

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289105

研究課題名(和文)単一トラップの分離検出・電子物性評価技術の開発とトラップ物理の新展開

研究課題名(英文)Development of detection and characterization techniques of single traps and innovative progress of trap physics

研究代表者

土屋 敏章 (Tsuchiya, Toshiaki)

島根大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：20304248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：チャージポンピング(CP)法を用いて、単一Si/SiO₂界面トラップの独創的検出評価手法を開発し、系統的評価結果から、単一トラップにおける電子捕獲放出過程は2つのエネルギー準位が関与し、単一トラップからの最大CP電流ICP_{MAX}は0～2fqの範囲の様々な値となることを初めて実証した(fはゲートパルス周波数、qは電子電荷)。これまで、ICP_{MAX}=fq一定と広く信じられてきたが、これは根本的に誤りであることを明らかにした。また、単一トラップの2つのエネルギー準位の状態密度分布を初めて導出すると共に、トラップに関する得られた本質的性質に基づいてCP理論を原理的に修正した。

研究成果の概要(英文)：We carried out a unique and systematic characterization of single Si/SiO₂ interface traps using the charge pumping (CP) method, and observed for the first time that two energy levels participate in electron capture/emission processes in a single trap, and the maximum CP current (ICP_{MAX}) from a single trap is in the range of 0-2fq, where f is the gate pulse frequency, and q is the electron charge. Although it is widely believed that ICP_{MAX} is a fixed value of fq, we experimentally clarified that this belief is basically incorrect. Based on the systematic characterization of the single traps, we estimated the distribution of the two energy levels of the single traps for the first time. By considering the essential nature of the traps, we corrected a widely held misconception and introduced a fundamental refinement of the CP theory.

研究分野：工学

キーワード：電子デバイス・電子機器 マイクロ・ナノデバイス 表面・界面物性

1. 研究開始当初の背景

我々は、超微細化されたデバイスでは含まれる界面トラップ数が数えられる程度になり、その数や個々のトラップのエネルギー準位が大きくばらついていることを、従来理論に基づいて実験的に示した。今後、トラップの数や物性のばらつきがデバイス特性ばらつきの変因として顕在化・深刻化するものと考えられる。

一方、More than Moore を志向した RF・アナログ回路等を混載した高機能化システムチップでは、トラップが関与した雑音が大きな課題として浮上するのは必至であり界面物性の理解が一層重要になると予想される。実際、酸化膜内トラップに起因した Random Telegraph Noise (RTN) がデバイス信頼性上の大きな課題となっている。

さらに CMOS を超越した Beyond CMOS デバイスでは、寸法が原子スケールとなり、数個あるいは単一電子の輸送が動作の基本となる。この場合、デバイス付近のたった 1 個のトラップの電子捕獲・放出過程は大きな擾乱要因となる。この種のトラップはいわゆる欠陥に起因しており完全に排除することは困難である。したがって、原子スケールデバイスの実現のための研究と並行して、デバイス動作の安定性・信頼性の面で大きな擾乱要因となるこの種の個々のトラップについて十分に理解することが極めて重要となり、そのための評価技術の開発も急務である。

このような状況で、特に欧州圏では ENIAC MODERN や MORDRED などの国境を越えたビッグプロジェクトが、主にシミュレーションを中心に、個々のトラップのデバイスへの影響やモデリングの研究を精力的に進めている。しかし、現実の個々のトラップに対する理解は極めて不十分であり、トラップ数のカウンティング技術さえ確立されていない状況である。本研究では原子スケールデバイスの信頼性をも視野に入れ、シミュレーションでは検討不可能な単一トラップの特性解明に真正面から挑戦するものであり、世界的に見ても全く例が無い。

2. 研究の目的

電子デバイスのナノスケール化・原子スケール化に伴いデバイス内には多様な界面が接近し、界面物性のデバイス特性への影響(擾乱)は急激に増大すると考えられる。しかし、ナノ構造界面のミクロな電子物性は未知の部分が多い。存在する界面トラップの信頼できるカウンティング技術すら存在しない状況である。本研究の目的は、これまでのようにトラップを“密度”で表すマクロ的な扱いから脱却し、ナノ構造界面における個々のトラップの分離検出技術、および、個々のトラップの物性評価技術を確立し、従来のマクロ的な見地を基盤としたトラップ物理に新たな視点を加えて新展開を計ることである。この目的達成のため、トラップとしては MOS

