

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360138

研究課題名(和文) 絶縁膜上における歪み単結晶 Ge の高品位形成と超高速トランジスタへの応用

研究課題名(英文) High-Quality Formation of Strained-Ge-on-Insulator for Ultrahigh-Speed Transistor Application

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) 15,000,000 円、(間接経費) 4,500,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高速トランジスタを集積回路に混載する基盤技術の創成を目指し、絶縁膜上の指定された位置に単結晶 Ge を高品位形成して高キャリア移動度を発現することを目的として研究を行った。具体的には、SiGe ミキシング誘起溶融成長法による高品質 GOI の形成、応力印加膜を用いた歪み制御、不純物ドーピング制御等を検討し、超高速 GOI 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)：To achieve ultrahigh-speed transistors, which can be merged with large-scale integrated circuits (LSIs), techniques for formation of high-quality strained Ge on insulator has been developed. Here, SiGe-mixing-triggered rapid-melting growth, insulating-film-induced local-strain introduction, and impurity-doping processes are investigated. These techniques facilitate formation of ultrahigh-speed Ge-on-insulator transistors for advanced LSIs.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子・電気材料工学

キーワード：集積回路 結晶成長 トランジスタ 半導体 溶融成長

## 1. 研究開始当初の背景

Si 集積回路(LSI)は、トランジスタの微細化(スケーリング)により高性能化(高速・低消費電力化)を達成してきたが、Si 材料の物性制約から物理的限界を迎えている。このため、次世代の高性能 LSI を実現するには、Si の物性値を遙かに凌駕する新材料を用いて、トランジスタのチャンネルを超高移動度化することが不可欠となる。

超高移動度チャンネルの候補として、我々は絶縁膜上に形成した単結晶 Ge(GOI: Ge-On-Insulator)に着目している。Ge の最大の魅力は、キャリア移動度が高いこと(Si の約 3 倍)に加え、伸張歪みを加えれば移動度がさらに増加すると理論予測されている点にある。しかし、LSI を構成する素子の全てが単結晶 Ge 上に構成されるとは考え難い。我々は、メモリなどの大半のデバイスを Si トランジスタで構成し、超高速動作を必要とする一部のデバイスのみを Ge トランジスタで構成すべきと考えている。このハイブリッド構造 LSI を実現するには、Si 上の指定された領域に GOI 構造を形成する技術の創出が必須となる。

この考えの元、我々は、Si 表面の一部分を絶縁膜で覆い、その上に堆積した非晶質 Ge を急速溶融し、その固化過程を利用して Si 基板から横方向に単結晶成長する「種付け溶融成長法」を開発した。その結果、絶縁膜上に LSI チップサイズに匹敵する長距離(~1cm)に渡り Ge 単結晶を形成することが可能となった。

しかし、この溶融 GOI にも課題が残されている。最大のポイントは、結晶面が(100)の場合は、どのような成長方向でも高い結晶性を有する GOI が形成されるが、(100)以外の面方位[(111),(110)]では、成長方向が<110>よりずれると、成長に伴って面方位が回転することである。また、キャリア移動度のさらなる向上には、GOI に伸張歪みを導入するプロセスの開発が必須となる。さらに、GOI には、空孔などの点欠陥に起因するアクセプタ準位により p 型伝導(正孔密度: 約  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ )を示すが、デバイス作製には、キャリア密度の制御が必須となる。

## 2. 研究の目的

上記背景の元、本研究では、我々の独自シーズ(種付け溶融 GOI 成長技術)をベースとし、高性能 GOI トランジスタを Si-LSI に混載するのに必要となる以下の基本技術を開発した。

- (1)「溶融 GOI 成長法」を高度化し、すべての面方位で、結晶面方位の制御された高品質 GOI を実現すること。
- (2) キャリア移動度を向上するため、GOI 層へ伸張歪み導入する手法を開発すること。
- (3) GOI 層に不純物元素を添加し、キャリア密度を制御する手法を開発すること。

## 3. 研究の方法

本提案では、我々の独自技術(種付け溶融 GOI 形成技術)を基盤とし、(1)結晶面方位の制御、(2)GOI への伸張歪みの導入プロセスの開発、及び(3)キャリア密度の制御の研究開発を行う。これにより、高速 GOI トランジスタの基盤技術を確立する。

