

平成21年11月30日  
筑波大学

## 次世代デバイス特性を予測する3次元モンテカルロシミュレータの構築

### ☆成果のポイント

- ナノスケールのデバイス特性を定量的に予測できるモンテカルロシミュレータを構築
- 取り扱いが困難だったクーロン相互作用の導入に成功
- 単純な微細化によるデバイス特性向上の限界を明確化

### 概要

筑波大学の大学院数理物質研究科の村上浩一研究科長を中心に進めている「つくばナノエレクトロニクス産学独連携教育研究システム構築プロジェクト」の一貫として、次世代デバイスのモンテカルロシミュレータの構築を進めていた筑波大学大学院電子・物理工学専攻の佐野伸行教授のグループは、これまで導入が困難であったクーロン相互作用の安定かつ高精度な導入に成功し、シリコンデバイスの単純な微細化による特性向上の限界を明らかにしました。

シリコンを基礎とした現在の半導体デバイスは、そのサイズを微細化することで特性向上等の多くのメリットを生み出してきました。この微細化の傾向は今も際限なく続けられています。一方、デバイスサイズがナノメートル領域に近づくにつれて、デバイスの物理的な微細化限界が議論されています。しかしながら、微細化限界を決めている物理的な要因や具体的なデバイスのサイズは、これまで明らかではありませんでした。その要因の一つは、サイズが微細になるにつれて重要となるクーロン相互作用のモンテカルロシミュレータへの導入が、極めて困難だったことにあります。今回、長距離クーロン相互作用を3次元モンテカルロシミュレータに導入することに初めて成功し、次世代の極微細シリコンデバイスの特性を定量的に予測することが可能になりました。また、本シミュレータを用いることで、現在のシリコンデバイスの単純な微細化による特性向上の限界が、10ナノメートル程度にあることを明確にしました。

### 背景

次世代の極微細シリコンデバイスでは、数ナノメートルで高濃度の領域が近接することから、高濃度領域で支配的なクーロン相互作用に伴った多体効果がデバイス特性に大きな効果を及ぼすことが懸念されています（図1）。しかしながら、モンテカルロシミュレータへのクーロン相互作用の導入は極めて困難であり、現在のところ、IBMで構築された2次元モンテカルロシミュレータが唯一導入に成功しているだけです。そのため、より信頼性の高い特性評価のために、3次元モンテカルロシミュレータへのクーロン相互作用の導入が

強く望まれていました。

## 研究手法と成果

### (1) 長距離クーロン相互作用の導入

クーロンポテンシャルを長距離成分と短距離成分に最適に分離することで、3次元モンテカルロシミュレータに安定かつ高精度にクーロン相互作用を導入することに成功しました。その結果、デバイス特性に強く影響を及ぼすクーロンポテンシャルの揺らぎを精度良くシミュレートすることが可能になりました (図2)。

### (2) デバイス特性予測と微細化によるデバイス特性向上の限界

構築したシミュレータを用いることで、10 ナノメートル以下の次世代デバイスでは、クーロン相互作用に伴った多体効果によって、デバイス特性の向上が期待できず、むしろ特性劣化が生じることを定量的に予測しました (図3)。これは、単純な微細化によるデバイス特性向上には限界があることを示唆しています。

## 今後の展開

シミュレータを用いることで、ナノスケールデバイスで避けることのできない多体効果を高精度に解析することが可能となり、デバイス特性予測の信頼性が上がることが期待できます。また、次世代デバイスの微細化限界の主要因と考えられる多体効果を抑制する新たなデバイス構造や材料の探索に、本シミュレータの応用が期待できます。

本成果は、米国ボルチモアで開催される 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (2009.12.7-9, Baltimore)において 12月7日の午後2時50分(現地時間)から発表します。

発表者

筑波大学大学院数理物質科学研究科 (電子・物理工学専攻)

佐野 伸行 教授

## 用語解説

1 ナノメートル :

1 m の 10 億分の 1 の長さ。

クーロン相互作用 :

荷電粒子間に働く電気力（クーロン力）による相互作用。

多体効果 :

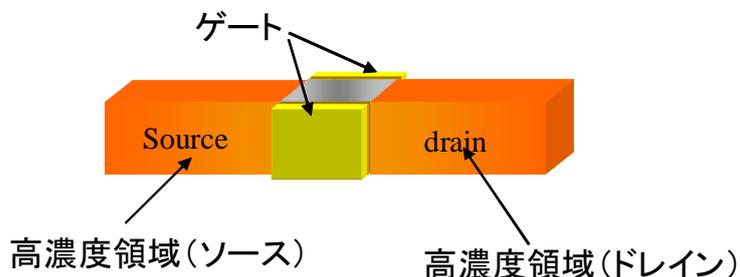
多数の荷電粒子との間に働くクーロン相互作用による効果。

モンテカルロシミュレーション :

