

マクスウェルの悪魔による電力の生成

Power generation with Maxwell's demon

NTT 物性科学基礎研究所 ○知田 健作、西口 克彦、藤原 聡

NTT Basic Research Laboratories ○Kensaku Chida, Katsuhiko Nishiguchi, and Akira Fujiwara

E-mail: chida.kensaku@lab.ntt.co.jp

【はじめに】マクスウェルの悪魔は一粒子レベルで観測とフィードバック制御を行い、情報をエネルギーに変換する[1]。これまでに水中のビーズ粒子や超伝導電子箱中の単電子[2]などを用いてその実証実験がなされている。しかし、悪魔によって生成されたエネルギーを系の外で利用する際に重要な物理量である“電力”の評価は未だなされていない。本研究では電力を評価する目的で、ソース(S)-ドレイン(D)に繋がっているシリコンナノトランジスタを用い、単電子検出に基づくフィードバック制御[3]を行った。その結果、単電子熱ゆらぎ[4]に関する情報を電力に変換し、その変換効率を求めることに成功したので報告する。【実験手法】デバイスは SOI(Silicon on insulator)基板上に形成された単電子箱(SEB)と検出器(det)によって構成され、SEB と det は静電的に結合している(Fig. 1)。det を流れる電流 I_{det} は SEB 内電子数 n を反映して増減する。また、トランジスタ G1、G2 に印加される電圧 V_{G1} 、 V_{G2} は S-SEB 間、SEB-D 間に形成されるエネルギー障壁の高さ、及び電子遷移レートを独立に制御する。SEB の帯電エネルギー $E_c (= e^2/2C)$ は 4 meV で、室温の熱エネルギー $k_B T = 26$ meV よりも小さい。従って、電子は S-SEB-D 間を熱によってランダムに行き来し、 n はゆらぐ。S-D 間に電位差 $V_{SD} = V_S - V_D$ を印加し、 I_{det} の測定結果から n を求め、 n をもとに次のフィードバック制御を行った。まず G1 の形成するエネルギー障壁を低く、G2 の障壁を高くした [状態 A (Fig. 2)]。状態 A における S-SEB 間の電子移動を測定間隔 $\Delta t_m = 60$ ms 毎に観測し、状態 A で最初に観測された値よりも n が増加した時に、G1 の形成するエネルギー障壁を高く、G2 の障壁を低くした [状態 B (Fig. 2)]。状態 B では SEB-D 間の電子移動を Δt_m 毎に観測し、状態 B で最初に観測された値よりも n が減少した時に、状態を A に戻した。Fig. 2 に示す例では、フィードバック制御 2 回を含む状態 A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ A の一連のサイクルを通し電子一つが S から D に運ばれる。この操作を繰り返すと、電子に仕事をする事無く、熱ゆらぎに関する情報を利用し、電子を V_{SD} だけ高い電位へ移動させ、電力を生成することができる。【結果】Fig. 3(a)に様々な V_{SD} のもとで求めた S-D 間電流 I_{SD} を示す。 V_{SD} が負の領域においても、フィードバック制御によって、S から D の向き（電位差に逆行する向き）に、情報を起源とする zA オーダーの I_{SD} が流れていることに注目されたい。電位差に逆行する電流から悪魔によって生成された電力 $-I_{SD} \times V_{SD}$ を求めた。また、測定で得られた情報量（相互情報量）との比から情報-電力変換効率を求めた。本研究では、 $V_{SD} \sim -26$ mV のもとで $I_{SD} \sim 20$ zA の生成[Fig. 3(a)]、電力約 0.5 zW の生成 [Fig. 3(b)]、及び、変換効率約 18% [Fig. 3(c)]を実現した。これらの値はモンテカルロシミュレーションにより再現され、実験で得られた電力がマクスウェルの悪魔による情報-電力変換を起源としていることを支持する。【参考文献】[1] 例えば、J. M. Parrondo *et. al.*, *Nat. Phys.* **11**, 131 (2015). [2] J. V. Koski *et. al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 13786 (2014). [3] K. Chida *et. al.*, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 073110 (2015). [4] K. Nishiguchi *et. al.*, *Nanotechnology* **25**, 275201 (2014).

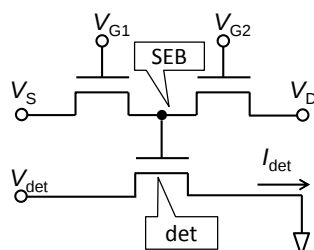


Fig. 1 Equivalent circuit of the device.

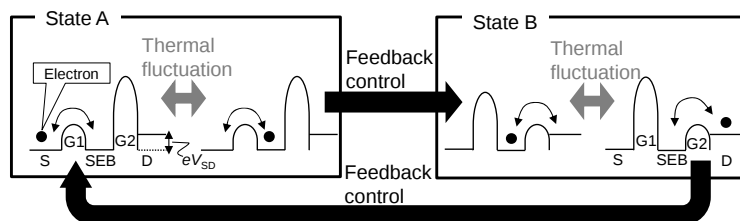


Fig. 2 Schematic of feedback control. One cycle of the feedback control transfers an electron from the S to D against applied voltage V_{SD} .

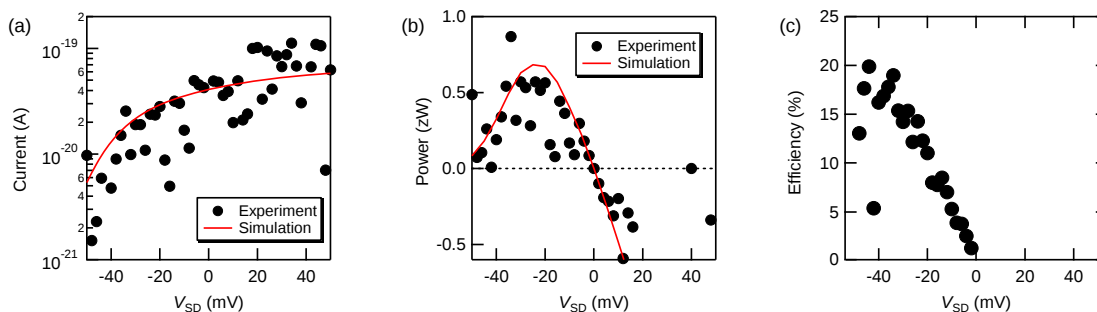


Fig. 3 Experimentally evaluated (a) I_{SD} , (b) power, and (c) efficiency as a function of V_{SD} .