

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18063004
 研究課題名（和文） 微視的揺らぎと少数電子系の輸送機構
 研究課題名（英文） Microscopic Fluctuations and Transport Mechanism of Few Electron Systems
 研究代表者
 佐野 伸行 (SANO NOBUYUKI)
 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
 研究者番号：90282334

研究成果の概要（和文）：

チャネル電子やイオン化不純物が少数個になるナノスケール MOSFET では、電子やイオン化不純物の離散性が、素子特性のばらつきに本質的影響を及ぼす。離散性に伴った問題を解決するために、本研究では、離散分布する不純物や電子のもつクーロンポテンシャルとナノスケールで発現する電子の量子性を考慮したシミュレータを高い精度で構築した。そのうえで、電子輸送機構の物理の解明と定量的な輸送特性評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

The discreteness of doped impurities and electrons in nano-scale MOSFETs become important because of the decrease in number of particles in such devices. In order to study such phenomena associated with discreteness, we have successfully developed the 3-D Monte Carlo simulator which takes account of the full Coulomb interaction among charged particles. The physical mechanism of electrons transport and device characteristics under nano-scale device structures have been studied via the Monte Carlo simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,400,000	0	11,400,000
2007 年度	11,400,000	0	11,400,000
2008 年度	11,900,000	0	11,900,000
2009 年度	11,900,000	0	11,900,000
年度			
総計	46,600,000	0	46,600,000

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

シリコンを基盤としたナノスケール素子では、チャネル領域の不純物間平均距離や電子の平均自由行程がゲート長と同程度になることから、離散的に局在した不純物による

散乱や電子間相互作用によって静電ポテンシャルが大きく揺らぐことが想定される。このようなポテンシャル揺らぎは、チャネル電子の走行パスを素子ごとにばらつかせ、素子特性の揺らぎを引き起こす。

しかしながら、クーロンポテンシャルは無
限遠にまで及ぶ長距離相関であることから、
いかなるデバイスシミュレーションにおい
ても、クーロン相互作用を正確に導入する
ことが困難な状態にある。分子動力学法等を用
いた様々な試みがあるが、数値安定性の問題
等、未解決なままである。モンテカルロ法に
よるアプローチでの唯一の例外は、本分野
(シミュレーションおよびデバイス物理分
野)で世界を牽引している米国 IBM グル
ープ(Drs. FischettiおよびLaux)のみである。
しかしながら、彼らのモンテカルロ・シミュ
レーションは2次元シミュレーションである
ことに加えて、エネルギー散逸のあるフォ
ノン散乱を含めたシミュレーションでパラ
メータ最適化を行っていることから、エネ
ルギー保存がシミュレーション上で厳密に守
られているかどうかという疑問がある。加
えて、高濃度領域での電子運動エネルギーの増
大の原因やチャンネル電子のクーロン相互
作用による素子特性への影響の定量的評価が
不明のままである。

また、ポテンシャル揺らぎを引き起こす離
散不純物による素子特性(しきい値電圧)揺
らぎの評価が、ドリフト拡散シミュレータを
用いて世界中で広く行われている。一方、そ
こで用いられる離散不純物の物理モデルの
正当性は、依然不明なままである。

2. 研究の目的

当該研究の最終目的は、長距離クーロン力
を正確に組み込んだ電子輸送の3次元粒子
シミュレータの構築と、ナノスケール素子構
造のもとでのモンテカルロ・シミュレーシ
ョンによる素子特性解析を行うことである。具
体的な到達目標は、以下の4点である。

