

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 22 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289098

研究課題名(和文)シリコン中のドーパント原子を用いた高精度電荷制御の研究

研究課題名(英文)Research on high-precision charge transfer using dopant atoms in silicon

研究代表者

小野 行徳(Ono, Yukinori)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：80374073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：半導体中の局在準位を用いた電荷の高精度転送を実現するために、その素過程を調べ以下の結果を得た。まず、電子正孔再結合過程を実時間で観測できる手法を確立し、捕獲断面積などの情報を抽出することに成功した。また、単一界面欠陥の再結合過程を調べ、2電子再結合が生じていることを見出した。この結果は、チャージポンピング法の基礎をなす電荷再結合のメカニズムが、SRH理論では記述できないことを強く示唆している。さらに、シリコン中の浅い準位を有するドナーのスピ状態を電子スピン共鳴法を用いて調べ、砒素のみ、常磁性化していないことを示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to realize high-precision charge transfer, we have performed three basic experiments, and obtained the following results. First, we have developed the method that enables us to monitor the electron-hole recombination process in time domain. Using the method, cross-sections for electron and hole captures were successfully obtained. Next, we investigated the electron-hole recombination via single interface defects, and found that the single defects could convey two electrons for one cycle of the charge pumping procedure. This strongly suggests that the existing Shockley Read Hall (SRH) theory for the recombination does not hold true. In addition, we have investigated, using electron spin resonance, the spin states of shallow donors, phosphorus, arsenic, and antimony, and found that only arsenic exhibited imperfect formation of the paramagnetic state.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：チャージポンピング ドナー 単一電子転送

1. 研究開始当初の背景

電子を微小領域に閉じこめることにより形成される、いわゆる人工原子 (artificial atom, または量子ドット) は、単一電荷の操作を可能とし、これにより、量子情報処理、通信、センサー、電気計測分野の標準器など、幅広い分野への応用が期待されている。しかし、量子ドットの加工精度の限界のため、高精度の電荷転送や高温動作はいまだに実現されていない。

2. 研究の目的

我々のゴールは、人工原子ではなく、半導体中の「真の原子」(ドープド原子や界面ダングリングボンドを持つ原子)を用いた新しいエレクトロニクスを創生することにある。これらの半導体中原子は、自然界に存在する量子ドットとみなすことができる。その量子ドットとしての特性はドープド種や欠陥種により一意に決まり、それぞれが持つ固有の電氣的、光学的性質を利用することにより様々な応用が期待されている。

研究代表者らは、本課題遂行の直前に、ドナー原子の電子捕獲放出過程を制御することにより、新規な単一電荷転送素子の基本動作に成功している。本課題では、同素子を基軸に、ドープド原子や界面欠陥に関わる単一電荷の捕獲放出過程、及び、電子正孔対による単一再結合過程の高精度制御技術構築に向けた要素技術を確立する。

3. 研究の方法

(1)これまで明らかにされていない、電子正孔再結合過程の動的過程の詳細を調べるために、再結合過程を実時間で観測するための評価手法を新たに確立する。

(2)単一の界面欠陥を介した電子正孔再結合過程による電荷転送を実証し、その電荷転送メカニズムの詳細を明らかにする。

(3)浅い準位を有するシリコン中のドープドの精密位置制御を念頭にリン、砒素、アンチモンドナーの熱的挙動を明らかにする。

4. 研究成果

(1)再結合過程を実時間で観測するための評価手法を新たに確立した。同手法では、チャージポンピングとよばれる再結合中心の密度を算定する手法を応用する(チャージポンピング過程については、図2の上図参照)。ここでは、チャージポンピング過程により生成されるトランジスタのソース・ドレイン電流と基板電流を高速の電流アンプを用いて計測する。系のノイズを小さく抑えることにより、再結合過程を電流変調として検出することが可能となった。図1はそのような電流変調の観測結果(測定温度は室温)の一例である。図の下段に示されているものが、チャージポンピング過程で重要となるトランジ

