

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820127

研究課題名(和文) ソース端ドナー原子のエネルギーフィルタ効果を用いたSiナノトランジスタ

研究課題名(英文) Effect of energy filtering due to donor atoms near source edge in Si nano-transistors

研究代表者

Moraru Daniel (Moraru, Daniel)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：60549715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：数ドナー原子は輸送特性を制御したナノスケールSiトランジスタを作製した。ノンドープチャンネルを有するトランジスタでは、ソース端付近に拡散ドナー原子はパスとして動作する可能性がある。単一電子トンネリング(SET)は、～100Kまで観察することができる。選択的にドーピングされたチャンネルトランジスタでは、チャンネルの中心で強く結合ドナー原子は、支配的な量子ドット(QD)を形成することができる。狭いチャンネルデバイスの場合、SET動作があっても、室温まで観察される。QDの位置も体系的中心とソース端との間で変更された。高温動作のために最適化された条件は、このように次の段階として同定することができる。

研究成果の概要(英文)：We fabricated nanoscale Si transistors in which a few donor-atoms control the transport characteristics. In transistors with non-doped channels, donor atoms diffused near the source edge may work as a path, possibly filtering the energy of the incoming electrons. For such devices, single-electron tunneling (SET) can be observed up to ~100K. In transistors with selectively-doped channels, strongly-coupled donor atoms in the center of the channel can form a dominant quantum dot (QD). For the narrowest-channel devices, SET behavior is observed even up to room temperature. This shows the possibility of controlling the transport mechanism in nanoscale transistors. The position of the QD was also systematically changed between center and source edge. An optimized condition for high-temperature operation can be thus identified as a next step.

研究分野：電子デバイス・機器

キーワード：電子デバイス・機器 シングルドーパント シリコン 量子ドット ドーパント原子 ナノデバイス トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

SiMOSFETのドレイン電流 vs. ゲート電圧特性 ( $I_D$ - $V_G$  特性)における立ち上がりの急峻性(サブシュレッドスイング(SS))は、**60 mV/decade** という理論的限界値がある。これはソース電極におけるフェルミ分布関数で決まるキャリアの熱励起が支配しているためである。もし、この熱励起を抑制できれば、SS 値は大幅に改善される。実際、この流れに沿って、トンネルFET (TFET) の研究が盛んに行われている(A.M. Ionescu and H. Riel, Nature (2011))。これは、 $n^+$  /  $i$ -チャネル /  $p^+$  の構造をもったバンド間のトンネル電流を利用するもので、 $i$ -チャネルがゲート電圧によって制御される。これは、熱励起されたキャリアのエネルギー分布をバンド構造でフィルタリングしようとするものである。これによって SS 値は改善されるが、構造が複雑でかつ抵抗が高いという問題点がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまで技術蓄積のある  $n^+$  /  $i$ -チャネル /  $n^+$  の構造の MOSFET 構造を維持しつつ、**ソース端のドーパント原子をエネルギーフィルタ**として利用しようとするものであり、これまで報告例のない全く新しい原理のトンネル FET である。チャネル部を十分に細いワイヤ状にすれば、平均的に1個のドーパント原子がソースとチャネルの境界部に存在することが可能となる。たとえば、ソースのリン濃度を  $\sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、シリコンナノワイヤの直径を 10nm とすれば、統計的に見てソース端にリン原子が1個存在し、これが電子のエネルギーを揃える役割をして急峻なスイッチング特性となることが期待できる。

3. 研究の方法

本研究計画は、微細 SOI-MOSFET の作製と、ソース端に位置するリン原子のエネルギーフィルタリング効果を確認することから成る。ここで必要となる MOSFET の作製は、静岡大学電子工学研究所のクリーンルーム施設で作製した。また、極低温 ( $\sim 5\text{K}$ ) から室温までの広い温度領域における MOSFET の特性評価も、電子工学研究所田部研究室で測定した。

$n^+$ ソース /  $i$ -チャネル /  $n^+$ ドレイン構造の微細 SOI-MOSFET の作製を行なった。デバイスパラメータは、SOI 厚さ  $t$ : 10nm、チャネル幅  $W$ : 100nm ~ 10nm、チャネル長  $L$ : 100~1000nm、ソース/ドレインのリン濃度  $C_P$ :  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  とする。これにより、統計的に見れば、 $W \sim 10\text{nm}$  の場合に、ソース端にリン原子が1個存在し、チャネルに注入される電子はそのリン原子のドナーレベルを通過することになる。ここで、パラメータの調整は極めて重要であり、特にチャネル幅  $W$  が特性を支配すると考えられた。