### (1)GOI 結晶面方位の制御

(100)面の Si シードから溶融成長した GOI は(100)面を維持し続ける。一方、(111)及び(110)面方位の Si シードから溶融成長すると、成長に伴って他の面方位に変化しやすい。(111)及び(110)シードからの成長では、成長フロントを構成する格子面間の結合強度が弱いので、結晶面方位の変化は、格子面間結合強度と面方位変化の起動力との競合で決まると考えられる。面方位変化の起動力は、試料構造やプロセス条件に依存すると考えられる。そこで、これらの因子が成長状態に与える影響を検討し、結晶方位安定化の指針を探索する。

### (2) GOI への伸張歪みの導入プロセスの開発

GOI 層への伸張歪みの導入を目的とし、SiN(H)からなるストレス印加層を用いて伸張歪みを導入するプロセスを検討する。SiN(H)膜により発生する歪みは、SiN(H)膜の原子ネットワーク構造(結合状態)で決定される。すなわち、膜中に存在する H 濃度とその結合状態に大きく依存する。本実験においては、化学気相堆積法を用いて、SiN(H)膜を堆積した後、Si-H や N-H 結合のエネルギーと共鳴する紫外線を照射する。紫外線の波長と強度、および基板温度をパラメータとすることで、H 原子を選択的に除去し、SiN(H)の原子ネットワーク構造を変調する条件を確立する。これにより、伸張歪みを導入するプロセスを構築する。

### (3)キャリア密度の制御

トランジスタの作製には、GOI 中のキャリア密度の制御が必須である。溶融成長法で形成した GOI 層は、点欠陥が形成するアクセプタ準位に起因して、p 型伝導を示す。そこで、族不純物を導入した非晶質 Ge 薄膜を用いて溶融成長を試行し、GOI 中のアクセプタ型点欠陥を補償することで、GOI 中のキャリア密度を制御する手法を検討する。

## 4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

### (1)GOI 結晶面方位の制御

細線状の非晶質 Ge 薄膜を用い、成長状態に与える細線形状(幅,膜厚)の影響を系統的に調べたところ、細線の狭小化により、結晶方位が安定化することを見いだした。これに

より、(111)及び(110)において、どの成長方向でも、結晶方位の制御された高品質 G0I の形成が可能となった。デバイス設計の自由度を格段に向上する結果である。

(2) G0I への伸張歪みの導入プロセスの開発  
ストレス印加膜 [SiN(H)] への紫外線照射の条件を適正化し、高い伸張歪みを導入するプロセス指針を明らかにした。さらに、伸張歪みの増強量は、SiN(H) 中の水素原子の脱離量と高い相関を示し、ストレス印加膜中の原子結合ネットワークの膨張により、伸張歪みが増強することが明らかとなった。

### (3) キャリヤ密度の制御

族不純物を導入した非晶質 Ge 膜の溶融成長を試行し、不純物導入が成長層の電気特性に与える効果を検討し、G0I 中のキャリヤ密度を制御する指針を明らかにした。成長層の結晶性を電子顕微鏡法で評価し、不純物を導入した G0I 層は高い結晶性を有することを明らかにした。高速 G0I トランジスタの実現に向けた基盤技術の確立である。

## 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 25 件)

R. Matsumura, Mohammad Anisuzzaman, H. Yokoyama, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Laterally-Graded Doping into Ge-on-Insulator by Combination of Ion-Implantation and Rapid-Melting Growth”,  
ECS Solid State Letters, 査読有, Vol.2, No.7, pp. P58-P60 (2013)  
DOI:10.1149/2.002307ssl

M. Anisuzzaman, S. Muta, M. Takahashi, Abdul Manaf Hashim, and T. Sadoh,  
“Orientation-Control of Ge-Stripes-on-Insulator by Narrowing in Rapid-Melting Growth from Si(111) Seed”,  
ECS Solid State Letters, 査読有, Vol.2, No.9, pp. P76-P78 (2013)  
DOI:10.1149/2.008309ssl

M. Kurosawa, K. Toko, T. Sadoh, I. Mizushima, and M. Miyao,  
“Atomically-Coherent-Coalescence of Two Growth-Fronts in Ge Stripes on Insulator by Rapid-Melting Lateral-Crystallization”,  
ECS Journal of Solid State Science and Technology, 査読有, Vol.2, No.3, pp54-57 (2013)  
doi: 10.1149/2.005303jss