界面トラップ、評価技術としては、我々の他に追従を許さない経験と実績を有するチャージポンピング (CP) 法を用いる。

3. 研究の方法

研究期間前半ではまず、ナノ MOS 構造を用いて、独自のチャージポンピング (CP) 法によって界面トラップ数のカウンティング技術、および、個々のトラップの離散的エネルギー準位の評価技術を確立する。そして、従来 CP 理論による結果との比較から、従来 CP 理論の原理的欠陥を定量的な誤差と共に示す。後半では、孤立単一界面トラップからの CP 電流の判定法を確立し、真の孤立単一トラップにおける電子捕獲・放出過程やその離散的エネルギー準位を実験的に明らかにする。さらに、界面トラップ間の相互作用やイオン化不純物などの荷電中心との相互作用の評価技術を確立し、複数トラップが存在するときのトラップにおける真の電子捕獲・放出過程の物理を明らかにする。これらの研究成果によって、従来の界面トラップ物理に画期的な視点を与え、新展開を計る。

4. 研究成果

(1) 単一界面トラップの検出

CP 法で単一トラップを検出し評価するためには、その CP 特性が真に単一トラップからのものであることを判断できなければならない。そのための手段として、測定される CP 特性を個々のトラップからの電流成分に分離する手法を開発した。これは、CP 特性のゲートパルスオン時間依存性、オフ時間依存性などを観測するものである。これらの依存性から、各トラップにおける電子の捕獲放出過程が分離観測できる。図 1 にオン時間依存性の例を示す。図から、2 つのトラップが関与した CP 特性であることがわかる。このような手法で単一トラップしか含まない試料からの CP 特性を得たところ、トラップ 1 個からの CP 電流は $0 \sim 2fq$ の範囲で様々な値をとることを発見した (f はゲートパルスの周波数、 q は電子電荷である)。特に、1 つのトラップから $2fq$ の CP 電流が観測されたのははじめてのことである。従来 CP 理論では、トラップ 1 個当たりの CP 電流は fq 以下でなければならない。

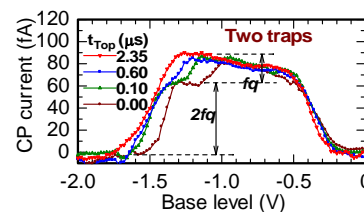


図 1

(2) 単一界面トラップの評価 (2 電子準位/トラップの実証)

MOS 界面トラップは P_b センター、つまり、Si ダングリングボンドと考えられ、(100)面

Si の MOS では約 80%が P_{b0} センターと考えられる。各 P_{b0} センターはドナー的な性質とアクセプタ的な性質の両面を有し、Si バンドギャップの下半分にドナー的準位、上半分にアクセプタ的準位を構成している。従って、たった 1 個の界面トラップしか含まない MOS の場合でも、ドナー的準位とアクセプタ的準位を 1 つずつ計 2 準位を形成すると推測される。

図 2 にこのように推測される 2 準位対の考え得る形態 (トラップタイプ) を示す。図中の ΔE は CP 測定で検出できるバンドギャップ中のエネルギー範囲で、室温ではギャップ中心 ± 0.3 eV 程度である。 ΔE の上端準位はゲートパルスの立下り時間 t_f の増加と共にわずかにバンド中心に向かって移動し、 ΔE の下端準位はゲートパルスの立上り時間 t_r の増加と共にわずかにバンド中心に向かって移動する。また、図中に各タイプのトラップから予想される CP 電流の最大値 I_{CPMAX} も示す。例えば、タイプ 1 の場合、CP 電流は ΔE 下端準位付近に存在するドナー的準位からのみとなり、 I_{CPMAX} は $f q$ 以下になると予想され、 t_f の増加と共に減少すると考えられる。タイプ 4 と 5 では、2 準位の内 1 つが ΔE の十分内部に存在するため、 I_{CPMAX} は丁度 $f q$ となり、かつ t_r や t_f の変化に依存しないと予想される。同様に、タイプ 9 は t_r や t_f の変化に依存しない $2f q$ の I_{CPMAX} を示すと考えられる。このように、界面トラップが P_{b0} センターであると仮定すれば、トラップ 1 個当たりの I_{CPMAX} は実測のように $0 \sim 2f q$ の範囲で様々な値をとること推測される。

