

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360160

研究課題名（和文） ナノスケール素子における長距離クーロン相互作用のシミュレーションによる研究

研究課題名（英文） Simulation Study of Long-Range Coulomb Interaction in Nano-Scale Devices

研究代表者

佐野 伸行（SANO NOBUYUKI）

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：90282334

研究成果の概要（和文）：

クーロン相互作用を高精度に導入したモンテカルロ・シミュレータを用いて、ダブルゲート構造のもとでのクーロン相互作用のデバイス特性への影響とその物理機構を検討した。また、デバイス内部での局所状態密度を調べることで、ポテンシャル揺らぎのデバイス内での変化を明らかにすることで、高濃度にドーピングされたソースおよびドレイン内では電子の巨視的流れがあることを見出した。また、デバイス形状（サイズ）を変化させることで、高濃度領域での電子輸送機構のサイズ依存性を明らかにした。そして、クーロン相互作用によるデバイス特性の劣化が、プラズモン励起によってチャネル長 10 nm 程度以下で顕在化することを見出した。

研究成果の概要（英文）：

We investigate the effect of the Coulomb interaction on device characteristics and its physical mechanism under the double-gate MOSFET structures by Monte Carlo simulations which take into account of the Coulomb interaction accurately. Potential fluctuations associated with the long-range part of the Coulomb interaction among electrons are also studied by looking at the local density of states in high-doped regions. We find that there are strong electron flows even inside the high-doped source regions near the channel junctions so that electrons there are in highly off-equilibrium. We also find that device characteristics strongly degrade if the channel length shrinks below 10 nm due to plasmon excitations by channel electrons through the Coulomb interaction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路

1. 研究開始当初の背景

微細素子のデバイスシミュレーション手

法としては、ポアソン方程式を自己無撞着に解いてクーロン相互作用を組み込んだモン

テカルロ・シミュレーションが、最も信頼のおけるシミュレーション手法として世界中で採用されている。しかしながら、クーロンポテンシャルの長距離相関を当該研究で行っている精度で解析を進めているのは、本分野の研究で世界を牽引している米国 IBM グループと当該グループのみであった。しかしながら、IBM グループのシミュレーションは 2 次元シミュレーションであるうえに、シミュレーション上でエネルギー保存が厳密に守られているか疑問がある。その結果、3 次元性が本質的になるナノスケール素子の素子特性予測において、定量性が無かった。また、当該申請者と同様の視点でモンテカルロ法を用いて検討を進めているグループが米国、英国、仏国、伊国の大学に存在するが、エネルギー保存やプラズマ波の励起の検証等が行われておらず、クーロン相互作用の取り扱い精度において、当該グループや IBM グループよりも大きく劣っている。

2. 研究の目的

ナノスケール素子では、電子やイオン化不純物が少数個になるため、それらの離散性が顕在化する。しかも、電子や不純物は理論的な取り扱いが極めて困難な長距離にわたるクーロン相互作用を及ぼし合うことから、素子特性を正確に理論予測するためには、離散的な不純物や電子のもつ長距離クーロンポテンシャルを正確に考慮したデバイス・シミュレータが必要不可欠になる。加えて、準弾道的に走行するチャネル電子は印加電圧に相当した高エネルギー状態で高濃度なドレイン領域に注入されることから、高濃度領域でのクーロン相互作用を通じた準弾道電子のエネルギー緩和が素子特性に大きな影響を及ぼすことになる。そこで、当該グループで構築した長距離クーロン相互作用を高精度に導入したバルクに対する 3 次元モンテカルロ・シミュレータにナノスケール素子構造とイオン化不純物の離散性を導入し、ナノスケール素子特性の定量的な解析と、クーロン相互作用を加味した準弾道輸送の機構解明を行う。

3. 研究の方法

(1) クーロン相互作用を正確に考慮したバルクに対する 3 次元モンテカルロ・シミュレータにデバイス構造を導入する。具体的には、次世代 Si-MOS 構造素子として最も有望視されている、ダブルゲート構造、サラディン (Fin) 構造、(大きめの) ワイヤ構造を 3 次元モンテカルロ・シミュレータに導入する。その際、準弾道輸送の物理機構解明を系統的に進めるために、最も現実的なデバイスサイズ (デバイス断面積は量子閉じ込めの影響が小さい 20nm \times 20nm から 10nm \times 10nm 程度とし、

