

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 10日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20241036

研究課題名（和文） シリコン・シングルドーパント・エレクトロニクス

研究課題名（英文） Silicon Single-Dopant Electronics

研究代表者

小野 行徳（ONO YUKINORI）

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主幹研究員

研究者番号：80374073

研究成果の概要（和文）：本研究は、人工原子（artificial atom）ではなく、半導体中の「真の原子」（true atom）を用いた、新しい単一電荷スピン操作技術とこれに基づく新規デバイスの実現を目指すものである。ここでは、トランジスタ中の個々のドーパントの位置特定技術を確立するとともに、個々のドーパントがトランジスタに与える影響を明らかにした。さらに、ドーパント原子により単一電荷を操作する「原子デバイス」の作製に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aim at the realization of technologies that enable us to manipulate single charges and spins, by using a true atom, or, dopant in silicon, rather than by using an artificial atoms, or quantum dots. Here, we established the way of identifying the position of individual dopants in a transistor and also clarified how each dopant had an impact on the transistor characteristics. In addition, we realized the “atom device” that controls motion of single charges by using a dopant embedded in silicon.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2011年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

研究分野：ナノエレクトロニクス

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：シングルドーパント、単一電子制御

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体の微細加工技術の発展により、微小領域に閉じこめられた電子の状態を利用した単一電荷や単一スピンの操作技術が注目されている。同技術は、いわゆる人工原子（artificial atom）、人工分子（artificial molecule）、人工格子（artificial lattice）を利用するものであり、その応用分野は、集積回路、センサー、電気計測分野の標準器、レ

ーザー、量子コンピュータ等非常に広い。しかしながら、人工的に作製するこれらの構造は、その特性制御が困難であるという本質的な問題を抱えている。ドーパントのエネルギーレベル、最大電荷捕獲数、及びスピンの状態は、近接する電子系との結合が小さければドーパント種により一意にきまり、人工原子（量子ドット）のように加工精度には依存しない。ドーパントの持つこの著しい特徴を利

用することにより、従来の単一電子エレクトロニクスでは実現できなかった分野、「単一ドーパントエレクトロニクス」が開けるものと期待される。

2. 研究の目的

人工原子ではなく、半導体中の「真の原子」(true atom)を用いた、新しい単一電荷スピ操作技術とこれに基づく新規デバイスの実現、さらには、新材料(新物性)の創成を最終目的とする。本課題は、最終ゴールを目指した初期ステップに相当し、以下の三点を達成することを目的とする。

- (1) トランジスタ中の個々のドーパントの位置特定技術の確立
- (2) 単一ドーパントを利用した新規デバイスの発案とその実証
- (3) ドーパントによる不純物バンド変調と Si 系新磁性材料の創成

3. 研究の方法

シリコンを母材として選定し、ドーパントとしては、その用途に応じ、リン、砒素、ボロン、インジウム、およびマンガンを用いる。

- (1) Silicon-on-insulator (SOI) 基板上にトランジスタを形成し、そのチャンネルに制御した形でドーパントを導入し、電界効果によるトランジスタ特性の変調から、個々のドーパントの位置を特定する。
- (2) 二つの微細ゲートに挟まれた微小領域に選択的にドーパントを注入し、ゲートの電界効果により、ドーパントへの電子の出し入れを精密に制御する。また、インジウムや界面のトラップのような深い準位を利用することにより電子正孔再結合を利用した電荷操作を行う。
- (3) マンガンなどの磁性元素を選択的に注入することにより、シリコンに磁性を付加し、これを制御する。

4. 研究成果

- (1) 単一のボロンを含有したトランジスタの特性を調べることにより、そのボロン原子がチャンネル中のどの位置にあるのかを特定した。また、そのボロン原子の位置とトランジスタ特性の相関を低温 (~10K) で明らかにした。さらに、シングルイオン注入法を用いてリンを注入した試料では、ドーパント原子の位置の違いによるトランジスタ特性の違いを室温において観測できた。
- (2) 砒素を選択的に注入したデバイスにおいて、注入数に依存した単一電子転送電流を生成した。また、この電流を解析することにより、ナノ領域の強電界によりドーパントのイオン化エネルギーが大きく変調を受けることを明らかにした。

(3) マンガンを薄層 SOI に注入した試料において、強磁性を観測するとともに、その起源が、マンガンシリサイドナノ粒子とシリコンの界面に存在することを明らかにした。また、理論計算を行い、これを裏付ける結果を得た。

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 24 件)

