

NAND FM におけるデータ保持能力の短期推定手法

鈴木彬史†
Akifumi Suzuki小川純司†
Junji Ogawa

概要

NAND Flash Memory (以下 FM)のデータ保持能力は、メモリセルの書き換え回数と書き換え間隔に依存して低下する。このため、データ保持能力の調査は、実利用条件の書き換え間隔を模擬する必要がある、この劣化試験は年単位の期間が必要となる。しかし、FM を早期に製品適用するには、FM 劣化後のデータ保持能力に基づいて必要な訂正回路の規模やデータ保護制御を定め、短期間で劣化の影響を定量化する必要がある。

本研究は、①書き換え間隔、②データ保持期間、③品質ばらつき、の条件から障害 bit 率を予測するモデルを述べる。このモデルにより、短期実験の結果より実利用条件下での FM のデータ損失確率が推定可能となる。

1. 導入

近年 FM は、微細化と多値化による Bit コストの低下により、様々な記憶装置に用いられている。例えば、HDD (Hard Disk Drive) 互換のインターフェースを有する SSD(Solid State Drive)や、大量の FM を搭載した Flash Array Storage などの FM を用いた装置が発表されている。

FM の利用が広がる一方で、製造プロセスの微細化により FM のデータ保持能力は急速に低下しており、今後も低下すると予測されている。[1]

FM は、データの書き換え（一旦削除後に再度データを書き込む）の繰り返しによりデータを記録するセルが劣化するため、FM のデータ保持能力の低下は、劣化に対する耐久度の低下として現れている。

こうしたセルの劣化を許容するため、FM を用いる装置は一般に記録データに数十個の障害 bit を訂正する ECC(Error Correction Code)を生成してデータに付与し、ECC CW(ECC Code Word)を構成することで、記録データを保護する。この ECC の訂正能力は、装置に求められる信頼性により定める必要がある。

ECC によるデータの瞬時的な訂正不能確率(UBER: Uncorrectable Bit Error Rate)は、ECC CW を構成するセルの平均障害確率(RBER; Raw Bit Error Rate)より、二項分布を用いた式(1)にて算出される。[2]

$$\text{UBER}(\text{instantaneous}) = \frac{\sum_{n=E+1}^N \binom{N}{n} \cdot \text{RBER}^n (1-\text{RBER})^{N-n}}{\text{User data bits per ECC CW}} \quad (1)$$

式(1)の N は ECC CW の bit 長、E は ECC にて訂正可能な bit 数の最大値であり、訂正不能となる確率は E+1 以上の障害 bit が ECC CW に生じる確率の和として求められる。

装置開発では、装置固有の信頼性基準から式(1)の UBER の許容値を定めおり、装置の想定利用条件にて劣化した FM の RBER にて、式(1)の UBER の値が許容値を下回る N と E の ECC CW 構成を採ることが必須となる。

しかし、高い訂正能力の ECC を搭載するとデータに対する ECC の割合が増加し、Bit コストが増加してしまう。

このため、通常、装置基準の信頼性を満たす最小の ECC CW 構成とすることが望ましい。

このように FM を用いる装置開発では、必要な ECC CW の最小構成を決定する為に、想定利用条件での RBER を定量化する必要がある。

2. 書き換えによるデータ保持能力の変化

想定利用条件下での RBER を定量化するには、条件下にて生じる FM の劣化を調査する必要がある。FM のデータ保持能力の低下は書き換えによる劣化だけでなく、書き換え間隔にも依存することが知られており、書き換え間隔が短いほどデータ保持能力が低下する。

このため、短期間に書き換えを繰り返す劣化試験では、実施可能な書き換え間隔が想定利用条件に比べて短くなり、過度に厳しい条件にて、FM の劣化を評価することとなる。

一方で、装置の想定利用条件での劣化状態を再現した書き換え実験は、膨大な実験期間が必要となる。例えば想定利用条件が、書き換え回数 3000 回、書き換え間隔 10 時間であった場合、この条件にて生じる RBER を実験より取得するには、3000 回×10 時間=30000 時間と 3 年以上の実験期間が必要となる。こうした膨大な実験期間の確保は、FM の早期製品適用の観点から困難である。