M. Anisuzzaman and T. Sadoh,  
“Effects of dose on activation characteristics of P in Ge”,  
Thin Solid Films, 査読有, Vol.520, pp3255-3258, (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.076>

T. Sadoh, M. Kurosawa, A. Heya, N. Matsuo, M. Miyao,  
“Enhancement of SiN-induced compressive and tensile strains in Si free-standing microstructures by modulation of SiN network structures”,  
Thin Solid Films, 査読有, Vol.520, pp3276-3278, (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.088>

H. Yokoyama, K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Nano-lithography free formation of high density Ge-on-insulator network for epitaxial template”,  
Applied Physics Letters, 査読有, Vol.100, 092111-1-4 (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3691258>

M. Kurosawa, N. Kawabata, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Hybrid-orientation Ge-on-insulator structures on (100) Si platform by Si micro-seed formation combined with rapid-melting growth”,  
Applied Physics Letters, 査読有, Vol.100, 172107-1-5 (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4705733>

Abdul Manaf Hashim, Mohamad Anisuzzaman, S. Muta, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Epitaxial-Template Structure Utilizing Ge-on-Insulator Stripe Arrays with Nanospacing for Advanced Heterogeneous Integration on Si Platform”,  
Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.51, 06FF04-1-5 (2012)  
doi:10.1143/JJAP.51.06FF04

I. Mizushima, K. Toko, Y. Ohta, T. Sakane, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Mesh-shape-and-size controlled rapid-melting growth for the formation of single-crystalline (100),(110) and (111) Ge networks on insulators”,  
Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 98, No.182107-1-3 (2011)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3586259>

T. Sakane, K. Toko, T. Tanaka, T. Sadoh,  
M. Miyao,  
“Strained single-crystal GOI (Ge on  
Insulator) arrays by rapid-melting  
growth from Si (111) micro-seeds”,  
Solid-State Electronics, 査読有,  
Vol.60, pp22-25 (2011)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2011.01.037>

Y. Ohta, T. Tanaka, K. Toko, T. Sadoh,  
M. Miyao,  
“Growth-direction-dependent  
characteristics of Ge-on-insulator by  
Si - Ge mixing triggered melting  
growth”,  
Solid-State Electronics, 査読有,  
Vol.60, pp18-21 (2011)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2011.01.039>

M. Kurosawa, N. Kawabat, R. Kato, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Lateral-liquid phase epitaxy of (101)  
Ge-on-insulator from Si template by  
metal-induced crystallization”,  
ECS Transactions, The Electrochemical  
Society, 査読有, Vol.35, No.5, pp 51-54  
(2011)  
doi: 10.1149/1.3570776

H. Yokoyama, Y. Ohta, K. Toko, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Growth-Direction Dependent  
Rapid-Melting-Growth of  
Ge-on-Insulator (GOI) and its  
Application to Ge Mesh-Growth”,  
ECS Transactions, The Electrochemical  
Society, 査読有, Vol.35, No.5, pp 55-60  
(2011)  
doi: 10.1149/1.3570777

K. Toko, Y. Ohta, T. Tanaka, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Chip-size formation of high-mobility  
Ge strips on SiN films by cooling rate  
controlled rapid-melting growth”,  
Applied Physics Letters, 査読有, Vol.99,  
032103-1-3 (2011)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3611904>

[学会発表](計61件)

T. Sadoh and M. Miyao,  
“(招待講演) Recent Progress of Rapid-  
Melting-Growth for Laterally-Graded,  
Ge-Based Mixed-Crystals on Insulator”,  
6th International WorkShop on New Group  
IV Semiconductor Nanoelectronics and  
JSPS Core-to Core Program Joint Seminar,  
Sendai (Feb. 22-23, 2013)

M. Miyao, T. Sadoh, and K. Hamaya,  
“(招待講演) Advanced Hetero-epitaxial  
Growth based on SiGe for Multi-  
functional Devices”,  
15th International Conference on Thin  
Films 2011, ICTF-15, 11/8, Kyoto, (Nov.  
8-11, 2011)

## 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

### (2) 研究分担者

宮尾 正信 (MIYAO, Masanobu)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・特任教授  
研究者番号: 60315132