

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成21年度採択研究代表者

H23 年度 実績報告

大毛利 健治

筑波大学 大学院数理物質系・准教授

ナノデバイスのピコ秒物理の解析による揺らぎ最小化設計指針の開発

§1. 研究実施体制

(1) 「実験」グループ

- ① 研究代表者：大毛利健治（筑波大学大学院数理物質系、准教授）
- ② 研究項目（ナノデバイスにおけるピコ秒領域のキャリア伝導観測と解析）
 - （1-1）ナノスケール MOSFET チャンネルでのポテンシャル変化のリアルタイム観測
 - （1-2）立体構造トランジスタによる静かなトランジスタ設計指針
 - （1-3）独自システム開発による高周波帯域雑音の計測

(2) 「理論」グループ

- ① 主たる共同研究者：白石賢二（筑波大学大学院数理物質科学研究科、教授）
- ② 研究項目（ピコ秒・ナノスケールの物理の構築とナノデバイス設計指針）
 - （2-1）量子古典クロスオーバー領域の電子輸送

(3) 「シミュレーション」グループ

- ① 主たる共同研究者：渡邊 孝信（早稲田大学理工学術院、准教授）
- ② 研究項目
 - （3-1）EMC-MD 法によるナノサイズ・ピコ秒領域の電流揺らぎの解析
 - （3-2）ナノワイヤ型トンネル FET の製作と電気特性評価
 - （3-3）分子動力学法による Si ナノ構造中のフォノンの解析

§2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

(1) 実験グループ

(1-1) ナノスケール MOSFET チャンネルでのポテンシャル変化のリアルタイム観測

微細 MOSFET において顕在化しているランダムテレグラフノイズ (RTN) は、ドレインまたはゲートの電流・電圧がディスクリットに変動する現象である。その要因としては、ゲート絶縁膜でのトラップ捕獲・放出があげられる。我々は、特殊な電圧モニタ端子をチャンネル中に取り付けしたナノワイヤトランジスタを用いて、ドレイン電流の RTN 要因となるチャンネルでのトラップ捕獲・放出によるポテンシャル変化を直接リアルタイムで測定する事に成功した(図 1-1)。その結果、ナノワイヤチャンネルにおける RTN は、局所的なトラップの捕獲・放出による電圧変動が、チャンネル全域に亘って起きることが明らかになった。ゲート幅の大きいプレーナトランジスタの場合は、電流経路として迂回することが出来るが、ナノスケールでは局所トラップがボトルネックになる事を示している。(VLSI Symposia 2011 にて発表)

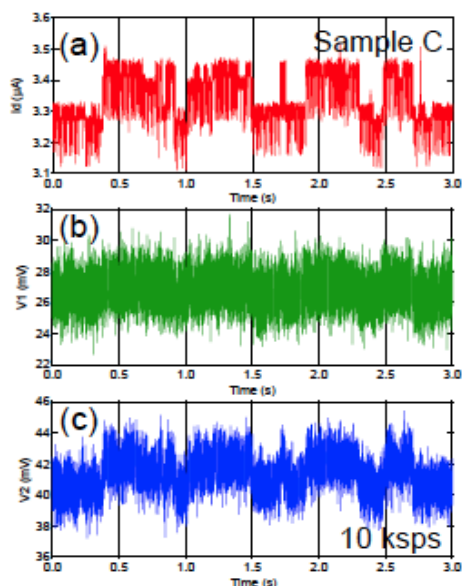


図 1-1 (a)ドレイン電流の RTN および (b-c) それに関連したチャンネル中の電圧の時間変化。

(1-2) 立体構造トランジスタによる静かなトランジスタ設計指針

MOSFET 雑音、特に $1/f$ 雑音もしくはフリッカーノイズと呼ばれる低周波帯域での雑音は、キャリア電子の移動度の揺らぎや絶縁膜中のトラップによって発生する。そのため、その雑音強度を低減する方法として、チャンネル形成を制御する事を試みた。しかしながら、例えば通常のプレーナ型 MOSFET を用いた場合、絶縁膜トラップでのキャリアの捕獲・放出頻度を低減するために、深い位置にチャンネルを形成すると、ゲ