作製した微細 SOI-MOSFET の電気的特性をまず低温域 ( $5 \sim 10\text{K}$ ) で測定して、ソース端リンドナーによる単一電子トンネル効果を明らかにした。特に、 $I_D$ - $V_G$  特性において、パラメータとして重要なチャネル幅  $W$  の依存性に注目し、詳しく測定した。

低温で、単一電子トンネル型の電流ピークが見られるデバイスに対して室温での  $I_D$ - $V_G$  特性を詳しく測定し、低温特性との対応関係を調べた。これによって、ソース電極端のドーパント原子のもつエネルギーフィルタリング効果を明らかにし、新しいデバイス原理の展開を目指した。

4. 研究成果

平成 26-27 年度に得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 高濃度ソース・ドレインのナノ SOI-MOSFET の作製：チャネル幅約 10nm、厚さが約 10nm 以下の微細チャネルをもつ SOI-MOSFET を作製した。ソースとドレインは高濃度 (約  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) にリンをドーピングし、チャネル部はノンドープとした。この構造では、 $I$ - $V$  特性がリードの端付近の少数個のリンドナーによって影響されると思われる。
- (2) SOI-MOSFET の  $I$ - $V$  特性：チャネル幅が小さい FET では、低温で明瞭な単一電子トンネル (SET) 特有の電流ピークが観察され、その電流ピークは比較的高い温度 ( $>100\text{K}$ ) でも消失しないことがわかった。チャネルは意図的にはドーピングしていないため、観測された SET 特性はリードの端付近に拡散したリンによる量子ドットに起因すると推察される。

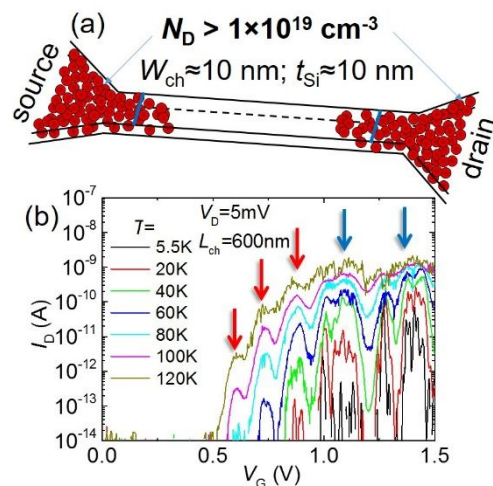


図 1. (a)  $n^+$ ソース /  $i$ -チャネル /  $n^+$ ドレイン構造の微細 SOI-MOSFET 構造。(b) 単一電子トンネル (SET) 特有の電流ピークの温度依存性 ( $>100\text{K}$ )。

この結果は、本研究の目的で用いた仮説である「ソース端リンドナーのエネルギーフィルターの効果」が原理的に正しいことを示している。しかし、この効果を室温で安定的に利

用するためには、量子ドットの位置やエネルギー深さを正確に制御するとともに最適化することが重要と思われる。

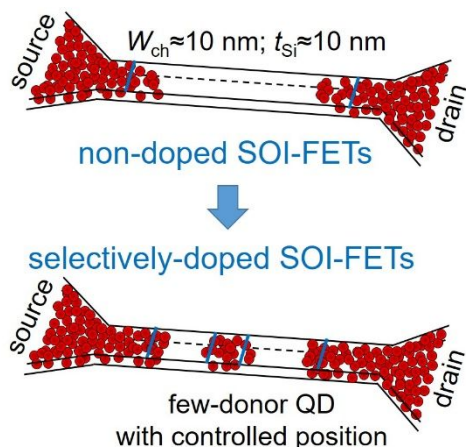


図 2. n+ソース / i-チャネル / n+ドレイン構造の微細 SOI-MOSFET 構造 → n+ソース / 選択ドーピング-チャネル / n+ドレイン構造の微細 SOI-MOSFET 構造。

- (3) リンドナー量子ドットの位置を制御するために選択ドーピング技術を用いてチャネル中央付近に量子ドットを形成し、電流電圧特性と量子ドットの電子状態の関係を明らかにした (D. Moraru et al., Sci. Rep. 2014; D. Moraru et al., Nanoscale Res. Lett. 2015)。また、ごく最近、このデバイスでチャネル幅が十分に狭い場合は、中央付近の量子ドットを介した単電子トンネリングが室温でも観測されることを見出した (SNW WS (2016 年 6 月)にて発表予定、図 3)。これにより動作の温度の高温化をほぼ達成することができた。ただし、この FET は、量子ドットがソース端から離れているので、「FET の立ち上がり特性の急峻化」に結び付くか否かは明らかでなく、今後、量子ドットのチャネル内での位置の効果を詳しく調べるのが重要となる。

