

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630133

研究課題名(和文) Geバンド構造の直接遷移化による超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 Band Structure of Ge

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科(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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：集積回路(LSI)の省電力化に向け、高性能なトンネル型トランジスタが要求されている。しかし、従来のSiを用いたトンネル型トランジスタでは、オフ電流が低減できるものの、オン電流が小さいとの課題がある。本研究では、トンネル型トランジスタの高性能化を目指し、絶縁膜上のGe結晶薄膜のバンド構造を直接遷移型化するための歪み導入プロセスを創出するとともに、Ge結晶薄膜への高濃度ドーピング技術を開発した。これにより、LSIプロセスとの整合性が良好で、高いオン電流を有する高性能なトンネル型トランジスタの基盤技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：High-performance tunnel transistors are required to realize large-scale integrated circuits (LSIs) with low-power consumption. However, on-current of the conventional Si tunnel transistors is low, though off-current can be decreased. In the present study, to achieve high-performance tunnel transistors, techniques for strain-introduction have been developed to obtain direct-transition band structures of Ge. In addition, a technique for high-concentration doping into Ge has been investigated. These techniques will facilitate formation of high-performance tunnel transistors with high on-current.

研究分野：工学

キーワード：電子・電気材料 半導体 Si系ヘテロ材料

1. 研究開始当初の背景

集積回路(LSI)の性能向上は、LSIを構成するSiトランジスタの微細化(スケーリング)により推進されてきた。しかし、スケーリングによる性能向上のアプローチが物理的限界を迎えている。LSI性能の更なる向上には、新しい動作原理を採用し、トランジスタを高性能化する事が必須である。

近年、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。高濃度ドーピングして縮退したp⁺/n⁺型のソース/ドレインと、真性(i型)チャンネルで構成され、ゲート電圧印加によりチャンネル領域をn⁺化して、ソースからドレインへの電子のトンネル伝導を誘起する。従来型トランジスタに比べ、リーク電流の遮断性能が向上する。小さなゲート電圧振幅でも十分なオン/オフ比を確保できるので、駆動電圧の低減が可能となり、消費電力が極めて削減できると期待されている。現在までにSiを用いたデバイス試作が報告されているが、リーク電流が激減できるものの、間接遷移型バンド構造に起因し電子のトンネル確率が低い為、オン電流が低い課題が判明している。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必須である。

Geに伸張歪み(約1.5%)を加えると、バンド構造が直接遷移型化することが理論予測されている。提案者は、これに着目し、直接遷移化した歪みGeを用いれば、オン電流値が飛躍的に向上すると着想した。さらにGeは、Siより狭いバンドギャップと軽い電子有効質量を有することも、トンネル確率向上に向けたメリットとなる。従って、歪みによるバンドエンジニアリングを用いて直接遷移型Geを創製すれば、高性能なトンネル型トランジスタが実現すると期待される。

2. 研究の目的

上記背景のもと、本研究では、高性能トンネル型トランジスタの創出を目指し、以下の研究を行った。

(1) Ge結晶薄膜に格子歪みを導入するプロセスを開発すること。

(2) 高性能なデバイス動作を実現するため、Geへの高濃度不純物ドーピングプロセスを開発すること。

3. 研究の方法

本研究では、(1)Ge結晶薄膜への格子歪み導入プロセスの開発、および(2)Geへの高濃度不純物導入プロセスの開発を行う。これにより、高性能なトンネル型トランジスタの基盤技術を構築する。

(1) Geへの格子歪み導入プロセスの開発

Ge結晶は間接遷移型バンド構造を有するが、格子歪み(約1.5%)を導入すると、バン

ド構造が直接遷移型化することが理論予測されている。そこで、結晶成長プロセスにおける熱歪みを用いた格子歪みの導入手法を検討し、Geに格子歪みを導入するためのプロセス指針を解明する。

(2) 高濃度不純物ドーピングプロセスの開発

歪みGeを用いてトンネル型トランジスタを作製するには、電極の高濃度不純物ドーピングが必須である。そこで、熱平衡固溶度を超える高濃度不純物導入を目指し、低温固相成長法を用いた不純物添加を検討し、Geへの高濃度不純物ドーピングプロセスを開発する。

4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

(1) Geへの格子歪み導入プロセスの開発

溶融法で成長した絶縁膜上のGe薄膜の格子歪みをラマン散乱分光法を用いて評価し、格子歪みに与える試料構造の影響を検討した。その結果、Geと下地絶縁膜や基板との熱膨張係数の差により、Ge結晶に格子歪みが導入されることを明らかにした。さらに、Ge上部の被覆層を除去することで、Ge中の格子歪みが増加することを明らかにした。

(2) 高濃度不純物ドーピングプロセスの開発

低温固相成長法による不純物ドーピングを検討した。その結果、熱処理条件を適正化することで、不純物の高濃度ドーピング(～10²⁰cm⁻³)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20件)