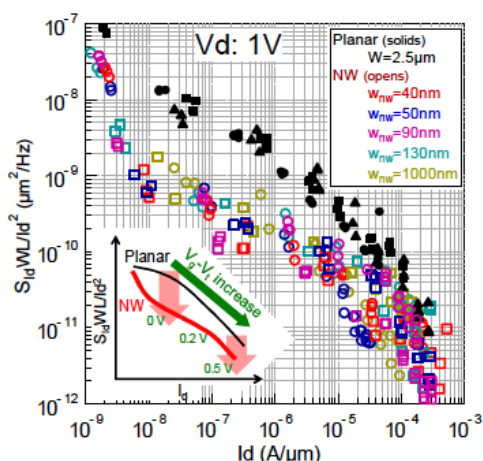


図 1-2 ナノワイヤ型 (色付き) 及びプレーナ型 (黒) における雑音強度の電流値依存性。ナノワイヤの方が雑音強度が低いことがわかる。

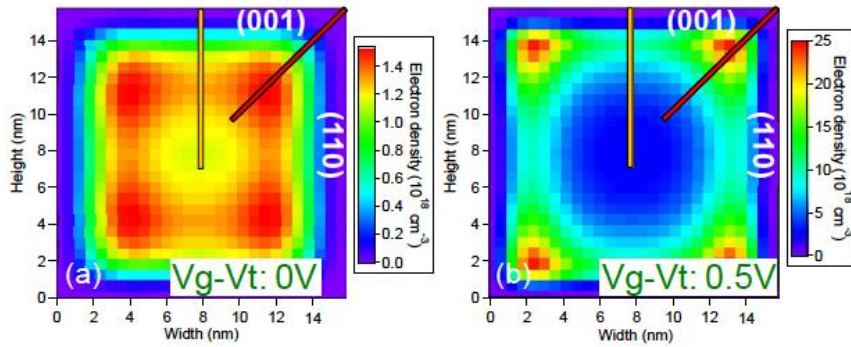


図 1-3 (a) $V_g=V_t$ 及び $V_g=V_t+0.5V$ におけるナノワイヤチャンネル断面のキャリア分布。Poisson-Schrödinger 方程式によりシミュレーションを行った。

ートの実効力が低下し、ゲート容量の低下や短チャンネル効果の発現が危惧される。

我々は、立体構造ナノワイヤ型 MOSFET を用いる事で、同じ電流量で比較したときにプレーナ型 MOSFET よりも雑音強度を低減することが出来る事を実験的に見いだした(図 1-2)。これは、量子効果によりナノワイヤ芯にチャンネルが形成され、絶縁膜でのトラップ頻度を低減するためと考えられる。さらに、ナノワイヤにおける量子効果は、誘起するキャリア密度の増大をもたらすために、界面からチャンネルが遠ざかった場合でも実効的なゲート容量の低下を回避できる事を実験およびシミュレーションより明らかにした(図 1-3)。(IEDM 2011 にて発表)

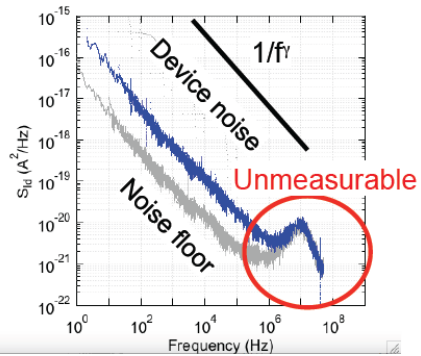


図 1-4 通常の雑音測定機における測定機のノイズフロアと DUT からの雑音。

(2)理論グループ

(2-1)量子古典クロスオーバー領域の電子輸送

理論グループは、ナノメートルスケール・ピコ秒領域の物理概念の構築を行うことを目指して研究を行なっている。特にナノスケールデバイスに高電界を印加されるとデバイス中の電子は量子論的性質と古典論的性質の双方を有するようになると考えられる。すなわち、量子古典クロスオーバー領域の電子物性を考察することが本研究のキーポイントである。電子輸送の物理は、①ドルーデモデルに代表される古典的な手法、②ランダウアー公式で代表される量子力学的な手法、の2つの立場からこれまで精力的に研究されてきた。しかしながら、これら2つの立場の間をつなぐ領域はほとんど研究が行われていない。上述の量子古典クロスオーバー領域の電子物性を考察するために、本年度は「多電子波束ダイナミクス」をはじめとするこれまでの電子輸送解析に用いられてこなかったアプローチも用いてナノ構造体中の電子の挙動を考察した。

