

## 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(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25706003

研究課題名(和文)ドーパント格子の実現とその磁性制御の研究

研究課題名(英文)Control of magnetic property in dopant lattice

研究代表者

堀 匡寛 (Hori, Masahiro)

静岡大学・電子工学研究所・講師

研究者番号：50643269

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、シリコントランジスタ上で電荷とスピンを精密に制御することを最終目的として、2つの基盤技術を確立した。一つは、実時間領域で電流を検出する手法「実時間チャージポンピング法」である。当該手法を用いることで、局在準位(半導体中のドーパント原子や界面欠陥の準位)での電荷の動的挙動を詳細に解析することが可能となった。もう一つは、電子スピン共鳴を電気的に読み出す手法「EDMR(Electrically detected magnetic resonance)法」である。ここでは特に、欠陥準位での電子正孔再結合過程に基づくEDMR信号を取得することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, I have established two methods towards the ultimate control of electronic charges and spins based on silicon transistors. One is the time domain charge pumping, which is a method for detecting the current flow in a MOS transistor in time domain. The method enables us to analyze the dynamics of electronic charges in localized states (such as dopant atoms and interface defects) in detail. The other is the electrically detected magnetic resonance (EDMR), which is a method for detecting the spin resonance of electrons in localized states. Here, I successfully obtained the EDMR signals based on electron-hole recombination process at the defect states.

研究分野：半導体量子エレクトロニクス

キーワード：量子準位 ト原子 チャージポンピング法 電子スピン共鳴法 EDMR シリコン MOSFET 界面欠陥 ドーパント原子

1. 研究開始当初の背景

ドナー原子とこれに束縛された電子は、半導体中に形成された水素原子とみなすことができる。この疑似水素原子が多数導入され、互いに量子的な結合を有して形成されるエネルギー許容帯がいわゆる“不純物バンド”であり、ランダム系の典型的なモデルとして、金属絶縁体転移やホッピングといった輸送過程の理解のために中心的な役割を果たしてきた。しかしながら、そのランダム性ゆえに、ドープド原子の相対的な配置関係から生じる興味ある現象を覆い隠してきたのも事実であり、例えば、ランダムにドープされたドープド原子集団の一部に強磁性発現が示唆されているが、その真偽の確定には至っていない。

一方、ドープド原子を量子ドットとして積極的にエレクトロニクスに適用しようという機運が高まっており、単一ドープド・テクノロジーと呼ばれる分野が形成されつつある。実際、単一のドナー原子の位置を精密に制御した単一原子トランジスタが作製され、原子の構造を反映した輸送特性が得られている。しかしながら、これらの研究をさらに発展させ、ドープド格子を実現しようという試みはこれまで成されていない。また、ドープド格子中の電荷、スピンを制御し、検出しようという試みもない。

2. 研究の目的

我々の最終目標は、ドープド格子をシリコントランジスタのチャンネル上に形成し、ゲートの操作でドープド格子中の電子数を可変にすることにより、強磁性の発現とスピン偏極電流を生成することである。本研究課題では特にその基盤技術として、(1)シリコントランジスタのゲート操作によって、局在準位(ドープド原子や界面欠陥準位)を介して流れる電流を制御しつつ、その電流を実時間観測する技術を確立すること、および(2)スピン偏極状態の読み出し技術を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

目的(1)に対しては、トランジスタ中の界面欠陥準位での電子正孔再結合過程で生じる電流を実時間領域で検出する。具体的には、ゲートにパルス電圧を印加することで、再結合過程を制御する手法(いわゆる界面欠陥評価手法として広く用いられているチャージポンピング法)の素過程(電子の捕獲、放出、再結合)を実時間領域で観測するための測定系を構築する。そして、ここで得られた結果から、電子の動的挙動(ダイナミクス)の解析を行う。

目的(2)に対しては、電気的に電子スピン共鳴を読み出す手法: Electrically detected magnetic resonance (EDMR)法の測定系を立ち上げる。そして、トランジスタ中の局在準位での電子スピン共鳴に起因する

信号を取得する。

4. 研究成果

(1)チャージポンピングの素過程を観測するために、「実時間チャージポンピング法」を立ち上げた。これは、ゲートにパルス電圧を印加したときのソース・ドレインの電子電流と基板の正孔電流とを高速電流アンプを用いて計測するものである(図1)。

図2に示すように、パルスの立ち上がり立ち下がりにおいて、それぞれ特徴的な電流ピークを観測した(図中の(A)と(B))。これらは、電子の捕獲過程と、捕獲電子と正孔との再結合に起因するものである。従来のチャージポンピング法では、時間平均された定常電流しか計測しておらず、これらの情報は覆い隠されていたが、本手法によってチャージポンピングの素過程(電子の捕獲、放出、再結合)の解析に切り込むことが可能となった。

その一例として、パルスの立ち上がりでの(電子捕獲過程に起因する)ピークの生じる電圧は、同MOSトランジスタの閾値電圧と比較すると、小さい値であることが判明した。このことは、チャンネルが形成される以前に電子の捕獲過程が完了していることを示している。この結果は、汎用チャージポンピング法で観測されていたチャージポンピング電流とMOSのDC電流との閾値の不一致の直接的な証拠となるものである。