1. G. P. Lansbergen, Y. Ono, A. Fujiwara: (査読有)
Donor-Based Single Electron Pumps with Tunable Donor Binding Energy
Nano Letters, Vol. 12, (2012) 763-768.
2. H. Sumikura, K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara, M. Notomi: (査読有)
Bound exciton photoluminescence from ion-implanted phosphorus in thin silicon layers
Optics Express, Vol. 19, No. 25, December (2011) 2525-2562.
3. Y. Ono, Y. Miyazaki, S. Yabuuchi, H. Kageshima, M. Nagase, A. Fujiwara, E. Ohta: (査読有)
Significance of the interface regarding magnetic properties of Mn-nanosilicide in silicon
Thin Solid Films, Vol. 519, No. 24, October (2011) 8505-8508.
4. M. Hori, T. Shinada, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari: (査読有)
Impact of a few dopant positions controlled by deterministic single-ion doping on the transconductance of field-effect transistors
Appl. Phys. Lett. Vol. 99, No. 6, August (2011) 062103_1-3.
5. T. Goto, H. Inokawa, Y. Ono, A. Fujiwara, K. Torimitsu: (査読有)
Electrical measurements of terphenyl-based molecular devices
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 50, No. 7, July (2011) 071603_1-6.
6. M. A. H. Khalafalla, Y. Ono, J. Noborisaka, G. P. Lansbergen, A. Fujiwara: (査読有)
Carrier transport in indium-doped p-channel silicon-on-insulator transistors doped with indium between 30 to 285 K
J. Appl. Phys. Vol. 110, No. 19, July (2011) 014512_1-6.
7. K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara: (査読有)
Single-electron counting statistics of shot noise in nanowire Si MOSFETs
Appl. Phys. Lett. Vol. 98, No. 19, May (2011) 193502_1-3.
8. M. Hori, T. Shinada, K. Taira, A.

- Komatsubara, Y. Ono, T. Tanii, T. Endoh, I. Ohdomari: (査読有)
Enhancing secondary electron detection efficiency by applying a substrate bias voltage for deterministic single-ion Doping Appl. Phys. Express. Vol. 4, No. 3, March (2011) 046501_1 – 2.
9. J. Noborisaka, K. Nishiguchi, Y. Ono, H. Kageshima, A. Fujiwara: (査読有)
Strong Stark effect in electroluminescence from phosphorous-doped silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors
Appl. Phys. Lett. Vol. 98, No. 3, January (2011) 033503_1 – 3.
 10. T. Tsuchiya: (査読有)
Direct Observation of Fluctuations in the Number and Individual Electronic Properties of Interface Traps in Nanoscale Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 49, (2010) 064001_1 – 5.
 11. T. Tsuchiya: (査読有)
Capture/Emission Processes of Carriers in Heterointerface Traps Observed in the Transient Charge-Pumping Characteristics of SiGe/Si-Hetero-Channel pMOSFETs
Key Engineering Materials, Vol. 470, (2011) 201-206.
 12. S. Miyamoto, K. Nishiguchi, Y. Ono, K. M. Itoh, A. Fujiwara: (査読有)
Resonant escape over an oscillating barrier in a single-electron ratchet transfer
Phys. Rev. B, Vol. 82, No. 3, July (2010) 033303_1 – 4.
 13. M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, R. Jablonski, Y. Ono, T. Mizuno: (査読有)
Single-electron transport through single dopants in a dopant-rich environment
Phys. Rev. Lett. Vol. 105, No. 1, April (2010) 016803_1 – 4.
 14. J. Noborisaka, K. Nishiguchi, H. Kageshima, Y. Ono, A. Fujiwara: (査読有)
Tunneling spectroscopy of electron subbands in thin silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors
Appl. Phys. Lett. Vol. 96, No. 11, March (2010) 112102_1 – 3.
 15. M. A. H. Khalafalla, Y. Ono, K. Nishiguchi, A. Fujiwara: (査読有)
Horizontal position analysis of single acceptors in Si nanoscale field-effect transistors
Appl. Phys. Lett. Vol. 94, No. 22, April (2009) 223501_1 – 3.
 16. K. Takashina, K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara, T. Fujisawa, Y. Hirayama, K. Muraki: (査読有)
Electrons and holes in a 40nm thick silicon slab at cryogenic temperatures
Appl. Phys. Lett. Vol. 94, No. 14, April (2009) 142104_1 – 3.
 17. 土屋 敏章 (査読有)
ナノスケール MOS デバイスにおける界面物性の揺らぎ—界面トラップ 1 個 1 個を検出して評価する—
応用物理 vol. 78 (2009) 868-872.
 18. S. Miyamoto, K. Nishiguchi, Y. Ono, K. M. Itoh, A. Fujiwara: (査読有)
Escape dynamics of a few electrons in a single-electron ratchet using silicon nanowire metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
Appl. Phys. Lett., Vol. 93, No. 22, December (2008) 222103_1 – 3.
 19. K. Nishiguchi, C. Koehlin, Y. Ono, A. Fujiwara, H. Inokawa, H. Yamaguchi: (査読有)
Single-electron-resolution electrometer based on field-effect transistor
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 11, November (2008) 8305 – 8310.
 20. N. M. Zimmerman, W. H. Huber, B. Simonds, E. Hourdakis, A. Fujiwara, Y. Ono, Y. Takahashi, H. Inokawa, M. Furlan, M. W. Keller: (査読有)
Why the long-term charge offset drift in Si single-electron tunneling transistors is much smaller (better) than in metal-based ones: Two-level fluctuator stability
J. Appl. Phys. Vol. 104, No.3, August (2008) 033710_1 – 12.
 21. S. Yabuuchi, H. Kageshima, Y. Ono, M. Nagase, A. Fujiwara, E. Ohta: (査読有)
First-principles study on origin of ferromagnetism of MnSi_{1.7} nanoparticles in Si
Phys. Rev. B Vol. 78, No.4, July (2008) 045307_1 – 7.
 22. Y. Ono, M. Khalafalla, K. Nishiguchi, K. Takashina, A. Fujiwara, S. Horiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi: (査読有)
Charge transport in boron-doped nano MOSFETs: Towards single-dopant electronics
Appl. Sur. Sci. Vol. 254, No.19, July (2008) 6252 – 6256. Paper for invited talk
 23. S. Yabuuchi, Y. Ono, H. Kageshima, M. Nagase, A. Fujiwara, E. Ohta: (査読有)
Ferromagnetism of manganese-silicide nanoparticles in Silicon
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 6, June

