

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600015

研究課題名(和文) 単一原子非弾性トンネル分光と原子スケール・格子系/電子系エネルギー変換技術の研究

研究課題名(英文) Research on single-atom inelastic tunneling spectroscopy and atomic scale energy transfer

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：単電子トランジスタを用いて、低温における電流特性の二階微分特性を高精度に取得する測定系を立ち上げた。また、シリコン中の不純物原子の振動分光を念頭に、超高感度な電気読み出しスピン共鳴法の測定系を立ち上げた。同測定系を用いてプラチナがドーピングされたシリコンPN接合のEDMR測定を行い、スピン緩和時間の算定に成功した。さらに、振動分光と素電荷の再結合との相関を調べるために、新たに再結合過程を実時間観測できる手法を開発した。同手法を用いて局在準位を介した再結合過程の詳細を調べ、二本の速報として報告した。

研究成果の概要(英文)：We first developed the measurement system that enables us to take the second derivatives of the current characteristics with very high precision. In addition, for the tunneling spectroscopy on a single impurity atom in silicon, we developed the system for electrically detected magnetic resonance (EDMR) with high sensitivity. Using the system, we observe the EDMR in platinum doped silicon PN diode, and successfully extracted the relaxation time for spin flip. We also developed the method for observing the recombination events in time domain in order to investigate the correlation between tunneling spectroscopy and the electron hole recombination. These studies were published in two letters.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：非弾性トンネル分光 電氣的読み出しスピン共鳴 再結合過程

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) 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、半導体中の単一の原子の振動モードを制御し、これをナノデバイスのエネルギー制御に用いるという試みはこれまでなされていない。

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」(true atom, or dopant) 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。ここでは、我々のこれまでの成果を踏まえ、エネルギー散逸過程を調べるための、高感度測定系を立ち上げる。これにより、シリコントランジスタ中のドーパント原子に対する単一原子振動分光の確立を目指す。また、単一原子局在振動と、局在準位におけるスピン状態や再結合過程との相関を調べる。本申請に関わる研究では、特に、以下の「研究の方法」で示される三つの基本測定技術の開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 単一の原子からなる単電子トランジスタにおける局在振動モードを観測するための、高感度非弾性トンネル分光法を確立する。

(2) 局在振動とスピン状態との相関を調べるための高感度 EDMR (Electrically detected magnetic resonance) 法を確立し、スピンの緩和時間の情報を取得する。

(3) 電子正孔再結合過程における原子振動の影響を調べることを目的に、新た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。

4. 研究成果

(1) 単一の原子からなる単電子トランジスタにおける局在振動モードを観測するための、高感度非弾性トンネル分光法を確立した。ここではまず、微小な二階微分信号のノイズを除去するために、極めてバンド幅の狭いノイズ除去フィルタ (ノッチフィルタ) を設計・作製し、これを測定系に組み込んだ。これにより、良好な二階微分特性を再現性よく取得することが可能となった。図1はノイズ除去フィルタ挿入後の単電子トランジスタ特性を7Kの低温で取得したものである。

(2) 高感度 EDMR 法を開発するために、グローバル EDMR と呼ばれる測定系を立ち上げた。市販の ESR キャビティ内で EDMR を観測するためのサンプルホルダーを新たに設計・作製し、良好な結果が得られることを確認した。また、(1)で開発したノイズ除去フィル

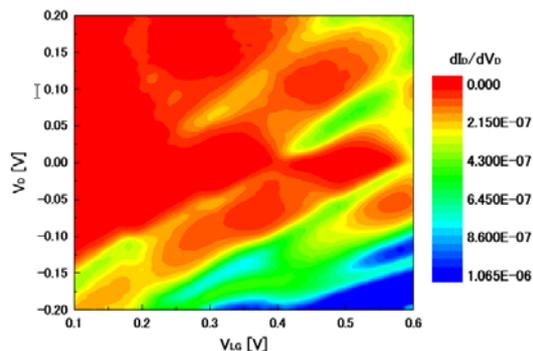


図1. 単電子トランジスタの特性

タと類似のフィルタを作製し、これを EDMR に適用した。図2はプラチナを含むシリコン PN ダイオードからの EDMR 信号である。

ダイオード電流 (1uA) に対し、EDMR のノイズ電流は、約 10fA であり、 $10^{-8}$  の感度を実現できている。また、この高感度化のため、Y 成分 (変調周波数から 90 度ずれた成分、図中 peak 2) の観測にも成功した。これらの結果より、スピン緩和の時間を見積もることが可能となり、当該ダイオードの場合、約 100us と見積もられた。

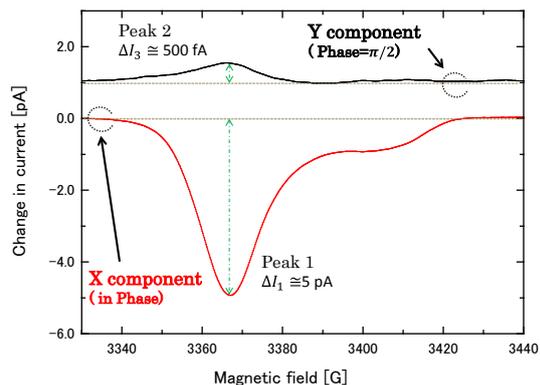


図2. シリコン PN ダイオードの EDMR 信号

(3) 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3はそのような電流変調の観測結果の一例である。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。これらを解析することにより、再結合による局在振動モードの観測に道が開かれるものと期待される。

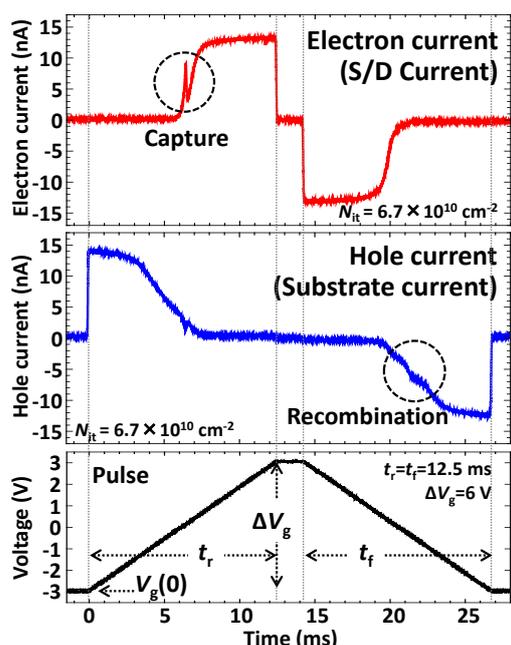


図 3. 電子正孔再結合過程の実時間観察結果

#### 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 6 件)

①M. 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

②T. Tsuchiya, Y. Ono:  
Charge pumping current from single Si/SiO<sub>2</sub> 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>

③M. 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

④M. 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

⑤K. 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

⑥Y. Niida, K. Takashina, Y. Ono, A. Fujiwara, Y. Hirayama:  
Electron and hole mobilities at a Si/SiO<sub>2</sub> 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 7 件)

①K. 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.

②T. Tsuchiya, Y. Ono:  
Charge Pumping Current from Single Si/SiO<sub>2</sub> 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).

③M. 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.

④T. 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.

⑤ 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)

⑥ 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.

⑦ 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

<http://www3.u-toyama.ac.jp/yukiono/index.html>

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)

富山大学大学院理工学研究部 (工学) 助教  
研究者番号：50643269

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：