

# フローティングゲートおよびチャージトラップTLC NANDフラッシュメモリにおけるトータルドーズ効果のデータパターン依存性

小澤 太希<sup>†</sup> 古田 潤<sup>†</sup> 小林 和淑<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 京都工芸繊維大学 〒606-0951 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町

**あらまし** 宇宙機に搭載する不揮発性メモリとして、NANDフラッシュメモリが注目されている。宇宙に存在する多量の放射線によりデバイスの劣化や故障を引き起こすため、耐性の評価が必要とされている。本稿では、フローティングゲート型フラッシュメモリとチャージトラップ型フラッシュメモリを用いて、ガンマ線照射によるしきい値電圧の変化を測定し、データパターンごとのトータルドーズ効果(TID)特性の比較を行った。測定の結果、チャージトラップ型のTID特性はフローティングゲート型より、データパターンに大きく依存する。チャージトラップ型ではセルのしきい値電圧が小さいデータパターンでは、高いTID耐性を持つが、しきい値電圧が大きくなるにつれて、急激にTID耐性は低くなる。

**キーワード** NANDフラッシュメモリ, フローティングゲート, チャージトラップ, トータルドーズ, ガンマ線

## Data Pattern Dependence of the Total Ionizing Dose Effect in Floating-gate and Charge-trap TLC NAND flash memories

Taiki OZAWA<sup>†</sup>, Jun FURUTA<sup>†</sup>, and Kazutoshi KOBAYASHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Kyoto Institute of Technology

**Abstract** The NAND flash memory is attracting attention as nonvolatile memory for spacecraft. Since the large amount of radiation in space causes device degradation and failure, device resistance must be evaluated. In this paper, we measured the change in threshold voltage due to gamma-ray irradiation using floating gate flash memory devices and charge trap flash memory, and compared the total dose effect (TID) characteristics for each data pattern. The measurement results show that the TID characteristics of the charge trap type are more dependent on the data pattern than those of the floating gate type. The charge trap type has high TID tolerance for data patterns with small cell threshold voltages, but as the threshold voltage increases, the TID tolerance rapidly decreases.

**Key words** NAND flash memory, floating gate, charge trap, total ionizing dose effect, gamma-ray

### 1. ま え が き

人工衛星や宇宙ステーションなどの宇宙機において半導体デバイスは不可欠であるが、宇宙空間には多くの高エネルギーの放射線が存在し、それらによって、半導体デバイスの劣化や故障、誤動作を引き起こされる。その一つとして、トータルドーズ効果(TID:Total Ionizing Dose effect)が挙げられる。TIDとは、放射線が半導体デバイスを通過・衝突することで電子正孔対が発生し、その中の正孔が酸化膜の欠陥に蓄積することで、デバイスの電気的な特性を劣化させる現象である[1]。

NANDフラッシュメモリは大容量、低電力の不揮発性メモリであり、宇宙機への搭載が期待されている記憶素子である。1つのセルに複数ビット記憶するトリプルレベルセル(TLC:Triple Level Cell)などの多値メモリは、長距離飛行を想定した宇宙探

査機や、大容量のデータを扱う人工衛星の記憶素子に適している。しかし、放射線によって発生した正孔の影響による保持値の変化、酸化膜に発生した欠陥の影響でデータの保持特性の劣化など、TIDの影響を大きく受ける[2]。しきい値電圧のマージンが小さい多値メモリは、TIDによる保持値の変化が起こりやすい。フラッシュメモリはフローティングゲートに電子を蓄えて値を記録するフローティングゲート(FG)型とチャージトラップ膜の欠陥に電子を蓄えるチャージトラップ(CT)型の2つに分類される。本稿では、FG型とCT型のTLCフラッシュメモリのTID特性の比較を行った。ガンマ線照射直後にそれぞれのしきい値電圧の分布を測定し、TID特性のデータパターン依存性を評価した。

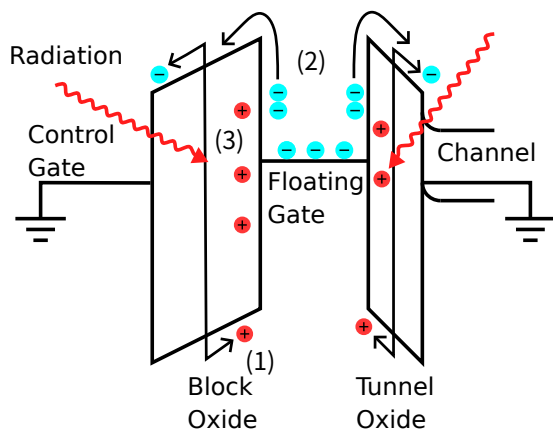


図 1: フラッシュメモリにおける TID の発生機構

## 2. Total Dose Effect

フラッシュメモリにおける TID の影響として、しきい値電圧の減少やデータ保持特性の劣化がある。主なメカニズムとしては図 1 に示す 3 つが挙げられる。TID の発生機構は FG 型を例に挙げているが、CT 型でも同様である。