- (1) 不純物および電子によるクーロンポテ
ンシャルの長距離成分を3次元粒子シミュ
レーションに厳密に組み込み、理論解析との比
較からシミュレータの精度を検証する。その
うえで、高濃度領域で発現する特異な電子の
ホットエレクトロン化を定量的に評価する。
- (2) 高精度化したシミュレータに典型的デ
バイス(ダブルゲート MOSFET)構造を導入
し、高濃度のソース/ドレイン領域での電子輸
送の物理機構説明とホットエレクトロン化
による素子特性への影響を定量的に明らか
にする。
- (3) チャンネル領域での閉じ込め効果に伴
った量子効果とモンテカルロ・シミュレー
タで考慮される粒子の有限サイズ効果との比
較検討を行い、当該モンテカルロ・シミュ
レータと量子閉じ込め効果との関係を明確
にする。
- (4) モンテカルロ・シミュレーションより
見積もったポテンシャル揺らぎを、ドリフト
拡散シミュレータでの離散不純物モデルに反
映させることで、離散不純物の物理モデルの

最適化を行う。

3. 研究の方法

(1) 当該グループで構築した2次元モン
テカルロ・シミュレータを3次元化して拡張
する。そのうえで、フォノン散乱等のエネ
ルギー散逸過程を外して、電子間クーロン相
互作用のみで熱平衡状態にある系の3次元
粒子シミュレーションを実行することで、全
系のエネルギー保存を長時間にわたって保
持させるためのメッシュサイズ等のシミュ
レーション・パラメータの最適化を行う。そ
のうえで、電子系に励起されるプラズマ振
動のスペクトル強度、励起波の分散関係等
の理論的予測と比較検討し、シミュレーシ
ョンの精度について検証する。

(2) 高濃度領域での電子間クーロンポテ
ンシャルの長距離成分によるバンド端の揺
らぎを定量的に評価する。これは、時間
に依存する動的遮蔽効果であって、基板不
純物濃度の空間的揺らぎによるバンドテール

(band-tail)効果と同様に捉えることが
できる。高濃度領域でのバンドテール効果
に伴った電子エネルギーのホット化を検証
する。

(3) フォノン散乱によるエネルギー散逸を
含めた3次元モンテカルロ・シミュレー
タに、ナノスケールの素子構造(ダブルゲ
ート MOSFET)を導入する。高濃度
にドープされているソース/ドレイン(S/D)
領域での電子のホットエレクトロン化を検
証する。そのうえで、S/D領域での電子
のホットエレクトロン化による素子特性へ
の影響を明らかにする。

(4) ダブルゲート構造のチャンネル部
に対しての Schrodinger-Poisson 方程式
を解くことで、量子閉じ込め効果に伴った
電荷分布とポテンシャル形状を求める。同
様の条件でモンテカルロ・シミュレー
タを実行することで、量子効果とモン
テカルロ法で用いられる粒子の有限サイズ
効果との関係を考察する。

(5) 不純物を離散分布させたモンテカル
ロ・シミュレーションよりポテンシャル揺
らぎを見積もる。全く同じ離散不純物分
布のもとでドリフト拡散シミュレータを
実行することで、離散不純物モデルに含
まれるパラメータの最適化を行う。その
うえで、電子移動度を評価することで、
世界中で用いられている様々な離散不
純物モデルの正当性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 数値計算上の取り扱いが困難なク
ーロンポテンシャルの長距離成分を3次元
粒子シミュレーションに厳密に導入するこ
に成功した。さらに、全ての短距離散乱に
縮退効果を組み込むことで、縮退状態の
電子輸送シミュレーションを可能にし、
低濃度から高濃度領域まで任意パラメ
ータを用いること

なく、電子移動度の不純物濃度依存性が再現できることを示した。また、高濃度領域での集団運動（プラズマ振動）の励起がされていることをポテンシャル揺らぎのスペクトル解析から確認した。これらの結果は、3次元粒子シミュレーションへのクーロン相互作用の高精度な導入に成功したことを意味する。クーロン相互作用の導入は、モンテカルロ・シミュレーションにおける長年にわたる未解決問題であり、世界的に見ても3次元シミュレーションで成功した例は無く、当該研究が唯一のものである。

