

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330059

研究課題名(和文)多レベルセルフラッシュメモリ用多値単方向誤り制御符号の研究

研究課題名(英文) Research on M-ary Unidirectional Error Control Codes for Multi-Level Flash Memories

研究代表者

北神 正人 (Kitakami, Masato)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号：20282832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではフローティングゲートに蓄積する電荷を段階的に制御することによって1個のメモリセルで多値(多ビットの値)を記憶できるマルチレベルセルフラッシュメモリに対する効果的な符号を開発している。メモリセルに生じる誤りが近傍値への誤りに限られることを利用した単一隣接誤り訂正符号を開発した。また、マルチレベルセルフラッシュメモリではページ内の複数セルの値を上位ビットから確定していくマルチページプログラミングが利用されページごとにビット誤り訂正符号が利用されているのを考慮して、誤り率を改善した復号手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this research, effective codes for multi level cell flash memory capable of storing multi-bit value by one memory cell are developed. Here, multi level cell flash memory stores multi-bit value by gradually controlling the charge accumulated in the floating gate. We have developed a single adjacent error correction code that utilizes the fact that errors occurring in memory cells are limited to errors to neighboring values. In addition, in the multi-level cell flash memory, considering that multi-page programming is used to determine the value of a plurality of cells in a page from upper bits and a bit error correction code is used for each page. We have proposed an improved decoding method which achieves lower bit error rate.

研究分野：情報工学

キーワード：誤り制御符号 多レベルフラッシュメモリ 単方向誤り 隣接誤り マルチページプログラミング

1. 研究開始当初の背景

近年、フラッシュメモリは記録メディアなどに多用されている。特に高集積化が容易な多レベルセル(MLC)NAND型フラッシュメモリが近年多用されている。このフラッシュメモリでは、フローティングゲートに蓄えた電荷の量を制御することでトランジスタの閾値電圧を制御し、それにより多値の値を1メモリセルに記憶させ、すなわち1メモリセルが複数ビットの情報を記憶することになる。この場合、メモリセルに故障が生じるとそのセルが出力する複数ビット(バイトと呼ぶ)単位の誤りとなるので、バイト誤り訂正符号が適用可能である。

バイト誤り訂正符号はバイト内の任意のパターンを誤りとして対象としているので多くの検査ビットを必要とする。フラッシュメモリにおける誤りパターンが2進数としてバイトを見たときに近隣の値に誤る確率が高、さらに複数の誤りが生じる場合にはすべての誤りが値を増加させる方向か減少させる方向のいずれかになることが実際のフラッシュメモリの動作試験で確認された。

これにより、多レベルフラッシュメモリに対する符号は上記のような誤り、すなわち多元における単方向誤りのみを考慮すればよくなり、バイト誤り訂正符号よりも効率の良い符号が構成可能となる。

2. 研究の目的

本研究では前項に述べたようにフラッシュメモリにおける誤りの傾向を考慮して、誤りを多元単方向誤りに限定することにより、より効率の良い符号を構成することを目的とする。バイト誤り訂正符号ではこの概念を用いて数学的に整った体系で符号を構成することができた。多元単方向誤りを表現できる数学的構造を明らかにする必要がある。

また、本研究で提案する符号はメモリ装置に搭載され高速復号を必要とする。そのために高速復号回路の開発も必要になる。実際にLSIを開発するのはコストや時間の関係から容易ではないので、CADツール上で設計しシミュレーションで性能評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 誤り傾向の分析と符号機能の決定

多レベルフラッシュメモリの内部の物理的構造から、生じる誤りの傾向を分析し、必要な誤り回復機能を求める。

(2) 符号の開発

前項で得られた機能を実現する符号を開発する。符号理論はその多くが代数学、組み合わせ論など数学的基盤に基づいているが、実際の符号開発には発見的要素が必要となるので計算機の支援を受けながら開発を行う。

(3) 評価

提案手法の有効性を確認するため、誤り訂正能力、機能を超えた誤りに対する検出率、復号時間等のデータを採取する。

(4) 高速復号法の検討

得られた符号に対して、組み合わせ回路のみで復号できるかどうか検討する。検討結果を符号開発の段階へフィードバックして開発を行う。

4. 研究成果

前項で述べたように、マルチレベルセルフラッシュメモリでは値が近傍の値に誤りことが多いため、誤りの大きさを制限したLM(Limited Magnitude)誤り訂正符号の方が全誤りを訂正する符号よりも少ない検査で構成できるので有効である。また、ビット数が大きいマルチレベルセルでは各セルの値を上位ビットから順に確定させることで値を確定するのに要する時間を短縮している。この場合、同一のページに属すメモリセルでは同じビット位置のビットをまとめて符号化するマルチページプログラミングがとられることが多い。その点を考慮して本研究では以下に示す2種類の符号を開発した。

- ・単一対称LM誤り訂正符号
- ・マルチページプログラミングと近傍地への誤りを考慮した符号

前者の符号は誤りの大きさを s 以下、すなわち $\pm s$ 以内に制限した単一誤りを訂正する符号である。後者の符号は上述のマルチページプログラミングに対応した符号である。以下に各符号に関する具体的な成果を示す。