- (2008) 4487 - 4450
24. H. W. Liu, T. Fujisawa, H. Inokawa, Y. Ono, A. Fujiwara, Y. Hirayama: (査読有) A gate-defined silicon quantum dot molecule Appl. Phys. Lett. Vol. 92, No. 22, June (2008) 222104_1 - 3.
- [学会発表] (計 34 件)
1. T. Shinada:
Quantum transport in deterministically implanted single-donors in Si FETs
2011 International Electron Devices Meeting (December 6-8, San Fransisco, USA).
 2. G. P. Lansbergen:
Charge transfer by multiple donors in a Si nanowire
2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (September 28-30, 2011, Nagoya).
 3. Y. Niida:
Subband energy manipulation by gate voltage in Si (100) hole system
The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (July 25-29, 2011, Tallahassee, Florida).
 4. M. Hori:
Impact of a few dopant positions controlled by single-ion implantation on transconductance of FETs
11th International Workshop on Junction Technology (June 9-10, Kyoto).
 5. M. Sinohara:
Observation of new current peaks of Si single-electron transistor with a single-hole trap,
2011 Silicon Nanoelectronics Workshop (June 12-13, Kyoto).
Workshop Abstract, pp. 59 - 60.
 6. G. P. Lansbergen:
Capture and emission kinetics of traps in MOSFETs,
2011 Silicon Nanoelectronics Workshop (June 12-13, Kyoto).
 7. J. Noborisaka:
Electroluminescence study of phosphorus ionization in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors,
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Jan. 11-14, Atsugi).
 8. G. P. Lansbergen:
Charge switching in wire MOSFETs studied by separation of capture and emission,
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Jan. 11-14, Atsugi).
 9. T. Shinada:
Reliable Single Atom Doping and Discrete Dopant Effects on Transistor Performance
2010 International Electron Devices Meeting (December 6-8, San Fransisco, USA).
 10. M. Anwar:
KFM Observation of Single-Electron Filling in Dopant Arrays
2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (September 22-24, 2010, Tokyo).
 11. J. Noborisaka:
Strong Stark effect of electroluminescence in thin SOI MOSFETs
2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (September 22-24, 2010, Tokyo).
 12. T. Goto:
Effect of Device Structure on Electrical Conduction of Terphenyl-based Molecule
2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (September 22-24, 2010, Tokyo).
 13. Y. Niida:
Electron-mobility suppression under valley-polarized region in Si quantum well
30th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 25 - 30, 2010, Seoul, Korea).
 14. Y. Ono:
Significance of the interface regarding magnetic properties of Mn nanosilicide in silicon
Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related materials Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (July 24 - 26, 2010, Tsukuba).
 15. M. Hori:
Enhancement of electron transport property in FET with asymmetric ordered dopant distribution
18th International Conference on Ion Implantation Technology (June 6 - 11, 2010, Kyoto).
 16. T. Shinada:
Performance evaluation of MOSFETs with discrete dopant distribution by one-by-one doping method
SPIE Advanced Lithography - Alternative Lithographic Technologies II (February