(2) 現実的なデバイス構造（ダブルゲートMOSFET）を3次元シミュレータに導入し、ソースおよびドレイン領域での高濃度電子輸送シミュレータが正しく動作することを検証した。具体的には、デバイスが動作している状態でソースおよびドレインでの集団運動（プラズマ波の励起）、電子の縮退状態、バンドテール効果とそれによるホットエレクトロン化、が正しくシミュレートできていることを検証した。

従来のシミュレータでは、クーロン相互作用の導入が不正確であったことから、高濃度の領域の電子状態を正しくシミュレートできているかどうか不明であった。当該研究で縮退した電子状態のシミュレートが初めて可能となり、かつこのような縮退状態がデバイス特性に大きな影響を及ぼし得ることを明らかにした。これらの結果は、2009年12月に米国で開催された半導体デバイス分野で最も権威ある国際会議（IEDM）で発表した。

(3) チャネル領域での閉じ込めに伴った量子効果とモンテカルロ・シミュレータで考慮される粒子の有限サイズ効果との定量的な比較を行うことで、当該モンテカルロ・シミュレータが実効的に量子閉じ込め効果を考慮していることを明らかにした。

(4) ドープされている不純物を離散分布させたうえでモンテカルロ・シミュレータを実行し、ポテンシャル揺らぎを見積もった。そのうえで、同じ不純物分布のもとでドリフト拡散シミュレータを実行し、離散不純物モデルに含まれるパラメータ（ポテンシャル成分のカットオフ長）を確定した。さまざまな離散不純物モデルのもとで電子移動度を評価することで、当該グループで提案している不純物モデルが唯一正しい移動度を再現することを実証した。

この結果は、物理的根拠が不明なままで広く用いられている大半の離散不純物モデルが、正しいデバイス動作特性を表現できていないことを示唆している。信頼性の高い特性ばらつきを評価するうえで、当該グループの提案している離散不純物モデルが最適モデルであることを早急にアピールする必要がある。

ある。

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 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
- ② 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
- ③ 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
- ④ S.Toriyama and N.Sano, "Schottky Barrier MOSFETs as Resonant Tunneling Devices," J. Comp. Electron., 7, pp.471-474 (2008), 査読有
- ⑤ T.Uechi, T.Fukui, and N.Sano, "3D Monte Carlo Analysis of potential Fluctuations under High Electron Concentrations," J. Comp. Electron., 7, pp.240-243 (2008), 査読有
- ⑥ S.Sato and N.Sano, "Consistency of Boundary Conditions in Nonequilibrium Green's Function Simulations," J. Comp. Electron., 7, pp.301-304 (2008), 査読有
- ⑦ T.Uechi, T.Fukui, and N.Sano, "3D Monte Carlo Simulations including Full Coulomb Interaction under High Electron Concentration Regimes," Phys.stat.sol.(c), 5, pp.102-106 (2008), 査読有
- ⑧ 佐野伸行、“ナノスケール半導体構造における準弾道電子輸送”、応用物理学会誌10月号, pp.1135-1141（応用物理学会、2007）、査読有