①“High carrier mobility in orientation-controlled large-grain (≥50 μm) Ge directly formed on flexible plastic by nucleation-controlled gold-induced-crystallization”

J.-H. Park, K. Kasahara, K. Hamaya, M. Miyao, and T. Sadoh

Applied Physics Letters, Vol.104, pp.252110-1-4, (2014) (査読有)

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4885716>

②“Comprehensive study of Al-induced layer-exchange growth for orientation-controlled Si crystals on SiO₂ substrates”

M. Kurosawa, T. Sadoh, and M. Miyao

Journal of Applied Physics Vol.116, pp.173510-1-8 (2014) (査読有)

[doi.org/10.1063/1.4901262](http://dx.doi.org/10.1063/1.4901262)

③“High quality, giant crystalline-Ge stripes on insulating substrate by rapid-thermal-annealing

of Sn-doped amorphous-Ge in solid-liquid coexisting region”

R. Matsumura, Y. Kai, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

AIP Advances Vol.5, pp.067112-1-7 (2015) (査読有)

doi: 10.1063/1.4922266

④“Ultra-low temperature (≤ 300 °C) growth of Ge-rich SiGe by solid-liquid-coexisting annealing of -GeSn/c-Si structures”

T. Sadoh, H. Chikita, R. Matsumura, and M. Miyao

Journal of Applied Physics Vol. 118, pp.095707-1-6 (2015) (査読有)

doi.org/10.1063/1.4929878

⑤“Seeding Effects of Sn/a-Ge Island Structures for Low-Temperature Lateral-Growth of a-GeSn on Insulator”

Y. Kai, H. Chikita, R. Matsumura, T. Sadoh, and M. Miyao

ECS Journal of Solid State Science and Technology Vol.5, No.2, pp.P76-79 (2015) (査読有)

DOI: 10.1149/2.0241602jss

[学会発表] (計 8 6 件)

①“Formation of Large Grain Ge single crystal on Insulating substrate by Liquid-Solid Coexisting Annealing of a-Ge(Sn)”

R. Matsumura, Y. Kai, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

The Electrochemical Society, 225th ECS Meeting, Orlando (May 11-16, 2014)

② “(Invited) Ultralow-Temperature Catalyst-Induced-Crystallization of SiGe on Plastic for Flexible Electronics”

T. Sadoh, J.-H. Park, M. Kurosawa, and M. Miyao

International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, Singapore (June 2-4, 2014)

③“Sn-enhanced low-temperature crystallization of a-GeSn/c-Si Stacked Structure for high-quality SiGe on Si platform”

H. Chikita, R. Matsumura, Y. Kinoshita, A. Ooato, T. Sadoh, and M. Miyao

International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, Singapore (June 2-4, 2014)

④“Self-organized-seeding process for melt-back lateral-growth of group-IV mixed-crystal on insulator”

R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, Singapore (June 2-4, 2014)

⑤“Formation of Quasi-Single-Crystal Ge on Plastic by Nucleation-Controlled Au-Induced Layer-Exchange Growth for Flexible Electronics”

Jong-Hyeok Park, M. Miyao, and T. Sadoh

International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices, Kyoto (July 2-4, 2014)

⑥“Formation of Large Grain Ge on Insulator Structure by Liquid-Solid Coexisting Annealing of a-GeSn”

Y. Kai, R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia, Fukuoka (Aug. 24-30, 2014)

⑦“Melting-Sn Induced Seeding-Processing for Low-Temperature Lateral-Crystallization of a-GeSn on Insulating Substrate”

H. Chikita, R. Matsumura, Y. Kai, T. Sadoh, and M. Miyao

International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba (Sep. 8-11, 2014)

⑧ “Formation of Large-Grain Ge-Based Group-IV Crystals on Insulator by Seedless Rapid-Melting Growth in Solid-Liquid-Coexisting Temperature Region”

R. Matsumura, Y. Kai, H.Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba (Sep. 8-11, 2014)

⑨“Orientation-Controlled Large-Grain SiGe on Flexible Substrate by Nucleation-Controlled Gold-Induced Crystallization”

J.-H. Park, M. Miyao, and T. Sadoh

International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba (Sep. 8-11, 2014)

⑩ “Low-Temperature Gold-Induced Crystallization of Orientation Controlled SiGe on Plastic for Flexible Electronics”

T. Sadoh and M. Miyao

The International Conference on Thin Films, Dubrovnik (Oct. 13-16, 2014)

⑪ “(Invited) Segregation-Controlled Rapid-Melting Growth for Large-Grain and Uniform -Composition SiGe on Insulator”

T. Sadoh, Y. Kai, H. Chikita, R. Matsumura, and M. Miyao

JSPS International Core-to-Core Program Workshop on Atomically Controlled Processing for Ultra-large Scale Integration, Leuven (Nov. 13-14, 2014)

