熱ノイズの単一電子分解能分析

Analysis about thermal noise with single-electron resolution

NTT 物性研¹, 富山大² ^O西口克彦¹, 小野行徳², 藤原聡¹

NTT Basic Research Labs.¹, Univ. of Toyama.² Katsuhiko Nishiguchi¹, Yukinori Ono², Akira Fujiwara¹ E-mail: nishiguchi.katsuhiko@lab.ntt.co.jp

[背景] トランジスタの微細化に伴い、電気的特性に及ぼすノイズの影響が大きくなっている。ノイズは、外因的なものを除くと、1/f ノイズ、ショット・ノイズ、熱ノイズが電子素子の本質的なノイズとして存在する。特にトランジスタの微細化により、1/f ノイズの源とされるランダム・テレグラフ・ノイズ(単一の電子がゲート酸化膜にトラップされることで発生するノイズ)が顕在化し、メモリ回路への影響が問題となっている。ショット・ノイズ(電子の粒子性に起因するノイズ)も、トランジスタの微



Fig. 1:An SEM image of an FET for single-electron detection.

細化により少数電子の回路動作への影響が懸念されている。このように、ノイズは単一電子レベルでの影響が大きくなっており、それを評価することが重要となっている。今回、微小な DRAM を用い、熱ノイズを単一電子レベルで評価した。

[動作原理と結果] 熱ノイズとして、DRAM を構成するキャパシタの電圧ノイズを評価する。単一電子分解能で評価するため、電圧信号を増幅するトランジスタをキャパシタに接続したゲイン・セル構造を用いる(Fig. 1)。キャパシタには平均 100 個程度の電子が蓄積されるが、熱エネルギーk_BT/2 によって電子がキャパシタを出入りする。この電子数が揺らぐ様子をリアルタイムで評価すると[Fig. 2(a)]、電子数揺らぎ Nのヒストグラムはガウス分布となり[Fig. 2(b)]、その分散 σ^2 が k_BT/2E_Cで表せること分かった(E_C= $e^2/2C$ はキャパシタの帯電エネルギー、C はキャパシタ容量)。これは、広く知られている k_BT/C ノイズが成立することを意味する。また Fig. 2(a)に示す電子数揺らぎ特性をパワー・スペクトラム密度 (PSD) に変換すると、ローレンツ特性となることを確認した。この強度は4k_BTR、カットオフ周波数が 1/2 π RC (R は DRAM を構成するトランジスタのチャネル抵抗)となることから、一般的な熱ノイズのモデルで表すことができる。このように、熱ノイズが単一電子のレベルとなった場合でも、多数電子で構成される回路と同じ熱ノイズのモデルが適用出来ることが分かった。これはエネルギー等分配則が成立していることを意味している。



Fig. 2: (a) Real-time monitoring of thermal noise with single-electron resolution. (b) Histogram of N, where N is defined as the deviation of the number of electrons in the SC from the integer part of the averaged value. (c) Power spectrum density (PSD) of voltage noise at the capacitor. Voltage applied to the gate of the transistor in the DRAM is changed.