SiナノワイヤFETのモンテカルロシミュレーションと多体効果

佐野 伸行，中西　洸平，唐澤　貴彦

筑波大学　電子物理工学専攻

NEDO「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造ナノ電子デバイス技術開発」（再委託）

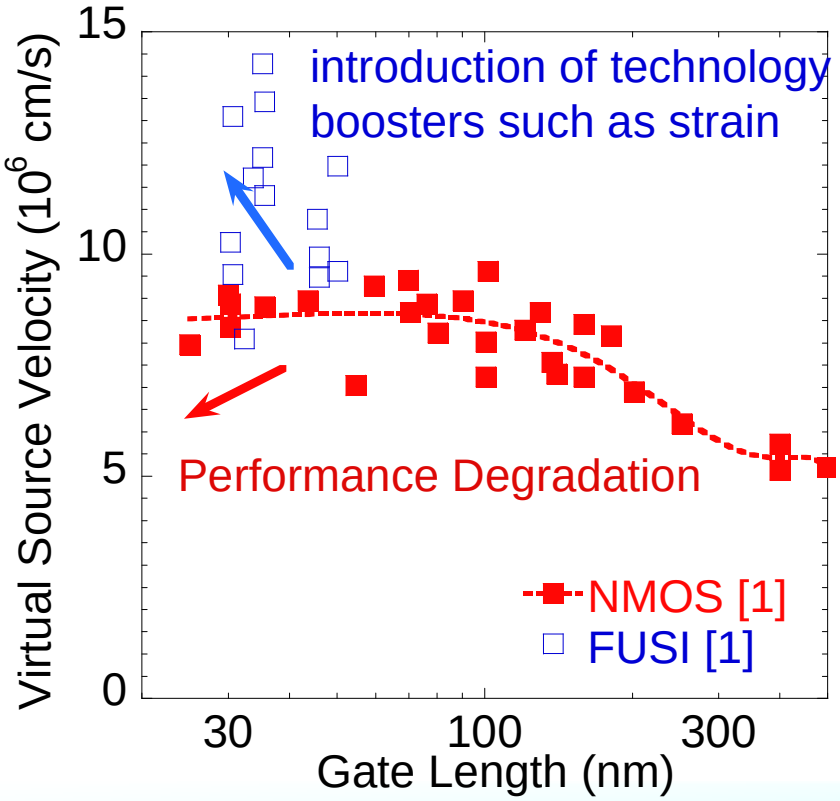
アウトライン

1. はじめに
2. 電子輸送と多体効果（クーロン相互作用）
3. ナノスケールデバイス（DGとGAA）の電子輸送
4. おわりに

2000年代までのストーリー

チャネル長 ＜ 数十 nm

チャネルの微細化
散乱数の減少
⇒ 準弾道輸送 ⇒ *デバイス特性向上*



バリスティック描像の破綻

界面ラフネス散乱

リモートクーロン散乱

不純物散乱 etc.

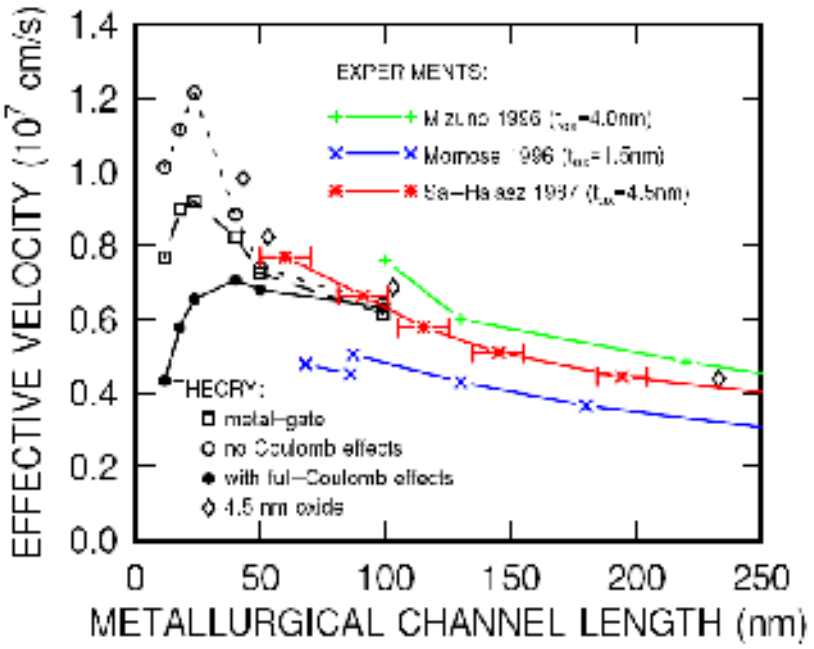
Khakifirooz and Antoniadis, ED 2008

Ballistic transport is a chimera …

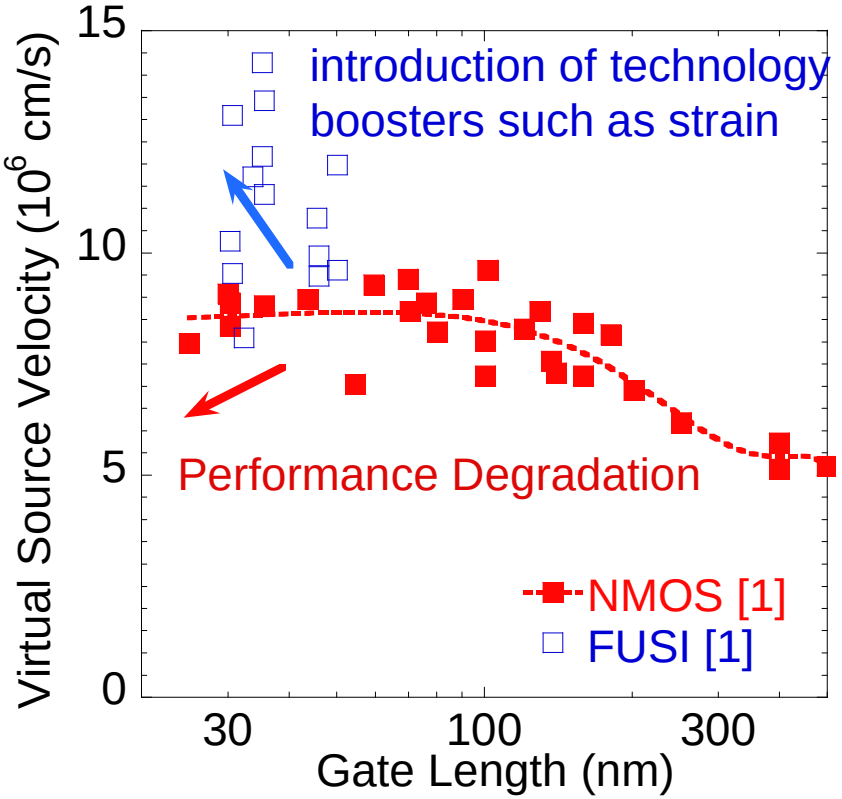
N. Sano, PRL 2004;

