

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360011
 研究課題名（和文）フレキシブル基板上における SiGe 結晶の超高移動度化とトランジスタ
 応用
 研究課題名（英文）High-Quality Formation of SiGe on Flexible Substrates for Transistor
 Application
 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所・教授
 研究者番号：60315132

研究成果の概要（和文）：

フレキシブルなシステムインディスプレイの創出を目指し、高移動度を有する SiGe 結晶の低温成長法の探索とデバイス試作を行った。金属触媒と電界印加を重畳した固相成長法を開発し、結晶成長の低温化（250℃）を実現した。さらに、ソース及びドレイン電極をショットキー接触構造とした新構造トランジスタを試作し、従来の多結晶 Si を凌駕する高いチャネル移動度を実証した。

研究成果の概要（英文）：

Low-temperature growth of SiGe has been investigated to realize the flexible system-in-displays. We have developed a new solid-phase crystallization technique, which uses catalytic effects of some metals and electric-fields. Consequently, the low-temperature crystallization (<250°C) becomes possible. Moreover, new type of transistors having source and drain electrodes with Schottky barrier contacts have been fabricated. Very high carrier mobility compared to poly-Si has been demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：電子デバイス・機器、集積回路、ディスプレイ、シリコンゲルマニウム、薄膜トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

21 世紀のコピキタス情報社会ではコンピュータや情報機器と人間の接点が飛躍的に増大する。従ってシリコン集積回路(Si-LSI)の性能を極限化し、大容量情報を超高速処理

するだけの単純システムから、高性能 LSI をマン・マシン・インターフェース(ディスプレイ等)と融合した統合的集積化システム(システム・イン・ディスプレイ)へと発展させる必要がある。特に真のコピキタス情報社会(何時で

も、何処でも、誰にでも)を実現するには、これらのシステムをフレキシブル基板(プラスチック等)上に構築し、軽く、薄くて、折り曲げる事の出来るウェアラブルなシステム・イン・ディスプレイを創製する必要がある

2. 研究の目的

LSI の高性能化は微細化(スケールアップ)により実現されてきたが、このアプローチが物理的限界に直面している。これを打破するには、Si よりも高いキャリア移動度を有するシリコンゲルマニウム(SiGe)等の Si 系ヘテロ半導体を活用して、新機能を発現する必要がある。

一方、ディスプレイでは非晶質のガラス上に Si 膜を堆積して薄膜トランジスタ (TFT) を形成する。非晶質基板上にガラス軟化温度 (~ 500)以下の低温で結晶成長するから、Si 薄膜は多結晶となり、そのキャリア移動度は低い。多結晶膜の結晶性を高品質化する研究が国内外で行われているが、それらの移動度を Si 単結晶なみとするには原理的限界がある。我々は TFT の移動度を向上する鍵が SiGe 結晶薄膜の活用にあると考えている。

そこで本研究では、ウェアラブルなシステムインディスプレイの実現を目指し、フレキシブル基板の軟化温度(250)以下の極低温で高品質 SiGe 結晶を形成する手法を開発すると共に、その高キャリア移動度をデバイス実証することを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

本研究では、触媒誘起固相成長法、電界誘起固相成長法を用いて SiGe 結晶薄膜を低温で高品位形成する手法を検討すると共に、電子顕微鏡法を用いて成長層の結晶性を評価した。さらに、ソース/ドレイン電極をショットキー障壁としたトランジスタを試作し、デバイス特性を評価した。

4. 研究成果

非晶質 SiGe の触媒金属誘起固相成長を探索すると共に、電界印加による成長促進効果を検討した。

ガラス基板上に堆積した非晶質 SiGe 薄膜 (Ge 濃度:0 ~ 100%)に触媒金属(Ni, Al, Cu, Co, Pd 等)を添加し、アニール(250 ~ 450)により固相成長を誘起する手法を検討した。結晶成長速度、形成層の結晶方位を触媒種、SiGe の Ge 組成、及びアニール温度の関数として系統的に評価した結果、Cu を用いる事で、成長温度の極低温化 (~ 250)が実現できる事が明らかになった。成長特性に与える熱処理温度の効果を系統的に解析した結果、Cu を用