チャネル長は 50nm から 5nm) を設定する。
(2) 高濃度にドーピングされているソース/ドレイン領域での電子間および電子不純物間クーロン相互作用の導入と検証を行う。クーロン相互作用の導入に対しては、(i) 集団運動 (プラズマ波) の励起、(ii) 縮退した電子ガス状態、(iii) ポテンシャル揺らぎに伴ったバンドテール効果とそれに伴ったホットエレクトロン化、を検証する。
(3) チャネルから注入される準弾道電子によるドレイン領域でのエネルギー緩和の素子特性への影響を明らかにし、準弾道輸送の物理機構を解明する。具体的には、デバイス内での緩和過程として、電子間クーロン相互作用を全く含めない場合 (従来のモンテカルロ・シミュレーション)、ポテンシャル揺らぎ (クーロン相互作用の長距離成分) 含めない場合、フルにクーロン相互作用を含めた場合、での輸送機構の相違を考察して、準弾道輸送の機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) クーロン相互作用を正確に考慮したバルク 3 次元モンテカルロ・シミュレータにデバイス構造を導入した。具体的には、次世代 Si-MOS 構造素子として最も有望視されている、ダブルゲート構造を 3 次元モンテカルロ・シミュレータに導入した。
(2) 高濃度にドーピングされているソース/ドレイン領域での電子間および電子不純物間クーロン相互作用の導入とその正常動作の検証を行った。クーロン相互作用の正確な導入には、(i) 集団運動 (プラズマ波) の励起、(ii) 縮退した電子ガス状態、(iii) ポテンシャル揺らぎに伴ったバンドテール効果が再現できることで正当性を検証した。尚、これらの研究成果は当該研究分野で最も権威ある米国での国際会議 IEDM において 2009 年に報告した。
(3) チャネル長とデバイス特性 (性能) との関係を明らかにした。特に、チャネル長を 50nm から 5nm にわたって変化させて、クーロン相互作用による伝達特性劣化の可能性を定量的に明らかにした。また、ポテンシャル揺らぎの状態密度を調べることで、ポテンシャル揺らぎの確率分布をデバイス内の各領域で調べた。その結果、高濃度にドーピングされたソース内においても、実効的な状態密度のバンドテールの大きさがチャネルに近づくにつれて減少することを見出した。これは、これまで準熱平衡状態と考えられていたソース内も非平衡状態が顕在化していることを意味する。
(4) クーロン相互作用によって予測されるデバイス特性の劣化の物理機構を明らかにした。自己無撞着シミュレーションで求めたデバイス内のポテンシャルの時間平均を求

め、デバイス内の電子の感じるクーロン力を自己無撞着ポテンシャルと固定ポテンシャルのもとで求めることで、動的なクーロン相互作用によるデバイス特性への影響を定量的に明らかにした。さらに、デバイス形状(サイズ)を変化させることで、高濃度領域での電子輸送機構のサイズ依存性を検討した。これらの研究成果は、当該分野で最も権威ある国際会議 SISPAD (Bologna で開催)において、2010 年に招待講演を行った。

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)

- ① N. Sano, "Impact of the Coulomb Interaction on Nano-Scale Silicon Device Characteristics," *J.Comp. Electron.*, 10, pp.98-103 (2011). 査読有
DOI: 10.1007/s10825-010-0327-6
 - ② N. Sano, "Monte Carlo Study of the Coulomb Interaction in Nano-Scale Silicon Devices", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, pp.010108_1-6 (2010). 査読有
DOI: 10.1143/JJAP.50.010108
 - ③ K. Yoshida, Y. Okada and N. Sano, "Self-Consistent Simulation of Intermediate Band Solar Cell: Effect of Occupation Rate on Device Characteristics", *Appl. Phys. Lett.*, 97, pp.133503_1-3 (2010). 査読有
DOI: 10.1063/1.3488815
 - ④ H. Ikeda and N. Sano, "Pinch-off Voltage Lowering in Polycrystalline-Silicon Thin-Film Transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, pp. 014301_1-8 (2010). 査読有
DOI: 10.1143/JJAP.50.014301
 - ⑤ M.V.Fischetti, S. Jin, T.-w. Tang, P. Asbeck, Y. Taur, S. E. Laux, and N. Sano, "Scaling FETs to 10 nm: Coulomb Effects, Source Starvation, and Virtual Source," *J.Comp. Electron.*, 2, pp.60-77 (2009). 査読有
DOI: 10.1007/s10825-009-0277-z
 - ⑥ H. Ikeda and N. Sano, "Analysis of Photon-Induced Drain Current in Polycrystalline-Silicon Thin-Film Transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, pp.101201_1-8 (2009). 査読有
DOI: 10.1143/JJAP.48.101201
 - ⑦ F. Ootsuka, A. Katakami, K. Shirai, H. Nakata, T. Eimori, Y. Nara, Y. Ohji, K. Shimura, S. Horii, N. Sano, K. Yamabe, "Hole Mobility Enhancement Caused by Gate-Induced Vertical Strain in Gate-First Full-Metal High-k pFETs using Ion-Beam W," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, pp.056502_1-6 (2009). 査読有
- DOI: 10.1143/JJAP.48.056502
- ⑧ 佐野伸行, "最先端デバイスのモンテカルロ法", *電気学会誌* 12 月号, pp.796-799 (電気学会、2009) . 査読有
http://www.jstage.jst.go.jp/login?mid=ieejjournal&sourceurl=/article/ieejjournal/129/12/796/_pdf/-char/ja/&lang=ja