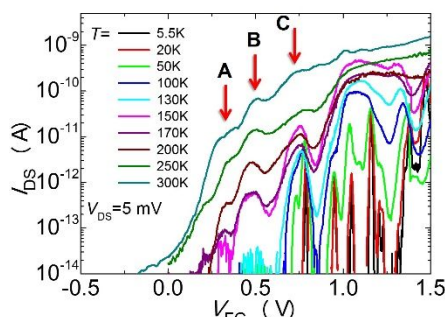


図 3. n+ソース / 選択ドーピング-チャネル / n+ドレイン構造の微細 SOI-MOSFET の I V 特製の温度依存性 (300K まで)。

- (4) 現在、選択ドーピングのチャネル内位置

を変えて FET を作製・評価している。予備的な I-V 測定を進めている段階であるが、今後、エネルギーフィルタリングのためのリンドナー量子ドットの最適位置と室温動作を両立させるべく研究を進めていく。

## 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 15 件)

M. Tabe, H. N. Tan, T. Mizuno, M. Muraganathan, L. T. Anh, H. Mizuta, R. Nuryadi, and D. Moraru, "Atomistic nature in band-to-band tunneling in two-dimensional silicon pn tunnel diodes", Appl. Phys. Lett., 査読有、vol. 108, 2016, pp. 093502-1-5  
DOI: 10.1063/1.4943094

A. Samanta, D. Moraru, T. Mizuno, and M. Tabe, "Electric-field-assisted formation of an interfacial double-donor molecule in silicon nano-transistors", Sci. Rep., 査読有、vol. 5, 2015, pp. 17377-1-10  
DOI: 10.1038/srep17377

M. Tabe, D. Moraru, A. Samanta, K. Tyszka, H. N. Tan, Y. Takasu, R. Jablonski, L. T. Anh, H. Mizuta, and T. Mizuno, "Effect of individual dopants in nano-SOI-MOSFETs and nano-pn-diodes", ECS Transactions, 査読有、vol. 69, 2015, pp. 189-195  
DOI:10.1149/06910.0189ecst

D. Moraru, K. Tyszka, Y. Takasu, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Physics of strongly-coupled dopant-atoms in nanodevices", International Journal of Technology, 査読有、vol. 6, 2015, pp. 1057-1064  
DOI: 10.14716/ijtech.v6i6.1305

D. Moraru, A. Samanta, K. Tyszka, L. T. Anh, M. Manoharan, T. Mizuno, R. Jablonski, H. Mizuta, and M. Tabe, "Tunneling in systems of coupled dopant-atoms in Si nanodevices", Nanoscale Res. Lett., 査読有、vol. 10, 2015, pp. 372-1-10  
DOI: 10.1186/s11671-015-1076-z

K. Tyszka, D. Moraru, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Effect of selective doping on the spatial distribution of donor-induced quantum dots in Si nanoscale transistors", Appl. Phys. Express, 査読有、vol. 8, 2015, pp. 094202-1-4  
DOI: 10.7567/APEX.8.094202

K. Tyszka, D. Moraru, A. Samanta, T.

Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Comparative study of donor-induced quantum dots in Si nano-channels by single-electron transport characterization and Kelvin probe force microscopy", J. Appl. Phys., 査読有、vol. 117、2015、pp. 244307-1-6 DOI: 10.1063/1.4923229

D. Moraru, A. Samanta, T. Tsutaya, Y. Takasu, T. Mizuno, and M. Tabe, "Tunneling transport in quantum dots formed by coupled dopant atoms", Advanced Materials Research, 査読有、vol. 1117、2015、pp. 78-81 DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.78

K. Tyszka, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Kelvin probe force microscope observation of donors' arrangement in Si transistor channel", Advanced Materials Research, 査読有、vol. 1117、2015、pp. 82-85 DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.82

D. Moraru, A. Samanta, L. T. Anh, T. Mizuno, H. Mizuta, and M. Tabe, "Transport spectroscopy of coupled donors in silicon nano-transistors", Sci. Rep., 査読有、vol. 4、2014、pp. 6219-1-6

DOI: 10.1038/srep06219

L. T. Anh, D. Moraru, M. Manoharan, M. Tabe, and H. Mizuta, "The impacts of electronic state hybridization on the binding energy of single phosphorus donor electrons in extremely downscaled silicon nanostructures", J. Appl. Phys., 査読有、vol. 116、2014、pp. 063705-1-9