M. V. Fischetti, *et al*, J. Comp. Electron. 2009

一方、(動的な)長距離クーロン相互作用を考慮すれば、



M.V.Fischetti and S.E.Laux, *J.Appl.Phys.* 2001



アウトライン

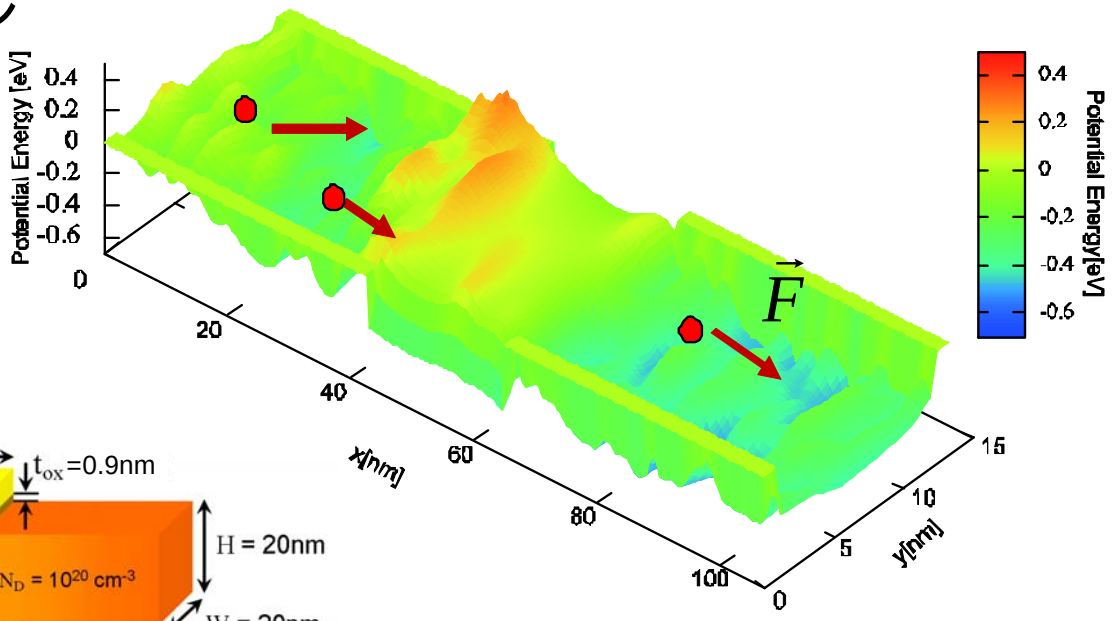
1. はじめに
2. 電子輸送と多体効果（クーロン相互作用）
3. ナノスケールデバイス（DGとGAA）の電子輸送
4. おわりに

