

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 特定領域研究  
 研究期間： 2006 ～ 2009  
 課題番号： 18063012  
 研究課題名（和文） ナノシステム機能化 High-k ゲート/歪制御ゲルマニウムチャネル構造の創成  
 研究課題名（英文） Construction of High-k Gate/Strain-engineered Germanium channel Structures with Functional Nano-system  
 研究代表者  
 財満 鎮明 (ZAIMA SHIGEAKI)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 70158947

研究成果の概要（和文）：ポストスケーリング世代における新規 IV 族系半導体 MOSFET の実現に向けて、高移動度伸張歪 Ge チャネル、高誘電率、低リークゲート絶縁膜/Ge 構造、Ge 表面窒化、仕事関数制御された均一金属合金ゲート電極およびこれらの接合界面に関する研究を行った。新規材料探索、要素プロセス構築、およびその統合に関する技術開発を達成した。

研究成果の概要（英文）： We have investigated “high mobility tensile-strained Ge channel”, “high dielectric and low leakage gate insulators/Ge stack”, “Ge nitridation”, and “metal alloy gate electrodes with work function controllability and high uniformity” for realization of novel group-IV semiconductors MOSFETs in the post-scaling generation. We have achieved finding new materials, establishing elemental technology, and developing integration technology of each material.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	56,600,000	0	56,600,000
2007 年度	56,500,000	0	56,500,000
2008 年度	57,600,000	0	57,600,000
2009 年度	24,200,000	0	24,200,000
年度			
総計	194,900,000	0	194,900,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：半導体超微細化、デバイス設計・製造プロセス、ナノ材料、半導体物性、表面・界面物性

## 1. 研究開始当初の背景

高度情報処理社会の発展を担っている Si デバイスの小型化・高性能化に伴って、携帯情報機器の爆発的普及が加速する中、ナノスケールの金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) を一つのシステムとして正常かつ精緻に機能させるための革新的技術が要求されている。本研究においては、こ

れまでのスケーリングによる性能向上を図る開発路線から脱却し、従来のデバイス物性の限界を大幅に超え、かつナノシステムを機能化させ得るポストスケーリング世代における MOSFET デバイスの実現を目指した。

## 2. 研究の目的

超低駆動電圧、超低消費電力と同時に超高

速動作を可能とする新規 IV 族系 MOSFET の実現に向けて、新しいゲートスタック/チャネル構造のためのプロセス技術の構築、仕事関数可変型の金属合金メタルゲート、超低リーク・高信頼性希土類金属系シリケート High-k 絶縁膜、歪・欠陥制御型 Ge チャネルおよびバッファ層からなるハイブリッドヘテロ構造における基礎的物性の解明を目指して研究推進した。

### 3. 研究の方法

本研究は、主に、高移動度伸張歪 Ge チャネル、High-k/Ge 構造、Ge 表面窒化技術、金属ゲート電極の 4 項目に開発の主眼を置いて、はじめに、各要素プロセスの構築から研究をスタートした。その後、各プロセス間の統合、材料界面の科学などにも研究の幅を広げ、新規 IV 族系 MOSFET の実現に向けた、材料・プロセス・デバイス技術の統合を目指した。

### 4. 研究成果

#### (1) 伸張歪 Ge チャネルの形成

①はじめに、Si 基板上に歪緩和 Ge 層を形成した仮想 Ge 基板上に歪緩和  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層の成長を行った。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層成長後の熱処理により、Ge 層に起因した貫通転位が  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}$  界面にミスフィット転位を形成しながら面内方向に伝播し、歪緩和が促進された。その結果、Sn 組成 5.0%、歪緩和率 58%の歪緩和  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層の形成に成功した。さらに、三段階に Sn の組成傾斜を施した多層  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  バッファ層の形成により、各界面におけるミスフィット歪量を制御することで、Sn の析出を適切に抑制できた。その結果、Sn 組成 5.5%の歪緩和  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  バッファ層を形成できた。

