

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760019

研究課題名（和文）量子ダイナミクスに基づく半導体デバイス界面におけるトンネル現象の
理論的考察研究課題名（英文）Theoretical Study on Tunneling Phenomena in Interface of Semiconductor
Devices based on Quantum Dynamics

研究代表者：村口 正和（MURAGUCHI MASAKAZU）

東北大学・学際科学国際高等研究センター・教育研究支援者

研究者番号：90386623

研究成果の概要（和文）：

次世代のナノスケール半導体デバイスの中核技術となる荷電担体のトンネル制御の指針を与えることを目的として、量子ダイナミクスの立場から半導体デバイス中の界面における電子のトンネル過程を探究した。「次元の異なる系へのトンネル現象」において顕在化する「電子の動的相関ダイナミクス」に着目し、検討を進め、ナノスケールの界面における局所的なポテンシャル場のゆらぎにより、協調的トンネル現象などの新奇な現象が発現する可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The efficiency and stability of electron injection from the electrode to the nano-structure is one of the most important issues for the future nano-electronic devices. In order to reveal the electron tunneling process to the nano-structure, we focused on the dimensionality and the dynamic interaction of electrons. As a result we have revealed a possibility of novel phenomena such as a collective motion of electrons between the two-dimensional electron gas and the nano structure. We have proposed a model for the corresponding collective tunneling. This insight is useful for designing future nano-electronic devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎， 薄膜・表面界面物性

キーワード：トンネル現象, ナノドット・ナノ構造, 量子ダイナミクス, 二次元電子ガス

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの微細化に伴い、そのチャネルを通過する電子数が減少しており、その結果としてデバイス中の界面における電子のトンネルによる電子密度の揺らぎがデバイス特性に大きな影響を与えるという課題

が様々な局面で現れつつある。これらの課題は微細化に伴いより顕著となるものであり、その制御は次世代の半導体テクノロジーにおける中核的課題のうちのひとつである。しかし、界面におけるトンネル現象の研究は Esaki らによるトンネルダイオードの研究に

端を発して様々に展開されているが、その理論的扱いの多くは単純化された一次元モデルやモデルハミルトニアンを用いた固有状態に対する議論であり、様々な素過程が動的に関連して発現する固体中の電子状態のダイナミクスを反映したものは数少ないのが現状である。実際、ナノスケールのデバイスにおいて、様々な形で多電子の動的な相互作用に基づくと見られる興味深いトンネルが見出されつつある。これは従来の理論の枠組みでは説明の出来ない現象である。このようなトンネルモードの機構を理解するためには極短時間に起こるトンネル現象の時間依存解析と同時に、それらを統一的に扱うための理論の構築が不可欠である。

これらの背景を踏まえて、本研究では半導体デバイスの界面における荷電担体のトンネリングを量子ダイナミクスの立場から取り扱い、この研究分野に新しい光を当て、荷電担体の動的な相互作用に基づく能動的なトンネリング制御のための新原理の提案を目指した。

2. 研究の目的

本研究は、半導体デバイスの界面における電子トンネルに対し量子ダイナミクスの立場から理論構築を目指す。特に電子を供給する側の電子ガスの変調に着目する。従来、電子ガス系はデバイス物理やメゾスコピック物理の立場では平衡状態にある電子溜めとして扱われてきたが、ナノスケールの半導体デバイスにおいては電子のトンネルやその他のイベントに伴い、フェムト秒からピコ秒の間の極短時間の時間スケールで大きくその状態を変えていることが予想され、これらの変調が荷電担体のダイナミクスに影響を与えることは十分に考えられる。我々はこの点に着目して研究を進めた。これらを踏まえたトンネル過程を追うことで、従来考えられていたとは異なる形での動的な電子相関を通したトンネルモードを明らかにすることを目的とした。

また同時に、ダイナミクス計算には動的な電子の相互作用が自然に取り込まれることから、界面のトンネル以外にも動的過程の検討によって初めて明らかになるような現象が見つかることも期待し検討を行った。

3. 研究の方法

本研究は半導体デバイスにおける電子トンネルに対して以下の課題を設定した。

- (1) 電子のダイナミクスを踏まえたトンネリングの素過程の探求
- (2) 実験との緊密な連携による理論の精緻
- (3) 具体的なトンネルデバイスへの適用
- (4) 動的相互作用に基づく新たなダイナミクス研究の展開
- (5) 半導体デバイス中の電子トンネル制御の指針の構築

