

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. 研究計画の概要

チャン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な影響を及ぼす。そこで本研究では、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これまでに無い精度で構築することを目指す。そのうえで、電子輸送機構の解明と定量的な輸送特性評価を行うことを目的とする。具体的には、

- (1) クーロンポテンシャルの長距離成分を厳密に考慮した 3 次元粒子シミュレータを構築する。
- (2) 3 次元粒子シミュレータでナノスケール素子における少数電子の輸送機構の解明と特性揺らぎの解析を行う。
- (3) ソース/ドレイン領域での散逸を含めた量子輸送シミュレータを構築し、チャンネル電子の位相干渉と位相緩和の電子輸送への影響を明らかにする。

2. 研究の進捗状況

(1) 数値計算上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、局在した離散不純物による新たな散乱モデルの構築を行った。構築した散乱モデルがバルク形状のもとでは、従来の散乱モデルの結果を再現し得ることを示した。そのうえで、縮退効果を組み込んだ短距離散乱を含む 3 次元粒子モンテカルロ・シミュレーションにより、低濃度か

ら高濃度領域まで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を再現できることを示し、正確なクーロン相互作用の 3 次元粒子シミュレーションへの組み込みに成功した。

(2) 一様なゼリー状不純物や、離散的なイオン化不純物をさまざまに空間的に分布させることによる電子輸送への影響を定量的に解析した。イオン化不純物の空間的な局在性を考慮したデバイス・シミュレータは現在のところ存在しないことから、本研究成果は、デバイス特性揺らぎを初めて定量的に評価し得る粒子モンテカルロ・シミュレータと言える。

(3) 一般的に用いられている非平衡グリーン関数法では、チャンネル領域と高ドープ（コンタクト）領域が分離されており、チャンネル領域での電子の位相はコヒーレントである。散乱効果はチャンネル領域に導入されているが、コヒーレンスが消失する高ドープ領域での散逸効果は、境界条件として人為的に設定される。しかしながら、散逸効果が顕著な高ドープ領域とチャンネル領域は強く結合しており、散逸効果を高ドープ領域まで含めて輸送特性を評価する必要がある。そこで、簡略化したデバイス構造のもとで現実的なフォノン散乱による散逸効果をデバイスの全領域に導入し、高濃度領域で想定されている準熱平衡状態の境界条件と非平衡グリーン関数法との整合性を考察した。その結果、従来の計算手法においては、境界条件に不整合が生じていることを見出した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。
(経緯)

H18-19 年度は3次元粒子シミュレータの構築に研究時間を集中させた結果、当初予定していた量子輸送シミュレーションに関する研究に遅れが生じていたが、H20年度に量子輸送の研究に注力した結果、当初の予定通りの進展となった。

4. 今後の研究の推進方策

これまでの研究成果から、高濃度領域での電子輸送がデバイス特性評価において最重要であることを明らかにしてきた。特に、長距離にわたるクーロン相互作用をいかに高精度にデバイス・シミュレータに反映させるかが、特性評価に信頼性を決定付けるカギとなる。量子輸送の枠組みでクーロン相互作用に伴った多体効果を導入することは困難であるが、半古典的な粒子シミュレータへの導入に関しては、当該グループが世界的にも研究を先導している。

そこで、当該シミュレータに典型的なデバイス構造を導入し、高濃度なドレイン/ソースでのクーロン相互作用の正確なシミュレーションを検証する。そのうえで、デバイス特性の定量的ないち早く評価を行い、微細化に伴った準弾道輸送の物理機構を明らかにすることを旨とする。また、離散的なイオン化不純物をさまざまに空間的に偏在させることで、電子輸送への影響を解析し、特性ばらつき物理機構の解明につなげる。

5. 代表的な研究成果

(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3件)

- ① T.Fukui, T.Uechi, and N.Sano, "Three-dimensional Monte Carlo Simulation of Electron Transport in Si Including Full Coulomb Interaction," *Appl. Phys. Exp.*, 1, pp.5107_1-3 (2008), 査読有
- ② S.Sato and N.Sano, "Consistency of Boundary Conditions in Non-equilibrium Green's Function Simulations," *J. Comp. Electron.*, 7, pp.301-304 (2008), 査読有
- ③ 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2件)

- ① 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).
- ② 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)].

[その他]

ホームページ

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