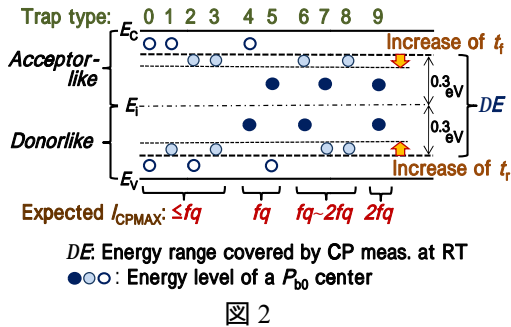


図 2

実際に、単一トラップから測定される I_{CPMAX} の値とその t_f 依存性および t_r 依存性から、そのトラップのタイプを判定できる。図 3 に一例を示す。この試料では $I_{CPMAX} < f q$ であり、 t_f 依存性は無いが、 t_r の増加と共に CP 電流が減少している。従って、2 準位の内、アクセプタ的準位は ΔE 上端準位付近には存在せず、ドナー的準位は ΔE 下端準位付近に存在しているはずである。よってタイプ 1 と判定できる。70 の試料を測定したところ、27 個の試料が単一トラップの CP 特性を示した。これらの単一トラップのタイプを判定した結果を表 1 に示す。この結果から、単一トラップからの CP 電流は、 P_{b0} センターの性質から予測されるように、確かに $0 \sim 2f q$ の範囲で

様々な値をとると結論付けた。つまり、トラップ 1 個当たり 2 つのエネルギー準位で電子の捕獲放出過程が行われていることを明らかにした。

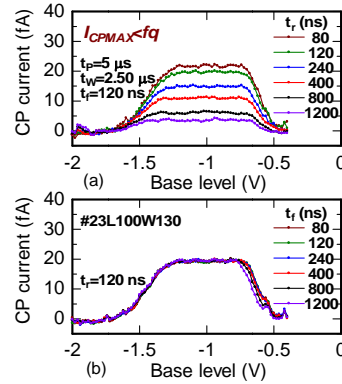


図 3

表 1 単一トラップを有したタイプ別試料数

Trap type	1	2	3	4 or 5	6	7	8	9
Number of samples	6	8	0	6	3	1	1	2

(3) チャージポンピング理論の原理的修正

Shockley-Read-Hall (SRH) モデルに基づいた従来の CP 理論¹⁾では、トラップ 1 個当たりの CP 電流 I_{CP} は次式で与えられる。

$$I_{CP} = f q [1 - \exp(-t_{Top}/\tau_{cn})][1 - \exp(-t_{Base}/\tau_{cp})] \quad [1]$$

ここで、 t_{Top} (t_{Base}) はゲートパルスの高 (低) レベル状態の時間であり、 τ_{cn} (τ_{cp}) は電子 (正孔) の捕獲時定数である。従って、 $t_{Top} \gg \tau_{cn}$ かつ $t_{Base} \gg \tau_{cp}$ であれば I_{CPMAX} は次式となる。

$$I_{CPMAX} = f q \text{ (constant)} \quad [2]$$

これらの式は、トラップ 1 個当たり 1 つの準位で電子捕獲放出過程が行われていることに基づいており、本研究の結果から、原理的に誤っているといえる。真の CP 電流は、ドナー的およびアクセプタ的準位の 2 つの準位からの成分の和であり次式となる。

$$I_{CP} = \alpha_D f q [1 - \exp(-t_{Top}/\tau_{cnD})][1 - \exp(-t_{Base}/\tau_{cpD})] + \alpha_A f q [1 - \exp(-t_{Top}/\tau_{cnA})][1 - \exp(-t_{Base}/\tau_{cpA})] \quad [3]$$

