招待講演）触媒成長法を用いた IV 族半導体/絶縁膜の低温形成 ― 高性能フレキシブル・エレクトロニクスの創出を目指して―”
佐道泰造，宮尾正信，角田功
第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017)

⑮“膜厚変調型 Sb 誘起層交換法による n 型 Ge/絶縁膜の低温成長”
高 洪ミョウ, 青木 陸太, 宮尾 正信, 佐道泰造
第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017)

⑯“Sn 添加 Ge/絶縁基板の固相成長に与える Si 下地層挿入効果”
徐 暢, 高 洪ミョウ, 杉野 貴之, 宮尾 正信, 佐道 泰造
第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017)

⑰“弱レーザー照射による非晶質 GeSn/絶縁基板の固相成長の促進 ― 薄膜化による置換 Sn 濃度の向上 ―”
杉野 貴之，茂藤 健太，松村 亮，宮尾 正信，池上 浩，佐道 泰造
第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017)

⑱ “Non-Thermal Equilibrium Growth of Amorphous $Ge_{1-x}Sn_x$ (0<x<0.2) / Insulator Structures by Pulsed Laser-Annealing”
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
8th International SiGe Technology and Device Meeting (2016)

⑲ “Liquid Phase Growth of Composition-Controlled Large-Grain Si_xGe_{1-x} (0<x<0.2) on Insulating Substrates”
R. Matsumura, T. Sadoh, and M. Miyao
8th International SiGe Technology and Device Meeting (2016)

⑳“Pulsed Laser Annealing for Supersaturated Substitutional Sn Atoms in GeSn Thin-Films on Insulator”
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials (2016)

㉑ “Orientation Controlled Artificial Nano-Crystals for Hybrid-Formation of (111), (110), and (100) Germanium-on-Insulator Structures”
M. Miyao, M. Kurosawa, and T. Sadoh
XIII International Conference on Nanostructured Materials (2016)

㉒ “Thickness-Controlled Low-Temperature (~380°C) Solid-Phase Crystallization of Sn-Doped Poly-Ge/Insulator for High Carrier Mobility (~320 cm^2/Vs)”
K. Moto, T. Sadoh, Y. Kai, R. Matsumura, and M. Miyao
International Conference on Solid State Devices and Materials 2016 (2016)

㉓ “Thermally-Stable High Sn Concentration (~9%) GeSn on Insulator by Ultra-Low Temperature (~180°C) Solid-Phase Crystallization Triggered by Laser-Anneal Seeding”
R. Matsumura, K. Moto, Y. Kai, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
International Conference on Solid State Devices and Materials 2016 (SSDM)

㉔ “(Invited) Low-Temperature Growth of Orientation-Controlled Large-Grain Ge-Rich SiGe on Insulator at Controlled-Position for Flexible Electronics”
T. Sadoh, R. Aoki, T. Tanaka, J. H. Park, and M. Miyao
Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (2016)

㉕“Cooling Rate Dependent High Substitutional Sn Concentration (>10%) in GeSn Crystals on Insulator by Pulsed Laser-Annealing”
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (2016)

㉖“High Carrier Mobility (~320 cm^2/Vs) of Sn-Doped Poly-Ge on Insulator by Low-Temperature Solid-Phase Crystallization”
T. Sadoh, Y. Kai, K. Moto, R. Matsumura, and M. Miyao
Materials Research Society, 2016 MRS Fall Meeting & Exhibit (2016)

㉗“Pulsed Laser Annealing for Non-Thermal Equilibrium GeSn (Sn>10%) on Insulating Substrate”
K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
Materials Research Society, 2016 MRS Falll Meeting & Exhibit (2016)

㉘“非晶質 GeSn/絶縁基板の低温固相成長の促進ー レーザー照射による前駆体の変調ー”
茂藤健太，杉野貴之，佐道泰造，池上 浩，宮尾正信
第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016)

㉙“Sb 誘起層交換法による n 型 Ge/絶縁膜の低温成長”
高 洪ミョウ, 青木隆太, 佐々木雅也,
宮尾正信, <u>佐道泰造</u>
第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016)

６．研究組織
(1)研究代表者
佐道泰造　(SADOH, Taizoh)
九州大学・システム情報科学研究院・准教授
研究者番号：２０２７４４９１