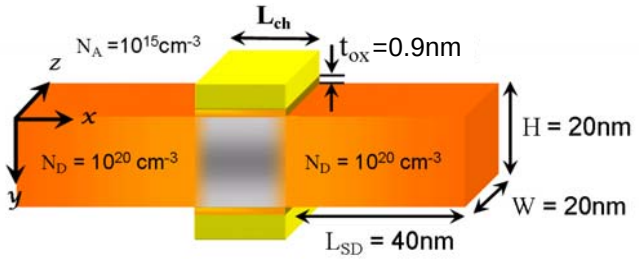
モンテカルロシミュレーション

クーロン相互作用を導入するためには、

- 分子動力学＋MCシミュレーション
- 自己無撞着MCシミュレーション

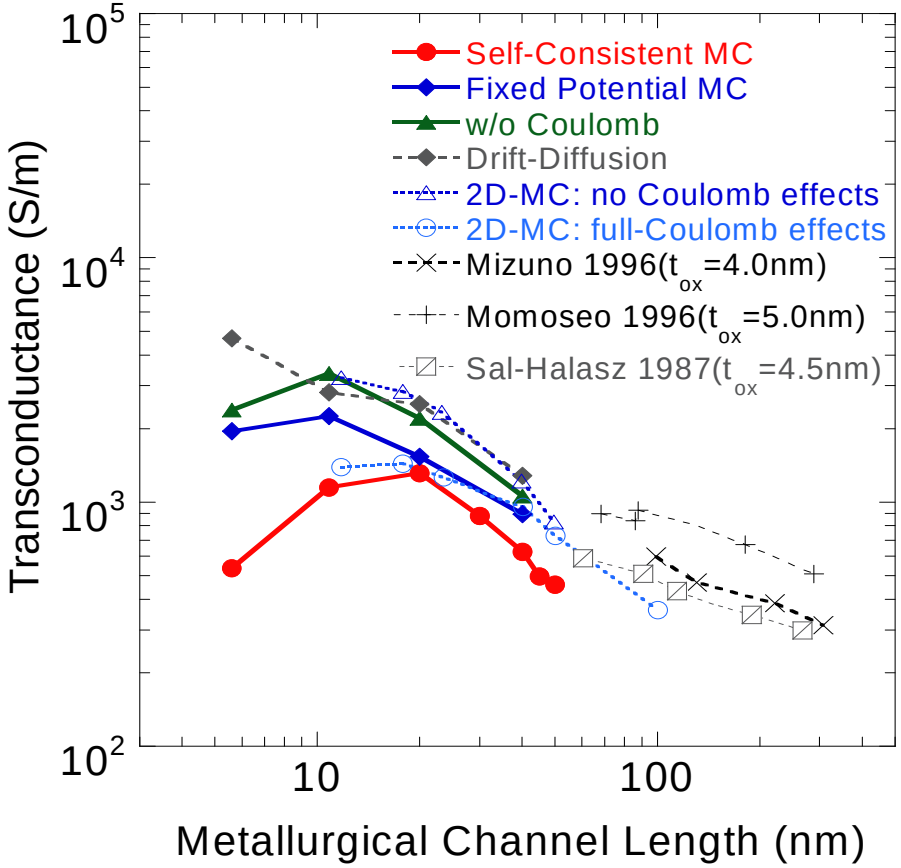
○ フォノン散乱
○ 不純物散乱
○ 短距離電子電子散乱
× 界面ラフネス散乱

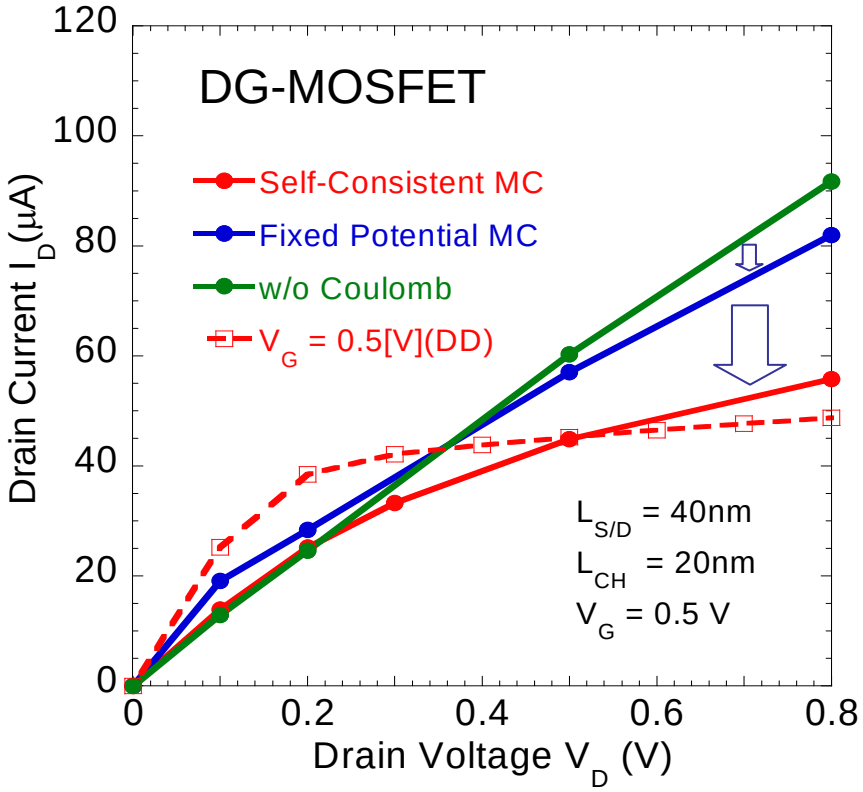




輸送機構と多体効果：クーロン相互作用

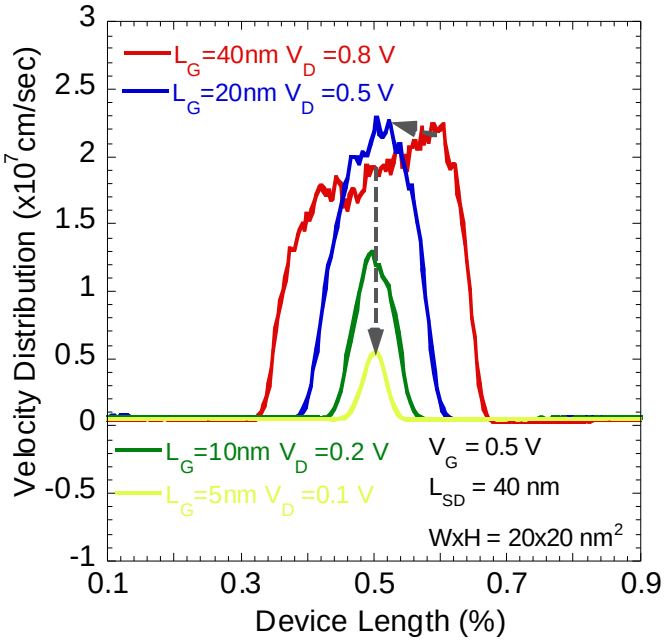
- *Self-consistent MC (w/ full Coulomb interaction)*
- *Fixed potential (w/out long-range part of Coulomb interaction)*
- *No Coulomb interaction (only phonon interaction)*