いると、他触媒(Ni, Co, Pd 等)に比べ、核発生及び核成長の活性化エネルギーが共に減少する事を明らかにした。また核成長の活性化エネルギーは、結晶 SiGe 中の触媒原子の活性化エネルギーとほぼ等しく、触媒誘起成長の速度は成長した SiGe 中における触媒原子の移動で規定される可能性がある事を見出した。

更に、Ni 及び Cu を触媒として用い、結晶成長中に電界を印加する事で、結晶成長を約 10 倍に高速化できた。これは、電界により触媒原子の移動が加速された事に起因すると考えられる。特に、Ni を触媒として用いた場合、電界を印加する事で結晶成長が電界印加方向に異方的に加速され、細線構造を有する SiGe 結晶が形成できた。

SiGe 成長領域の電気特性をホール効果法により解析すると共に、電気伝導度の温度依存性を系統的に評価し、キャリア伝導特性の支配因子を解明すると共に移動度向上の指針を明らかにした。

デバイス応用に向け、トランジスタ構造の設計と試作を行った。ソース及びドレインをドーピング構造とした従来型の MOS トランジスタを絶縁膜上の SiGe 薄膜に形成すると、高電界領域で発生した過剰キャリアが基板浮遊効果で蓄積され、トランジスタ特性が変動する。また、ドーピングを充分に行うには比較的高温のアニール(500)が必要である。これらの課題を解決し、フレキシブル基板に適合したトランジスタを開発する為、“ SiGe 結晶領域をチャネルとし、ソース・ドレインをショットキー接合とするトランジスタ”を設計・試作した。この構造では過剰キャリアがショットキー障壁を通して流れ出し、基板浮遊効果が抑制できると共に、ソース・ドレインが低温度(150)で形成出来るとのメリットがある。この新構造トランジスタの形成プロセス(シリサイド形成、MOS 構造形成等)を構築し、SiGe チャネルトランジスタを試作した。従来の多結晶 Si チャネルトランジスタを凌駕する高いチャネル移動度を実証した。

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 33 件)

- (1) Formation of single-crystalline Ge stripes on quartz substrates by SiGe mixing-triggered liquid-phase epitaxy : K. Toko, T. Tanaka, T. Sadoh and M. Miyao (Thin Solid Films 518, pp.S179-181 (2010)) (査読有)
- (2) Giant growth of single crystalline Ge on