このため、短い書き換え間隔での実験から、長い書き換え間隔条件を外挿するモデルが提案されている。書き換え間隔によるデータ保持能力の低下は、FM セルの酸化絶縁膜にトラップされた電子が放出される現象(デトラップ)により生じる。このデトラップによる FM セルの閾値電圧変動は、式(2)にてあらわされる。[3]

$$\text{Detrapping} \propto \ln\left(1 + \frac{\text{Retention time}[s]}{B+C \times \text{Cycle time}[s]}\right) \quad (2)$$

式(2)の Retention time は、データを記録してからの経過時間であり、Cycle time は、書き換え試験に要した時間である。また B と C はフィッティング用のパラメータである。

式(2)を用いることで、想定利用条件でのデトラッピング影響を推定可能となる。しかし、デトラップと障害 bit の関連は明らかでない為、RBER の推定には、式(2)を用いた RBER 推定モデルが別途必要となる。

3. RBER のばらつき

FM は、先天的な品質差によりデータ保持能力が個々に異なることが知られている。このため、たとえ同一条件で利用したとしても、RBER は記憶領域毎に異なる。

こうした RBER のばらつきは ECC を利用したデータ保護の信頼性に大きな影響を及ぼす。例えば、RBER が 0.05% のとき UBER が 7.1e-16[secort/bit]となる ECC CW 構成(N=8528bit,E=24bit,User data=8192bit)にて、RBER が 20% 増加し 0.06% となった場合、UBER は 3.0e-14[sector/bit]と 42 倍に増加する。このように、ばらつきによる RBER のわずかな変化は、UBER に大きな影響を及ぼす。このため、装置全体のデータ消失確率は、データ保持能力の低い一部の領域で決定される。このため、装置に必要な ECC CW 構

† (株)日立製作所, Hitachi Ltd

成の検討には、装置に搭載する FM のデータ保持能力のばらつきを定量化する必要がある。

4. 短期実験による推定モデルの作成

装置に必要な ECCCW 構成を短期間で決定するには、短期実験の結果から FM のデータ保持能力のばらつきと書き換え間隔の影響を表す推定モデルを作成し、想定利用条件を外挿する必要がある。

本研究では、2xnm 世代の MLC NAND FM について推定モデル作成を試みた。短期実験の条件は表 1 に示す 15 通りである。各条件でそれぞれ FM の消去単位であるブロック 640 個をサンプルとして作成した。「15 年間、1 日平均 1 回書き換え」を想定利用条件とし、 $1[\text{回/day}] \times 365[\text{day}] \times 15[\text{year}] \div 6000$ 回の書き換えを実施した。

ブロックの劣化期間は、書き換え間隔の最も長い 675[s] で 6000 回より $675[\text{s}] \times 6000 = 46.8$ 日、データ保持期間は $528\text{hour} = 22$ 日より、実験期間は、 $46.8 + 22 = 68.8$ 日である。

表 1 実験条件

| 書き換え回数 [回] | 書き換え間隔 [秒] | データ保持期間 [hour] |
|------------|-------------|----------------|
| 6000 | 225,450,675 | 0,191,360,528 |

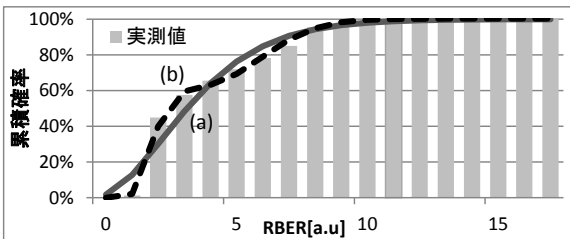


図 1 書き換え間隔 450 秒,データ保持期間 360 時間の RBER のブロックばらつきと確率密度関数 ((a)ガンマ分布, (b)2つのガンマ分布の重ね合わせ)

図 1 の棒グラフは、消去回数 6000 回、書き換え間隔 225 秒、データ保持期間 360 時間の条件における RBER のばらつきを示している。RBER は負の値とならず連続値と見做せることから、RBER の確率密度関数としてガンマ分布を選定した。図 1 の破線(a)は、ガンマ分布によるフィッティング結果、実線(b)は、共通の形状母数による 2 つのガンマ分布の重ね合わせによるフィッティング結果をそれぞれ示している。(a)(b)各関数の KS 値 (Kolmogorov-Smirnov Value) は(a)3.7, (b)1.2 であった。KS 検定 (Kolmogorov-Smirnov Test)にて、棄却域を 5%とした場合、KS 値の許容値は 1.36 となるので、RBER のばらつきを表す確率密度関数として許容値を満たす(b)を用いる。