- 21 – 25, 2010, San Jose, USA).
17. K. Takashina:
In plane transport in a double layer crystalline silicon structure with an SiO₂ barrier
2010 International Symposium on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than -Moore' & 'Beyond CMOS' Era (March 1 – 2, 2010, Southampton, UK).
 18. T. Tsuchiya:
Fluctuations in Electronic Properties of Individual Interface Traps in Nanoscale MOSFETs
International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (June 3-5, 2010, Tokyo).
 19. K. Nishiguchi:
Single-electron counting statistics of shot noise in nanowire Si MOSFETs
2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (October 7-9, 2009, Sendai).
 20. J. Noborisaka:
Tunnel spectroscopy of electron subbands in thin SOI MOSFETs
2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (October 7-9, 2009, Sendai).
 21. T. Tsuchiya:
Direct Observation of Fluctuations in Both the Number and Individual Carrier Capture Rate of Interface Traps in Small Gate-Area MOSFETs
39th European Solid-State Device Research Conference (September 14-18, 2009, Athens, Greece)
 22. T. Tsuchiya:
Fluctuation in Electronic Properties of Interface Traps in Nano-MOSFETs
4th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (January 29-30, 2009, Sendai, Japan)
 23. K. Takashina:
Electron-hole transport in a 40 nm thick silicon slab
The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (July 19-24, Kobe, Japan).
 24. S. Miyamoto:
Single-electron activation over an oscillating barrier in silicon nanowire MOSFETs
The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (July 19-24, Kobe, Japan).
 25. A. Fujiwara:
Single-electron devices based on silicon nanowire MOSFETs
"Trends in NanoTechnology" International Conference (September 7-11, 2009, Barcelona, Spain).
 26. M. A. H. Khalafalla:
Detection and position analysis of single and coupled acceptors in silicon nano field-effect transistors
2009 Silicon Nanoelectronics Workshop (June 13-14, 2009, Kyoto).
 27. M. Kawachi:
Effect of δ -function-like boron charge sheet on p-channel ultra-thin SOI MOSFETs
2009 Silicon Nanoelectronics Workshop (June 13-14, 2009, Kyoto).
 28. Y. Niida:
Asymmetric mobility of electrons and holes with respect to quantum-well potential in a double gate SIMOX MOSFET,
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Jan. 20-23, 2009, Atsugi).
 29. K. Takashina:
In-plane transport in a double layer crystalline silicon structure with an SiO₂ barrier
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Jan. 20-23, 2009, Atsugi).
 30. M. A. H. Khalafalla:
Detection and position analysis of single and coupled acceptors in silicon nano field-effect transistors
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Jan. 20-23, 2009, Atsugi).
 31. T. Tsuchiya:
Capture /Emission Process of Carriers in Interface Traps Observed in the Transient Charge Pumping Characteristics of MOSFETs
39th IEEE Semiconductor Interface Specialist Conference (2008, Dec. 11 – 13, San Diego, USA)
 32. A. Fujiwara: (invited)
Single-electron devices and their circuit applications,
2008 Tera-level nanodevices (TND) Technical Forum (October 6–7, 2008, Korea).
 33. S. Miyamoto:
Escape dynamics of electron in a single-electron ratchet using silicon nanowire MOSFETs

IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (Oct. 20-22, 2008, Kyoto).

34. K. Takashina:

In-plane transport in a double layer crystalline silicon structure with an SiO₂ barrier

IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (Oct. 20-22, 2008, Kyoto).

[図書] (計 2 件)

1. Y. Takahashi, Y. Ono, A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and H. Inokawa: Silicon Single-Electron Devices, in "Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures eds. by N. Koshida, Springer, 2009. pp. 125-172.
2. Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi and A. Fujiwara: Single-electron transistor and its logic application, in "Information Technology II (volume 4) of Nanotechnology", Wiley-VCH Verlag, 2008. pp. 45-68.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/ono/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 行徳 (ONO YUKINORI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・主幹研究員

研究者番号 : 80374073

(2) 研究分担者

土屋 敏章 (Tsuchiya Toshiaki)

島根大学総合理工学部・教授

研究者番号 : 20304248

堀口 誠二 (Horiguchi Seiji)

工学資源学研究科・教授

研究者番号 : 60375219

西口 克彦 (Nishiguchi Katsuhiko)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・特別研究員

研究者番号 : 00393760

(3) 連携研究者

山口 徹 (Yamaguchi Toru)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・主任研究員

研究者番号 : 30393763

モハメッド カラファラ (Mohammed

Khalafalla)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・研究員

研究者番号 : 70463627