- insulator by seeding lateral liquid-phase epitaxy : T. Tanaka, M. Tanaka, M. Itakura, T. Sadoh and M. Miyao (Thin Solid Films 518, pp.S170-173 (2010)) (査読有)
- (3) Al-induced low-temperature crystallization of Si_{1-x}Ge_x (0<x<1) by controlling layer exchange process: M. Kurosawa, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films 518, pp.S174-178 (2010)) (査読有)
- (4) Liquid-phase epitaxial growth of Ge island on insulator using Ni-imprint-induced Si crystal as seed : K. Toko, T. Sakane, T. Tanaka, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films 518, pp.S181-185 (2010)) (査読有)
- (5) High Quality Single-Crystalline Ge-Rich SiGe on Insulator Structures by Si-doping Controlled Rapid Melting Growth: T. Tanaka, K. Toko, T. Sadoh, M. Miyao (Applied Physics Express, Vol. 3, No. 3, 031301 (2010)) (査読有)
- (6) Ge Fraction Dependence of Al-Induced Crystallization of SiGe at Low Temperatures : M. Kurosawa, Y. Tsumura, T. Sadoh and M. Miyao (Journal of the Korean Physical Society, Vol. 54, No. 1, pp. 451-454 (2009)) (査読有)
- (7) Position-Controlled Growth of SiGe Crystal Grains on Insulator by Indentation-Induced Solid-Phase Crystallization : K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao (Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, No.3, B007-1-3 (2009)) (査読有)
- (8) Interfacial-Oxide Layer Controlled Al-Induced Crystallization of Si_{1-x}Ge_x (x: 0-1) on Insulating Substrate : M.Kurosawa, Y. Tsumira, T. Sadoh, and M. Miyao (Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, No.3, B002-1-3 (2009)) (査読有)
- (9) Effects of Si Layer Thickness on Solid-Phase Crystallization of Stacked Ge/Si/SiO₂ Structures : T. Sadoh, H. Ohta, and M. Miyao (Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, No.3, B004-1-3 (2009)) (査読有)
- (10) Giant Ge-on-Insulator Formation by Si-Ge Mixing-Triggered Liquid-Phase Epitaxy : M. Miyao, T. Tanaka, K. Toko, and M. Tanaka (Applied Physics Express Vol.2, No.4 pp.045503-1-3 (2009)) (査読有)
- (11) Indentation-induced low-temperature solid-phase crystallization of Si_{1-x}Ge_x (x: 0-1) on insulator : K. Toko, T. Sadoh, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.94, No.19, pp192106-1-3 (2009)) (査読有)
- (12) Lateral liquid-phase epitaxy of Ge on insulator using Si seed for ultrahigh speed transistor : T. Sadoh, T. Tanaka, Y. Ohta, K. Toko and M. Miyao (電子情報通信学会 信学技報 ED2009-91, SDM2009-86, pp177-180 (2009)) (査読無)
- (13) High-quality single-crystal Ge stripes on quartz substrate by rapid-melting-growth : M. Miyao, K. Toko, T. Tanaka, and T. Sadoh (Applied Physics Letters Vol.95, No.2, pp22115-1-3 (2009)) (査読有)
- (14) Defect-free single-crystal Ge island arrays on insulator by rapid-melting growth combined with seed-positioning technique : K. Toko, T. Sakane, T. Tanaka, T. Sadoh, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.95, No.11, 112107-1-3 (2009)) (査読有)
- (15) Orientation-controlled Si thin films on insulating substrates by Al-induced crystallization combined with interfacial-oxide layer modulation : M. Kurosawa, N. Kawabata, T. Sadoh, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.95, No.13, 132103-1-3 (2009)) (査読有)
- (16) Electrical properties of poly-Ge on glass substrate grown by two-step solid-phase crystallization : K. Toko, I. Nakao, T. Sadoh, T. Noguchi, M. Miyao (Solid-State Electronics, Vol.53 pp.1159-1164 (2009)) (査読有)
- (17) Stress-enhancement in free-standing Si pillars through nonequilibrium dehydrogenation in SiN:H stress-liners by ultraviolet light irradiation : T. Tanaka, T. Sadoh, M. Kurosawa, M. Tanaka, M. Yamaguchi, S. Suzuki, T. Kitamura, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.95, pp.262103-1-3, (2009)) (査読有)
- (18) アルミニウム誘起層交換法による SiGe/ガラスの低温成長 : 黒澤昌志, 川畑直之, 佐道泰造, 宮尾正信 (電子情報通信学会 信学技報 SDM2009-5, pp19-21 (2009)) (査読無)
- (19) Abnormal oxidation characteristics of SiGe/SOI structures depending on piled-up Ge fraction at SiO₂/SiGe interface : M. Tanaka, T. Ohka, T. Sadoh,