⑫ “Low-Temperature Crystallization of a-GeSn on Insulating Films for Next-Generation Flexible Electronics(1) Characteristics of Solid Phase Crystallization”

R. Matsumura, H. Chikita, M. Sasaki, T. Sadoh, and M. Miyao

International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov. 20-21, 2014)

⑬ “Low Temperature Crystallization of a-GeSn on Insulating Films for Next Generation Flexible Electronics (2) Positioning Control of Nucleation”

H. Chikita, R. Matsumura, Y. Kai, T. Sadoh, and M. Miyao

International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov. 20-21, 2014)

⑭ “Large-Grain Ge-on-Insulator Structure by Rapid-Melting Growth of a-GeSn”

Y. Kai, R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov. 20-21, 2014)

⑮ “Ultra-Low-Temperature Crystallization of a-GeSn on Insulator for Flexible Electronics”

H. Chikita, R. Matsumura, Y. Kai, T. Sadoh, and M. Miyao

International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai (Jan. 29-30, 2015)

⑯ “Composition-controlled SiGe crystal on insulator by rapid-melting growth -Analysis and control of SiGe segregation-“

R. Matsumura, T. Sadoh, and M. Miyao

International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai (Jan. 29-30, 2015)

⑰ “Low temperature solid phase crystallization of GeSn on insulator for flexible electronics”

R. Matsumura, M. Sasaki, H. Chikita, M. Miyao, and T. Sadoh

International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Fukuoka (May 12-13, 2015)

⑱ “Sn-precipitation-suppressed solid-phase epitaxy of GeSn on Ge at low-temperatures (~150°C)”

T. Sadoh, A. Ooato, J. -H. Park, and M. Miyao,

International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Fukuoka (May 12-13, 2015)

⑲ “Orientation-controlled large-grain SiGe on insulator by gold-induced crystallization at low-temperature for flexible opto-electronics”

T. Sadoh, J.-H. Park, R. Aoki, and M. Miyao
International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Fukuoka (May 12-13, 2015)

⑳ “Thickness dependent solid phase crystallization of amorphous GeSn on insulating substrates”

R. Matsumura, M. Sasaki, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao

International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal (May 17-22, 2015)

㉑ “Low Temperature (<200°C) position controlled Solid Phase Crystallization of GeSn combined with Laser Anneal Seeding”

R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao

International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal (May 17-22, 2015)

㉒ “Melting Sn Induced Low-Temperature Seeding for Position Controlled Giant GeSn Crystal Arrays”

Y. Kai, H. Chikita, R. Matsumura, T. Sadoh, and M. Miyao

International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal (May 17-22, 2015)

㉓ “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, and M. Miyao

International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal (May 17-22, 2015)

㉔ “Low-Temperature (~150°C) Solid-Phase Epitaxy of a-GeSn/c-Ge for High Non-Equilibrium Substitutional Sn-Concentration GeSn”

T. Sadoh, A. Ooato, J.-H. Park, and M. Miyao

International Conference on Solid State Devices and Materials, Sapporo (Sep. 27-30, 2015)

㉕ “(Invited) Gold-induced low-temperature ($\leq 300^\circ\text{C}$) growth of quasi-single crystal SiGe on insulator for advanced flexible electronics”

T. Sadoh, J.-H. Park, R. Aoki, and M. Miyao
ECS Meeting, Phoenix (Oct. 11-16, 2015)

㉖ “Non-thermal equilibrium formation of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.2$) crystals on insulator by pulsed laser annealing”

K. Moto, R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao

ECS Meeting, Phoenix (Oct. 11-16, 2015)

㉗ “Ultra-low temperature (~180°C) solid-phase crystallization of GeSn on insulator triggered by laser-anneal seeding”

R. Matsumura, K. Moto, Y. Kai, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
ECS Meeting, Phoenix (Oct. 11-16, 2015)

⑳ “Effects of Diffusion-Barrier-Patterning on Formation of Position-Controlled Ge-on-Insulator by Gold-Induced Crystallization at Low Temperatures ($\leq 300^\circ\text{C}$)”

R. Aoki, J.-H. Park, M. Miyao, and T. Sadoh
International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov.19-20, 2015)

㉑ “Analysis and control of Si segregation phenomena to achieve uniform-SiGe crystals on insulator by rapid-melting growth”

R. Matsumura, T. Sadoh, and M. Miyao
International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov.19-20, 2015)

㉒ “Laser-Annealing-Induced Crystallization of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.2$) on Insulating Substrate”

K. Moto, R. Matsumura, T. Sadoh, H. Ikenoue, and M. Miyao
International Electron Devices and Materials Symposium, Taiwan (Nov.19-20, 2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐道 泰造 (SADOH, Taizoh)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・准教授

研究者番号：20274491