

令和元年6月26日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16028

研究課題名（和文）最悪時評価で理論的限界に肉薄する符号化による多値セル不揮発性メモリの書き込み削減

研究課題名（英文）Write Reduction for Multi-level Cell Non-volatile Memory by Coding Optimally in the Worst Case

研究代表者

多和田 雅師（TAWADA, Masashi）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：80754887

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：不揮発性メモリは不揮発性のメリットがあるが書き込み耐性が低く書き込みエネルギーが大きいデメリットがある。不揮発性メモリには読み出しと書き込みに非対称性があり、読み出し回数を増やして書き込み量を削減できる。多値セルで書き込み削減する場合、書き込み量はビット単位ではなくセル単位で削減する必要がある。複数のセルをまとめて符号語とすることで1つの情報を不揮発性メモリに保存するときにわずかなセルの書き込み量で複数ビットを保存する書き込み削減手法を研究した。セル単位でワーストケースにおいても書き込み量を一定値以下に制限できる書き込み削減符号の構築を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果として書き込み量の理論的な限界を達成しワーストケースにおけるセルレベル書き込み削減が体系化されたことには大きな学術的意義がある。セルレベル書き込み削減はアプリケーションレベル書き込み削減と書き込み量を削減する効果が重複すると考えられ、メモリに保存するデータを符号化することで書き込み量を削減し不揮発性メモリの長寿命化と低消費電力化を達成できる。更にこの技術はメモリセルに対する書き込み削減だけでなく、バスエンコーディングにも同様の効果を期待できるなど応用の幅が広く社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Non-volatile memory has the merit of non-volatility, but has low write resistance and large write energy. Non-volatile memory has asymmetry between read operation and write operation, and can increase the number of read accesses and reduce the write amount. When write reduction in cells, it is necessary to reduce the write amount not in bit units but in cell units. When storing a data as a small number of cells in nonvolatile memory by combining multiple cells into a code word we proposed a write reduction method that preserves multiple bits by the amount of write. We achieved the construction of a write reduction code that can limit the amount of cell-write to a fixed value or less even in the worst case.

研究分野：工学

キーワード：書き込み削減符号 不揮発性メモリ 多値メモリ 多値セル セルレベル書き込み削減

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在計算機の主流はノイマン型と呼ばれるメモリを使用するタイプである。近年そのメモリに不揮発性メモリの実用化が検討されている。不揮発性メモリが実用化されればリーク電力がほとんどかからないため省電力化が期待できる。一方で不揮発性メモリは書き込みエネルギーが大きくかかる、書き込み耐久性が低い(書き込み可能な回数が少ない)という問題がある。一般にこれらの問題は不揮発性メモリに対する書き込み削減や書き込み領域を平均化することで解決が試みられる。アプリケーションレベルでの書き込み削減は統計的性質に強く依存するため、平均時は良くても、最悪時において書き込み削減の性能が著しく落ちる。一方、ビットレベルでの冗長符号化では、情報量は等価なまま本質的に書き込み削減できる。特にメモリをビット列とみなし符号化し最大反転ビット数を制限することで、最悪時に書き込み削減性能の保証を与えることができる。符号化によるビットレベルの書き込み削減手法とアプリケーションレベルで書き込み削減・平均化手法は効果が重複するため両方を実装することで最悪時と平均時で大きな効果が得られる。しかし近年の不揮発性メモリはマルチレベルセル(多値セル)が標準となりつつある。アプリケーションレベルで書き込みの削減と平均化はマルチレベルセル不揮発性メモリでも適用できるが、ビットレベル書き込み削減では十分な効果が得られない。効果的にセルレベルで書き込み削減する技術が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究ではセルレベル書き込み削減を可能とする符号生成技術を研究する。マルチレベルセル不揮発性メモリでは1個のセルで2ビットや3ビットの値が保持される。ビットレベルで書き込み削減をした場合にはセルが表す2ビット(3ビット)のうち全ビットが反転するところを1ビット反転のみに抑えることができるが、1つのセルに書き込みが発生するということは変わらない。書き込み量をセル単位で見たときには余分なビットレベル書き込み削減が存在し書き込み削減に必要なセル数が増加する問題がある。マルチレベルセルに適した符号を考える必要が上がる。セルレベル書き込み削減ではセルへの書き込みに対してのモデルを構築し、書き込み量の評価尺度を定式化する。性能が最悪時において、評価式で与えられる理論的境界上の書き込み削減性能を持つセルレベル書き込み削減符号生成手法を構成する。シングルレベルセルの書き込み削減符号では、現在のメモリ状態に合わせてメモリに保存したい値を符号語のビット列に変換する。これまでの研究ではビットレベルで書き込み量が少なくなるように符号語を書き込む選択的書き込み回路を用いることで効果的な書き込み量削減が達成された。更に選択的書き込み回路を用いると実際に書き込まれる符号語のビット列のパターンがばらつくため書き込み領域の平均化の効果がある。これまでの研究ではある誤り訂正符号の誤り訂正能力を書き込み削減能力に変換するというアプローチにより符号を構成することで符号理論に基づいた数学的裏付けで変換工程の規模の削減を達成している。セルレベル書き込み削減でもこの選択的書き込み回路による効果的な書き込み削減と符号理論に基づいた数学的裏付けで変換工程の規模の削減を実現する。