また、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層成長温度の低温化により、Sn 組成 6.8%、歪緩和率 87%の高 Sn 組成歪緩和  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  単一層の形成に成功した。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層中の空孔密度の増大によって Sn 析出の抑制、歪緩和の促進が実現できたものと推測される。さらに、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層の Si 基板上への直接形成により、大きな格子定数差に起因する界面ミスフィット転位伝播の駆動力向上によって、歪緩和をより優先的に引き起こせることを見出した。その結果、Sn 組成 9.2%の  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層の形成に成功した。最終的には、これらのバッファ層を用いて、世界最高水準の歪量 0.71% を有する伸張歪 Ge 層の形成に成功した。

②SOI 基板上に低温成長させた  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  層において、Sn 組成 2~4% の Sn 添加によって、正孔密度を低減できることを見出した。Sn-空孔対の形成により、空孔の不活性化が生じると推測される。欠陥起因の正孔密度が減少する結果、Ge 層と比較して移動度をおよそ 2 倍にまで改善できることを示した。

③Si(011)/Si(001)基板の直接接合を試み、界面領域の基板結晶性を SPring-8 のサブミクロンスケールの X 線マイクロビームにより評価した。接合処理によって Si(011)層に発生した、(022)格子面の  $\pm 0.005^\circ$  程度の揺らぎを検出し、それらが数  $\mu\text{m}$  程度のドメイン構造を形成していることを示した。

さらに、絶縁膜付 Si 基板上への歪 Ge 層の直接接合の検証を行った。接合後に 0.32% の歪量を保持したまま伸張歪 Ge 層が接合された歪 Ge on insulator 構造の作製を実証できた。

#### (2) High-k/Ge 構造の形成

①Ge 基板上に Pr 酸化膜を堆積した場合、Pr 酸化膜中への Ge の拡散により、膜の比誘電率が 10 程度まで低下する。Ge の拡散量は成膜雰囲気中の酸素濃度が高い程大きく、Ge 基板から酸化膜中へ GeO(gas) が拡散すると考えられる。一方、Pr 酸化膜/Ge 基板界面への GeN 層の導入によって、Ge の拡散が抑制され、24 程度の高い比誘電率を持つ Pr 酸化膜を形成できた。

②シクロペンタジエニル系原料を用いた Pr 酸化膜の CVD 成長において、酸化剤として  $\text{H}_2\text{O}$  を用いることで、 $\text{O}_2$  の場合と比較して、膜中の C 組成を 10 分の 1 に低減できた。結果として、リーク電流を 4 桁以上低減し、26 という高い誘電率を持つ緻密な Pr 酸化膜を形成できた。さらに、シクロペンタジエニル錯体原料である  $\text{Pr}(\text{EtCp})_3$  を用いた ALD 法によって、面内膜厚分布のばらつきが最大  $\pm 0.7\%$  の非常に均一な Pr 酸化膜を 3 インチ Si 基板上に形成できた。

③Pr 酸化膜/Ge 界面の安定化を目的に、ラジカル窒化による界面への窒素導入を検討した。厚さ 0.7 原子層程度の Ge サブオキシナイトライド界面層の導入によって、低誘電率な  $\text{GeO}_x$  界面層の形成を抑制し、なおかつ、 $3.5 \times 10^{11} \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  と低い界面準位密度を実現できることを実証した。

④劣化防止膜として超薄  $\text{Al}_2\text{O}_3$  キャップ層を有した  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{GeO}_2/\text{Ge}$  積層構造絶縁膜を作製し、その界面特性を評価した。後アニールに伴う界面  $\text{GeO}_2$  層の成長を放射光 XPS を用いて確認した積層構造 High-k/Ge スタックについて、界面準位密度が  $5.3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$  と極めて良好な結果が得られた。