また、異なる立ち上がり時間(図2(c)の $t_f$ )を有するパルスに対する電流を調査したところ、ピークの生じる電圧は、パルスの立ち上がり時間に依存していることが分かった。このことは、電子捕獲の割合がチャンネルのキャリア(電子)濃度によって制限されていることを示している。この結果に基づき、電子の捕獲過程に対するレート方程式を導き、その解析解を導出した。得られた解析解を用いて実験結果を解析することにより、従来の複雑な計測手法を用いることなく、電子の捕獲断面積( $\approx 10^{-16} \text{ cm}^2$ )を求めることに成功した。この値は、過去に報告されたものとも良く一致しており、本解析手法の高い精度を証明している。また、同解析が正孔捕獲に対しても適用でき、同様に正孔の捕獲断面積も導けることが確認された。本手法により、初めて電子の捕獲断面積と正孔のそれとを別々に見積もることが可能となった。

以上のように、当該手法は、ゲート操作に伴う局在準位での電荷の動的挙動を明らかにするための基盤技術として貢献する。

Time-domain CP method

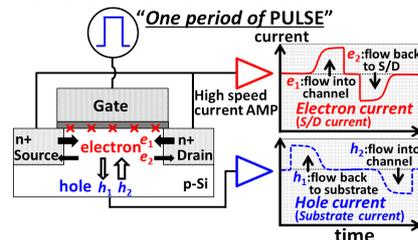


図1: 実時間チャージポンピング法の概要

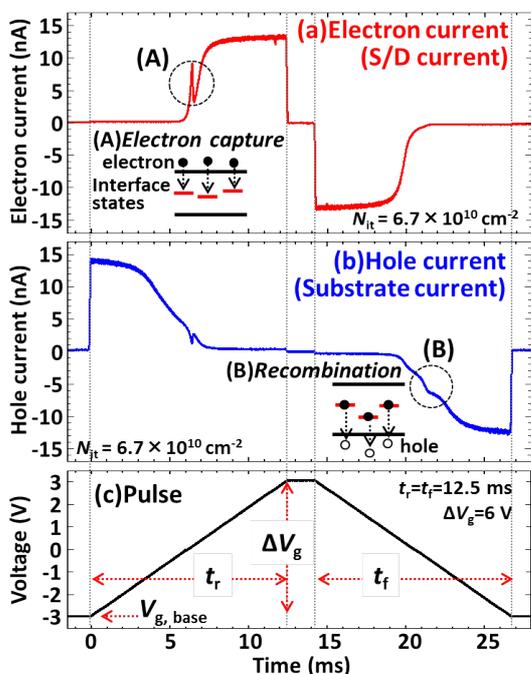


図 2 : 実時間チャージポンピングの測定結果

(2) トランジスタ中の局在準位での電子スピンを検出するために、EDMR 法の立ち上げを行った。EDMR 法では、電子スピン共鳴を電流の変化(本研究では、再結合電流の変化)として検出する。したがって、トランジスタを配線した状態でキャビティー内に挿入するため、ここでは、サンプルホルダの設計から行った。サンプルホルダ中に含まれる微量なスピンに由来するゴースト信号を抑制するため、サンプルホルダの材料の選定を行った。また、配線材料やデバイス固定材料の選定のために、それぞれの材料のキャビティーの Q 値を詳細に調べた。一方、測定系においては、ノイズを抑制するためのフィルターの配備や、低ノイズ電源の選定を行った。以上の結果、電子スピン共鳴に伴う再結合電流の微小変化(EDMR 信号)の検出に成功した。測定から求めた g 値より、EDMR 信号の起源は、トランジスタ中のシリコンダングリングボンドであると結論付けた。また、上述したチャージポンピング法に、EDMR 法を組み合わせ、チャージポンピング EDMR 法を新たに立ち上げ、電子スピン共鳴に伴うチャージポンピング電流の微小変化(チャージポンピング EDMR 信号)の検出にも成功した。今後は、ノイズをさらに 2 桁低減させて、単一、もしくは少数個のスピンを検出を目指す。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

E. Prati, K. Kumagai, M. Hori, T. Shinada:  
Band transport across a chain of dopant sites in silicon over micron distances and high temperatures  
*Scientific Reports* Vol. 6, January

(2016) 19704\_1-8(査読有).

DOI: 10.1038/srep19704

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

Evaluation of accuracy of charge pumping current in time domain

*IEICE Trans. Electron.* Vol. E98-C, No. 5, May (2015) 390-394(査読有).

DOI: 10.1587/transele.E98.C.390

M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono:

Electrical activation and electron spin resonance measurements of arsenic implanted in silicon

*Appl. Phys. Lett.* Vol. 106, No. 14, April (2015) 142105\_1-4(査読有).