一方で、低次元ナノ構造体中での電子輸送において電子間相互作用の重要性が指摘されている。Kravchenkoらは低電子密度のシリコンMOSFETを用いた実験において、電子間相互作用の効果によって温度の低下とともに金属-絶縁体転移が起こることが報告されている。これらの結果は、1次元および2次元の系において電子波動関数が常に局在すると提案したAbrahamsらのスケーリング理論の結果と本質的に異なる結果であり、この現象を

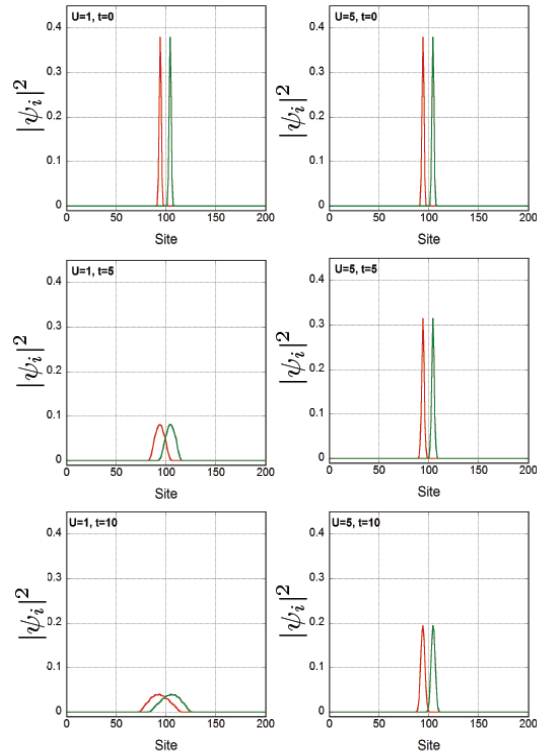


図 2-1: クーロン相互作用(U/γ)を変化させたときの波束崩壊過程の相違。(a) $U/\gamma = 1$ 、(b) $U/\gamma = 5$ 。

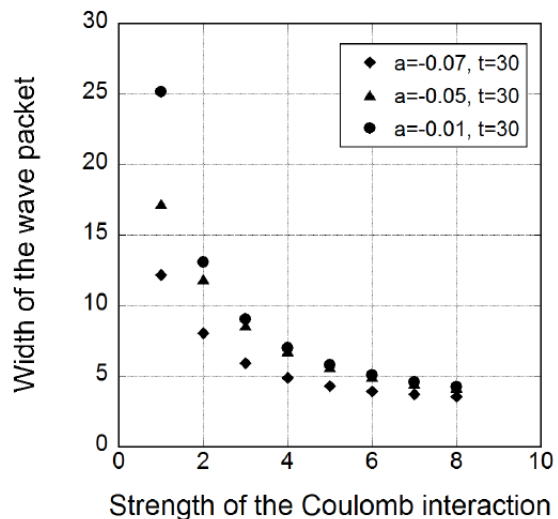


図 2-2: 電界印加による波束崩壊過程の変化。電界パラメーター a を -0.01 、 -0.05 、 -0.07 と変化させた。電界が強いほど波束が崩壊しにくくなる。

説明する十分な理論的な枠組みは得られていない。さらに、室温動作する MOSFET 中での電子輸送においても電子間相互作用が極めて重要な役割を果たすことを佐野らが3次元モンテカルロ法によるシミュレーションによって明らかにしている。以上のような研究は、ナノ構造体中での電子輸送において多体効果を取り込んだ解析が本質的に重要であることを示している。