### (1) 正孔と電子との再結合による電荷量の減少

放射線が酸化膜に照射することで、電子正孔対が発生する。そのうち正孔の一部が酸化膜の電界の影響で、フローティングゲート (FG) に送られる。FG に送られた正孔は電子と再結合する。セルの蓄積電荷量が減少し、しきい値電圧が減少して保持値が変化する。FG に送られる正孔は酸化膜にかかる電界に依存するため、セルのしきい値電圧が大きいほどこの影響を大きく受ける [3]。

### (2) 電子のデトラップによる電荷量の減少

FG に保持された電子が放射線のエネルギーを得ることで、酸化膜のバリアの高さを超えてコントロールゲートまたは基板に放出され、しきい値電圧が減少する [3]。

### (3) 界面準位への正孔のトラップ

放射線が酸化膜に照射されることで発生した正孔の一部が界面準位にトラップされることで、しきい値電圧が減少する。トラップされた正孔は時間経過やゲート電圧の影響などで放出されるため、しきい値電圧は一部回復する [4] [5]。

## 3. NAND フラッシュメモリ

### 3.1 フラッシュメモリの構造

フラッシュメモリはフローティングゲート (FG) 型とチャージトラップ (CT) 型の 2 つに分類される (図 2)。FG 型は酸化膜に挟まれた FG に電子を蓄えて値を記憶する。FG は通常ポリシリコンでできており、保持された電子が FG 内で自由に動く。対して、CT 型はチャージトラップ (CT) 膜の欠陥に電子を蓄えて値を記憶する。CT 膜は絶縁体である窒化シリコンでできているため、トラップされた電子は CT 膜内で動けない。CT 型は FG 型より酸化膜が薄く、平坦な構造を持つため、微細化しやすい [6]。先行研究では CT 型の方が TID に強い耐性を持つ [7]。これは電子が離散的に保持されているため、酸化膜から移動

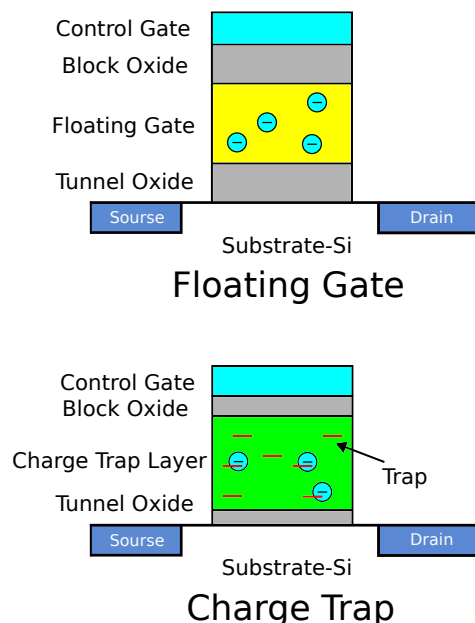


図 2: FG 型および CT 型フラッシュメモリの構造

してきた正孔との再結合が起こりにくく、正孔が基板やコントロールゲートに抜けていくためである [8]。一方で FG 型は電子が自由に動けるため、移動してきた正孔と再結合は起こりやすく、しきい値電圧は大きく減少する。

### 3.2 多値メモリ

NAND フラッシュメモリは各メモリセルのゲート内部に蓄えられた電荷量により、記憶された値が決定される。1 つのセルに記憶できるビット数により、セルタイプが定義される。多値メモリでは製品によって、各しきい値電圧に割り当てられているデータパターンが異なる。一般的にはエラー訂正しやすくするため、隣接する記憶値の値はハミング距離が 1 になっている。多値化が進むごとに、隣接するレベル間のしきい値電圧のマージンが小さくなるため、信頼性が悪化する [9]。

## 4. 測定について

### 4.1 測定条件

市販の SSD から取り外したトリプルレベルセル (TLC) の NAND フラッシュメモリの FG 型 3D NAND (Intel 社, 29F01T2ANCTH2) と CT 型 3D NAND (Kioxia 社, TABHG65AWV) を測定対象として用いた。測定対象の詳細及び照射条件は表 1, 表 2 に示す。FG 型と CT 型でしきい値電圧に対するデータパターンの割り当ては異なり、図 3 に示すようになっている。しきい値電圧、エラー率の測定には Siglead 社の SigNAS3 を用いる (図 4)。測定は、高崎量子応用研究所のガンマ線照射施設で行った。ガンマ線照射にはコバルト 60 線源を用いた。