スタのゲート電極に印加するパルス電圧の波形である。このようなパルス電圧を印加することにより、ソース・ドレイン、および、基板に過渡応答電流が生じる。これらの電流を図の上段と中段に示してある。丸で囲まれた領域に電流の変調がみられる。これらはトランジスタ界面に存在する局在準位に起因した電子正孔再結合過程により生ずるものである。これらの結果から、電子と正孔の捕獲断面積を個別に抽出することに成功するなど、再結合過程の詳細を明らかにすることができた。

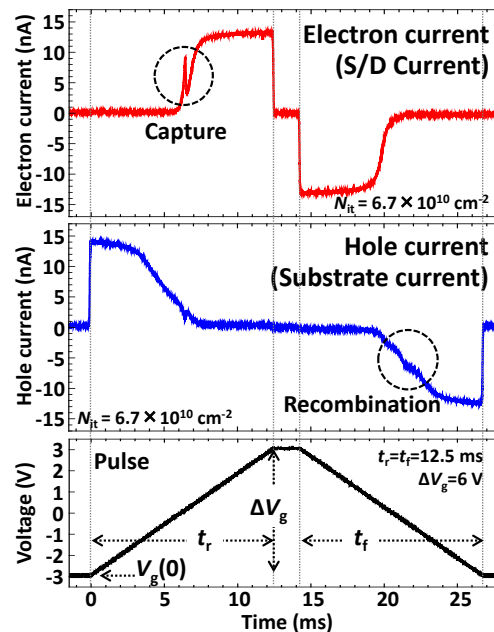


図1. 電子正孔再結合過程の実時間観察結果

(2)ここでは、微細MOSトランジスタを用い、単一の欠陥を介したチャージポンピング電流を室温にて計測した。図2の上図はチャージポンピング過程における電荷の流れを示している。トランジスタのゲートにパルス電圧を印加することにより、電子が界面欠陥に捕獲され、続いて正孔と再結合することにより、ソース・ドレイン電極から基板電極に再結合電流が流れる。図2の下図は、単一欠陥からのチャージポンピング電流をゲート電圧の関数としてプロットしたものである。図からチャージポンピング電流 I_{cp} が $2ef$ (e は素電荷、 f はゲートパルスの周波数)に量子化されていることが分かる。

この結果は、界面欠陥評価法として最も信頼性があり、最も広く普及しているチャージポンピング法の基礎をなす電荷再結合のメカニズムが、これまで常識と考えられていた、Shockley-Read-Hall (SRH) 理論では記述できないことを強く示唆しており、学術、応用の両面においてその意義は極めて大きいと考える。同時に、単一欠陥における再結合過程が「電荷転送というデバイス動作」に対して、潜在的に豊かな物理を持っていることを示唆している。また、この発見が室温でなされ

たという事実は、この系が素電荷の制御に対して、非常に高い精度を有していることを明確に示している。

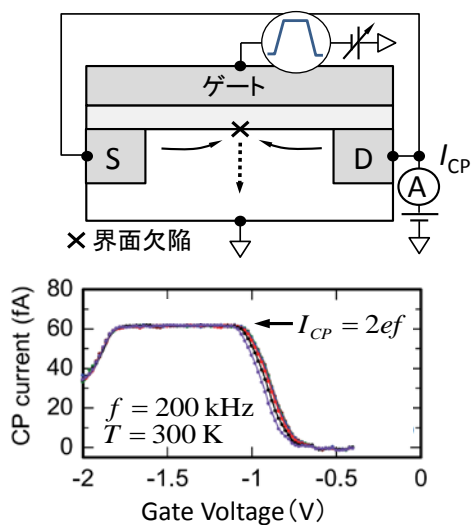


図2. チャージポンピング過程 (上図) と単一界面欠陥による2電子再結合 (下図)。

(3) ここでは、リン、砒素、アンチモンについて、シリコン中へイオン注入、続いて熱処理をすることにより活性化処理をなされた場合について、低温 (10K) 電子スピン共鳴を用いてその電子状態を調べた。図3 (a) に示すように、各ドナーからの信号は、核スピンと電子スピンの超微細相互作用の効果により分裂する。