また、波束ダイナミクスによる研究は、これまで電子励起、トンネル、キャリア輸送と様々な領域で行われてきた。しかしながら、これまでの研究は一体の電子波束を用いており、本研究で行うような多体効果を取り入れた多電子波束による解析はほとんど行われていないのが現状である。

このような考察から、本研究では1次元・2次元系において時間依存ハートリーフォック方程式および時間依存シュレディンガー方程式を数値的に解くことによって、多電子波束ダイナミクスにおける電子間相互作用の影響を検討した。その結果、系の次元性に依らず電子波束の崩壊が電子間相互作用の効果により強く抑制されることがわかった(図 2-1)。これは、電子間相互作用の効果に依って電子が粒子的な性質を保ったまま輸送されることを示唆する結果である。さらに、電子の粒子性が電界印加によって強まることを明らかにした(図 2-2)。

また、初期状態に幅の広い電子波束が、電界下において幅の狭い電子波束に変化する現象が、非均一なポテンシャル中において見られることを明らかにした。上記現象の物理的起源については24年度に徹底的に明らかにする予定である。

以上の結果は、多電子波束ダイナミクスが電子輸送における多体効果の重要性を明らかにするための新たなツールとなることを示すとともに、ナノデバイス中の電子輸送における新しい物理概念構築の足がかりとなると期待している。

また、従来から用いられている非平衡グリーン関数による電子輸送の解析も行なった。量子ポイントコンタクトにおける交流応答において、量子ポイントコンタクトのサイズが電子波の波長よりも小さい領域の解析はこれまでなされていなかった。本年は上記のサイズの小さな量子ポイントコンタクトにおける交流応答特性がランダウアー公式で表される直流応答を全く異なる特性になることを明らかにした。本結果は最近の交流応答の実験をよく再現している。

また、古典量子クロスオーバー領域における、古典量子両極限を(1)古典論に基づくランダム抵抗ネットワーク模型(2)非平衡グリーン関数法による量子極限の格子模型、としておさえ、そのクロスオーバー現象を Suzuki-Trotter 法による量子拡散から数値的に確認する研究も遂行した。

以上の今年度までに得られた計算結果を、古典量子クロスオーバーの観点から解析を進めるとともに、適用範囲の広い手法の開発も同時に行っている。

シミュレーショングループ

(3-1) EMC-MD 法によるナノサイズ・ピコ秒領域の電流揺らぎの解析

ゲートオールアラウンド(GAA)型の円筒形状ナノワイヤ(NW)チャンネル中のキャリア輸送を EMC/MD シミュレーションで再現し,チャンネル形状^(c-2)やゲート酸化膜中の単一トラップ電荷がチャンネル電流に与える影響を調査した(図 3-1).トラップ電荷の有無による平均電流の差から,ランダム・テレグラフ・シグナル(RTN)の電流変動幅を評価することができる.シミュレーションの結果,トラップ電荷の影響はチャンネル断面全体に及び,細かいNWほど相対的なRTN振幅が増加した(図 3-1(b)).

細かいNWで相対的なRTN振幅がやや減少する傾向を示したものの,単位界面面積当たりのトラップ密度を同じと仮定して異なるNW径における電流値を比較すると,相対的なRTN振幅はNW径に比例縮小しないことが判明した.すなわち,RTNはNW径を縮小するほど顕在化すると予想される.トラップ電荷のない状態における電流揺らぎを比較したところ,これもチャンネル径の縮小にともない増加した.この事はサンプリング時間内に流れるキャリアの個数の減少で説明できる.以上から,RTN振幅やピコ秒領域の電流揺らぎなどデバイス動作のバラツキに関わる問題は,GAA型構造においても微細化に伴って深刻化すると考えられる.