#### (3) Ge 表面窒化技術

①Ge デバイスに向けた絶縁膜界面制御、表面安定化技術の確立を目的に、高密度プラズマを用いた Ge 表面の直接窒化法を検討した。高純度  $\text{Ge}_3\text{N}_4$  膜の形成に成功し、Ge 表面の清浄化および安定化技術としての可能性を示した。更に  $\text{Ge}_3\text{N}_4$  膜の熱安定性を評価し、酸化膜層に対する優位性を示すと共に、窒化膜の熱脱離機構に関する基礎物性情報を取得した。

ラジカル窒化法により形成したGe窒化膜構造の基板温度および窒素活性種依存性を調べた結果、窒化膜の飽和膜厚が窒素分圧に依存することがわかった。本結果より、異なる窒素分圧下でのラジカル窒化においては、活性種の密度が異なるだけでなく、窒化に寄与する活性種も異なることが示唆された。

②Ge<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜の耐湿性評価を行なった結果、高湿大気への長時間曝露によってGe-N結合がGe-Oへ置換される反応が顕著に進み、アイランド状の表面ラフネスが生じることが明らかになった。

#### (4) 金属ゲート電極

①Tiシリサイドを高窒素濃度雰囲気ですパッタリングし、熱処理したTiSiN膜は、アモルファス相中に1~2nmの微結晶粒が高密度に存在するアモルファス-微結晶粒混合（ミクタミクト合金）状態であることがわかった。この膜では熱処理に伴う結晶成長が起こりにくく、抵抗率の変化が極めて少ない等、安定なゲート電極材料としての有望性を示した。さらに、W/Ti-Si-N/SiO<sub>2</sub>/Si MOSキャパシタ構造を作製し、容量-電圧特性からミクタミクトTi-Si-N電極の仕事関数を調べた。500~700°Cの熱処理後において、4.6eVとミッドギャップ付近で安定な仕事関数値が得られることがわかった。

②Ti-Si-NおよびHf-Si-N金属ゲート電極の結晶構造、電気的特性の窒素組成依存性を系統的に調査した。高窒素組成領域では、Ti<sub>3</sub>N<sub>4</sub>およびHf<sub>3</sub>N<sub>4</sub>などの高窒素組成が形成され、これらの結晶相が電気特性を支配していることが示唆された。

③反応性スパッタリングによりTaCN、TiCN金属ゲート電極を形成し、結晶構造と電気的特性を調べた。TiCN、TaCNでは、窒素組成の増大に伴い、抵抗率が増大する。また、窒素組成の増大に伴って、TiCN中の微結晶粒径は小さくなるのに対し、TaCNでは顕著な結晶化抑制効果は見出されなかった。

#### 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 27 件)

- [1] K. Kato, H. Kondo, M. Sakashita, and S. Zaima, "Formation Processes of Ge<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Films by Radical Nitridation and Their Electrical Properties", *Thin Solid Films* **518** (6), pp. S226-S230 (2010).
- [2] Y. Shimura, N. Tsutsui, O. Nakatsuka, A. Sakai, and S. Zaima, "Low temperature growth of Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> buffer layers for tensile-strained Ge layers", *Thin Solid Films*