DOI: 10.1063/1.4893181

S. Purwiyanti, A. Udhiarto, D. Moraru, T. Mizuno, D. Hartanto, and M. Tabe, "Observation of tunneling effects in lateral nanowire pn junctions", Makara Journal of Technology, 査読有、vol. 18、2014、pp. 91-95

DOI: 10.7454/mst.v18i2.2948

[学会発表](計 47 件)

D. Moraru, A. Samanta, Y. Takasu, K. Tyszka, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Atomic and Molecular Effects based on Dopants in Silicon Nanodevices", International Conference on Small Science (ICSS 2015), Phuket, THAILAND, 2015.11.4-7 (invited talk)

M. Tabe, D. Moraru, A. Samanta, K. Tyszka, H.N. Tan, Y. Takasu, R.

Jablonski, L.T. Anh, H. Mizuta, and T. Mizuno, "Effect of individual dopants in nano-SOI-MOSFETs and nano-pn-diodes" ECS ULSI Process Integration 9 Conference, Phoenix, USA, 2015.10.11-15 (invited talk).

D. Moraru, A. Samanta, Y. Takasu, K. Tyszka, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Impact of dopant-atoms on electron tunneling into nanoscale-transistor channels", 4th International Conference on Global Research and Education in Intelligent Systems (inter-Academia), Hamamatsu Congress Center, Hamamatsu, SHIZUOKA, 2015.9.28-30.

K. Tyszka, D. Moraru, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Correlation between single-electron tunneling characteristics and potential landscapes in dopant-atom transistors", 76th JSAP Autumn Meeting, Nagoya Congress Center, Nagoya, AICHI, 2015.9.13-16

D. Moraru, K. Tyszka, Y. Takasu, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe "Physics of strongly-coupled dopant atoms in nanodevices", Quality in Research (QiR) Conference, Lombok, INDONESIA, 2015.8.10-13

M. Tabe, D. Moraru, A. Samanta, H. N. Tan, L. T. Anh, M. Manoharan, H. Mizuta, and T. Mizuno,

"Dopant-cluster-assisted tunneling in Si nanodevices", Silicon Quantum Electronics workshop 2015, Sunport Takamatsu, Takamatsu, KAGAWA, 2015.8.4

D. Moraru, A. Samanta, Y. Takasu, K. Tyszka, T. Mizuno, R. Jablonski and M. Tabe, "Impact of diffused donor-clusters near lead/channel boundary on high-temperature single-electron tunneling in narrow SOI-FETs" IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW) 2015, Rihga Royal Hotel Kyoto, KYOTO, 2015.6.14-15

D. Moraru, A. Samanta, K. Tyszka, L. T. Anh, M. Manoharan, T. Mizuno, R. Jablonski, H. Mizuta, and M. Tabe, "Tunneling via single and coupled dopants in Si nanodevices" EMN Meeting on Quantum Technology, Beijing, CHINA, 2015.4.14-17 (invited talk)

D. Moraru, Y. Takasu, A. Samanta, T. Mizuno, and M. Tabe, "Interactions of individual dopants and macroscopic quantum dots in weakly-doped nanoscale SOI-FETs", 62nd JSAP Spring Meeting, Tokai Univ. Hiratsuka,

KANAGAWA, 2015.3.11-14  
D. Moraru, K. Tyszka, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, " Tunneling transport via dopant-induced quantum dots in silicon nano-devices " 3<sup>rd</sup> International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN), Chennai, INDIA, 2015.2.4-6 (invited talk)  
D. Moraru, A. Samanta, T. Tsutaya, Y. Takasu, L. T. Anh, M. Manoharan, T. Mizuno, H. Mizuta, and M. Tabe, " Control of electron transport regimes via single- and multiple-donors in nano-channel SOI-FETs " IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW) 2014, Honolulu, USA, 2014.6.8-9

研究者番号 :  
(3)連携研究者 ( )

研究者番号 :

〔図書〕(計 1 件)

D. Moraru and M. Tabe, in " **Nanoscale Silicon Devices** " (Taylor & Francis Group, edited by S. Oda and D. Ferry) - chapter 8: " Dopant-Atom Silicon Tunneling Nanodevices " (December, 2015, CRC Press), pp. 181-206.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 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 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〕

Homepage: <http://morarulab.wordpress.com>

6. 研究組織

(1)研究代表者

モラル ダニエル (Moraru Daniel)  
静岡大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 60549715

(2)研究分担者

( )