

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656209

研究課題名(和文)多機能ハイブリッド集積回路を可能とする異種材料混載化技術の創出

研究課題名(英文)Development of Hetero-Materials Integration Technology for Multi-Functional Hybrid Large-Scale Integrated Circuits

研究代表者

宮尾 正信(Miyao, Masanobu)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・特任教授)

研究者番号：60315132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電子・光・スピン機能を混載した多機能ハイブリッド集積回路の基盤となるテンプレート技術の構築を目指し、絶縁膜上における $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ( $0 < x < 1$ )単結晶の形成プロセスを創出した。まず、 $\text{SiGe}$ の融点が組成に依存することを利用した逐次溶融成長法を開発し、絶縁膜上に組成の異なる $\text{SiGe}$ テンプレートの多段構造を実現した。次に、 $\text{SiGe}$ 偏析現象を制御し、平面内で $\text{SiGe}$ 組成が傾斜的に変化するテンプレートを実現した。 $\text{Si}$ プラットフォーム上に於ける新機能材料混載の基盤技術として期待される成果である。

研究成果の概要(英文)：To achieve hybrid-integration of multi-functional devices on Si platform, formation techniques of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ( $x:0-1$ ) on insulator have been investigated. First, the successive rapid-melting-growth technique has been developed, by utilizing the Ge fraction-dependent melting point of  $\text{SiGe}$ . This enables formation of multi-layered  $\text{SiGe}$  templates with different Ge fractions. Second,  $\text{SiGe}$  template with laterally-graded Ge fraction is achieved by controlling Si segregation during rapid-melting growth. These techniques facilitate heterogeneous integration of new functional devices on Si platform.

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：電子デバイス・機器 集積回路 結晶成長

### 1. 研究開始当初の背景

Si 基板をプラットフォームとした集積回路(LSI)は、トランジスタの微細化(スケーリング)を指導原理とし高性能化を進め、IT 産業を牽引してきた。しかし、スケーリング原理にも限界が見え始め、移動度の高い電子材料(SiGe, 歪 Ge 等)を LSI に導入し、トランジスタの動作速度を高速化する新しいアプローチ(材料革命)の研究開発が試みられている。

### 2. 研究の目的

我々は、「この材料革命を極限化し、Si プラットフォームに光機能を有する半導体(GaAs 等)や、スピン機能を有する強磁性薄膜(FesSi)を混載し、LSI を多機能化する事がスケーリング限界をブレイクスルーする鍵」と考えている。この実現には、新機能を有する結晶群を Si 基板上に混載する結晶成長技術の創出が必須となる。しかし、Si 基板(0.543nm)と格子定数の異なる新機能薄膜(GaAs:0.565nm 他)の結晶成長には、格子定数差の壁を克服する必要がある。

本研究では  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (0 < X < 1) 混晶が、混晶比(X)の制御で格子定数を変調(0.543nm ~ 0.565nm)出来る事、及び多くの新機能材料の格子定数がこの範囲に含まれる事に着目し、Si 上に絶縁膜を介して SiGe 混晶を成長し、それを新機能材料の結晶成長テンプレートとして活用する手法を創成することを目的とする。新機能材料にユニバーサルなテンプレートを創出する事により、新材料の結晶成長が格段に容易化され、異種機能混載型 LSI の早期実現が可能となる。

本研究の具体的目標は、以下である。

(1) Si 上に絶縁膜を介して、単結晶  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (0 < X < 1) を多段に形成し、絶縁分離型多段構造のユニバーサル・テンプレートを実現すること。

(2) Si 上に絶縁膜を介して、混晶比が傾斜型に変化する単結晶  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (0 < X < 1) を形成し、二次元組成傾斜構造のユニバーサル・テンプレートを実現すること。

### 3. 研究の方法

本研究では、我々の独自技術(SiGe ミキシング誘起溶融法による Ge 成長)をシーズとし、絶縁分離型多段テンプレートを実現する。その後、シーズ技術を SiGe 偏析成長に発展し、二次元組成傾斜テンプレートを実現する。

#### (1) 絶縁分離型多段テンプレートの形成

絶縁膜を介した多段テンプレートを実現するには、初段のテンプレートとなる SiGe 層を絶縁膜上に形成する必要がある。そこで、溶融成長法を用いて単結晶 SiGe 層を絶縁膜上に溶融成長した後、上段に、絶縁膜を介して、下段より Ge 濃度の高い単結晶 SiGe を溶