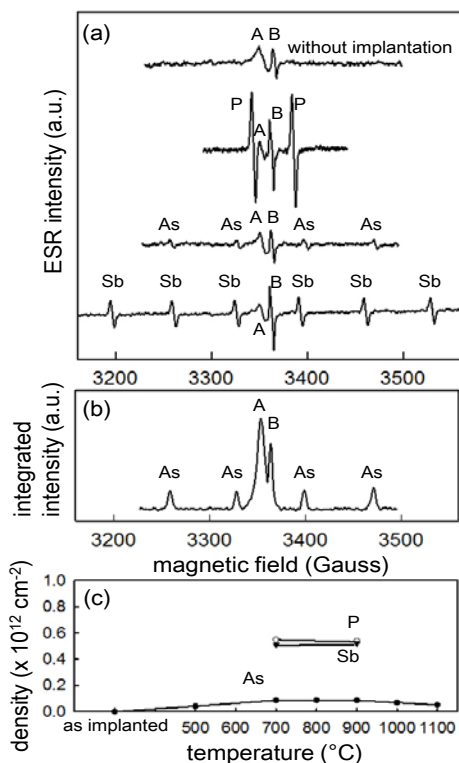


図3. シリコン中のドナーからの電子スピン共鳴信号。(a)リン (P)、砒素 (As)、アンチモン (Sb) からの信号。(b)砒素の積分信号。(c) スピン密度の熱処理温度依存性。

図3 (b)に示された積分信号 (図は砒素に関する結果) から、常磁性スピンの密度を算定すると、図3 (c)に示すように、リン、アンチモンに比して、砒素が極端に小さくなっていることが分かる。別に計測したシート抵抗の結果では、砒素は十分に電氣的に活性化されるという結果が得られている。したがって、この電子スピン共鳴の結果は、砒素原子が低温において常磁性の状態にない (例えば電子を2個保有し反磁性の状態にある) ことを示唆しており、砒素原子を用いた電荷転送過程の「機能化」に新たな道を拓くものと期待される。

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8件)

①M. Jo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi: Fabrication and single electron transfer operation of a triple-dot single-electron transistor J. Appl. Phys. 査読あり Vol. 118, No. 21, December (2015) 214305_1 - 6. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4936790>

②M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono: Electrical activation and electron spin resonance measurements of arsenic implanted in silicon Appl. Phys. Lett. 査読あり Vol. 106, No. 14, April (2015) 142105_1 - 4 DOI: 10.1063/1.4917295

③T. Tsuchiya, Y. Ono: Charge pumping current from single Si/SiO₂ interface traps: Direct observation of Pb centers and fundamental trap-counting by the charge pumping method Jpn. J. Appl. Phys. 査読あり Vol. 54, January (2015) 04DC01_1 - 7. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.04DC01>

④T. Watanabe, M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono: Evaluation of accuracy of time-domain charge pumping IEICE Trans. Electron. 査読あり Vol. E98-C, No. 5, May (2015) 390- 394. DOI: 10.1587/transele.E98.C.390

⑤M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono: Direct observation of electron emission and recombination processes by time domain measurements of charge pumping current

Appl. Phys. Lett. 査読あり Vol. 106, No. 4, January (2015) 041603_1 - 4.
doi: 10.1063/1.4906997

⑥M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono:

Analysis of electron capture process in charge pumping sequence using time domain measurements

Appl. Phys. Lett. 査読あり Vol. 105, No. 26, December (2014) 261602_1 - 4.
doi: 10.1063/1.4905032

⑦K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara:

Single-electron thermal noise

Nanotechnology 査読あり Vol. 25, No. 27, May (2014) 275201_1 - 7.
doi:10.1088/0957

⑧ Y. Niida, K. Takashina, Y. Ono, A. Fujiwara, Y. Hirayama:

Electron and hole mobilities at a Si/SiO₂ interface with giant valley splitting

Appl. Phys. Lett. 査読あり Vol. 102, No. 19, May (2013) 191603_1 - 4.
doi: 10.1063/1.4803014

[学会発表] (計 13 件)

①M. Jo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi:

Fabrication of triple-dot single-electron transistor and its turnstile operation

28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC-2015, November 10-13, Toyama, Japan), Abstract 12P-7-31.

