

平成 21 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： 18063005  
研究課題名(和文) ナノ機能化ゲルマニウム系チャネル

研究課題名(英文) Nano-structure functional devices based Ge-based channels

## 研究代表者

東京大学・大学院工学系研究科・教授

高木 信一

研究者番号：30372402

研究分野： 電子デバイス工学、半導体工学

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： ゲルマニウム、MOSFET、GOI、移動度、面方位、スピン、強磁性

## 1. 研究計画の概要

微細化にともなうシリコン MOS トランジスタの性能の物理限界を打破できる素子として、Ge チャネル MOSFET に注目し、MOS2 次元キャリア系の物性とキャリア輸送特性を検証することを通じて、Ge 反転層に係る新物性と量子効果を最大限に利用し、極薄 Ge-On-Insulator (GOI) 構造やひずみの有効利用、面方位・チャネル方位の選択・メタルソースドレインの利用などを通じて、最適 Ge CMOS 構造の素子設計と実証を目指す。また、上記 Ge CMOS 構造におけるソースドレインまたはチャネルに強磁性によるスピン制御の機能を導入し、スピン依存伝導による新規な機能を付加した新しい高機能 CMOS 素子を実現する。

## 2. 研究の進捗状況

これまで、高移動度が期待される(110)面 GOI pMOSFET を世界で初めて実現し、その高移動度性を実証した。また、原子状水素アニールによるリーク電流の抑制手法を提案・実証した。更に、熱酸化 GeO<sub>2</sub>/Ge MOS 界面構造が優れた界面特性をもつことを実証し、高温酸化が界面特性を改善できることを示した。加えて、この界面を用いた Ge pMOSFET の動作を実証すると共に、これまでで最大の移動度を実現した。

一方、Ge スピン MOSFET 実現のために必須のハーフメタル S/D として期待されるフルホイスラー合金 Co<sub>2</sub>FeGe (CFG) が、疑似 GOI 構造を用いて実現できることを実証した。

## 3. 現在までの達成度

高機能・高性能の Ge MOSFET に向けて、GOI 構造形成、面方位エンジニアリング、高品質

MOS 界面形成技術、リーク電流抑制技術、スピン MOSFET の中核技術であるハーフメタル S/D 材料形成技術などを、提案・実証しており、順調に目標が達成されている。

## 4. 今後の研究の推進方策

Ge MOSFET に関しては、より薄膜かつ高いゲート電圧が印加できるゲートスタック構造を開発し、広汎な Ns 範囲に対し、キャリア輸送機構の明確化を行う。また、CMOS 化に必須な高移動度の Ge n チャネル MOSFET を実現するため、nMOSFET を試作してその電気特性を調べ、性能向上を阻んでいる機構の明確化を行う。更に、ブースター技術として、(1) (100)面以外の面指数での高い性能の MOSFET の実現 (2) 酸化濃縮による GOI 構造の結晶性改善とチャネル薄膜化が電気特性に与える影響の明確化、フロントゲート GOI MOSFET の実現 (3) 圧縮ひずみの導入による正孔移動度の向上 などを進める。

また、Ge チャネル・スピン MOSFET のためのハーフメタル S/D 材料であるフルホイスラー合金 Co<sub>2</sub>FeGe (CFG) に関しては、pure な GOI 基板を用いて CFG の形成を行い、構造・磁性の評価を行う。

## 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 11 件)

[1] S. Takagi, T. Tezuka, T. Irisawa, S. Nakaharai, T. Maeda, T. Numata, K. Ikeda and N. Sugiyama, "Hole Mobility Enhancement of p-MOSFETs Using Global and Local Ge Channel Technologies", Materials Science and Engineering: B, Vol. 135, Issue. 3, 2006, pp. 250-255

[2] T. Uehara, H. Matsubara, S. Sugahara and S.

Takagi, "Ultrathin Ge-On-Insulator Metal Source/Drain p-Channel MOSFETs Fabricated By Low Temperature Molecular Beam Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 46, no. 4B, pp. 2117-2121, 2007

[3] S. Takagi, T. Irisawa, T. Tezuka, S. Nakaharai, T. Numata, N. Hirashita, Y. Moriyama, K. Usuda, S. Dissanayake, M. Tekenaka, S. Sugahara and N. Sugiyama, "Mobility-Enhanced Device Technologies Using SiGe/Ge MOS Channels", ECS Trans. Vol. 11, No. 6, pp. 61-74, Oct. 2007

[4] S. Takagi, T. Maeda, N. Taoka, M. Nishizawa, Y. Morita, K. Ikeda, Y. Yamashita, M. Nishikawa, H. Kumagai, R. Nakane, S. Sugahara and N. Sugiyama, "Gate Dielectric Formation and MIS Interface Characterization on Ge", Microelectronic Engineering, vol. 84, Issue 9-10, pp. 2314-2319, 2007