ここで、添え字 D (A) はドナー (アクセプタ) 的準位を意味する。 α (≤ 1) は図 4 に示すような 2 つの準位の位置に依存する係数である。従って、 $t_{Top} > \tau_{cn}$ かつ $t_{Base} > \tau_{cp}$ であれば真の I_{CPMAX} は次式となり、 $0 \sim 2f q$ の範囲で様々な値をとることになる。

$$I_{CPMAX} = \alpha_D f q + \alpha_A f q = 0 \sim 2f q \quad [4]$$

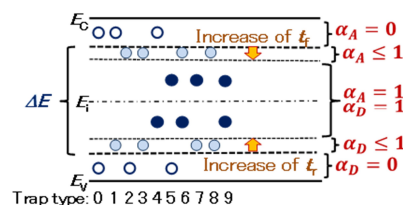


図 4

なお、詳細は省くが、複数のトラップを含む場合の CP 電流は、トラップ間のクーロン相互作用の強さに依存する係数 $\beta(\leq 1)$ を導入して次式で与えられることを示した。

$$I_{CP} = \sum_{i=1}^N \left\{ \alpha_{Di} \beta_{Di} f q \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{Top}}{\tau_{cnDi}}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{Base}}{\tau_{cpDi}}\right) \right] \right\} + \sum_{i=1}^N \left\{ \alpha_{Ai} \beta_{Ai} f q \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{Top}}{\tau_{cnAi}}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{Base}}{\tau_{cpAi}}\right) \right] \right\} \quad [5]$$

(4) 単一界面トラップのエネルギー準位の状態密度分布

表 1 に示した試料はいずれも界面トラップを 1 個しか含んでいない。従って、表中の各トラップタイプに対する試料数は、図 2 に示した各トラップタイプに対するトラップのエネルギー準位の数を与える。この準位数分布から、図 5 に示すように、単一トラップの 2 準位の状態密度分布を粗くではあるが導出できる。図 5 には、報告されている P_{b0} センターの状態密度分布の概要^{2,3)}も示している。図から両者の分布の様子が酷似していることがわかる。つまり、2 つのピークがギャップ中心の \pm 約 0.3 eV の所に位置しており、バンドギャップ上半分に存在しているピークの方が下半分のものよりも高くなっている（なお、両ピークの面積、つまり、両ピークの準位の総数は同一である）。この結果は、界面トラップの支配的起源は P_{b0} センターであり、トラップ 1 個当たりドナーのおよびアクセプタ的準位の 2 つのエネルギー準位を有していることを強く支持している。

従来、界面トラップの状態密度分布はバンドギャップ内でいわゆる“U字型”分布をしていると一般に受け入れられているように思われる。しかし、本研究の結果はこの“常識”とは異なっており、興味深い。

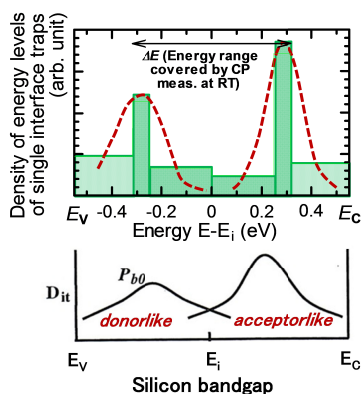


図 5

そこで、サブハーフミクロン程度の比較的大きな nMOSFET を用いて、ホットキャリア・ストレス (HCS) 前後における界面トラップ密度分布の変化の様子を CP 法により導出した。結果を図 6 に示す。図から、ギャッ

プ中心 ± 0.3 eV に位置するピークが、HCS 印加後に増大して明白な 2 つのピークを出現させていることがわかる。この結果は、図 5 に示した単一トラップの状態密度分布の様子と良く一致している。従って、HCS 印加などしていない場合であっても、界面トラップの状態密度分布は“U字型”ではなく、 P_{b0} センターによる成分が支配的であると考えられる。この傾向は、HCS 印加によって P_{b0} センターが発生してより顕著になっている。

なお、例え P_{b0} センターの成分が支配的であっても、CP 測定を室温のみで行った場合には、バンドギャップ内の検出できるエネルギー範囲がギャップ中心 ± 0.3 eV 程度に限られるため、図 6 からわかるように、分布は見かけ上“U字型”に見誤る可能性があることに注意する必要がある。