- and M. Miyao (J. Appl. Phys. Vol.103, pp.054909-1-5 (2008)) (査読有)
- (20) Nucleation Controlled Metal-Induced Lateral Crystallization of Amorphous Si_{1-x}Ge_x with Whole Ge Fraction on Insulator : T. Sadoh, K. Toko, H. Kanno, S. Masumori, M. Itakura, N. Kuwano, and M. Miyao (Jpn. J. Appl. Phys. Vol.47, No.3, pp1876-1879 (2008)) (査読有)
- (21) Influences of Si Pillar Geometry on SiN-Stressor Induced Local Strain : M. Tanaka, T. Sadoh, J. Morioka, T. Kitamura and M. Miyao (Applied Surface Science Vol.254, No.19, pp6226-6228 (2008)) (査読有)
- (22) Low-Temperature Solid-Phase Crystallization of Amorphous SiGe Films on Glass by Imprint Technique : K. Toko, H. Kanno, A. Kenjo, T. Sadoh T. Asano, and M. Miyao (Solid-State Electronics Vol.52, No.8, pp1221-1224 (2008)) (査読有)
- (23) Formation of SiGe Quasi-Single Crystal Grain on Insulator by Indentation-Induced Solid-Phase Crystallization : T. Sadoh, K. Toko, K. Ikeda, S. Hata, M. Itakura, H. Nakashima, M. Nishida, and M. Miyao (ECS Transactions, Vol.16 No.10, pp219-222 (2008)) (査読有)
- (24) Enhancement of Local Strain in Si Microstructure by Oxidation Induced Ge Condensation : M. Tanaka, T. Tanaka, T. Sadoh, J. Morioka, T. Kitamura, and M. Miyao (ECS Transactions, Vol.16 No.10, pp189-192 (2008)) (査読有)
- (25) Comprehensive study of low temperature (< 1000°C) oxidation process in SiGe/SOI structures : M. Tanaka, T. Ohka, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp251-253 (2008)) (査読有)
- (26) Local strain evaluation of single crystal Si pillar by micro Raman spectroscopy and photoluminescence : Dong Wang, H. Nakashima, M. Tanaka, T. Sadoh, M. Miyao, J. Morioka, T. Kitamura (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp31-33 (2008)) (査読有)
- (27) Stress-relaxation mechanism in ultra-thin SiGe on insulator formed by H⁺ irradiation-assisted Ge condensation method : M. Tanaka, A. Kenjo, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp248-250 (2008)) (査読有)
- (28) 次世代 TFT に向けた a-Ge/石英の低温固相成長:中尾 勇兼, 都甲 薫, 野口 隆, 佐道泰造 (電子情報通信学会 信学技報 SDM2008-17, pp.83-88 (2008)) (査読無)
- (29) 金属触媒誘起固相成長法による多結晶 Ge/絶縁膜の低温形成 ~電界印加効果、触媒種効果~ : 萩原貴嗣, 都甲 薫, 佐道泰造 (電子情報通信学会 信学技報 SDM2008-17, pp.101-105 (2008年)) (査読無)
- (30) (招待) a-SiGe 薄膜の低温結晶化機構の電子顕微鏡的研究:板倉 賢, 宮尾正信 (電子情報通信学会 信学技報 SDM2008- (2008年)) (査読無)
- (31) 縁膜上における非晶質 SiGe のインデント誘起固相成長: 都甲 薫, 佐道泰造 宮尾正信 (電気学会・電子材料研究会資料 EFM-08-29 pp.31-34 (2008)) (査読無)
- (32) Comparative Study of Al-Induced Crystallization for Poly-Si and Ge on Insulating Film : Y. Tsumura, I. Nakao, H. Kanno, A. Kenjo, T. Sadoh, and M. Miyao (ECS Transactions, Vol.11, No.6, pp395-402 (2007)) (査読有)
- (33) High-Performance Poly-Ge Thin-Film Transistor with NiGe Schottky Source/Drain : T. Sadoh, H. Kamizuru, A. Kenjo and M. Miyao (Materials Science Forum Vol.561-565, pp.1181-1184 (2007)) (査読有)
- [学会発表](計 90 件)
- (1) (招待講演) SiGe Mixing-Triggered Liquid-Phase Epitaxy for Defect-Free GOI (Ge on Insulator) : K.Toko, M.Kurosawa, T. Tanaka, T. Sadoh, and M.Miyao (5th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai, JAPAN, (Jan. 29-30, 2010))
- (2) (招待講演) Lateral liquid-phase epitaxy of Ge on insulator using Si seed for ultrahigh speed transistor : T. Sadoh, T. Tanaka, Y. Ohta, K.Toko, M. Miyao (AWAD2009, 3A-2, Busan, Korea, (Jun. 24 26, 2009))
- (3) (招待講演)a-SiGe 薄膜の低温結晶化機構の電子顕微鏡的研究:板倉 賢, 宮尾正信 (電子情報通信学会研究会 S D M, 12-17 沖縄, 2008年4月11-12日)
- (4) (招待講演) Materials Innovation for Advanced TFT : Why and How? : M. Miyao, T. Sadoh and Y. Maeda (The 4th International Thin-Film Transistor

Conference (ITC '08, 1-24, Seoul, Korea, (Jan. 24-25, 2008))

- (5) シリコン系ヘテロ超構造技術の創出と未来型デバイスの夢 - 半導体ナノテクノロジーリサーチコアの活動を中心として - : 宮尾正信 (薄膜材料デバイス研究会 第4回研究集会 招待講演, b-1, 京都, 2007年11月2-3日)

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・教授
研究者番号 : 60315132

(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 : 20274491

浜屋 宏平 (HAMAYA KOHEI)
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 : 90401281

(3) 連携研究者

なし。