具体的には、まずシリコンナノドットメモリ系の電荷注入過程における界面でのトンネル素過程に対する理論構築を目指し、実験と連携して検討を進めた。さらに、それらを他のナノスケールデバイスのトンネル過程に対して適用することで、デバイスごとの個性（物質や構造）に依存した現象について検討を行い、最終的には界面の電子トンネルの制御に対する指針を与えることを目指した。

4. 研究成果

- (1) 電子のダイナミクスを踏まえたトンネリングの素過程の探求

まず、半導体デバイス中の界面での電子トンネル素過程の検討を行った。具体的には、シリコンナノドットフローティングゲートメモリにおけるナノドットへのトンネルによる電荷注入過程を検討し、この系において見出された直接トンネル領域における注入電圧の温度依存性などの従来の理論では説明できない現象の起源を解明することを目指した。

本研究では特に、デバイス中の反転層に形成される二次元電子ガス中の過渡的な電子状態がトンネルに与える影響に着目し検討を進めた。従来のトンネル現象に対する研究においてはこの点は、重要視されてこなかった。この視点の下に、電子のトンネル過程の検討を行った。その結果、図1に示すようなナノドットメモリなどへの電荷注入などの次元の異なる系への電子移動においては幾何学的な波動関数マッチングが極めて重要となり、トンネルする先の位置情報と電子の波動関数形状でトンネルの成否が決定されることを明らかとした。

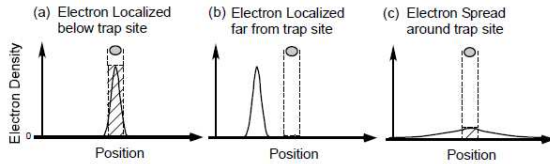


図1 次元の異なる系への電子移動の概念図

これは、2次元電子ガス(反転層・電極)から0次元系(ナノドット)へのトンネルには、電子ガス中において波動関数を局在させるための時間的・空間的揺らぎが不可欠となることを示す重要な知見である。

これにより、(2)項にて述べる実験との連携により得られた、従来の次元が同じ系間で起こる電子移動には見られない、シリコンナノドットフローティングゲートMOSキャパシタ系における「特異な温度依存性」、「掃引速度依存性」の起源が説明可能であることも同時に明らかとした。

(2) 実験との緊密な連携による理論の精緻化

本研究では、理論のみに固執せず、実験との対応を検討することで、ナノ構造への電荷注入過程の素過程に対する理解を深化させるため、研究代表者が所属する東北大学遠藤研究室において得られた最先端の半導体デバイスに関する知見(特にデバイスの高速高精細な電気特性)に加え、名古屋大学宮崎誠一教授のグループおよび筑波大学野村晋太郎准教授および白石賢二教授の研究グループと連携し検討を進めた。これにより、量子ドットメモリー系のサンプルに電圧を印可した時間依存測定の実験を通して上述の温度依存性、電圧の掃引速度依存性のデータを得て、理論の精緻化を行うことが出来た。

また、実験との連携に得られた知見を基に本研究の次の課題であるデバイスごとの個性(物質や構造)に依存した現象の解明、動的相互作用に基づく新たなダイナミクス研究への展開の検討を効率的に進めることができた。

(3) 具体的なトンネルデバイスへの適用

電子のダイナミクスを踏まえたトンネリングの素過程の探求により、本研究で提案した動的相関に基づく協調的トンネル現象の可能性((4)項に詳述)を、当初から検討してきたシリコンナノドットメモリーに加え、次世代の大容量メモ

セルの有力候補である電荷蓄積型メモリーセルの電荷注入過程にも展開し、検討した。その結果、当該デバイスにおいても、協調的トンネルが起こりうることを明らかとした。この成果は、電荷蓄積型メモリーの新たな多値化の可能性を示唆する重要な成果である。

(4) 動的相互作用に基づく新たなダイナミクス研究の展開

さらに申請者は次元の異なる系への電荷注入への検討を進めた結果、局在した状態からのトンネルにより、ドット直下の電子ガス中にポテンシャルの穴が生じ、それが新たな局在状態を誘起する電子ガスを介した電子の動的相関に基づく協調的トンネルモデルを実験結果をもとに提案するに至った。図2にその模式図を示す。