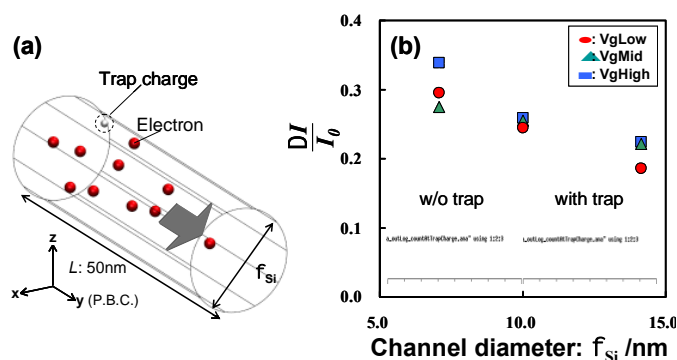


図 3-1 □EMC/MD シミュレーションによるトラップ電荷の存在するGAA型NWチャンネルのキャリア輸送シミュレーション. (a)GAA NW チャンネルのデバイスモデル. (b)電流低下率のチャンネル径依存性,およびチャンネル断面におけるキャリア密度分布.

単位界面面積当たりのトラップ密度を同じと仮定して異なるNW径における電流値を比較すると,相対的なRTN振幅はNW径に比例縮小しないことが判明した.すなわち,RTNはNW径を縮小するほど顕在化すると予想される.トラップ電荷のない状態における電流揺らぎを比較したところ,これもチャンネル径の縮小にともない増加した.この事はサンプリング時間内に流れるキャリアの個数の減少で説明できる.以上から,RTN振幅やピコ秒領域の電流揺らぎなどデバイス動作のバラツキに関わる問題は,GAA型構造においても微細化に伴って深刻化すると考えられる.

(3-2) ナノワイヤ型トンネル FET の製作と電気特性評価

ショットキーバリア型トンネルFETを3次元化すると,電流駆動能力が大幅に向上することが前年度までの研究で判明した.この予想を実験で検証するため,ナノワイヤ型のショットキーバリアFETの製造プロセスを立ち上げに着手した.Siワイヤの片側からNiシリサイドを形成し,ワイヤの中央にナノサイズのショットキー接合を形成した.電気特性評価から,逆方向降伏電圧がワイヤ幅に依存して変化する様子が確認された(図 3-2).これ

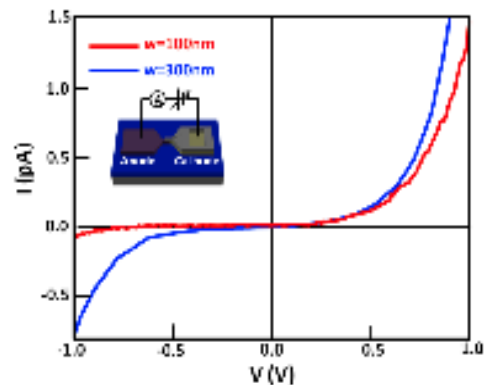


図3-2 ショットキーダイオードのI-V特性のSiワイヤ幅依存性.

は電界のフリッジ効果により細いNWで空乏層幅が広がったためと考えられる。こうした空乏層幅や不純物イオンが作るポテンシャルをSTMで直接観察する実験も試みた。図3-3に示すように、幅1 μm のストライプ構造のSTM観察に成功した。Si表面下のドーパントイオンを可視化するため、表面を水素で不活性化する技術も確立した。

(3-3) 分子動力学法によるSiナノ構造中のフォノンの解析

分子動力学シミュレーションで得られる原子座標の時系列データを時空間フーリエ変換する方法でSiナノワイヤ構造のフォノン分散関係を計算した(図3-4)。独自に開発したSi₂O₃混在系用原子間相互作用モデルを用いて酸化被膜を形成したところ、バルクSi結晶の分散関係の概形を維持しつつ、音響フォノン分枝の低エネルギー側に新たな状態が発生する傾向が見られた。この状態を群速度の小さな音響フォノン分枝の集まりと解釈すれば、Siナノ構造における熱拡散係数の低下を説明することが出来る。