以上より、推定モデルとして式(3)を作成した。

$$\alpha \times \text{Gamma_dist}\left(\frac{E_1}{\beta}, \beta\right) + (1 - \alpha) \times \text{Gamma_dist}\left(\frac{E_2}{\beta}, \beta\right) \quad (3)$$

$$E_1 = A_1 \times \text{Detrapping} + D$$

$$E_2 = A_2 \times \text{Detrapping} + D$$

式(3)各ガンマ分布の期待値 E_1, E_2 は、個別のフィッティングパラメータ A_1, A_2 と共通のフィッティングパラメータ D を持つ。 D は、データ保持期間が 0 の時の切片である。また、各ガンマ分布の形状母数 β は共通で、尺度母数 E_i/β のみ異なる。

5. 推定モデル評価

式(3)について、各パラメータを最尤法にて求め、推定モデルを作成した。図 2 のとおり、各データ保持期間と書き換え間隔にて、モデルは実験データを適切に表している。

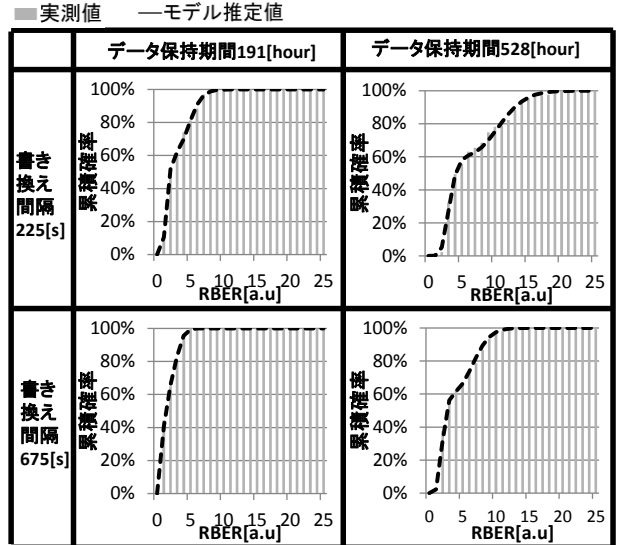


図 2 RBER のブロックばらつきとモデル推定値

フィッティングに用いた表 1 の条件外の比較として「消去回数 6000 回、書き換え間隔 900 秒、データ保持期間 720 時間」の RBER のブロックばらつきの実測値と式(3)に各条件を入力したときの推定モデルの比較を図 3 に示す。

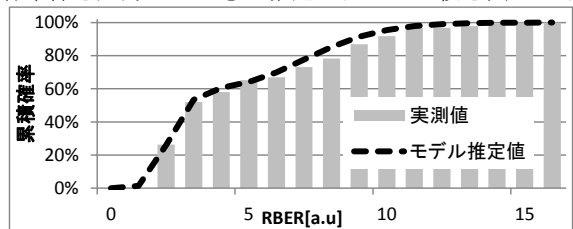


図 3 書き換え間隔 900 秒,データ保持期間 720 時間の RBER のブロックばらつきとモデル推定値

図 3 のとおり、モデル推定値による外挿線は、実測値を適切に表しており、式(3)により書き換え間隔とデータ保持期間について適切に外挿されていることを示している。

6. まとめ

任意の書き換え間隔、データ保持期間における RBER のばらつきを推定するモデルを提案した。このモデルを用いることで、装置の想定利用条件にて必要とされる ECC CW 構成を短期間で決定できる。

文献

- [1] G. Molas and et al. "Degradation of floating-gate memory reliability by few electron phenomena," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no. 10, pp. 2610–2619, Oct. 2006
- [2] N. Mielke and et al. "Bit error rate in NAND Flash memories." InIEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pages 9–19, April 2008.
- [3] N. Mielke and et al. "Recovery effects in the distributed cycling of flash memories." IRPS, 2006