**518** (6), pp. S2-S5 (2010).

- [3] T. Kato, Y. Nakamura, J. Kikkawa, A. Sakai, E. Toyoda, K. Izunome, O. Nakatsuka, S. Zaima, Y. Imai, S. Kimura, O. Sakata, "Structural change of direct silicon bonding substrates by interfacial oxide out-diffusion annealing", *Thin Solid Films* **518** (6), pp. S147-S150 (2010).
- [4] H. Kondo, S. Sakurai, M. Sakashita, A. Sakai, M. Ogawa, and S. Zaima, "Metal-organic chemical vapor deposition of high-dielectric-constant praseodymium oxide films using a cyclopentadienyl precursor", *Appl. Phys. Lett.* **96**, 012105, (2010).
- [5] H. Kondo, K. Furumai, M. Sakashita, A. Sakai, and S. Zaima, "Thermal Stability and Scalability of Mictamict Ti-Si-N Metal-Oxide-Semiconductor Gate Electrodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, pp. 04C012-1-5 (2009).
- [6] Y. Shimura, N. Tsutsui, O. Nakatsuka, A. Sakai, and S. Zaima, "Control of Sn Precipitation and Strain Relaxation in Compositionally Step-Graded Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> Buffer Layers for Tensile-Strained Ge Layers", *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, pp. 04C130-1-4 (2009).
- [7] R. Kato, S. Kyogoku, M. Sakashita, H. Kondo, and S. Zaima, "Effects of Atomic Layer Deposition-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Interface Layers on Interfacial Properties of Ge Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors", *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, pp. 05DA04-1-4 (2009).
- [8] K. Miyamoto, K. Furumai, B. E. Urban, H. Kondo, and S. Zaima, "Nitrogen-Content Dependence of Crystalline Structures and Resistivity of Hf-Si-N Gate Electrodes for Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, pp. 045505-1-4 (2009).
- [9] Y. Ohara, T. Ueda, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, S. Zaima, E. Toyoda, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, H. Tajiri, O. Sakata, S. Kimura, T. Sakata, H. Mori, "Microstructures in directly bonded Si substrates", *Solid-State Electronics* **53**, pp. 837-840 (2009).
- [10] T. Mizutani, O. Nakatsuka, A. Sakai, H. Kondo, M. Ogawa, and S. Zaima, "Novel Method to Introduce Uniaxial Tensile Strain in Ge by Microfabrication of Ge/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> Structures on Si(001) Substrates", *Solid-State Electronics* **53** (11) pp. 1198-1201 (2009).
- [11] T. Hosoi, K. Kutsuki, G. Okamoto, M. Saito, T. Shimura, and H. Watanabe, "Origin of flatband voltage shift and unusual minority carrier generation in thermally grown