融成長する。SiGe の融点は、Ge 濃度の上昇に伴い低温化するので、下段の SiGe 層に損傷を与えることなく、上段の SiGe を形成することが可能である。

#### (2) 二次元組成傾斜テンプレートの形成

平面内で SiGe 組成が傾斜的に変化するテンプレートを実現する鍵が「SiGe 偏析現象の制御」である。SiGe の溶融成長において、固化速度が十分に遅ければ、固液界面で Ge が溶融領域へと偏析し、Ge 組成が傾斜分布するはずである。すなわち、均一組成の非晶質 SiGe 薄膜を溶融成長することで、Ge 濃度分布が傾斜型に変化し、格子定数が横方向に変化したテンプレートが形成される。冷却速度を速めると、Ge 濃度分布は熱平衡での偏析分布とは乖離し、種々の傾斜分布が得られるはずである。本研究では、冷却速度を広範囲で変調して溶融成長を試行する。溶融成長後の Ge 分布を顕微ラマン分光法で実測し、偏析と冷却速度の相関を調べ、新機能材料を混載するのに最も適した傾斜組成を有するテンプレートを実現する。

### 4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

#### (1) 絶縁分離型多段テンプレートの形成

絶縁膜を介した多段テンプレートを実現するには、まず、初段のテンプレートとなる SiGe 層を絶縁膜上に形成する必要がある。そこで、溶融法を用いて、絶縁膜上に  $\text{Si}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}$  混晶を 1200 で成長した。次に、この SiGe 層の上に、絶縁膜を介して、Ge 層を 980 で成長した。電子顕微鏡法による詳細解析を行い、形成層は高い結晶性を有することを明らかにした。絶縁分離型多段テンプレートの実現である。

#### (2) 二次元組成傾斜テンプレートの形成

平面内で SiGe 組成が傾斜的に変化するテンプレートを実現する鍵が「SiGe 偏析現象の制御」である。偏析の様態は、成長速度に依存して変化する。そこで、急速加熱ランプアニール等を用いて冷却速度を広範囲(10 ~ 19 /sec)に変調して偏析のダイナミクスを制御する手法を検討した。溶融成長後の Ge 分布をラマン分光法で実測し、冷却速度が偏析現象に与える影響を定量的に解明した。その結果、冷却速度の変調による SiGe 組成分布の制御が実現した。すなわち、二次元組成傾斜テンプレートの創出である。

### 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 8 件)

R. Matsumura, R. Kato, Y. Tojo, M.

Kurosawa, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Giant-Lateral-Growth of SiGe Stripes  
on Insulating-Substrate by  
Self-Organized-Seeding and  
Rapid-Melting-Growth in Solid-Liquid  
Coexisting Region”,  
ECS Solid State Letters, 査読有, Vol.3,  
No.5 pp.P61-P64 (2014)  
DOI: 10.1149/2.003405ssl

R. Matsumura, Y. Tojo, M. Kurosawa, T. Sadoh, M. Miyao,  
“Dynamic analysis of rapid-melting  
growth using SiGe on insulator”,  
Thin Solid Films, 査読有, Vol.557,  
pp.125-158 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.129>

H. Chikita, R. Matsumura, Y. Tojo, H. Yokoyama, T. Sadoh, M. Miyao,  
“In-depth analysis of high-quality  
Ge-on-insulator structure formed by  
rapid-melting growth”,  
Thin Solid Films, 査読有, Vol.557,  
pp.139-142 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.035>

Y. Tojo, R. Matsumura, H. Yokoyama, M. Kurosawa, K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“High-quality formation of multiply  
stacked SiGe-on-insulator structures by  
temperature-modulated successive  
rapid-melting-growth”,  
Applied Physics Letters, 査読有,  
Vol.102, 092102-1-4 (2013)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4794409>

R. Matsumura, Y Tojo, M Kurosawa, T. Sadoh, I. Mizushima, and M. Miyao,  
“Growth-rate-dependent laterally  
graded SiGe profiles on insulator by  
cooling-rate controlled  
rapid-melting-growth”,  
Applied Physics Letters, 査読有,  
Vol.101, 241904-1-5, (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4769998>

M. Miyao, M. Kurosawa, K. Toko, Y. Tojo,  
and T. Sadoh,  
“Hybrid-Formation of Ge-on-Insulator  
Structures on Si Platform by  
SiGe-Mixing-Triggered Rapid-Melting  
Growth --- A Road to Artificial Crystal  
--- “,  
ECS Transactions, 査読有, Vol.50, No.5,  
pp. 59-70 (2013)  
doi: 10.1149/05005.0059ecst