[学会発表] (計 14 件)

- ① (INVITED) N. Sano, "The Role of High-Doped Source and Drain on Device Performance in Nano-Scale Si-MOSFETs," 2011 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Kansai Univ., May 19-20, 2011 [Proc. 2011 IMFEDK, pp.22-23 (2011)].
- ② N. Sano, "Self-Consistent Monte Carlo Study of the Coulomb Interaction under Nano-Scale Device Structures," The American Physical Society March Meeting, Dallas, U.S.A., Mar. 21-25, 2011.
- ③ T. w. Tang, I. Yoon, N. Sano, S. Jin, M. Fischetti, and Y. J. Park, "Model-Comparison Study of Quasi-Ballistic Electron Transport in Nanoscale Semiconductor Devices," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-14), Pisa, Italy, October 27-29, 2010.
- ④ (INVITED) N. Sano, "Quasi-Ballistic Transport in Nano-Scale Devices: Boundary Layer, Potential Fluctuation, and Coulomb Interaction," International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD-2010), Bologna, Italy, September 6-8, 2010 [Proc. SISPAD, pp.177-180 (2010)].
- ⑤ K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano, "Self-Consistent Drift-Diffusion Approach for Analysis of Intermediate Band Solar Cells with Multi-Stacked Quantum Dots," 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (25thEUPVSEC), Valencia, Spain, September 6-10, 2010.
- ⑥ S. Abe, Y. Watanabe, S. Hirayama, N. Sano, Y. Tosaka, M. Tsutsui, H. Furuta and T. Imamura, "Validation of nuclear reaction models relevant to cosmic-ray neutron induced single-event effects in microelectronics," International Nuclear Physics Conference (INPC 2010), Vancouver, Canada, July 4-9, 2010.
- ⑦ N. Sano and T. Karasawa, "Quasi-Ballistic Transport in Nano-Scale Devices: Boundary Layer, Potential Fluctuation, and Coulomb Interaction," International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (ISTESNE), Tokyo Institute

- of Technology, June 3-5, 2010 [Proc. ISTESNE, Session 3-5 (2010)].
- ⑧ (INVITED) M.V.Fischetti, S. Jin, T.-w. Tang, P. Asbeck, Y. Taur, S. E. Laux, N. Sano, and M. Rodwell, "Scaling FETs to 10 nm: Coulomb Effects, Source Starvation, and Virtual Source," 217th ECS Meeting, Vancouver, Canada, April 25-30, 2010 [Proc. 217th ECS, #915 (2010)].
- ⑨ K. Yoshida, Y. Okada and N. Sano, "Numerical Analysis of Electron Transport in Quasi Quantum Dot Superlattice", Workshop on Information, Nano and Photonics Technology 2009 (WINPTech2009), Kobe University, December 1-2, 2009.
- ⑩ N. Shibano, N. Sano, Y. Tosaka, H. Furuta, M. Tsutsui, and K. Imamura, " Physical Model and Mesh-Size Dependence in Drift-Diffusion Simulations for Single-Event Effects by Heavy Ions," 2009 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS 2009), College Park, U.S.A. December 9-11, 2009.
- ⑪ T. Karasawa, K. Nakanishi, and N.Sano, "Discrete Impurity and Mobility in Drift-Diffusion Simulations for Device Characteristics Variability," 2009 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS 2009), College Park, U.S.A. December 9-11, 2009.
- ⑫ K. Nakanishi, T. Uechi, and N. Sano, "Self-Consistent Monte Carlo Device Simulations under Nano-Scale Device Structures: Role of Coulomb interaction, Degeneracy, and Boundary Condition," IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM-2009), Baltimore, December 7-9, 2009 [IEDM Tech. Digest, pp.79-82 (2009)].
- ⑬ (INVITED) N. Sano, "Simulation of Electron Transport in Si Nano Devices", G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030 - Prospects by World's Leading Scientists, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, October 13-14, 2009.
- ⑭ (INVITED) M.V.Fischetti, S. Jin, T.-w. Tang, P. Asbeck, Y. Taur, S. E. Laux, and N. Sano, "Scaling FETs to 10 nm: Coulomb Effects, Source Starvation, and Virtual Source," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-13), Beijing, China, May 27-29, 2009.

[その他]

ホームページ等

<http://hermes.esys.tsukuba.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 伸行 (SANO NOBUYUKI)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：90282334