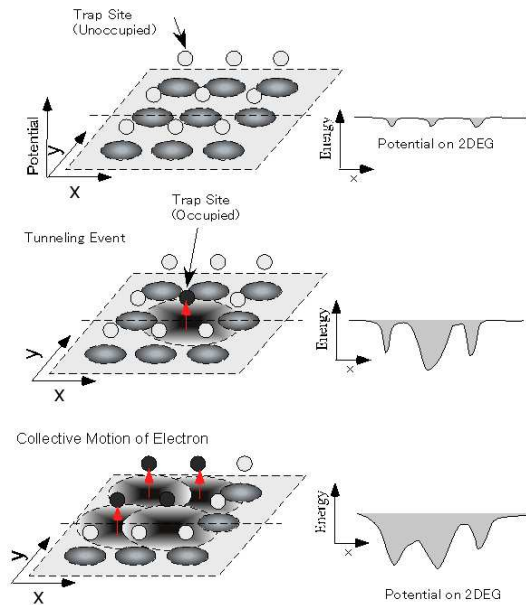


図2 協調的トンネルモデルの概念図

これは電子ガス中の電子の時間的・空間的ゆらぎにより、Siナノドット直下で過渡的な局在状態が形成され、電子のトンネル確率が飛躍的に増大し、トンネルが起こるといふモデルである。

上述の成果から得られた半導体デバイス中のナノスケールの界面に特徴的な「次元の異なる系へのトンネル現象」において顕在化する「電子の動的相関ダイナミクス」の研究を引き続き進め、提案しているナノ界面における協調的トンネル現象の発現条件を量子ダイナミクス的手法を用いて探求し、その物理メカニズムの解明と普遍

性を示すことを目指した。これによりトンネルにおける電子の動的相関効果の理論体系を得るための端緒を得た。

(5) 半導体デバイス中の電子トンネル制御指針の構築

提案した半導体デバイス中の界面における新たな協調的トンネル現象に対する理論の検討を進めることで、半導体デバイス中の電子トンネル制御の指針の構築を目指し研究を展開した。この目的のため、次元の異なる系間のトンネル過程について、実験で得られた現象の抽出、理論の構築、開発した現象論的シミュレーションによる検証までを一貫して行った。

上述の結果とあわせ、これまでの研究成果をとりまとめ、総括を行った。その結果、将来のデバイスを考える上で、ナノ構造への電荷注入においては、従来重要視されてこなかった、電極中の電子状態が極めて重要となることが示された。本課題については、より精緻なものとするため今後も新たな研究として引き続き検討を続ける。

以上まとめると、本研究では、半導体デバイス中のナノスケールの界面に特徴的な「次元の異なる系へのトンネル現象」において顕在化する「電子の動的相関ダイナミクス」に着目して研究を展開した結果、電子ガス中の局所的なポテンシャル場のゆらぎと、それに伴う動的相互作用の顕在化により、提案した協調的トンネル現象などの新奇な現象が発現することが明らかとなった。これらの現象を制御し、積極的に使用していくことが今後のナノスケール半導体デバイスの性能の維持と向上にとって極めて重要であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計9件)

1. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell, Japanese Journal of Applied Physics 50, pp. 04DD04-04DD04-4, 2011, 査読有.
2. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, Collective Electron Tunneling Model in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Structure,

Key Engineering Materials, vol. 470, pp.48-53, 2011, 査読有.

3. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, and T. Endoh, Study on Collective Electron Motion in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Capacitor, IEICE Transactions on Electronics, E94-C, pp.730-736, 2011, 査読有.
4. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, K. Makihara, M. Ikeda, S. Miyazaki, Y. Shigeta, and T. Endoh, Collective Tunneling Model between Two-Dimensional Electron Gas to Si-Nano Dot, AIP Conference Series, 2011, 印刷中, 査読有.
5. M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Takada, Y. Sakurai, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, Importance of Electronic State of Two-Dimensional Electron Gas for Electron Injection Process in Nano-Electronic Devices, Physica E, 2602-2605, 2010, 査読有.
6. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, T. Endoh, K. Shiraishi, Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot, IEICE Transactions on Electronics, E93-C, pp. 563-568, 2010, 査読有.
7. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, and K. Shiraishi: "Theoretical Study of the Electron Dynamics of a Quantum Wire Coupled with the Quantum Dots" Journal of Physics : Conference Series 150. 22061(4), 2009, 査読有.
8. M. Muraguchi, K. Shiraishi, K. Takeda: "Theoretical study of the time-dependent phenomenon of photon assisted tunneling through a charged quantum dot" Journal of Physics : Condensed Matter 21. 064230(5), 2009, 査読有.
9. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, and K. Shiraishi: "Theoretical study of the time-dependent phenomena on a two-dimensional electron gas weakly coupled with a discrete level" Japanese Journal of Applied Physics 47. 7807-7811, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

1. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, "Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2010), E-3-2, Tokyo, Sep. 22-24, 2010.
2. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, K. Makihara, M. Ikeda, S. Miyazaki, Y. Shigeta, and T. Endoh, "Collective Tunneling Model between Two-Dimensional Electron Gas to Si-Nano Dot" International Conference on the Physics of Semiconductors, Seoul, Korea, July 25-July 30, 2010, Th-P2-105.
3. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, and T. Endoh, "Study on Collective Electron Motion in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Capacitor", 2010 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, 8A-4, Tokyo, Japan, June 24-26 2010.
4. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi and T. Endoh, "Collective Electron Tunneling Model in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Structure", ISTESNE 2010, ISTESNE 2010, Tokyo, June 3-4 2010.
5. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi and T. Endoh, "Bias Voltage Sweep Speed Dependence of Electron Injection in Si-Nano-Dots Floating Gate MOS Capacitor", IMFEDK2010, B-2, Osaka, May 13-14, 2010.
6. 村口正和, 高田幸宏, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 牧原克典, 池田弥央, 宮崎誠一, 重田育照, 遠藤哲郎, 2次元電子ガス-量子ドット界面における電子トンネル過程に対する微視的考察, 日本物理学会2010年春季大会, 2010年3月21日, 岡山大学(岡山県)
7. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, New Tunneling Model with Dependency of Temperature Measured in Si Nano-Dot Floating Gate MOS Capacitor, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009), Oct. 7, 2009, Sendai, Japan.
8. 村口正和, 遠藤哲郎, 杉山功太, 多川知希, 奥西拓馬, 武田京三郎, 円-リング複合型量子ドットのFloquet状態, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009年9月25日, 熊本大学(熊本県)
9. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot, The 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe, Japan, July. 20, 2009
10. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, Importance of Electronic State of Two-Dimensional Electron Gas for Electron Injection Process in Nano-Electronic Devices, Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices 2009, June 25, 2009, Busan, Korea,
11. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, Study of Electronic State in Electrode for Nano-Electronic Devices, The 2009 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Osaka, Japan, May 14, 2009.
12. 村口正和, 遠藤哲郎, 白石賢二, 野村晋太郎, 櫻井蓉子, 高田幸宏, 宮崎誠一, 牧原克典, 池田弥央, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2009年 3月30日~4月2日, 筑波大学, "少数個の電子で動く未来デバイスの姿"
13. 村口正和, 遠藤哲郎, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 高田幸宏, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 齊藤慎一 "電子ガス-量子ドット結合系における電子ダイナミクス II" 日本物理学会春季大会. 2009年3月30日, 立教大学
14. M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, "New insight into Tunneling Process between

Quantum Dot and Electron Gas” America Physical Society 2009 March Meeting. March 19, 2009, Pittsburg, USA.

15. M. Muraguchi, Y. Takada, Y. Sakurai, T. Endoh, S. Nomura: “Theoretical investigation of quantum dot coupled to a two-dimensional electron system” 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop. December 10, 2008, Hawaii, USA.
16. 村口正和, 高田幸宏, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 斎藤慎一, 白石賢二, “電子ガス-量子ドット結合系における電子ダイナミクス” 日本物理学会秋季大会. September 21, 2008, 岩手大学.
17. 村口正和, 白石賢二: “信頼性を支配するトンネル現象に対する新しい理解(シンポジウム講演)” 第 55 回応用物理学関係連合講演会 September 2, 2008, 中部大学.
18. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, and K. Shiraishi “Theoretical Study of the Electron Dynamics of a Quantum Wire Coupled with the Quantum Dots” International conference on Low Temperature Physics. August 6, 2008, Amsterdam, Holland.
19. M. Muraguchi, “Theoretical Study on Electron Dynamics for a Two-dimensional Electron Gas Coupled with a Quantum Dot” International Conference on the Physics of Semiconductors. July 31, 2008, Rio de Janeiro, Brazil.
20. M. Muraguchi, T. Okunishi, K. Shiraishi and K. Takeda: “Theoretical Study on Time-dependent Phenomena of Photon-Assisted Tunneling through Charged Quantum Dot” International Conference on Quantum Simulators and Design 2008. June 2, 2008, 東京都江東区, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村口 正和 (MURAGUCHI MASAKAZU)
東北大学・学際科学国際高等研究センター・
教育研究支援者
研究者番号: 90386623