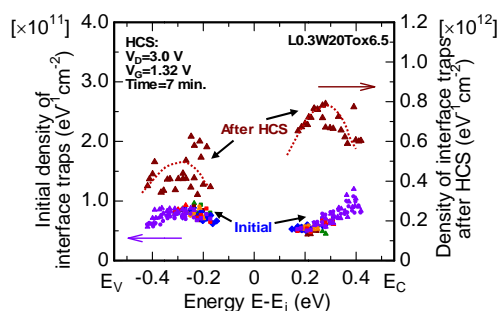


図 6

< 引用文献 >

- 1) G. Groeseneken, H. E. Maes, N. Beltran, and R. F. DeKeersmaecker, “A Reliable Approach to Charge-Pumping Measurements in MOS Transistors,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 31, no. 1, pp. 42-53, 1984.
- 2) P. M. Lenahan and P. V. Dressendorfer, “Paramagnetic trivalent silicon centers in gamma irradiated metal-oxidesilicon structures,” Appl. Phys. Lett., vol. 44(1), pp. 96-98, 1984.
- 3) P. M. Lenahan, T. D. Mishima, J. Jumper, T. N. Fogarty, and R. T. Wilkins, “Direct Experimental Evidence for Atomic Scale Structural Changes Involved in the Interface-Trap Transformation Process,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, no. 6, pp. 2131-2135, 2001.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

T. Tsuchiya, “Single Defect Characterization at Si/SiO₂ Interface,” ECS Transactions, 査読有, vol. 79, no. 1, pp. 79-89, 2017
DOI: 10.1149/07901.0079ecst

T. Tsuchiya and P. M. Lenahan, “Distribution of the energy levels of individual interface traps and a fundamental refinement in charge pumping theory,” Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, vol. 56, no. 3, pp. 031301_1-6, 2017.

DOI: 10.7567/JJAP.56.031301

T. Tsuchiya, "Characterization of Interface Defects by the Charge Pumping Technique," ECS Transactions, 査読有, vol. 74, no. 4, pp. 29-37, 2016.

DOI: 10.1149/07504.0029ecst

土屋敏章, "チャージポンピング法による単一界面トラップ(欠陥)の検出と評価", 応用物理, 査読無, 第 85 巻, 第 5 号, pp. 422-426, 2016. (依頼執筆)

<http://www.jsap.or.jp/ap/2016/05/index.xml>

T. Tsuchiya and Y. Ono, "Charge Pumping Current from Single Si/SiO₂ Interface Traps: Direct Observation of P_b Centers and Fundamental Trap-Counting by the Charge Pumping Method," Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, vol. 54, no. 4S, pp. 04DC01_1-7, 2015.

DOI: 10.7567/JJAP.54.04DC01

[学会発表](計 26 件)

土屋敏章, "チャージポンピング(CP)法による MOS 界面欠陥評価: CP 法の原理的改善と単一欠陥評価への進展," 第 13 回薄膜材料デバイス研究会, 龍谷大学響都ホール校友会館(京都), 2016 年 10 月 21-22 日.(招待講演)

T. Tsuchiya, "Characterization of Interface Defects by the Charge Pumping Technique," The 14th Symposium on High Purity and High Mobility Semiconductors, PRiME2016/The 230th ECS Meeting, Honolulu (USA), Oct. 2-7, 2016. (Invited paper)

T. Tsuchiya, "Detection and Characterization of Single MOS Interface Traps by the Charge Pumping Method," International Meeting for Future of Electron Devices, Ryukoku University Avanti Kyoto Hall (Kyoto), June 23-24, 2016. (Invited paper)

T. Tsuchiya, "Distribution of the energy levels of single interface traps in nanoscale MOSFETs and a comparison of the actual number of traps with the values determined by conventional charge pumping theory," 46th IEEE Semiconductor Interface Specialist Conference, Arlington (USA), Dec. 2-5, 2015.

T. Tsuchiya, "Detection of Single Traps and Characterization of Individual Traps: Beginning of "Atomistic Reliability Physics"," The 4th International Symposium on Next-Generation Electronics, Taipei (Taiwan), May 4-6, 2015. (Invited paper)

T. Tsuchiya, "Charge Pumping Current from Single Si/SiO₂ Interface Traps: Direct Observation of P_b Centers and Fundamental Trap-Counting by the Charge Pumping Method," International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba International Congress Center (Ibaraki), Sep. 9-11, 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~tsuchiya/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

小野 行徳 (ONO, Yukinori)
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究者番号: 80374073