DOI: 10.1063/1.4917295

M. 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.* Vol. 106, No. 4, January (2015) 041603\_1-4(査読有).

DOI: 10.1063/1.4906997

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

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

*Appl. Phys. Lett.* Vol. 105, No. 26, December (2014) 261602\_1-4(査読有).

DOI: 10.1063/1.4905032

M. Hori, N. Fukumoto, Y. Ono, R. Chikaoka, S. Moriwaki, N. Mio:

Electron spin resonance study on pure single crystalline sapphire

*Phys. Status Solidi C* Vol. 10, No. 12, November (2013) 1681-1683(査読有).

DOI: 10.1002/pssc.201300321

[学会発表](計 19 件)

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

Cryogenic Charge Pumping using Silicon on Insulators

28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015,

Nov. 13th, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan),

Abstract 13B-10-4.

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

Electrically detected magnetic resonance study on silicon PN junction

2015 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of

Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2015, June 29, 2015, Jeju Island,

Korea).  
M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono:  
ESR measurements of As donor electrons in silicon  
The 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2015, June 17th, TOKI MESSE Niigata Convention Center Niigata, Japan), Workshop Abstract, pp. 220.  
Y. Ono and M. Hori:  
Charge pumping by point defects -Towards ultimate control of recombination in silicon-  
III Bilateral Italy-Japan Seminar (June 16th, 2015, Campus Plaza Kyoto, Kyoto, Japan), Workshop Abstract, pp. 6 (Invited).  
T. Watanabe, M. Hori, T. Saruwatari, T. Tsuchiya, A. Fujiwara, Y. Ono:  
Charge Pumping in SOI Gated PIN Diode  
2015 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2015, June 15th, Rega Royal Hotel Kyoto, Japan), Workshop Abstract, pp. 105-106.  
E. Prati, Y. Chiba, M. Yano, K. Kumagai, M. Hori, G. Ferrari, T. Shinada, T. Tani  
Single ion implantation of Ge donor impurity in silicon transistors  
2015 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2015, June 14th, Rega Royal Hotel Kyoto, Japan), Workshop Abstract, pp. 29-30 (Invited).  
T. 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 1st, Kanazawa, Japan), Workshop Digest, pp. 96-99.  
M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono:  
Time-domain measurements of charge pumping current  
2014 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2014, June 8th, Honolulu, Hawaii, USA), Workshop Abstract, pp. 31- 32.  
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 28th,

2013, Tsukuba, Japan), Abstract 28-P24.  
N. Fukumoto, Y. Ono, M. Hori, R. Chikaoka, Y. Hayakawa, S. Moriwaki, and N. Mio:  
Electron spin resonance measurement of sapphire for KAGRA mirrors  
12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12, July 16th, 2013, Chiba, Japan), Abstract, pp. 52.  
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, June 18th, 2013, Kanazawa, Japan), Abstract pp. P1-47.  
渡辺 時暢、堀 匡寛、小野 行徳  
シリコン酸化膜界面欠陥の低温電子情報通信学会研究会 機能ナノデバイスおよび関連技術、北海道大学百年記念会館(北海道), 2016/3/3.  
堀 匡寛、渡辺 時暢、土屋 敏章、小野 行徳  
チャージポンピング電流の実時間計測による電子捕獲過程の解析  
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県), 2015/03/11, 11p-A23-9.  
堀 匡寛、渡辺 時暢、土屋 敏章、小野 行徳  
チャージポンピング電流の実時間計測による電子放出、再結合過程の直接観測  
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県), 2015/03/11, 11p-A23-10.  
古田 慧梧、小野 行徳、西内 祐樹、三谷 太希、堀 匡寛  
シリコン PN 接合における再結合電流のEDMR 観察  
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県), 2015/03/11, 11p-A23-13.  
渡辺 時暢、堀 匡寛、土屋 敏章、小野 行徳  
実時間チャージポンピングの精度評価  
電子情報通信学会研究会 シリコン材料・デバイス研究会、北海道大学百年記念会館(北海道), 2015/2/5.  
渡辺 時暢、堀 匡寛、土屋 敏章、小野 行徳  
実時間チャージポンピング法の開発  
第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大(神奈川県), 2014/3/20, 20p-F12-3.  
熊谷 国憲, Enrico Prati, 堀 匡寛, 福井 結子, 谷井 孝至, 品田 賢宏

1次元リン(P)ドーパント配列を有する  
長チャネルトランジスタの低温伝導特性  
評価

第 61 回応用物理学会春季学術講演会,  
青山学院大(神奈川県), 2014/3/18,  
18p-PA12-1.

大泊 巖、堀 匡寛

イオンビーム応用研究の源流

マイクロビームアナリシス第 141 委員会  
平成 25 年度研修セミナー「イオン利用  
分析法」, ホテルコスモスクエア国際交  
流センター(大阪府), 2013/4/18,  
pp1-48.

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~nanohome/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀 匡寛 (HORI, Masahiro)

静岡大学・電子工学研究所・講師

研究者番号: 5 0 6 4 3 2 6 9

### (2) 研究協力者

小野 行徳 (ONO, Yukinori)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号: 8 0 3 7 4 0 7 3