- GeO<sub>2</sub>/Ge metal-oxide-semiconductor devices” Appl. Phys. Lett. **94**, 202112-1-3 (2009).
- [12] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, “Germanium oxynitride gate dielectrics formed by plasma nitridation of ultrathin thermal oxides on Ge(100)” Appl. Phys. Lett. **95** (2009) 022102-1-3.
- [13] S. Saito, T. Hosoi, H. Watanabe, and T. Ono, “First-principles study to obtain evidence of low interface defect density at Ge/GeO<sub>2</sub> interfaces” Appl. Phys. Lett. **95**, 011908-1-3 (2009).
- [14] T. Hashimoto, C. Yoshimoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, “Fabrication of local Ge-on-Insulator structures by lateral liquid-phase epitaxy: effect of controlling interface energy between Ge and insulators on lateral epitaxial growth” Appl. Phys. Express **2**, 066502-1-3 (2009).
- [15] K. Furumai, H. Kondo, M. Sakashita, A. Sakai, M. Ogawa and S. Zaima, “Crystalline and electrical properties of mictamict TiSiN gate MOS capacitors”, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (4), pp. 2420-2424 (2008).
- [16] O. Nakatsuka, A. Suzuki, S. Akimoto, A. Sakai, M. Ogawa and S. Zaima, “Dependence of Electrical Characteristics on Interfacial Structures of Epitaxial NiSi<sub>2</sub>/Si Schottky Contacts Formed from Ni/Ti/Si System”, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (4), pp. 2402-2406 (2008).
- [17] S. Takeuchi, Y. Shimura, O. Nakatsuka, S. Zaima, M. Ogawa, and A. Sakai, “Growth of highly strain-relaxed Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>/virtual Ge by a Sn precipitation controlled compositionally step-graded method”, Appl. Phys. Lett. **92**, pp. 231916-1-3 (2008).
- [18] S. Zaima, O. Nakatsuka, H. Kondo, M. Sakashita, A. Sakai, and M. Ogawa, “Silicide and germanide technology for contacts and gates in MOSFET applications”, Thin Solid Films **517** (1) pp. 80-83 (2008).
- [19] S. Takeuchi, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Tensile strained Ge layers on strain-relaxed Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>/virtual Ge substrates”, Thin Solid Films **517** (1) pp. 159-162 (2008).
- [20] E. Toyoda, A. Sakai, O. Nakatsuka, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, M. Ogawa, and S. Zaima, “Characterization of bonding structures of directly bonded hybrid crystal orientation substrates”, Thin Solid Films, **517** (1), pp. 323-326 (2008).
- [21] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, “Characteristics of pure Ge<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dielectric layers formed by high-density plasma nitridation” Japanese J. Appl. Phys. **47**, 2415-2419 (2008).
- [22] T. Shimura, T. Inoue, Y. Okamoto, T. Hosoi, A. Ogura, O. Sakata, S. Kimura, H. Edo, S. Iida, and H. Watanabe, “Application of synchrotron x-ray diffraction methods to gate stacks of advanced MOS devices” ECS Transactions **13**, 75-82 (2008).
- [23] T. Shimura, T. Inoue, Y. Okamoto, T. Hosoi, H. Edo, S. Iida, A. Ogura, and H. Watanabe, “Observation of crystalline imperfection in supercritical thickness strained silicon on insulator wafers by synchrotron x-ray topography” ECS Transactions **16**, 539-543 (2008).
- [24] D. Ikeno, Y. Kaneko, H. Kondo, M. Sakashita, A. Sakai, M. Ogawa, and S. Zaima, “Composition dependence of work function in metal (Ni, Pt)-germanide gate electrode”, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (4B), pp. 1865-1869 (2007).
- [25] S. Takeuchi, A. Sakai, K. Yamamoto, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Growth and structure evaluation of strain-relaxed Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> buffer layers grown on various types of substrates”, Semicond. Sci. Technol. **22** (1), pp. S231-S235 (2007).
- [26] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, “Humidity-dependent stability of amorphous germanium nitrides fabricated by plasma nitridation” Applied Physics Letters, **91**, 163501-1-3 (2007).
- [27] T. Shimura, M. Shimizu, S. Horiuchi, H. Watanabe, K. Yasutake, and M. Umeno, “Self-limiting oxidation of SiGe alloy on silicon-on-insulator wafers”, Appl. Phys. Lett. **89**, 111923-1-3 (2006).
- [学会発表] (計 29 件)
- [1] **Invited:** S. Takeuchi, Y. Shimura, T. Tsutsui, O. Nakatsuka, A. Sakai, and S. Zaima, “Potential of Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> alloys as high mobility channel materials and stressors”, 5th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, pp. 67-68, Sendai, Japan, Jan. 29-30, 2010.
- [2] T. Nishimura, O. Nakatsuka, and S. Zaima, “Crystalline Orientation Dependence of Electrical Properties on Mn Germanide/Ge(111) and (001) Schottky Contacts”, Materials for Advanced Metallization, Mechelen, Belgium, Mar. 7-10, 2010.
- [3] **Invited:** S. Zaima, O. Nakatsuka, Y. Shimura, N. Tsutsui, and A. Sakai, “Formation and characterization of tensile-strained Ge layers on Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> buffer layers”, The 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Los Angeles, USA, May 17-22, 2009.