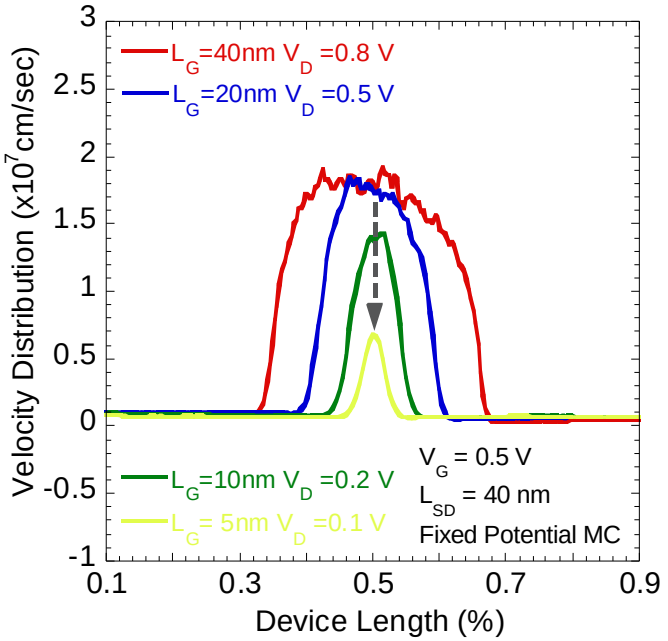


輸送機構と多体効果：クーロン相互作用

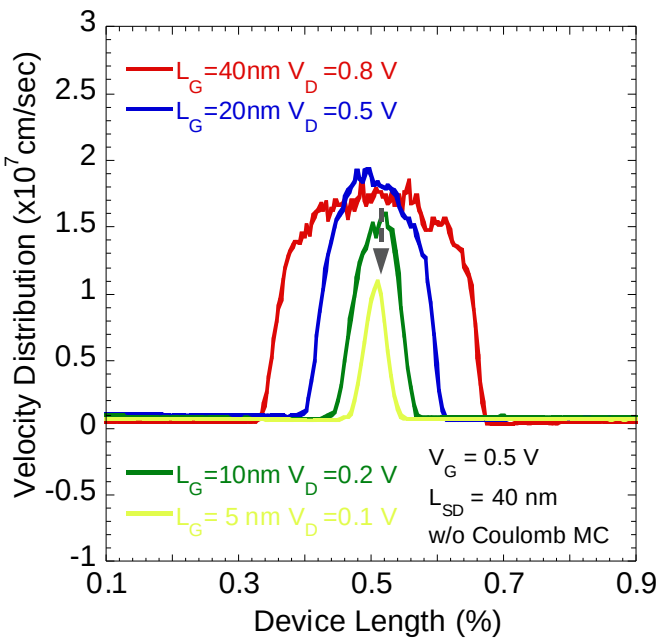
DG-MOSFET



Self-Consistent MC



Fixed Potential MC

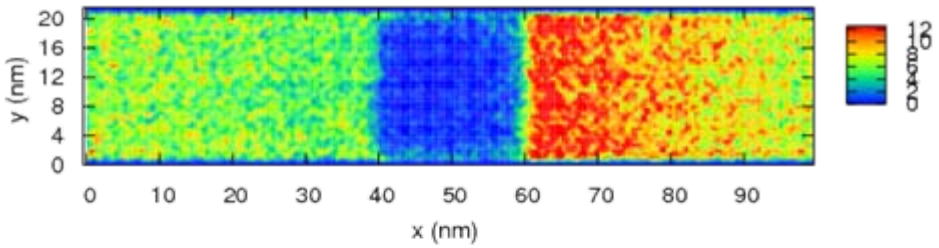


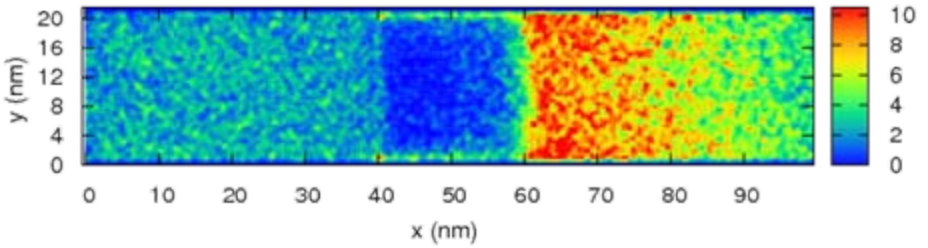
w/o Coulomb interaction

- *as the channel shrinks, the velocity begins to be degraded. → intrinsic effects*
- *momentum relaxation processes due to short-range Coulomb interaction in S/D*
- *velocity profiles are rather different between the self-consistent and fixed potentials.*

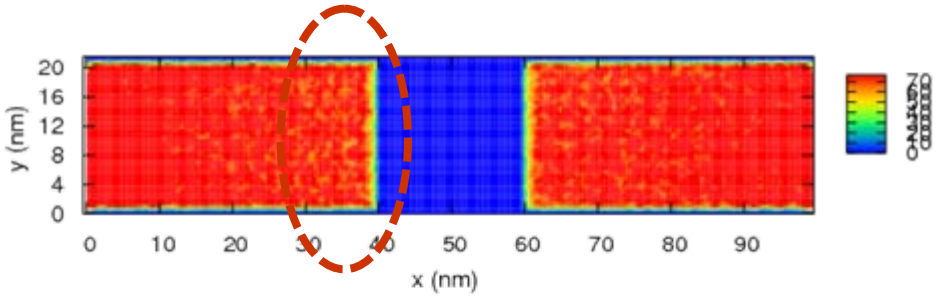
輸送機構と多体効果：クーロン相互作用

phonon scattering

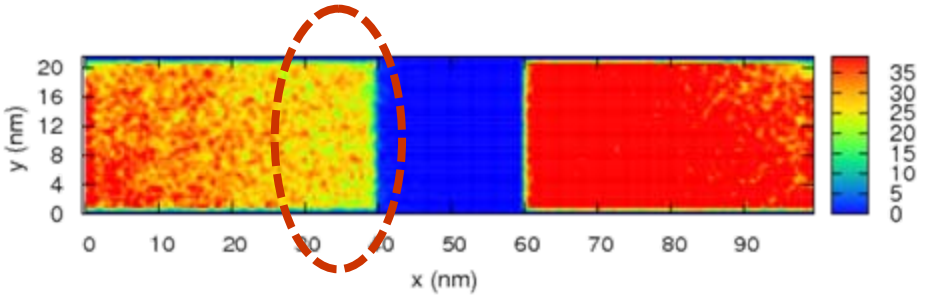




short-range Coulomb scattering (e-e and impurity)



self-consistent MC

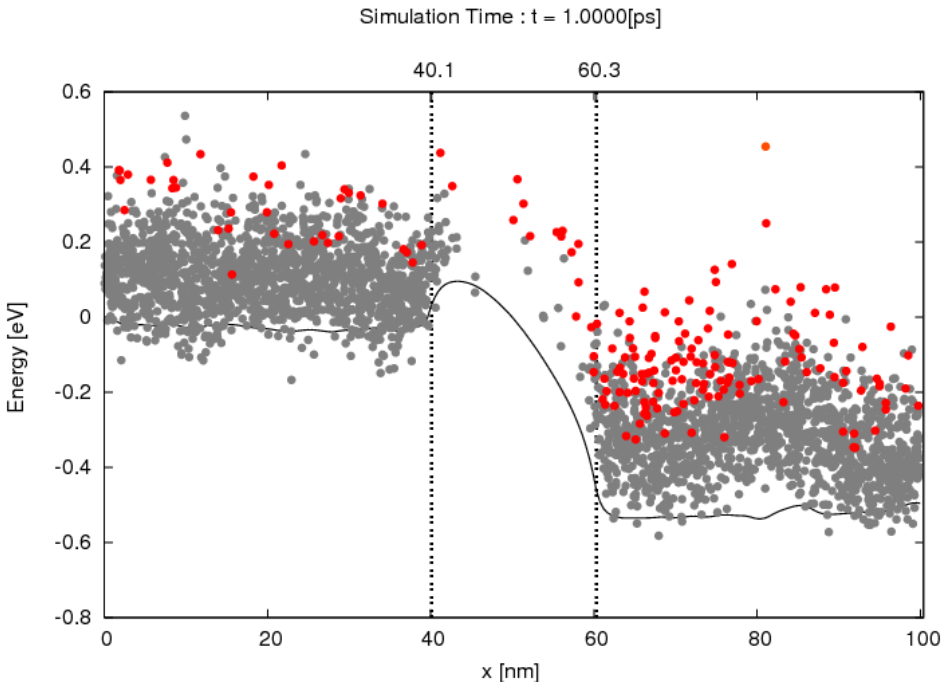


fixed potential MC

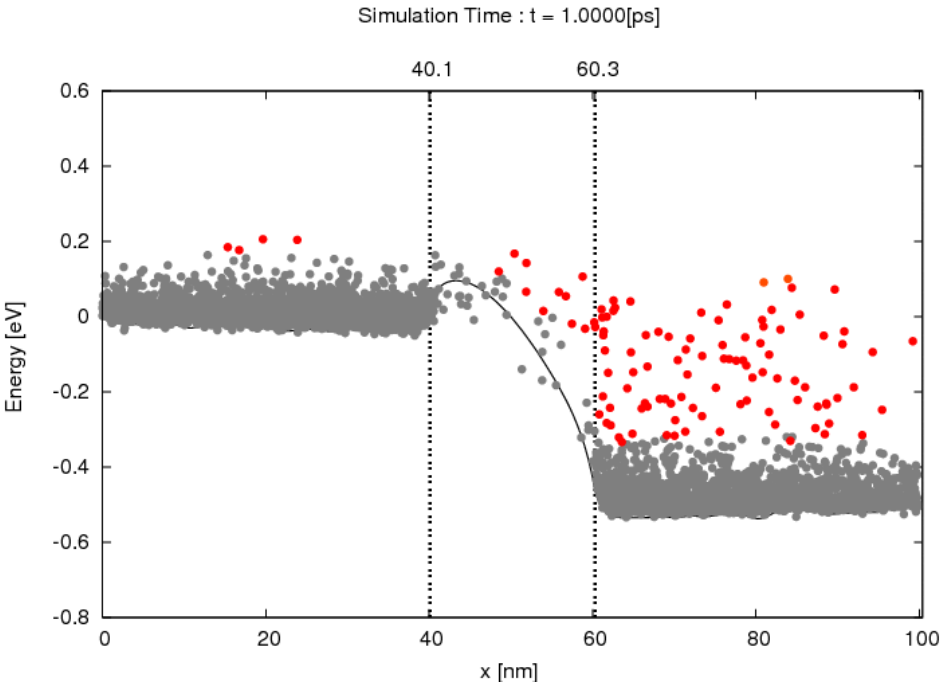
- *potential fluctuations induce phonon interaction in high-doped S/D regions.*
- *short-range Coulomb scattering is greatly reduced near the source/channel when potential is fixed. → momentum randomization becomes extremely weak, and streaming.*

輸送機構と多体効果：クーロン相互作用

DG-MOSFET



self-consistent MC



fixed potential MC

ナノスケールチャネルでも拡散的（準弾道輸送）

高ドープ領域でのエネルギー・運動量緩和

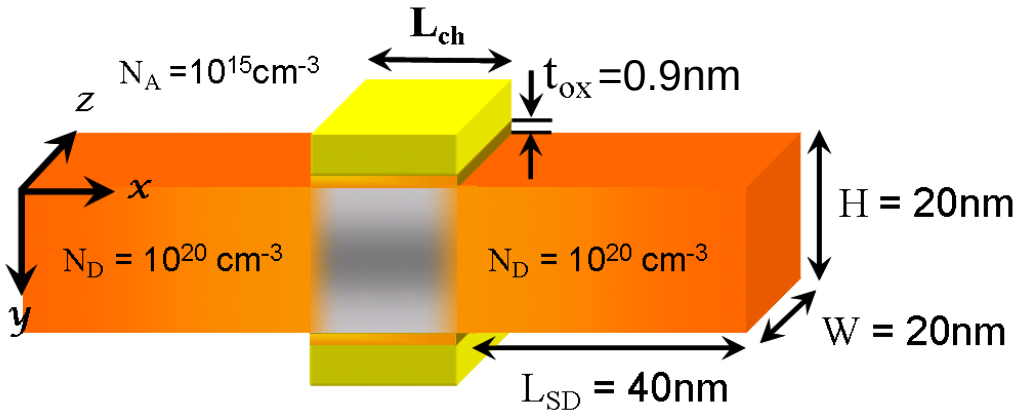
(no elastic back-scattering !) **Nakanishi, Uechi, Sano, IEDM 2009.**

アウトライン

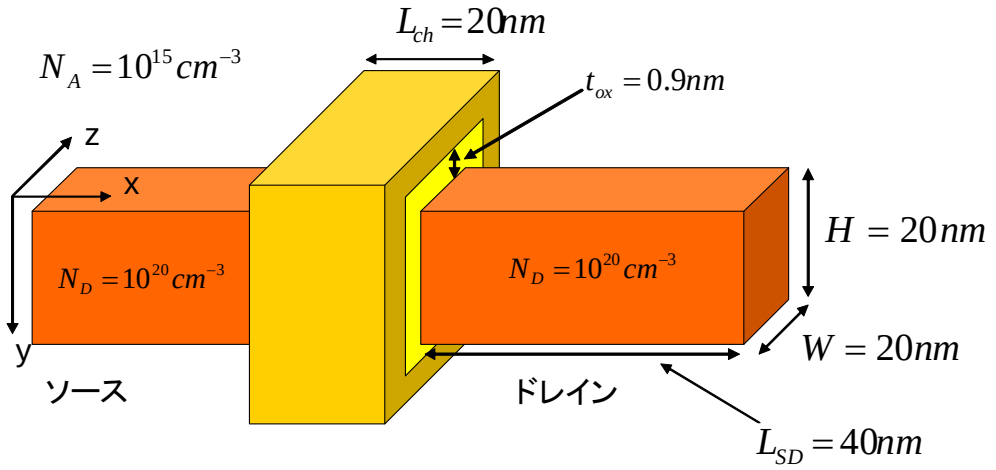
1. はじめに
2. 電子輸送と多体効果（クーロン相互作用）
3. ナノスケールデバイス（DGとGAA）の電子輸送
4. おわりに

デバイス構造

DG-MOSFET

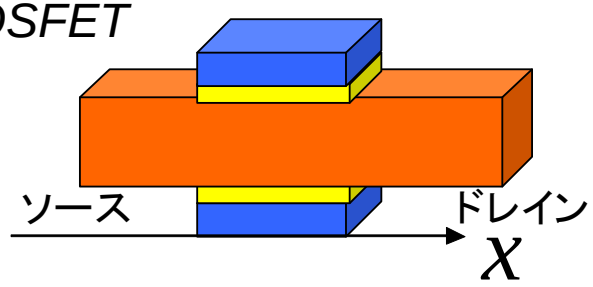


GAA-MOSFET

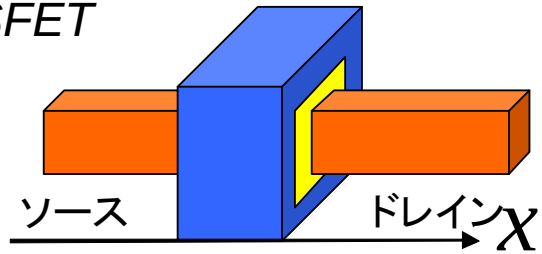


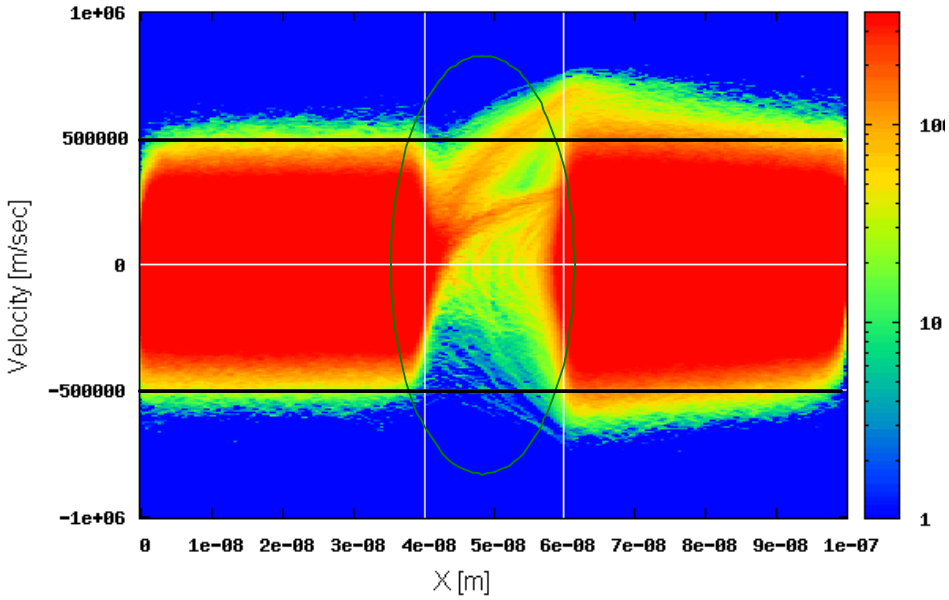
ナノスケールデバイスの電子輸送

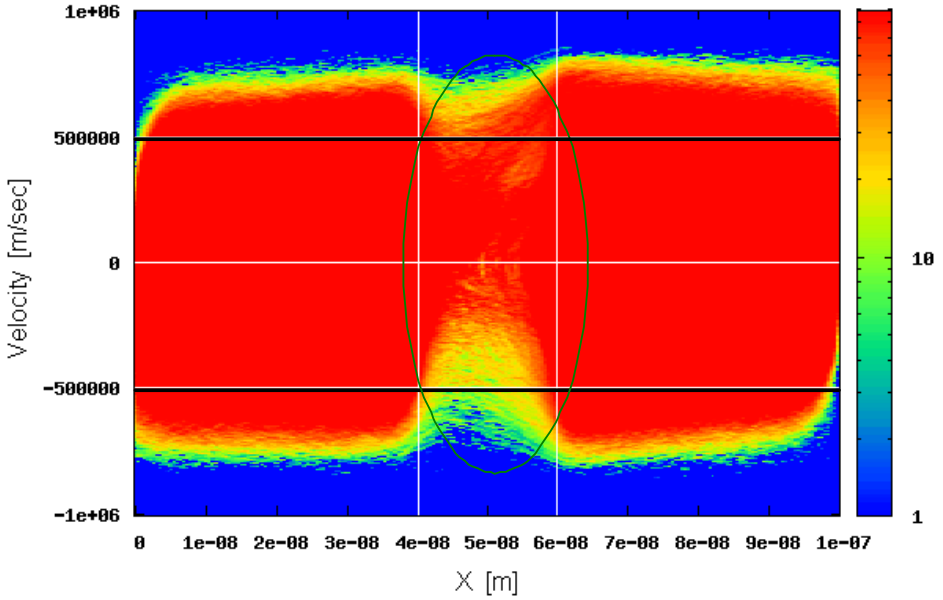
DG-MOSFET



GAA-MOSFET

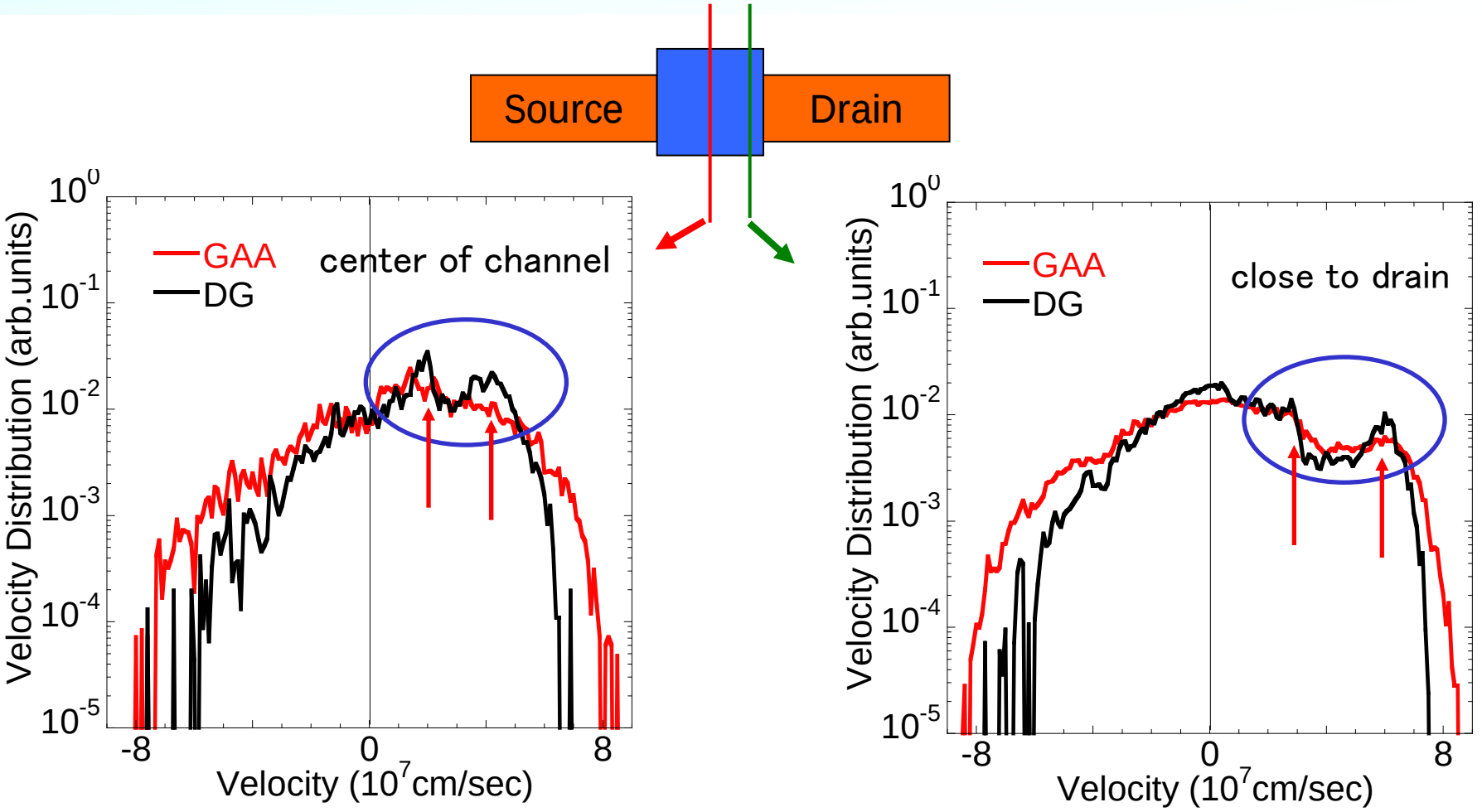






- *velocity distribution greatly spreads in the entire device regions.*
- *transport in the channel becomes more diffusive, contrary to the usual intuition.*

ナノスケールデバイスの電子輸送

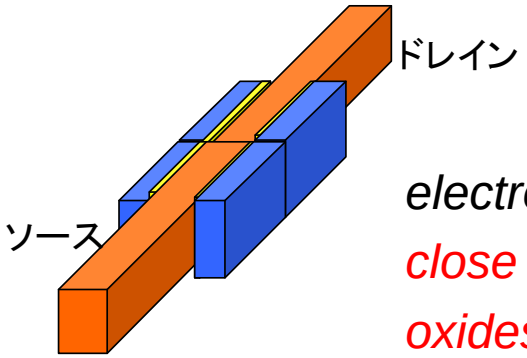


- *ballistic peaks are greatly suppressed in the channel and wide velocity distribution.*

→ *transport in the channel becomes more diffusive due to small* α_b. **N. Sano, PRL 2004.**

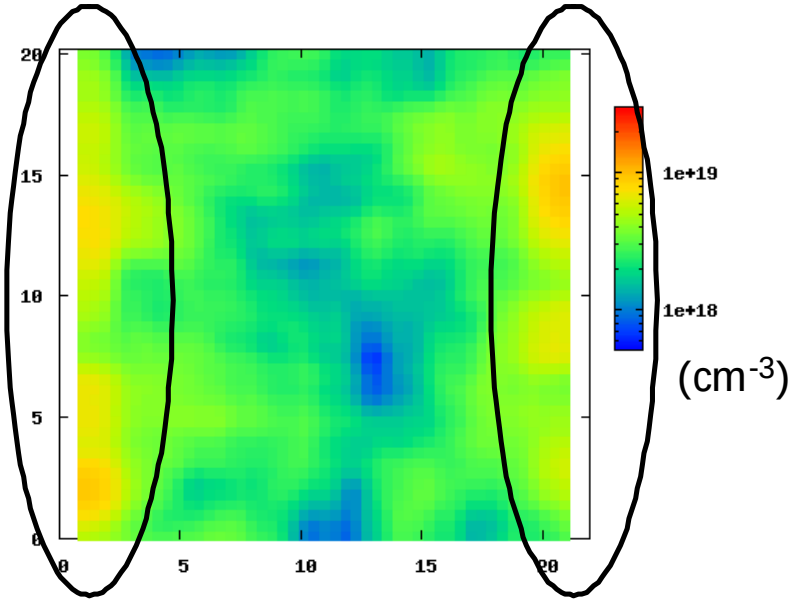
ナノスケールデバイスの電子輸送

DG-MOSFET

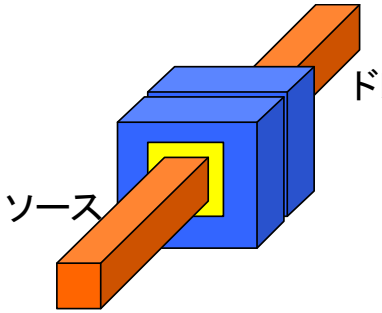


Time averaged electron density

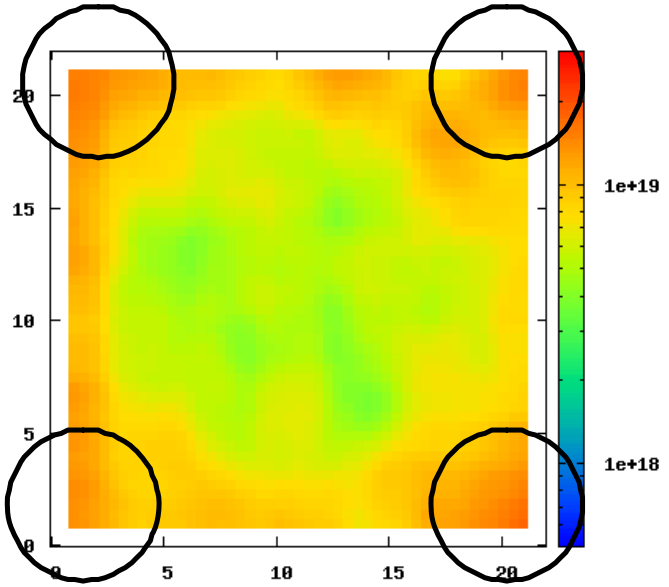
electrons reside close to the gate oxides.



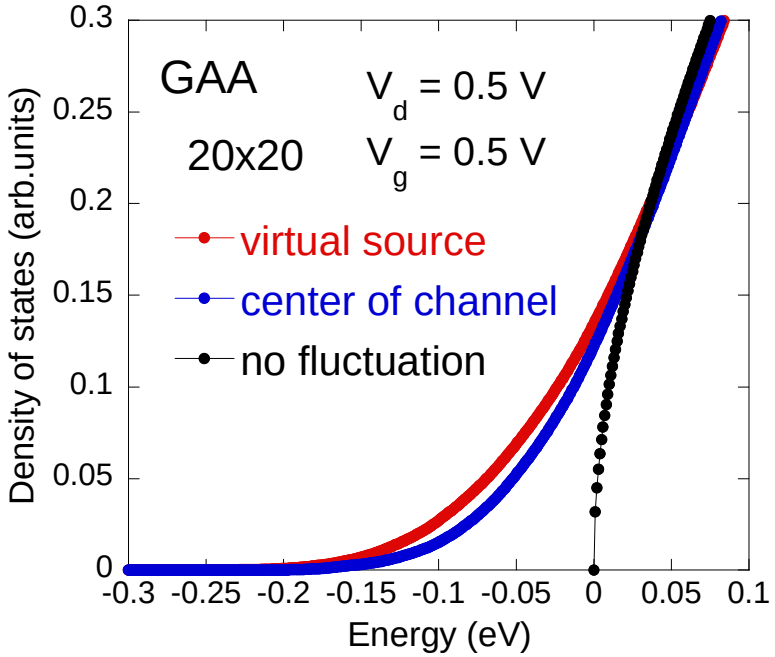
GAA-MOSFET



electrons reside close to the edges, yet spread over the wide regions.

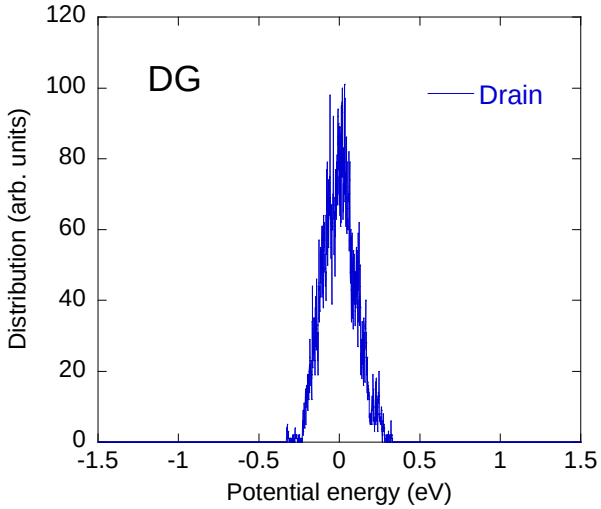


Band-tailing due to potential fluctuations



though somewhat exaggerated …

Gaussian probability distribution



- *Large band-tailing in the effective DOS*

  → *spreads the velocity distribution*

アウトライン

1. はじめに
2. 電子輸送と多体効果（クーロン相互作用）
3. ナノスケールデバイス（DGとGAA）の電子輸送
4. おわりに

おわりに

- デバイスサイズのナノスケール化に伴って、クーロン相互作用の影響が顕著化
  - チャネル電子のドリフト速度（相互コンダクタンス）の劣化
  - 散乱と物理機構、チャネルポテンシャルの変調
- DGおよびGAA　MOSFETでの電子輸送特性
  - ゲートによる制御　→　直感に反して、より拡散的？
  - 今後の超難題：　ナノデバイスでの量子閉じ込め？