### 4.2 しきい値電圧の分布測定

照射前と照射直後、室温放置後のしきい値電圧を測定する。これはすべてのデータパターンで行う。手順を以下に示す。

(1) 照射前の FG 型と CT 型それぞれのチップの 1 プロックにランダム値を書き込み、しきい値電圧の分布を測定する。

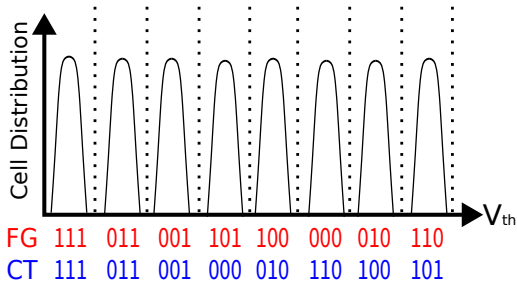


図 3: TLC しきい値電圧に対するデータパターン割り当て



図 4: SigNAS3

- (2) Co60 線源を用いて、ガンマ線を照射する。
- (3) 照射直後に読み出し動作を行い、しきい値電圧の分布を測定する。
- (4) 24 時間室温放置する。本実験は加速試験であり、高線量率で短時間照射をしているため、照射直後は正孔の放出される影響が小さい。室温放置は、時間経過で放出される正孔の影響を考慮するためである。
- (5) 再度読み出し動作を行い、しきい値電圧の分布を測定する。

### 4.3 照射後チップの BER 測定

照射後から時間変化で、1 ブロックあたりの BER(Bit Error Rate) を測定する。BER はすべてのデータパターンを合わせて算出している。また、測定ブロックはしきい値電圧の分布測定とは異なるブロックを用いて行う。手順を以下に示す。

- (1) 照射前の FG 型と CT 型それぞれのチップの 1 ブロックにランダム値を書き込む。
- (2) Co60 線源を用いて、ガンマ線を照射する。
- (3) 照射後、室温放置中のチップに 1 時間毎に読み出し動作を行い、BER を測定する

## 5. 測定結果

### 5.1 しきい値電圧の分布測定

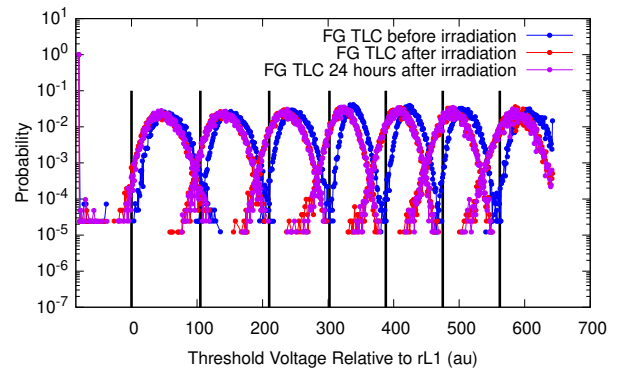
各データパターンでのしきい値電圧の分布の測定結果を図 5 示す。横軸は、消去状態と、次にプログラムされた状態の読取り時の電圧差 (rL1) を基準としてその相対値単位 (au) で表す。縦軸はデータパターンにおいて、その読み取り電圧範囲内の各しきい値電圧における、セルの割合を表す。FG 型、CT 型ともに、照射後は各データパターンでしきい値電圧が減少して、分布が広がる。CT 型では 24 時間の室温放置により、セルのしきい値電圧の回復が確認できた。

表 1: FG 型 TLC NAND フラッシュメモリの仕様

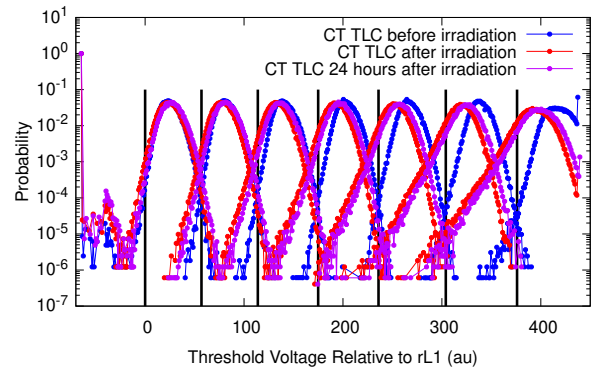
チップ型番	29F01T2ANCTH2
仕様	Floating Gate 64Layer TLC 3D
Block サイズ	2,160 page
Page サイズ	4KB
照射線量	19rad(Si)
照射時間	30min

