

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） Creation of high-k gate dielectrics/strain-engineered germanium channel structures for 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. 研究計画の概要

Si デバイスの小型化に伴う携帯情報機器の爆発的普及が加速する現在、ナノスケールの金属-絶縁物-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、これまでのスケールリングにより性能向上を図る開発路線を脱却し、従来のデバイス物性の限界を大幅に超えて、ナノシステムを機能化させ得るポストスケール世代における MOSFET デバイスの実現を目的とする。具体的には、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 の実現に向けた、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を構築し、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高誘電率 (High-k) 絶縁膜、歪・欠陥制御型高移動度歪 Ge チャネルおよびバッファ層から構成されたハイブリッドヘテロ構造の開発、および基礎的物性解明を目指す。

### 2. 研究の進捗状況

Ge CMOS 技術に向けた各材料・プロセス技術、およびこれらの統合技術の開発を行い、歪 Ge チャネル MOSFET の実用化に向けた基板・ゲートスタック構造試料作製、およびその結晶物性、界面物性、電子物性の評価を進めている。

(1) 金属ゲート電極の開発: 窒素を用いたシリサイドの反応性スパッタリングによる

Ti-Si-N および Hf-Si-N ゲート電極形成とその物性解明を行った。窒素組成制御により、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) 状態を形成できることを実証した。この膜は、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有望な特性を示す。また、ミクタミクト電極の電子物性を評価し、Ti-Si-N では仕事関数 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、高窒素組成 Hf-Si-N では半導体的な特性が顕在化すること等を示した。

(2) Ge 上の High-k ゲート絶縁膜の開発: High-k/Ge 界面反応制御による高誘電率、低リーク電流ゲート絶縁膜構造の開発を進めている。Pr 酸化膜/Ge 基板界面への GeN 層の導入により、界面酸化物形成、Ge の拡散を抑制し、24 程度の高比誘電率を持つ Ge 上 Pr 酸化膜形成に成功した。また、原子層堆積 (ALD) 法により形成した極薄 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を LaAlO<sub>3</sub>/Ge 界面に挿入し、界面 Ge 酸化物の形成量を原子層オーダーで制御することで、界面準位密度を制御できることを示した。

また、シクロペンタジエニル系原料を用いた Pr 酸化膜の新規 CVD 技術を開発した。H<sub>2</sub>O を酸化剤に用いることで、O<sub>2</sub> 酸化剤に比べ、膜中 C 組成を 10 分の 1、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 酸化膜形成に成功した。

(3) 伸長歪 Ge 層形成技術の開発：高移動度チャネルに向けた伸長歪 Ge 層の形成技術を開発している。Si 基板上に歪緩和 Ge 層を形成した仮想 Ge 基板上に格子定数制御のための歪緩和  $Ge_{1-x}Sn_x$  層の成長を行った。仮想 Ge 基板の採用により、Ge 層に起因する貫通転位が  $Ge_{1-x}Sn_x/Ge$  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することで、歪緩和を促進できることを示した。また、Sn の組成傾斜を施した多層  $Ge_{1-x}Sn_x$  バッファ層形成により、各界面における格子ミスフィット量を制御することで、Sn の析出を適切に抑制し、Sn 組成を増大できることを実証した。さらに、 $Ge_{1-x}Sn_x$  層の形成温度および歪緩和熱処理温度低減、膜厚増大によるミスフィット転位伝播の促進によって、6.8%の高 Sn 組成  $Ge_{1-x}Sn_x$  層の形成に成功し、世界最高水準の 0.71%の伸長歪を有する伸張歪 Ge 層を実現した。

(4) Ge 表面窒化技術の開発：Ge デバイスに向けた絶縁膜界面制御、表面安定化技術確立を目指して、Ge 表面窒化技術を開発している。高密度プラズマにより高純度  $Ge_3N_4$  膜の形成に成功し、熱安定性等の点で酸化膜層に対する優位性を実証すると共に、窒化膜の熱脱離機構に関する基礎物性情報を取得した。また、ラジカル窒化法により形成した Ge 窒化膜について、窒化膜成長時の飽和膜厚の窒素分圧依存性、窒化物の分解による表面ラフネスの増大などを明らかにし、新しく開発した二段階窒化法によって、均一平坦な高密度窒化膜の形成に成功した。

#### (5) 基板張り合わせ技術の開発

既存の Si 技術への高移動度チャネルの効率的な融合に向けて、基板貼り合せ技術構築を行っている。Ge/Si 接合に先駆けて、Si(011)/Si(001)系基板の貼り合せ、原子接合を検証し、界面接合に伴う結晶性変化を X 線マイクロビームにより評価した。原子接合処理によって Si(011)層に発生した、格子面揺らぎの検出に成功し、それらは数  $\mu m$  程度のドメインを形成していることを示した。

### 3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している。

(理由)

当初計画であった Ge MOSFET 実現に向けた各種材料の探索、要素プロセスの開発は順調に進展してきた。各新規材料界面における界面反応、電子物性の解明も進んでおり、その制御技術構築に向けた知見も十分に蓄積されてきた。

### 4. 今後の研究の推進方策

これまでに開発した各材料・プロセス技術、およびこれらの統合技術を用いて、歪 Ge チャネル MOSFET の実用化に向けた基板・ゲートスタック構造試料作製、およびその結晶物性、電子物性の解明を進める。張り合わせ技術にも耐えうる高均一・高伸長歪 Ge 層形成と DSB 基板技術による張り合わせ歪 Ge 基板の開発、歪 Ge キャリア移動度の評価、歪 Ge とラジカル窒化法および High-k 膜の統合とその界面電気特性の解明、High-k 膜との統合も含めた金属ゲート電極の材料選択・プロセス指針の構築、歪 Ge ゲートスタック構造の作製とその界面物性評価および制御技術の検証などを推進する。

### 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 18 件)

S. Takeuchi, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, "Tensile strained Ge layers on strain-relaxed  $Ge_{1-x}Sn_x$ /virtual Ge substrates", Thin Solid Films (査読有) **517** (1) pp. 159-162, 2008.

S. Takeuchi, Y. Shimura, O. Nakatsuka, S. Zaima, M. Ogawa, and A. Sakai, "Growth of highly strain-relaxed  $Ge_{1-x}Sn_x$ /virtual Ge by a Sn precipitation controlled compositionally step-graded method", Appl. Phys. Lett. (査読有) **92**, pp. 231916-1-3, 2008.

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. (査読有) **47** (4), pp. 2420-2424, 2008.

K. Kutsuki, G. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, "Humidity-Dependent Stability of Amorphous Germanium Nitrides Fabricated by Plasma Nitridation", Appl. Phys. Lett. (査読有) **91**, pp. 163501-1-3, 2007.

〔学会発表〕(計 102 件)

A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, and S. Zaima, "Strain and dislocations in group IV semiconductor heterostructures" (招待講演), Materials Research Society 2007 Spring Meeting, San Francisco, USA, Apr. 9-13, 2007.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

〔その他〕

ホームページ

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