[5] S. Takagi, T. Irisawa, T. Tezuka, T. Numata, S. Nakaharai, N. Hirashita, Y. Moriyama, K. Usuda, E. Toyoda, S. Dissanayake, M. Shichijo, R. Nakane, S. Sugahara, M. Takenaka and N. Sugiyama, "Carrier-transport-enhanced channel CMOS for improved power consumption and performance" (Invited Paper), IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 55, No. 1, pp. 21-39, 2008

[6] H. Matsubara, T. Sasada, M. Takenaka and S. Takagi, "Evidence of low interface trap density in GeO<sub>2</sub>/Ge Metal-Oxide-Semiconductor structures fabricated by thermal oxidation", Appl. Phys. Lett., Vol. 93, Issue. 3, 032104, 2008

[7] Y. Takamura, A. Nishijima, Y. Nagahama, R. Nakane and S. Sugahara, "Formation of Si- and Ge-based Full-Heusler Alloy Thin Films Using SOI and GOI Substrates for the Half-Metallic Source and Drain of Spin Transistors", ECS Transactions, Vol. 16, pp. 945-952, 2008

[8] S. Dissanayake, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Takenaka and S. Takagi, "(110) Ultra-thin GOI Layers Fabricated by Ge Condensation Method", Thin Solid Films, Vol. 517, Issue 1, pp. 178-180, 2008

[9] 高木信一, 山本豊二, 田岡紀之, 池田圭司, "界面制御層を用いた高性能 Ge MOS トランジスタ", 応用物理, vol. 78, no. 1, pp. 37-42, 2009

[10] 高木信一, "ポストスケーリング時代の CMOS デバイス技術", 電子情報通信学会誌, vol. 92, No. 1 (2009) pp. 43-48

[11] 菅原聡, "スピン機能 MOSFET による新しいエレクトロニクスの展開", 応用物理, vol. 78, no. 3, (2009) pp. 236-241

〔学会発表〕(計 30件)(すべて国際会議)

[1] S. Takagi, "Mobility-Enhanced MOS Device Technologies in Nano-CMOS era (plenary talk)", Device Research Conference (DRC), pp. 5-8, South Bend, USA, June 2007.

[2] S. Dissanayake, H. Kumagai, T. Uehara, Y. Shuto, S. Sugahara and S. Takagi, "(110) Ultra-thin GOI p-MOSFETs Fabricated by Ge Condensation Method", 5th International Conference on SiGe(C) Epitaxy and Heterostructures, pp. 57-58, Marseille, France, May 2007.

[3] S. Takagi, T. Maeda, N. Taoka, M. Nishizawa, Y. Morita, K. Ikeda, Y. Yamashita, M. Nishikawa, H. Kumagai, R. Nakane, S. Sugahara and N. Sugiyama, "Gate Dielectric Formation and MIS Interface Characterization on Ge (invited)", 15th Insulating Films on Semiconductors (INFOS2007), pp. 2314-2319, Athens, Greece, June 2007,

[4] S. Dissanayake, S. Tanabe, S. Sugahara, M. Takenaka and S. Takagi, "Effect of Annealing on (100) and (110) Oriented pseudo-GOI pMOSFETs Fabricated by Ge Condensation Method", 5th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), pp. 233-234, Tokyo, Japan, Nov. 2007

[5] Y. Nakakita, R. Nakane, T. Sasada, H. Matsubara, M. Takenaka and S. Takagi, "Interface-controlled Self-Align Source/Drain Ge pMOSFETs Using Thermally-Oxidized GeO<sub>2</sub> Interfacial Layers", International Electron Device Meeting, pp. 877-880, Dec. 15-17, 2008, San Francisco, USA

他、30件(国際会議のみリストアップ)

〔図書〕(計 11件)

[1] S. Takagi, T. Tezuka, T. Irisawa, S. Nakaharai, T. Numata, K. Usuda, N. Sugiyama, M. Shichijo, R. Nakane and S. Sugahara, Electronic Device Architectures for the Nano-CMOS Era - From Ultimate CMOS Scaling to Beyond CMOS Devices, Chapter 5, Pan Stanford Publishing (2008)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

なし

取得状況(計 0件)

なし

〔その他〕

[1] Sanjeewa Dissanayake, 第22回(2007年春季)応用物理学会講演奨励賞受賞 (Sanjeewa Dissanayake, 熊谷寛, 周藤悠介, 菅原聡, 高木信一, "酸化濃縮法により作製された超薄膜(110)面 GOI p-MOSFET")

[2] 高木信一, 応用物理学会フェロー表彰受賞。「MOS トランジスタの輸送現象の解明と高移動度化の研究」(2008年9月)

[3] Yosuke Nakakita, IEEE EDS Japan Chapter Student Award, "Interface-Controlled Self-Align Source/Drain Ge PMOSFETs Using Thermally-Oxidized GeO<sub>2</sub> Interfacial Layers (IEDM2008)", (2009年1月)