3. 研究の方法

研究課題を実現するために対象モデル/評価式の作成、既存の誤り訂正符号に着目した書き込み削減符号の生成、符号理論による書き込み削減符号の生成を工程として研究を進める。対象モデル/評価式の作成ではマルチレベルセル不揮発性メモリに書き込みが発生したときに消費電力やセルの書き込み耐性への影響を推定するための書き込み量を定義する。ビットレベルとセルレベルでは書き込みに対する影響が異なり、それぞれに適した符号を構築する必要がある。既存の誤り訂正符号に着目した書き込み削減符号の生成では数学的裏付けのあるアプローチとして既存の多値誤り訂正符号リードソロモン符号に注目しこれを書き込み削減符号に変換することを考える。リードソロモン符号はビット単位で誤り訂正をするのではなくシンボル単位で誤り訂正するため、このシンボル単位をセル単位と読み替えてマルチレベルセルに適した書き込み削減符号に変換する。誤り訂正符号は符号語と誤り語の距離が近い符号と考えることができる。この符号語と誤り語の距離が近いという性質をメモリに保存されている符号語と書き込まれる符号語の距離が近いという性質に変換することで書き込み削減符号が構築できると考えられる。符号理論による書き込み削減符号の生成では誤り訂正符号から書き込み削減符号を構築するのではなく、符号空間を直接考えることで書き込み削減符号を生成する。

4. 研究成果

(1)

不揮発性メモリは書き込みエネルギーが大きい、書き込み耐性が低いといった問題がある。不揮発性メモリに保存する情報を符号化して書き込むことで書き込み量を削減することができる。多値セル不揮発性メモリでは、ビットレベルではなくセルレベルで書き込み量を削減する必要がある。本研究は効率よくマルチレベルセル不揮発性メモリの書き込み量を削減することを目標とする。リードソロモン符号を書き込み削減符号に変換する手法を提案しマルチレベルセル不揮発性メモリの書き込み量を削減した。セルの書き込み量の指標にはセルハミング距離を用いた。リードソロモン符号は複数ビットを1シンボルとしてまとめて扱うシンボル単位での誤り訂正符号である。リードソロモン符号の符号語同士はシンボル単位でのハミング距離が大きく、そのため誤り訂正が可能となる。リードソロモン符号の誤り語を考えると、その誤り語は訂正されるべき符号語と誤りベクトルによって構成されていると考えることができる。ここで誤りベクトルに情報を割り当てた新しい符号を構築する。任意の語から特定の誤りベクトルを持つ誤り語へのシンボル単位でのハミング距離を小さくすることで、この符号によるマルチレベルセル不揮発性メモリの書き込み量を削減できる。シンボル単位で誤り訂正する性質をセル単位で情報書き込みをする性質に変換することで、無駄なくセル書き込み量の削減を達成できた。

(2)

不揮発性メモリは不揮発性などの長所がある一方で、書き込みエネルギーが大きいことや書き込み耐性が低いことなどの短所がある。この短所に対し、不揮発性メモリ内に書き込む情報を符号化することで書き込みの総量を減らす手法が存在する。書き込み量をビットレベルで最小化する手法は既に提案されているが、多値メモリでは書き込み量をセルレベルで考慮する必要がある。ワーストケースでもセルレベルで書き込み総量を最小化できるメモリ符号化技術の実装を提案した。各メモリセルの状態を1シンボルとみなし、1ワードを表す線形空間を考える。ハミング重みが1以下となるワードから部分空間を作成し、線形空間全体を部分空間とその商空間に分ける。部分空間の要素と情報源を対応させる。線形空間全体は部分空間と商空間の直積で表現されるため、その線形空間上のワードは部分空間との対応付けにより一意に情報源に復号できる。この符号化により情報に対しどんな情報に対してもその書き込み量が1ワードあたり1セルになるように線形符号を構築できる。セル長に対して最適な書き込み量削減を達成した。

(3)

電源が遮断されていてもメモリ内にデータを保存できるデバイスとして不揮発性メモリが研究されている。不揮発性メモリは書き込み耐性が低く書き込みエネルギーが大きいデメリットがある。不揮発性メモリには読み出しと書き込みに非対称性があり、読み出しにかかるコストは低い。読み出し回数を増やして書き込み量を削減することを考える。不揮発性メモリには1つのセルの状態が複数ビットを表現する多値セルが使用される。多値セルで書き込み削減する場合、書き込み量はビット単位ではなくセル単位で削減する必要がある。複数のセルをまとめて符号語とすることで1つの情報を不揮発性メモリに保存するときにわずかなセルの書き込み量で複数ビットを保存する書き込み削減手法が存在する。特にセル1つで3ビットの情報を保持する多値メモリに適用可能な書き込み削減を研究した。1セル3ビットの多値メモリを符号化するために3ビット情報を持つ有限体の拡大体を考え、その要素を1セルに対応付けたシンボルレベルでの誤り訂正符号を構成した。構成したシンボルレベルでの誤り訂正符号を格子として、符号空間の商空間を得ることで書き込み削減符号を構成した。構成した書き込み削減符号はメモリに格納された情報に応じて変更後の状態を決定することで、不揮発性メモリに情報を保存するときにワーストケースでも1セルの書き込み量で情報を保存できる成果を得た。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

[1] Masashi Tawada, Shinji Kimura, Masao Yanagisawa, and Nozomu Togawa, "Effective write-reduction method for MLC non-volatile memory," in Proc. ISCAS 2017, pp. 1708-1711.

[2] 多和田雅師, 柳澤政生, 戸川望, "不揮発性メモリを対象とした低書き込みメモリ暗号化手法," DA シンポジウム 2017, pp. 121-126.

[3] 多和田雅師, 柳澤政生, 戸川望, "高精度ストカスティック演算のための FSM 設計," 信学技報, vol. 116, no. 415, VLD2016-96, pp. 171-174.

[4] 多和田雅師, 柳澤政生, 戸川望, "リードソロモン符号に基づいたマルチレベルセル不揮発性メモリ書き込み削減," DA シンポジウム 2016, pp. 163-168.