表 2: CT 型 TLC NAND フラッシュメモリの仕様

チップ型番	TABHG65AWV
仕様	Charg Trap 96Layer 3D TLC(BiCS4)
Block サイズ	1,024 page
Page サイズ	16KB
照射線量	19rad(Si)
照射時間	30min



(a) FG 型 TLC



(b) CT 型 TLC

図 5: 各データパターンのしきい値電圧の確率分布

### 5.2 照射後チップの BER 測定

照射直後からの BER の時間変化を図 6 に示す。未照射状態の BER は FG 型で 0.019 %、CT 型で 0.0059 %であった。FG 型は照射直後の BER は 2.9 %であり、大きく増加した。また FG 型は、室温放置中も BER は一定であり回復は見られない。一方で CT 型は照射直後の BER は 0.26 %であり、照射後 10 時間の室温放置により 0.095 %まで減少する。

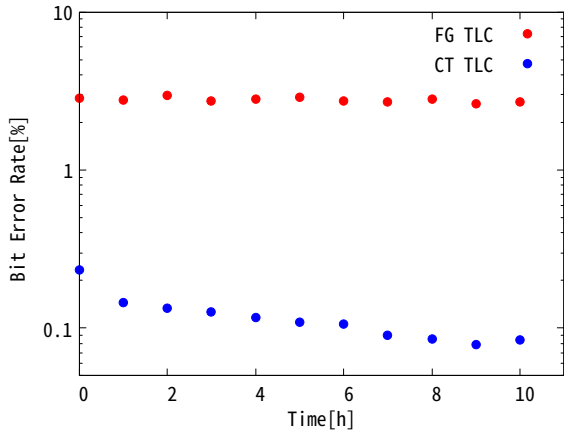


図 6: 照射後, BER の時間変化

## 6. 考 察

### 6.1 ガンマ線照射によるしきい値電圧の減少量

各データパターンでの全体的なセルのしきい値電圧の減少量は、しきい値電圧の分布の平均値から評価する。照射前の平均値を  $V_{th1}$ 、照射直後の平均値を  $V_{th2}$  とする。ガンマ線照射によるしきい値電圧の減少量を  $\Delta V_{th} = V_{th1} - V_{th2}$  で算出する。各データパターンのガンマ線照射によるしきい値電圧の減少量  $\Delta V_{th}$  を図 7 示す。上位のデータパターンほどしきい値電圧の減少量が大きくなる。また、FG 型は減少量のデータパターンの依存性は小さく、最下位データパターン 011 で 10au、最上位の 110 で 20au であり、約 2 倍の差である。一方で CT 型の下位のデータパターンの減少量は極めて小さく、011 では 0.44au である。しかし上位のデータパターンになるほど減少量は急激に増加し、最上位での 101 では 25au となり、011 の約 57 倍となる。

各データパターンでしきい値電圧の確率分布の広がり、照射前と照射直後のしきい値電圧の確率分布の分散の比  $\sigma_{after}^2 / \sigma_{before}^2$  から評価する。各データパターンの確率分布の分散の比を図 8 に示す。いずれのデータパターンにおいても分散が大きくなっていることから、セル毎のしきい値電圧の減少量には、ばらつきがある。FG 型ではデータパターンの依存性は小さいが、CT 型では上位のデータパターンほど分散が大きい傾向がある。

以上よりガンマ線照射により、セルのしきい値電圧が減少することに加え、その減少量にもセル毎にばらつきがあることが確認できた。CT 型は FG 型と比較して、下位のデータパターンではしきい値電圧の減少量は小さくなり、優れた TID 耐性を持つ。しかし上位のデータパターンでは、CT 型はしきい値電圧が大きく減少し、セル毎のばらつきも大きくなり、TID 耐性は FG 型より低くなる。照射中のしきい値電圧減少の原因は (1) 電子と正孔の再結合、(2) 酸化膜の界面準位への正孔のトラップ (3) 保持された電子の放出の 3 つがある。CT 型の下位のデータパターンが高い TID 耐性を持つのは (1) の影響が小さいためと考えられる。CT 型では CT 膜に電子がトラップされており、自由に動けず、そのため酸化膜から移動してきた正孔との再結合が起こりにくい。再結合しなかった正孔はコントロールゲー