乱数を用いて荷電粒子（電子）の運動をコンピュータ上で模擬的に追いかけて、電流特性等のデバイス特性を求めるシミュレーション手法。

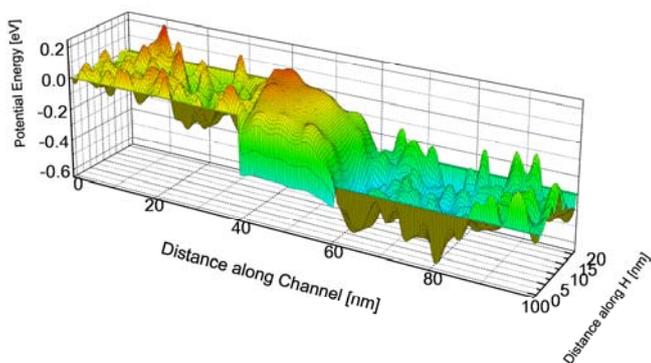
### 参考図 1

次世代デバイスとして有力なダブルゲートデバイス(DG-MOSFET)構造。



### 参考図 2

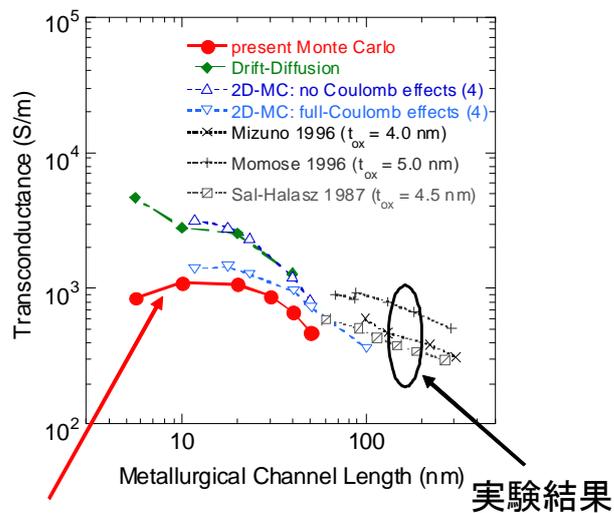
長距離クーロン相互作用を導入することで生じたデバイス内部のクーロンポテンシャルの揺らぎ。ポテンシャルは時間的にも刻々と揺らぎます。



### 参考図 3

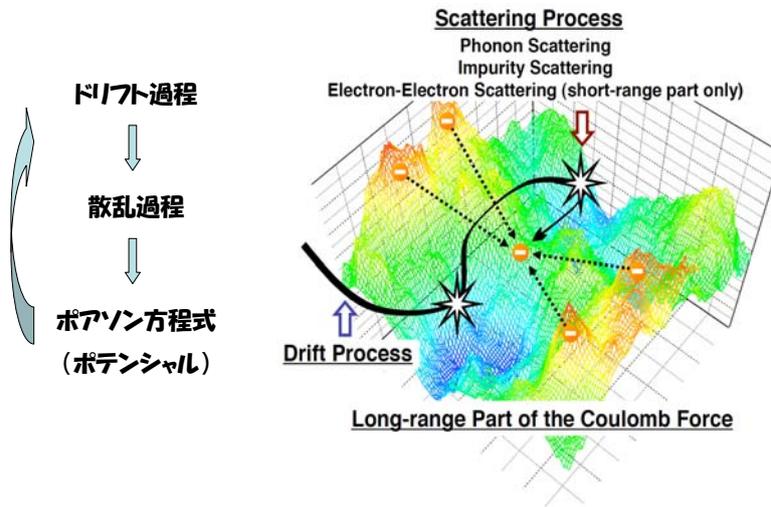
デバイス特性評価の指標である伝達特性 ( $g_m$ ) のデバイスサイズ依存性。