- [4] Y. Shimura, N. Tsutsui, O. Nakatsuka, A. Sakai, and S. Zaima, "Low Temperature Growth of  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  Buffer Layers for Tensile-strained Ge Layers", The 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Los Angeles, USA, May 17-22, 2009.
- [5] T. Kato, T. Ueda, Y. Ohara, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, O. Nakatsuka, S. Zaima, E. Toyoda, K. Izunome, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "Structural change of direct silicon bonding substrates by interfacial oxide out-diffusion annealing", The 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Los Angeles, USA, May 17-22, 2009.
- [6] K. Kato, H. Kondo, and S. Zaima, "Formation Processes of  $\text{Ge}_3\text{N}_4$  films by Radical Nitridation and their Electrical Properties", The 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Los Angeles, USA, May 17-22, 2009.
- [7] **Invited:** S. Zaima, O. Nakatsuka, T. Hattori, "Study on Gate Stacks in Future Nano-Scaled CMOS using Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy", International Workshop for New Opportunities in Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy, New York, USA, May 20-22, 2009.
- [8] K. Miyamoto, H. Kondo, and S. Zaima, "Crystalline Structures and Electrical Properties of High Nitrogen-content Hf-Si-N Films", 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sendai, Japan, Oct. 7-9, 2009.
- [9] **Invited:** S. Zaima, "Formation of GeSn Buffer Layers for High-Speed Strained-Ge Channel MOSFETs", The 1st International Workshop on Si based nano-electronics and -photonics, Vigo, Spain, Sept. 20-23, 2009.
- [10] T. Hashimoto, C. Yoshimoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, "Fabrication of single-crystal local germanium-on-insulator structures by lateral liquid-phase epitaxy" MRS Fall Meeting, A5.1, Boston, Nov. 30, 2009.
- [11] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, "Impact of plasma nitridation of physical and electrical properties of ultrathin thermal oxides on Ge(100)" MRS Fall Meeting, A7.2, Boston, USA, Dec. 1, 2009.
- [12] T. Hosoi, M. Saito, I. Hideshima, G. Okamoto, K. Kutsuki, T. Shimura, S. Ogawa, T. Yamamoto, and H. Watanabe, "New insights into flatband voltage shift and minority carrier generation in  $\text{GeO}_2/\text{Ge}$  MOS devices" 40<sup>th</sup> IEEE Semiconductor Interface Specialist Conference, Arlington, USA, Dec. 3, 2009.
- [13] **Invited:** E. Toyoda, A. Sakai, O. Nakatsuka, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, K. Omote, and S. Zaima, "Characterization and analyses of interface structures in directly bonded Si(011)/Si(001) substrates", The 5th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials, Hawaii, USA, Nov. 10-14, 2008.
- [14] E. Toyoda, A. Sakai, O. Nakatsuka, S. Zaima, M. Ogawa, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, and K. Omote, "Characterization and Analyses of Interface Structures in Directly Bonded Si(011)/Si(001) Substrates", The fourth International SiGe Technology and Device Meeting, pp. 139-140, HsinChu, Taiwan, May 2008.
- [15] A. Sakai, Y. Ohara, T. Ueda, O. Nakatsuka, M. Ogawa, S. Zaima, E. Toyoda, "Microstructures in Directly Bonded Si Substrates", The fourth International SiGe Technology and Device Meeting, pp. 153-154, HsinChu, Taiwan, May 2008.
- [16] **Invited:** T. Shimura, T. Inoue, Y. Okamoto, T. Hosoi, A. Ogura, O. Sakata, S. Kimura, H. Edo, S. Iida, and H. Watanabe, "Application of synchrotron x-ray diffraction methods to gate stacks of advanced MOS devices", 213<sup>th</sup> ECS Meeting, Phoenix, AZ, USA, May, 2008.
- [17] H. Kondo, S. Sakurai, A. Sakai, M. Ogawa and S. Zaima, "Metalorganic Chemical Vapor Deposition of High-Dielectric-Constant Praseodymium Oxide Films using a Liquid Cyclopentadienyl Precursor", 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), pp. 856-857, Tsukuba, Japan, Sept. 2008.
- [18] Y. Shimura, N. Tsutsui, O. Nakatsuka, A. Sakai, and S. Zaima, "Control of Sn Precipitation and Strain relaxation in Compositionally Step-graded  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  Buffer Layers for Tensile-strained Ge Layers", 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), pp. 142-142, Tsukuba, Japan, Sept. 2008.
- [19] S. Oda, H. Kondo, M. Ogawa, and S. Zaima, "Formation of  $\text{Ge}_3\text{N}_4/\text{Ge}$  structures using nitrogen radicals and their thermal stability", 214<sup>th</sup> ECS meeting, Honolulu, USA, Oct. 2008.
- [20] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, "Improved electrical properties of  $\text{Ge}_3\text{N}_4$  interfaces by fluorine ion implantation" IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference, pp.15-16, San Diego, USA, Dec. 11-13, 2008.