〔学会発表〕（計19件）

- ① N. Shibano, N. Sano, "Discrete Impurity and Mobility in Drift-Diffusion Simulations for Device Characteristics Variability," 2009 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS 2009), College Park, USA, December 9-11, 2009.
- ② 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, USA, December 9-11, 2009.
- ③ 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, USA, December 7-9, 2009 [IEDM Tech. Digest, pp.79-82 (2009)].
 - ④ 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.
 - ⑤ 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, October 13-14, 2009.
 - ⑥ 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.
 - ⑦ N.Sano, "Impact of the Coulomb Interaction on Nano-scale Device Characteristics: A Monte Carlo Study", IEEE EDS Mini-colloquium for Nano CMOS and Nanowire, 東工大、横浜市, 2009年2月21日.
 - ⑧ S.Toriyama, K.Matsuzawa, and N.Sano, "Impacts of Random Dopant Fluctuation on Transient Characteristics in CMOS Inverters: A Device Simulation Study," International Conference on Solid State Materials and Devices (SSDM-2008), Tsukuba, September 24-26, 2008 [Proc. SSDM, pp.892-893 (2008)].
 - ⑨ N.Sano, T.Uechi and T.Fukui, "3D Monte Carlo Simulations of Nano-scale Devices: Impact of Coulomb Interaction on Device Characteristics", Technical Seminar, International Conference on Solid State Materials and Devices (SSDM-2008), Tsukuba, September 23, 2008.
 - ⑩ T.Yamada and N.Sano, "Effects of Gate-Edge Metamorphoses (GEM) on Device Characteristics of Scaled MOSFETs," 2007 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS 2007), College Park, USA, December 12-14, 2007 [Proc. ISDRS, p.WP8-01 (2007)].
 - ⑪ T.Uechi, T.Fukui, and N.Sano, "3D Monte Carlo Analysis of potential Fluctuations under High Electron Concentrations," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-12), Amherst, USA, October 8-10, 2007 [Proc. IWCE, pp.128-129 (2007)].
 - ⑫ S.Toriyama and N.Sano, "Scaling Dependence of Electron Transport in Nano-scale Schottky Barrier MOSFETs," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-12), Amherst, USA, October 8-10, 2007 [Proc. IWCE, pp.141-142 (2007)].
 - ⑬ T.Fukui, T.Uechi, and N.Sano, "Electron Transport Simulations Including Full Coulomb Interaction in Si," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-12), Amherst, USA, October 8-10, 2007 [Proc. IWCE, pp.102-103 (2007)].
 - ⑭ S.Sato, H.Kusaka, and N.Sano, "Consistency of Boundary Conditions in Nonequilibrium Green's Function Simulations," International Workshop on Computational Electronics (IWCE-12), Amherst, USA, October 8-10, 2007 [Proc. IWCE, pp.205-206 (2007)].
 - ⑮ S.Toriyama and N.Sano, "Schottky Barrier MOSFETs as Resonant Tunneling Devices," International Conference on Solid State Materials and Devices (SSDM-2007), Tsukuba, September 19-21, 2007 [Proc. SSDM, pp.48-49 (2007)].
 - ⑯ T.Uechi, T.Fukui, and N.Sano, "3D Monte Carlo Simulations including Full Coulomb Interaction under High Electron Concentration Regimes," 15-th International Conference on Nonequilibrium Carrier Transport in Semiconductors (HCIS-15), Tokyo, July 23-27, 2007 [Proc. HCIS-15, p.89

- (2007)].
- ⑰ H.Kusaka and N.Sano, "Detailed Balance in Quasi-Ballistic Electron Transport under Nanoscale Device Structures," International Conference on Solid State Materials and Devices (SSDM-2006), Yokohama, September 13-15, 2006 [Proc. SSDM, pp.356-357 (2006)].
 - ⑱ S.Toriyama, D.Hagishima, K.Matsuzawa, and N.Sano, "Device Simulation of Random Dopant Effects in Ultra- small MOSFETs Based on Advanced Physical Models," International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD-2006), Montley, USA, September 6-8, 2006 [Proc. SISPAD, pp.145-146 (2006)].
 - ⑲ T.Uechi and N.Sano, "Hot Electrons Associated with the Long-Range Coulomb Interaction under the High-Density Regime," 2006 VLSI-TSA Technology Symposium, Hsinshu, Taiwan, April 24-26, 2006 [Proc. 2006 VLSI-TSA, pp.141-142 (2006)].

[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・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：90282334

(2) 研究協力者

中西 洗平 (NAKANISHI KOHEI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・博士

前期課程 2 年

柴野 望己 (SHIBANO NOZOMI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・博士

前期課程 2 年

吉田 勝尚 (YOSHIDA KATSUHISA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・博士

前期課程 2 年

唐澤 貴彦 (KARASAWA TAKAHIKO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・博士

前期課程 1 年