

静電結合したシリコンナノドット間を流れる熱流ゆらぎの観測

Observation of fluctuating heat current across capacitively-coupled silicon nanometer-scale dots

NTT 物性科学基礎研究所 ◦知田 健作, アントワン・アンドリュウ, 西口 克彦

NTT Basic Research Laboratories

◦Kensaku Chida, Antoine Andrieux, Katsuhiko Nishiguchi

E-mail: kensaku.chida@ntt.com

【概要】 ナノデバイス中の熱流（エネルギーの流れ）はゆらいでおり、その大きさはデバイスの動作効率と密接に関わっている。しかし、ナノデバイスの熱流を外乱なく正確に測定することは極めて困難である。本講演では、単電子ダイナミクス計測によりナノドット間を流れる熱流のゆらぎを観測したので、その手法について報告する。

【理論】 静電結合したナノデバイス中で一連の電子遷移が特定の順番で起こると、静電結合に誘起された熱流が発生する[1]。例えば、Fig. 1 に 1 から 4 で示す電子遷移によりドット内電子数(N_1, N_2)が $(0, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (1, 1) \rightarrow (1, 0) \rightarrow (0, 0)$ と変化すると、Dot1 から Dot2 へ向かい $Q = E_{Cm}$ の熱が流れる。ここで、 N_1 (N_2) は Dot1 (Dot2)内電子数、 E_{Cm} はドット間の静電結合強度である。Fig. 1 中の(2) [(3)] は 2 番目 (3 番目) の電子遷移によって Dot1 (Dot2) の電子数が増えた (減った) ことで静電結合により Dot2 (Dot1) のエネルギーがその強度 E_{Cm} だけ増大 (減少) することを表す。電荷はドット間容量 C_m を貫通して移動しないのに対し、エネルギーは Dot1 (Dot2) への電子遷移によって C_m を貫通して Dot2 (Dot1) まで伝わる。そのため、この熱流は電流とは空間的に分離された場所を流れる。

Fig. 2 に電子遷移によって N_1 - N_2 状態空間上に描かれる軌跡の例を示す。Fig. 1 に示される一連の電子遷移は N_1 - N_2 状態空間上では反時計回りの面積 $S = 1$ のループに対応する (Fig. 2 左上)。 E_{Cm} は Q と S を繋ぐ変換係数の役割を担っており、このループが運ぶ Q の絶対値は $|Q| = SE_{Cm}$ である。また、時計回りのループは熱を逆方向 ($Q < 0$) に移動させる (Fig. 2 右上)。この様に、単電子ダイナミクス計測を行って N_1 - N_2 状態空間上に描かれるループの面積と回転方向を求めることで、静電結合に誘起される熱流を計数し、そのゆらぎを計測することができる。

【実験】 実験で用いた素子は Silicon on insulator 基板上に作製された静電結合した二つのナノドット、検出器、ゲート電極、電子溜から構成され (Fig. 3)、検出器電流 I_D は単電子熱運動による N_1 と N_2 の変化に応じて離散的な値を示す (Inset of fig. 3)。 I_D をモニタし N_1 と N_2 をそれぞれ求めることで、単電子熱運動により N_1 - N_2 状態空間上に描かれる軌跡が求められる。また、 E_{Cm} の大きさは軌跡から得られる N_1 と N_2 の相関の大きさから導出した [2]。全ての実験は室温 (300 K) で行った。

当日の講演では、平衡状態にある静電結合したシリコンナノドットを出入りする単電子ダイナミクスから、平均ゼロの熱流がゆらいでいる様子を観測した実験結果について報告する。

【謝辞】 本研究について議論頂きました北大葛西誠也教授と筑波大都倉康弘教授、NTT 林稔晶博士、清水貴勢博士、藤原聡博士に感謝いたします。**【参考文献】** [1] R. Sanchez, and M. Buttiker, *EPL* **100**, 47008 (2012). [2] 知田健作 他 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-D63-7 (2024).

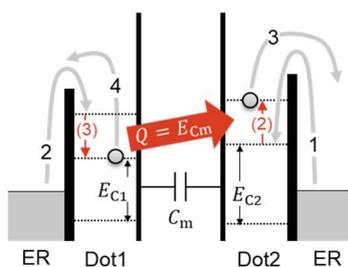


Fig. 1 Schematic illustration of heat current. Through the set of electron transition, heat $Q = E_{Cm}$ transfers from dot1 to dot2. No charge flows through the dots.

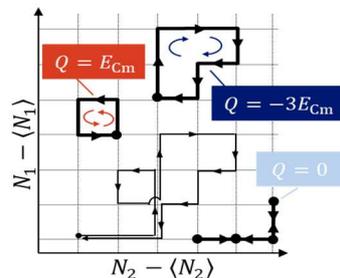


Fig. 2 Schematic illustration of a trajectory on the N_1 - N_2 state space. The area and rotation direction of a loop correspond to the amount and the direction of Q , respectively.

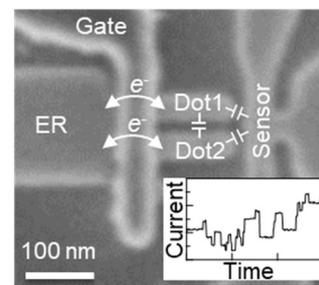


Fig. 3 Scanning electron microscope image of our device. Electrons thermally hop between the dots and ER. (Inset) Sensor current as a function of time.