(1) 単一対称LM誤り訂正符号

本符号では整数環 Z_m 上で符号を構成する。情報シンボルを整数環の位数 m で剰余を取って Z_m 上で単一誤り訂正符号化する。得られた検査を元の情報シンボルに付加して符号語を得る。表1に1セルに5ビット記憶できるセルに対する符号の情報長を示す。従来符号1, 2はそれぞれ[1],[2]で提案された既存の単一 ± 1 誤り訂正符号であり、従来符号3は単一シンボル誤りハミング符号[3]である。提案符号0は提案した単一 ± 1 誤り訂正符号であり、提案符号1は提案した単一 ± 1 誤り訂正 $\cdot \pm 2$ 誤り検出符号である。表より従来符号1, 2と同機能の提案符号0の方が同一の検査長でより長い情報長をとる効率のよい符号であることが分かる。

表1: 5ビットセルに対する符号の情報長

	検査長			
	2	3	4	5
従来符号1	502	16,369	524,268	16,777,191
従来符号2	508	16,377	524,276	16,777,195
従来符号3	31	1,054	33,821	1,082,396
提案符号0	508	16,377	524,276	16,777,195
提案符号1	382	14,333	491,516	16,252,923

表 2 : (126,124)単一±1 誤り訂正符号の復号確率(%)

誤り	検出	誤訂正	未検出
± 2	4.8	95.2	0
± 3	0	100	0
± 4	19	76.1	4.8
± 5	0	100	0
± 6	4.8	95.2	0
± 7	0	100	0
± 8	76.2	0	23.8

表 2 に ± 2 ~ ± 8 誤りに対する (126, 124) 単一 ± 1 誤り訂正符号の復号確率を示す。これらの誤りは本符号の誤り訂正能力を超えた誤りであるので正し復号される保証はない。実際にどの誤りに対しても誤訂正率が高くなっている。これより本符号は ± 1 誤りを超える誤りの生じる確率がきわめて低い場合にのみ利用すべきであることが分かる。

(2) マルチページプログラミングと近傍値への誤りを考慮した符号

マルチページプログラミングを用いたマルチレベルセルフラッシュメモリではページごとにビット誤り訂正符号を適用する。本提案の符号も同様の符号化をおこなうが、復号法を改良することによって近傍の誤りを訂正する。本手法では最上位ビットのページから順に復号していく。以降のビットに対応するページの復号にはすでに確定している上位ビットの値を利用する。

表 3 に符号に用いた BCH 符号の復号時間を示す。表 4 に提案手法の読み出しレイテンシを示す。表より提案手法の読み出しレイテンシは従来手法に比べて低下している。

表 3 BCH 符号の復号時間 (μ s)

	平均			最大
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	
BER				
$t=8$	5.1	5.2	5.5	5.5
$t=16$	5.1	5.3	5.8	5.6

表 4 読み出しレイテンシ (μ s)

		平均			最大
		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	
BER					
既存符号	$t=8$	208.9	209.0	209.3	316.0
	$t=16$	208.9	209.1	209.6	316.4
提案符号	$t=8$	239.4	239.5	239.8	377.0
	$t=16$	239.4	239.6	240.1	377.4

理論解析を行うと、ビット誤り率は従来手法に比べて 16%改善する。また、メモリの寿命は 9.1%改善する。

参考文献

- [1] K. Sato and M. Kitakami, "A class of 1 level error correcting code for multilevel cell flash memories," IEICE Technical Report, DC, no.53, pp.9-14, Dec. 2010.
 [2] H. Kostadinov, H. Morita, and N. Manev, "On (±1) error correctable integer codes," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E93-A, no.12, pp.2758-2761, Dec. 2010.
 [3] E. Fujiwara, Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Application, Wiley-Interscience, 2006.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Shohei Kotaki and Masato Kitakami, "An Error Correction Method for Neighborhood-Level Errors in NAND Flash Memories," IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E100-A, No.2, pp.653-662, February 2017. (査読有)

[学会発表](計 6 件)

Shohei Kotaki and Masato Kitakami, "Codes Correcting Asymmetric/Unidirectional Errors along with Bidirectional Errors of Small Magnitude," Proc. 2014 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, pp. 159-160, November 18-21, 2014, Singapore. (査読有)

Tianyi Zhang and Masato Kitakami, "The Effective Method of Improving BerlekampPreparata Convolutional Codes Decoding by Tail-Biting Technology," Proceedings of 2016 International Symposium on Information Theory and Its Applications, pp. 512-516, October 30 -November 2, 2016, Monterey, CA, USA. (査読有)

浅井万平, 北神正人, "NAND フラッシュメモリのための P/E サイクルを考慮した誤り訂正符号," 信学技報, DC15-76, December 2015, 村上市 (新潟県). (査読無)

Tianyi Zhang and Masato Kitakami, "The Effective Method of Improving Berlekamp-Preparata Convolutional Codes Decoding by Tail-Biting Technology," IEICE Technical Report IT15-118, March 2016, Chofu,

Tokyo. (査読無)

室井拓也, 北神正人, "PPM 圧縮におけるブロック間バースト誤りに対応する訂正手法," 信学技報, DC16-23, October 2016, 彦根市(滋賀県). (査読無)

小滝翔平, 北神正人, "位数の大きい整数剰余環を用いた単一 Limited-Magnitude 誤り訂正符号," 信学技報, DC16-24, October 2016, 彦根市(滋賀県). (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北神 正人 (KITAKAMI, Masato)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授
研究者番号: 20282832