デバイスサイズが 10nm 以下では、伝達特性が劣化します。これは、デバイスサイズの単純な微細化の限界が 10nm 程度にあることを示唆しています。



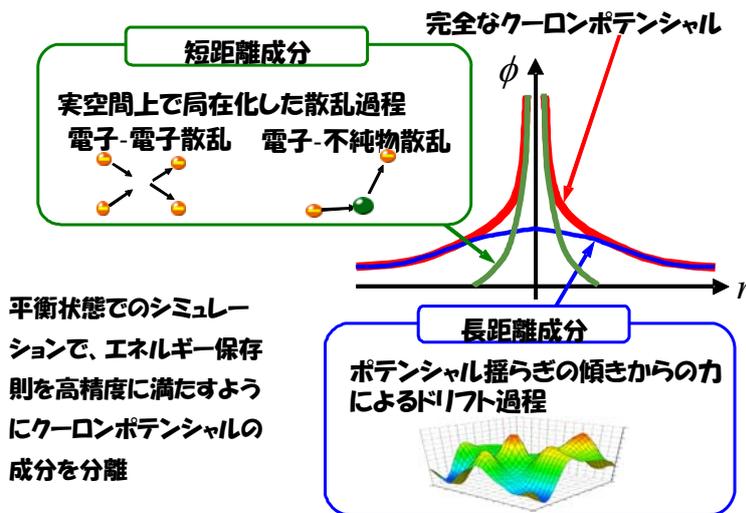
今回のシミュレーション  
による予測

# モンテカルロシミュレーションの概念図



1

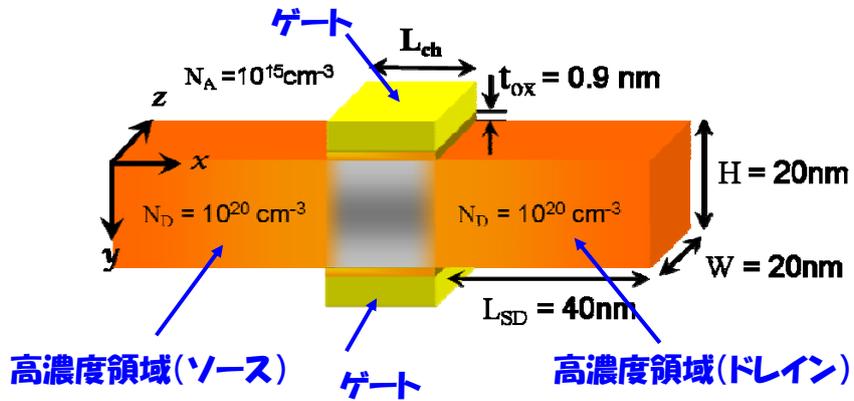
# クーロンポテンシャルを距離成分で分離



平衡状態でのシミュレーションで、エネルギー保存則を高精度に満たすようにクーロンポテンシャルの成分を分離

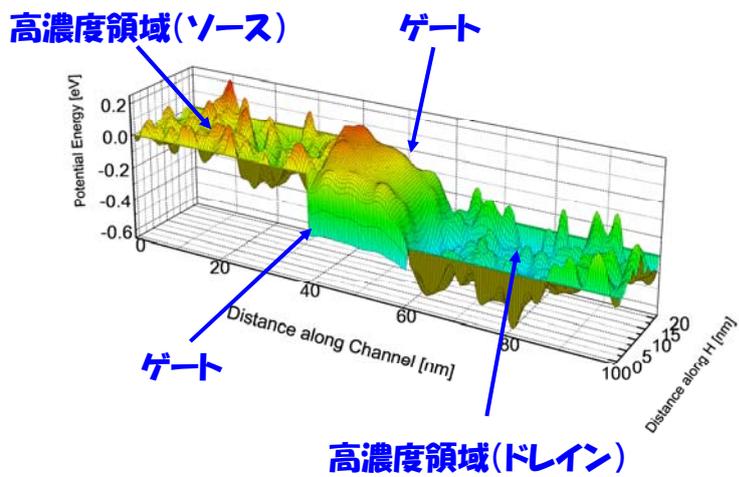
2

### ダブルゲートMOSFET構造



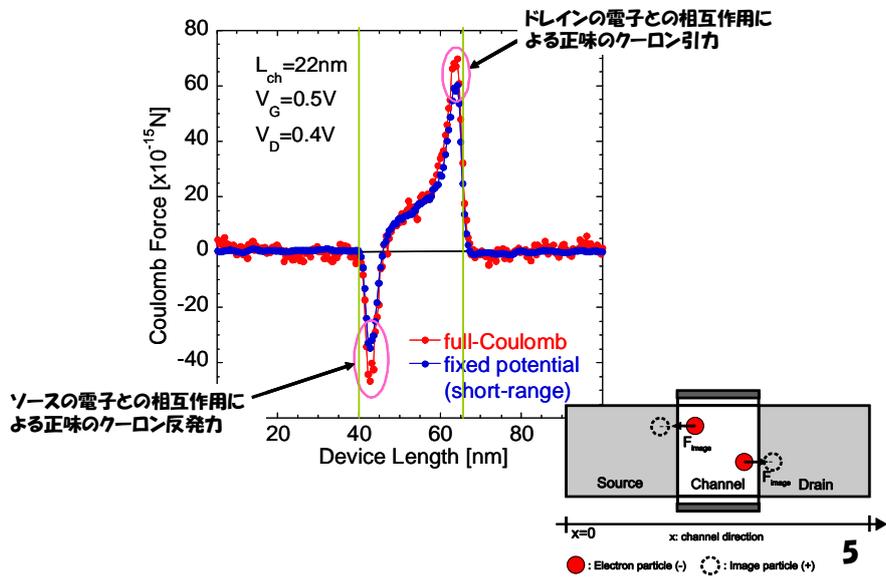
3

### クーロン相互作用によるポテンシャル揺らぎ



4

## クーロン相互作用による多体効果



## デバイス伝達特性のチャンネル長依存性

