

DRAM セルのエネルギー効率限界：セル容量依存性

Energy Efficiency Limits of DRAM Cells: Dependence on Cell Capacitance

NTT 物性基礎研 ○清水 貴勢, 知田 健作, 山端 元音, 西口 克彦

NTT Basic Research Labs., ○Takase Shimizu, Kensaku Chida, Gento Yamahata, Katsuhiko

Nishiguchi

E-mail: takase.shimizu@ntt.com

Dynamic Random Access Memory (DRAM) は、現在の情報処理システムにおいて最も一般的なメモリであり、そのエネルギー高効率化は重要な課題である。DRAM において 1bit の情報を担う DRAM セル(Fig. 1a)自体の消費エネルギーは、周辺回路と比べれば小さいと考えられているものの、今後の最適化を踏まえて到達し得る DRAM セルの原理的限界を評価することは、MRAM や ReRAM など他のメモリ技術との比較においても意義深い。

我々はこれまで、単一の DRAM セルが到達し得るエネルギー効率の限界について、理論的および実験的に検討してきた[1]。今後、DRAM のセル容量が更に小さくなると予想される中、セル容量がエネルギー効率に与える影響については十分に検討されていない。本発表では、効率とセル容量の関係を明らかにする計算結果を報告する。

本研究では、論理状態「0」「1」が同じ確率で偏りなく書き込まれた DRAM セルを「1」へ書き換える場合(Fig. 1b)を想定してエネルギー効率 $\eta = -k_B T \Delta S / Q$ を求めた。ここで ΔS は書き換えに伴うシャノンエントロピー変化、 Q は発熱(エネルギー消費)、 k_B はボルツマン定数、 T は温度である。なお、 ΔS は書き換えエラー率 ϵ に対する増加関数であり、エラーの熱力学的指標と解釈できる。

さらに、 $\eta = 1$ はランダウア限界と呼ばれ、熱力学第二法則に基づく理想的な最高効率であり、準静的操作で達成可能である。本研究では、理想的な状況として熱ノイズのみが存在し、漏れ電流は無視でき、書き換え操作には無限の時間をかけられる我々独自の DRAM[2]を想定した。その上で、書き換えに伴う放電および充電の各過程における発熱やエントロピー変化を、カノニカル分布等から計算している。

Fig. 1c に、様々な ϵ に対するエネルギー効率 η の、チャージングエネルギー $E_c = e^2/2C$ (C : セル容量) 依存性を示す ($T = 300$ K)。丸印は $E_c = 8.1$ meV の DRAM セルに関する測定結果であり、計算結果との高い一致は本モデルの妥当性を裏付ける。グラフから、 η は E_c に対して単調増加し、エラー ϵ が小さいほど全体的に効率が低下する傾向がみられる。興味深いことに、 E_c が $k_B T$ より十分大きくなると、効率は1に漸近する。これは、系が実質的に二準位系になることでランダウア限界に到達する条件である準静的な書き換え操作が可能となるためと考えられる。本発見は、DRAM セルにおける単電子効果とエネルギー効率の関係を示すものであり、DRAM のエネルギー高効率化に向けた新たな方向性を示唆するものである。

[1] 2024 年 第 85 回 応用物理学会 秋季学術講演会 19a-D63-9. [2] K. Nishiguchi et al., Nanotechnol. 25, 275201 (2014).

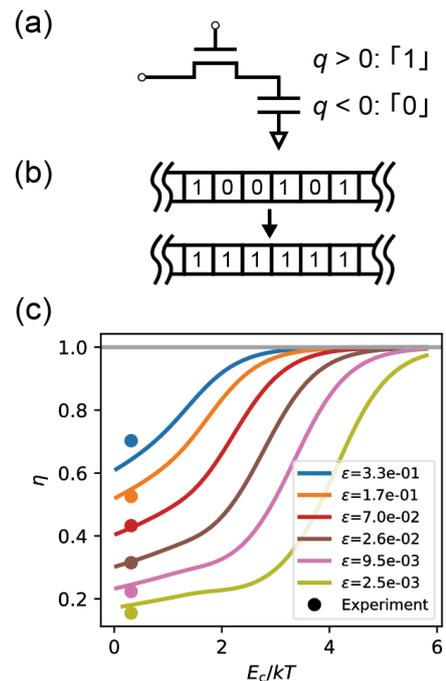


Fig. 1: (a) Circuit diagram of a DRAM cell. (b) Rewrite operation process. (c) Calculated efficiency η as a function of E_c/kT at various error rates ϵ . Markers are experimental data for $E_c = 8.1$ meV.