[学会発表](計41件)

R. Matsumura, H. Chikita, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Dynamic control of lateral  
crystallization for Group IV  
mixed-crystal semiconductor on  
insulating substrate”,  
7th International Workshop on New Group  
IV Semiconductor Nanoelectronics,  
Sendai, (Jan. 27-28, 2014)

M. Miyao, R. Matsumura, M. Kurosawa, K. Toko, and T. Sadoh,  
“(招待講演) Hybrid-Formation of  
Single-Crystalline  
Ge(Si,Sn)-on-Insulator Structures by  
Self-Organized Melting-Growth”,  
International Conference on Solid State  
Devices and Materials2013, SSDM2013,  
Fukuoka, (Sept. 24-27, 2013)

R. Matsumura, R. Kato, Y. Tojo, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Segregation-Free Giant  
Single-Crystalline SiGe-on-Insulator  
by Super-Cooling-Controlled  
Rapid-Melting Growth”,  
International Conference on Solid State  
Devices and Materials 2013, SSDM2013,  
Fukuoka, (Sept. 24-27, 2013)

R. Matsumura, R. Kato, Y. Tojo, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Cooling-Rate-Controlled  
Rapid-Melting-Growth for  
Giant-Single-Crystal SiGe on  
Insulator”,  
The 17th International Conference on  
Crystal Growth and Epitaxy, ICCGE-17,  
Warsaw, Poland (Aug. 11-16, 2013)

Y. Tojo, R. Matsumura, H. Yokoyama, M. Kurosawa, K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“3-Dimensionally-Graded  
SiGe-on-Insulator Stacked Structures by  
Successive Rapid-Melting Growth”,  
The 8th International Conference on  
Silicon Epitaxy and Heterostructures,  
ICSI-8, Fukuoka (June 2-7, 2013)

R. Matsumura, R. Kato, Y. Tojo, T. Sadoh,  
and M. Miyao,  
“Single-Crystalline SiGe Stripes on  
Insulating Substrate by  
Segregation-Free Rapid  
-Melting-Growth”,  
The 8th International Conference on  
Silicon Epitaxy and Heterostructures,

ICSI-8, Fukuoka (June 2-7, 2013)

R. Matsumura, Y. Tojo, M. Kurosawa, T. Sadoh, M. Miyao,

“Dynamics Analysis of Rapid-Melting Growth Using SiGe on Insulator”,  
The 8th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, ICSI-8, Fukuoka, (June 2-7, 2013)

Y. Kinoshita, Y. Tojo, R. Matsumura, T. Sadoh, T. Nishimura, and M. Miyao,

“Melting-Induced-Mixing in a-Ge/Sn/c-Ge Structures for Sn-Doped Ge Films”,  
The 8th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, ICSI-8, Fukuoka (June 2-7, 2013)

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

“Low-Temperature Formation of SiGe Crystals by Partial-Melting Method in a-GeSn /Si(100) Structure”,  
The 8th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, ICSI-8, Fukuoka (June 2-7, 2013)

R. Matsumura, Y. Tojo, H. Yokoyama, M. Kurosawa, T. Sadoh, and M. Miyao,

“Formation of Graded SiGe on Insulator by Segregation-Controlled Rapid-Melting-Growth”,  
PRiME 2012, ECS Pacific RIM Meeting 2012, Hawaii (October 7-12, 2012)

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

“Formation of Large Grain SiGe on Insulator by Si Segregation in Seedless-Rapid-Melting Process”,  
PRiME 2012, ECS Pacific RIM Meeting 2012, Hawaii (October 7-12, 2012)

R. Matsumura, Y. Tojo, H. Yokoyama, M. Kurosawa, T. Sadoh, and M. Miyao,

“Laterally Graded SiGe-on-Insulator with Universal Si Profile by Cooling-Rate-Controlled Rapid-Melting-Growth”,  
International Conference on Solid State Devices and Materials 2012, SSDM2012, Kyoto (September 25-27, 2012)

Y. Tojo, R. Matsumura, H. Yokoyama, M. Kurosawa, K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao,

“Defect Free Multi-Structures of [SiGe/Insulator]<sub>2</sub> on Si (100) platform”,

E-MRS 2012 Fall Meeting, Warsaw (Sep. 17-21, 2012)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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：6 0 3 1 5 1 3 2

### (2) 研究分担者

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：2 0 2 7 4 4 9 1