②T. Watanabe, M. Hori, T. Saruwatari, A. Fujiwara, and Y. Ono:

Cryogenic Charge Pumping using Silicon on Insulators

28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC-2015, November 10-13, Toyama, Japan), Abstract 13B-10-4.

③Y. Nishiuchi, K. Furuta, T. Mitani, M. Hori, Y. Ono:

Electrically detected magnetic resonance study on silicon PN junction

2015 Asdia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD-2015, July 1-3, Jeju, Korea), Workshop Digest, pp. 352 - 353.

④M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono:
ESR measurements of As donor electrons in silicon

The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2015, 16-19, June, 2015, Niigata, Japan), Abstract P2-75.

⑤Y. Ono, M. Hori:

Charge pumping by point defects - Towards ultimate control of recombination in silicon -

Silicon nanoelectronics for advanced applications (June. 16, 2015, Kyoto, Japan)

⑥T. Watanabe, M. Hori, T. Saruwatari, A. Fujiwara, Y. Ono:

Low Temperature Charge Pumping in SOI Gated PIN Diode

2015 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2015, June 14-15, Kyoto, Japan).
Workshop Abstract, pp. 29-30.

⑦K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara:

Counting statistics of single-electron thermal noise

2014 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS November 30-December 5, 2014, Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA),
Book of abstract, p.13.

⑧T. Tsuchiya, Y. Ono:

Charge Pumping Current from Single Si/SiO₂ Interface Traps: Direct Observation of Pb Centers and Fundamental Trap-Counting by the Charge Pumping Method by the charge pumping method

2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM-2014, September 9-11, 2014, Tsukuba), Extended Abstracts, pp. 842-843 (J-2-5L).

⑨M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono:

Time-domain measurements of charge pumping current

2014 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2014, June 8-9, Honolulu, Hawaii, USA). Workshop Abstract, pp. 31- 32.

⑩T. Watanabe, M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono:

Evaluation of accuracy of time-domain charge pumping

2014 Asdia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD-2014, July 1-3, Kanazawa, Japan), Workshop Digest, pp. 96-99.

⑪ Y. Ono, G. P. Lansbergen, M. Hori, A. Fujiwara:Invited
Electron pump by a single atom -Towards ultimate control of electronic charges-
2014 International Workshop on Advanced Nanovision Science (Jan. 21-22, 2014, Hamamatsu, Japan)

⑫ M. Hori, N. Fukumoto, Y. Ono, R. Chikaoka, Y. Hayakawa, S. Moriwaki, N. Mio:
ESR study on pure single crystalline sapphire
Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-Silicide July 27 - 29, 2013, Tsukuba), Abstract 28P-24.

⑬ M. Hori, H. Tanaka, A. Fujiwara, Y. Ono:
ESR study of arsenic in silicon in low ion-implantation-dose regime
The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2013, 17-20, June, 2013, Kanazawa, Japan), Abstract P1-47.

〔図書〕 (計 0 件)

〔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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 行徳 (ONO Yukinori)

富山大学大学院理工学研究部 (工学) 教授
研究者番号：80374073

(2) 研究分担者

堀 匡寛 (HORI Masahiro)
静岡大学電子工学研究所 講師
研究者番号：50643269

土屋 敏章 (Tsuchiya Toshiaki)
島根大学総合理工学研究科 教授
研究者番号：20304248

(3) 連携研究者

()

研究者番号：