- [21] **Invited:** A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Strain and dislocations in group IV semiconductor heterostructures”, Materials Research Society 2007 Spring Meeting, San Francisco, USA, Apr. 9-13, 2007.
- [22] S. Takeuchi, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Tensile strained Ge layers on strain-relaxed  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ /virtual Ge substrates”, 5th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, pp. 36-37, Marseille, France, May 20-25, 2007.
- [23] K. Furumai, H. Kondo, M. Sakashita, A. Sakai, M. Ogawa and S. Zaima, “Crystalline and electrical properties of mictamict TiSiN gate MOS capacitors”, 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 342-343, Tsukuba, Japan, Sept. 18-21, 2007.
- [24] H. Kondo, M. Fujita, A. Sakai, M. Ogawa and S. Zaima, “Surface Treatment of Ge(001) Surface by Radical Nitridation”, 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 1036-1037, Tsukuba, Japan, Sept. 18-21, 2007.
- [25] **Invited:** O. Nakatsuka, S. Takeuchi, A. Sakai, M. Ogawa, and S. Zaima, “Growth and Characterization of Tensile- Strained Ge Layers on Strain Relaxed  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  Buffer Layers”, The 3rd international workshop on new group IV semiconductor nanoelectronics, pp. 75-76, Sendai, Japan, Nov. 8-9, 2007.
- [26] **Invited:** A. Sakai, S. Takeuchi, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Defect Control for Ge/Si and  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ /Ge/Si Heterostructures”, Fifth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces, pp. 31-32, Tokyo, Japan, Nov. 12-14, 2007.
- [27] K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, T. Shimura, and H. Watanabe, “Thermal and humidity stability of  $\text{Ge}_3\text{N}_4$  thin layers fabricated by high-density plasma nitridation”, International Semiconductor Device Research Symposium, WP7-03, Maryland, USA, Dec. 12-14, 2007.
- [28] S. Takeuchi, A. Sakai, K. Yamamoto, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, “Growth and structure evaluation of strain-relaxed  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  buffer layers on virtual Ge(001) substrates”, The Third International SiGe Technology and Device Meeting, pp. 98-99, Princeton, USA, May, 2006.
- [29] D. Ikeno, K. Furumai, H. Kondo, M. Sakashita, A. Sakai, M. Ogawa, and S. Zaima, “Composition dependence of work function in metal (Ni, Pt)-germanide gate

electrodes”, 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 442-443, Yokohama, Japan, Sept. 12-15, 2006.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：多層膜構造体の形成方法

発明者：中塚理、酒井朗、小川正毅、財満鎮明、近藤博基、湯川勝規、水谷卓也

権利者：国立大学法人名古屋大学

種類：特許

番号：特願 2007-122891、特開 2009-272504

出願年月日：2007 年 5 月

国内外の別：国内

名称：伸張歪ゲルマニウム薄膜の作製方法、

伸張歪ゲルマニウム薄膜、及び多層膜構造体

発明者：竹内正太郎、酒井朗、中塚理、小川正毅、財満鎮明

権利者：国立大学法人名古屋大学

種類：特許

番号：特願 2007-132189、特開 2008-288395

出願年月日：2007 年 5 月 17 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ

<http://alice.xtal.nagoya-u.ac.jp/zaimalab/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

財満 鎮明 (ZAIMA SHIGEAKI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70158947

### (2)研究分担者

小川正毅 (OGAWA MASAKI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：10377773

酒井 朗 (SAKAI AKIRA)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：20314031

渡部平司 (WATANABE HEIJI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90379115

坂下満男 (SAKASHITA MITSUO)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30225792

近藤博基 (KONDO HIROKI)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50345930

中塚理 (NAKATSUKA OSAMU)

名古屋大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：20334998