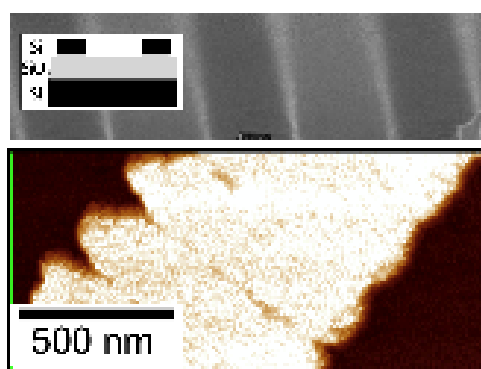


図3-3 STM観察用の立体型Si試料の断面SEM像(上)、および上面のSTM像(下)。

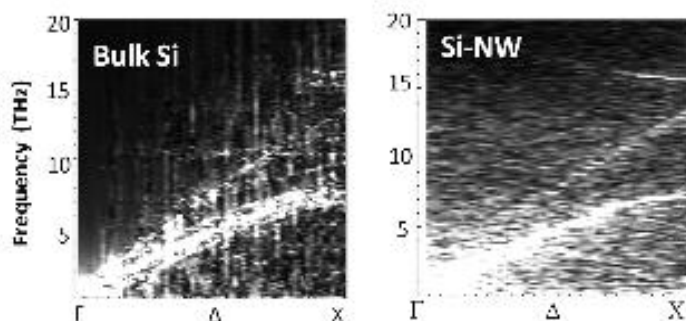


図3-4 分子動力学法で計算したフォノン分散関係。バルクSi(左)、およびSiナノワイヤ(右)。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Takeo Matsuki, Ranga Hettiarachchi, Wei Feng, Kenji Shiraishi, Keisaku Yamada, and Kenji Ohmori
“Impact of Nitrogen Incorporation on Low-Frequency Noise of Polycrystalline Silicon/TiN/HfO₂/SiO₂ Gate-Stack Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistors”
Japanese Journal of Applied Physics **50** (2011) 10PB02 (5 pages).
2. Ranga Hettiarachchi, Takeo Matsuki, Wei Feng, Keisaku Yamada, and Kenji Ohmori
“Behavior of Low-Frequency Noise in n-Channel Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors for Different Impurity Concentrations”
Japanese Journal of Applied Physics **50** (2011) 10PB04 (5 pages).
3. T. Kamioka, H. Imai, T. Watanabe, K. Ohmori, K. Shiraishi, Y. Kamakura
“Impact of Channel Shape on Carrier Transport Investigated by Ensemble Monte Carlo/Molecular Dynamics Simulation”
2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) Proceedings, pp.83-86, 2011.
4. Wei Feng, Ranga Hettiarachchi, Soshi Sato, Kuniyuki Kakushima, Masaaki Niwa, Hiroshi Iwai, Keisaku Yamada, Kenji Ohmori
“Advantages of Silicon Nanowire Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors over Planar Ones in Noise Properties”
Japanese Journal of Applied Physics **51** (2012) 04DC06.
5. Yukihiro Takada, Young Taek Yoon, Taro Shiokawa, Satoru Konabe, Mitsuhiro Arikawa, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, and Kenji Shiraishi
“Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Applied Electric Field”
Japanese Journal of Applied Physics **51** (2012) 02BJ01.
6. K. Sasaoka, T. Yamamoto, S. Watanabe, and K. Shiraishi
“ac response of quantum point contacts with a split-gate configuration”
Phys. Rev. B **84** 125403 (2011)
7. K. Ohmori, W. Feng, S. Sato, R. Hettiarachchi, M. Sato, T. Matsuki, K. Kakushima, H. Iwai, and K. Yamada
“Direct Real-Time Observation of Channel Potential Fluctuation Correlated to Random Telegraph Noise of Drain Current Using Nanowire MOSFETs with Four-Probe Terminals”
2011 Symposium on VLSI Technology, Digest of Technical Papers pp. 202-203.
8. W. Feng, R. Hettiarachchi, Y. Lee, S. Sato, K. Kakushima, M. Sato, K. Fukuda, M. Niwa, K. Yamabe, K. Shiraishi, H. Iwai, and K. Ohmori
“Fundamental origin of excellent low-noise property in 3D Si-MOSFETs ~ Impact of charge-centroid in the channel due to quantum effect on 1/f noise ~”
Technical Digest of International Electron Devices Meeting 2011, pp. 630-633.
9. Kamioka, F. Isono, T. Yoshida, I. Ohdomari, and T. Watanabe
“Challenge for STM Observation of Dopant Activation Process on Si(001): In-Situ Ion Irradiation and Hydrogenation”
Phys. Stat. Solidi C. (*in press*).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)