

平成 22 年 4 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究 (A)  
研究期間： 2007~2010  
課題番号： 19206037  
研究課題名 (和文) 極微細構造シリコン結晶の電子物性に基づくナノスケール半導体デバイスに関する研究  
研究課題名 (英文) Research on nano-scale semiconductor devices based on the electronic properties of atomic-scale silicon crystals  
研究代表者  
遠藤 哲郎 (ENDO TETSUO)  
東北大学・学際科学国際高等研究センター・教授  
研究者番号： 00271990

研究代表者の専門分野： 電子デバイス  
科研費の分科・細目： 電気電子工学・電子デバイス 電子機器  
キーワード： 集積回路、ナノデバイス、ナノ電子物性科学

### 1. 研究計画の概要

本研究は、量子論的な物理を背景とする研究者と材料工学・デバイス工学を学術的背景とする研究者の有機的連携により、理論的手法と実験的実証の両面から、以下に示すことを定量的に提案することを目的としている。

- (1) ナノスケールの極微細構造な Si 結晶に対するナノ電子物性物理の構築
- (2) ナノスケールの極微細構造な Si 結晶に対する材料・プロセス技術の構築
- (3) 前記 (1) (2) に基づく真のナノスケール Si デバイス技術の構築

理論計算と実証的実験を相互補完的に推進することで、ナノスケールの極微細構造の半導体中で起こる様々な揺らぎを予測し、その揺らぎを極限まで抑えた界面構造、材料構造を提案する。さらに、Si 結晶の酸化現象や不純物拡散現象に伴う Si 結晶内に生じる応力・ひずみの制御技術を開発し、極微細構造な Si 結晶中の電荷の移動度を向上させ、デバイスの高速動作化を目指す。また、極微細構造な Si 結晶中で発生する種々の揺らぎに対して強い新しいデバイス設計技術を開発する。

### 2. 研究の進捗状況

極微細構造シリコン結晶の電子物性に基づくナノスケール半導体デバイスに関する研究においてこれまでの研究により得られた成果を、以下にテーマごとに記載する。

(1) 極微細構造 Si 結晶中の不純物の挙動、及び、その表面化学に関する基礎データに基

づき不純物揺らぎ、及び、界面のひずみのデバイスへの影響を評価した。その結果、Si 単結晶の面方位および歪が不純物拡散に与える影響、特にデバイスが三次元的にナノサイズ化するに伴って結晶表面に誘起される歪、及びその内部への分布が不純物分布に与える影響を解明した。また、1nm の HfO<sub>2</sub> 絶縁膜中に不可避に存在する欠陥が干渉効果に及ぼす影響を解明することで、絶縁膜中の欠陥の分布揺らぎがデバイス特性に与える本質的なバラツキの原因の解明を進めている。

(2) 極微細構造材料の表面ポテンシャル揺らぎと、不純物揺らぎ・界面ひずみが、デバイス特性に与える影響を、構築した操作プローブ顕微鏡、コンビナトリアル的手法による解析を駆使し、デバイス設計及びその集積回路の観点から、系統的に解析した。

上記の結果を、デバイスサイズと前述の材料物性の関係に注目して、実験、理論両面から知見を精査した。

(3) さらに、これらの結果を考慮して、デバイス中で発現する様々な物理現象の中からトンネル現象をその代表例として選択し、デバイス構造とトンネル現象の相関関係について、知見を得た。

これら上述の知見は、Si 結晶の①界面構造揺らぎ、②不純物分布揺らぎ、③表面ポテンシャル揺らぎがデバイスの駆動電流やしきい値やカットオフ電流やデバイス内部で発生する発熱量などの諸特性の揺らぎに与える影響を解明する上で不可欠である重要な知見である。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

当初計画した研究の順調な進展に加え、ナノスケールの極微細構造な Si 結晶に対するナノ電子物性物理の構築において、当初予期していなかった「非平衡電子状態」や「動的電子相関」というナノ構造中における電荷の挙動に関する新しい物理概念の端緒を得た。これらは今後のナノデバイスの構築にとって必須となる現象になると考えている。したがって本研究は当初の計画以上に進展している。

#### 4. 今後の研究の推進方策

①極微細構造 Si 結晶中での電子干渉・仕事関数・表面状態・不純物導入・信号伝達等々の挙動と揺らぎ、②それがデバイス特性に及ぼす影響に関する知見を統合し、揺らぎを極限まで抑えた界面構造・材料構造、および、揺らぎに強いデバイス構造・集積回路を提案する。最後に、上記結果を総合的にとりまとめ、材料レベル及びデバイスレベルでの統計的揺らぎ現象を制御する理論、および技術を提案する。

#### 5. 代表的な研究成果

(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 5 件)

1. M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Takada, Y. Sakurai, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, "Importance of Electronic State of Two-Dimensional Electron Gas for Electron Injection Process in Nano-Electronic Devices," Physica E, 査読有, 2010, In Press
2. Masakazu Muraguchi, Yukihiro Takada, Shintaro Nomura, Tetsuo Endoh, Kenji Shiraishi, "Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot", Physica E, 査読有, No.5, 2010, In Press
3. M. Hori, T. Shinada, K. Taira, N. Shimamoto, T. Tanii, T. Endoh and I. Ohdomari, "Performance enhancement of semiconductor devices by control of discrete dopant distribution", IOP PUBLISHING Nanotechnology, 査読有, Vol. 20, 365205.1-5, 2009
4. Tetsuo Endoh, Kazuyuki Hirose, and Kenji Shiraishi: "Physical Origin of Stress-Induced Leakage Currents in Ultra-Thin Silicon Dioxide Films" IEICE Trans Electron 査読あり E90-C. 955-961

(2007), 1

5. Tetsuo Endoh and Yuto Monma: "Study of 30-nm Double-Gate MOSFET with Halo Implantation Technology using a Two-Dimensional Device Simulator" IEICE Trans Electron 査読あり E90-C. 1000-1005 (2007), 1

[学会発表] (計15件)

1. M. Muraguchi, "New Tunneling Model with Dependency of Temperature Measured in Si Nano-Dot Floating Gate MOS Capacitor" International Conference on Solid State Devices and Materials (SS DM2009), Oct. 7, 2009, Sendai, Japan
2. 上柳 雅史, "しきい値および電源電圧同時ばらつきに対するCC-MCMLインバータ回路の制御理論", 平成21年秋季第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山県 富山市
3. 佐々木健志, "High-k絶縁膜/Poly-SiゲートおよびMetalゲート電極を有するn型MOSFETのカットオフ特性の評価", 平成21年秋季第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山県 富山市
4. 今本拓也, "poly-Si及び金属ゲート電極を有するhigh-k絶縁膜系p型MOSFETのカットオフ特性", 平成21年秋季第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山県 富山市
5. M. Muraguchi, "Importance of Electronic State of Two-Dimensional Electron Gas for Electron Injection Process in Nano-Electronic Devices", The 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures, July. 20, 2009, Kobe, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし