

## クライオ CMOS の絶縁体-半導体界面における電子-格子相互作用と非平衡輸送

### Electron-phonon interactions and nonequilibrium transport at the semiconductor-insulator interface in cryo-CMOS

東大工, O内田建

Faculty of Engineering, The Univ. of Tokyo, OKen Uchida

E-mail: [uchidak@material.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:uchidak@material.t.u-tokyo.ac.jp)

量子コンピュータを実現するために、量子ビットの状態を高速に読み出し、また制御するためのエレクトロニクスとして、4K 近傍で動作するクライオ CMOS が注目されている。量子ビットを高速に読み出すために、ゲート長が 40nm 程度以下という極めて短い CMOS トランジスタの利用が見込まれている。一方で、トランジスタの移動度は低温で高くなるため、電子の平均自由行程も長くなり、準バリスティック伝導がトランジスタにおいて発現することとなる。6K で動作するゲート長 30nm のトランジスタでは、90%以上のキャリアはバリスティックに伝導されとの報告もある[1]。このような準バリスティック伝導のときに、トランジスタのノイズは何で決まるのだろうか？室温では、熱雑音がトランジスタの主要なノイズ源の一つであるため、低温になるに従い熱雑音の低減による低ノイズ化が期待される。しかし、クライオ CMOS では、4K で熱ノイズモデルから想定されるほどにはノイズが低減せず、短チャネル素子では、そもそも室温でもショットノイズがノイズの主たる起原であるとの報告もなされている[2]。実際には、ノイズ測定と同時にチャネル内の電子温度や格子温度をはじめとした他のパラメータの計測などが行われている訳では無く、クライオ CMOS におけるノイズの物理起原を明らかにする試みはまだまだ必要であると考えられる。

本報告は、このようなノイズに関する問題意識に基づき、クライオ CMOS における非平衡輸送について改めて考えてみたい。低温においても、電界からエネルギーを得た電子はフォノンを励起することでそのエネルギーの一部を格子系に引き渡し、定常状態に落ち着く。この時、電子系の温度  $T_e$  と格子系の温度  $T_l$  は解離する。電子-格子相互作用が強ければ温度の解離は小さく、電子-フォノン相互作用が弱ければ温度の解離は小さい。このことを利用して、電子-フォノン相互作用の強さを表すパラメータである変形ポテンシャルを評価したところ、絶縁体-半導体界面にキャリアが誘起される MOS トランジスタでは、バルクの場合よりも有意に高いことが確認された[3]。このことは、絶縁体-半導体界面で電子-格子相互作用が強いことを示唆する。シリコン酸化膜で覆われた Si ナノワイヤーの原子振動を分子動力学法で調べたところ、Si-SiO<sub>2</sub> 界面での Si 原子の振動振幅が、Si 中での振動振幅よりも大きいことが確認され、定性的には変形ポテンシャルが大きくなることと矛盾しない。

今後、ナノシートトランジスタが量産化され、さらなる微細化が追求される時代では、絶縁体-半導体界面における電子-格子相互作用の理解が益々重要になると考えられる。これは、室温で動作する通常の LSI 向けの素子だけでなく、低温で動作するクライオ CMOS においては、ノイズ起原の理解のためにも、やはりナノスケール構造における電子-格子相互作用の理解は不可欠なものであると考えられる。

謝辞: 本研究は科研費 18H0543, 19H00756 及び JST-CREST JPMJ19I2 の助成を受けた。

[1] W. Chakraborty *et al.*, *IEDM*, 39.4.1, 2019.

[2] 例えば, X. Chen *et al.*, *ISCAS*, 2021.

[3] T. Ohashi *et al.*, *IEEE J. Elec. Dev. Soc.*, **4**, 278 (2016).