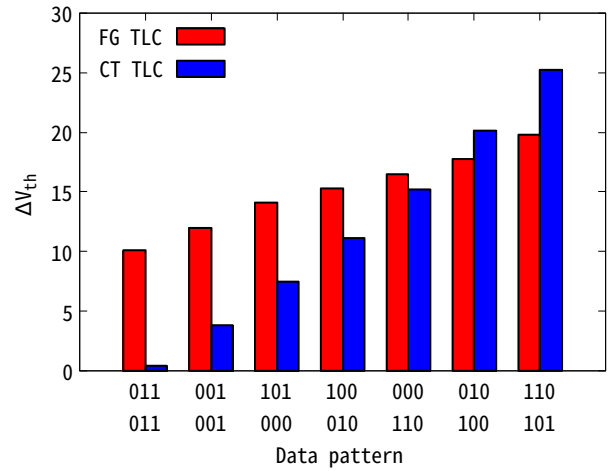


図 7: 各データパターンのガンマ線照射によるしきい値電圧の減少量  $\Delta V_{th}$

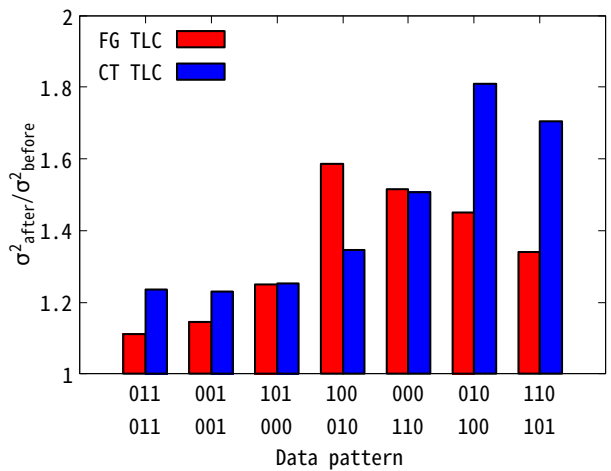


図 8: 照射前後のしきい値電圧の確率分布の分散の比  $\sigma_{after}^2 / \sigma_{before}^2$

トや基板に排出されるため、セルのしきい値電圧は減少量は小さくなる。一方で FG 型は導電体に電子を保持しているため、電子が自由に動ける。そのため、011 などの電子の数が少ない下位のデータパターンでも、移動してきた正孔と再結合が高い確率で発生し、セルのしきい値電圧が減少する。

CT 型のデータパターン依存性が高いのは (3) の影響と考えられる。CT 型は CT 膜の欠陥にトラップして電子を保存している。そのため FG 型に比べて、電子がデトラップするエネルギーが小さく、ガンマ線照射により多くの電子が放出され、しきい値電圧が大きく減少する。これは電子が多くトラップされている上位のデータパターンほど影響が大きくなる。

### 6.2 照射後室温放置による、しきい値電圧の回復量

照射から 24 時間後の平均値を  $V_{th3}$  とする。照射後から 24 時間でのしきい値電圧の回復量を  $\Delta V_{th} = V_{th3} - V_{th2}$  と定義する。各データパターンの 24 時間の室温放置による回復量  $\Delta V_{th}$  を図 10 示す。FG 型の回復量  $\Delta V_{th}$  は CT 型と比較して小さい。下位のデータパターンではわずかに回復が見られるが、上位のデー

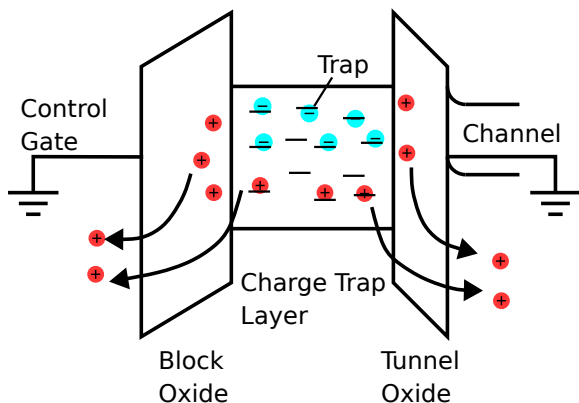


図9: チャージトラップ型 照射後、室温放置による正孔の放出メカニズム

タパターンでは減少している。CT型は全てのデータパターンで3.0au以上の回復が見られ、上位のデータパターンになるほど回復量は増加する。

しきい値電圧が回復するのは、ガンマ線照射で発生した正孔のうち、酸化膜の欠陥にトラップしたものや、再結合しなかったものが時間経過でコントロールゲートおよび基板に抜けるためである。CT型の回復量が多いのは、前述した通りCT膜に送られてきた正孔は電子と再結合しにくく、CT膜に捕獲される割合が高いためである。それらの正孔が時間経過で排出され、しきい値電圧が回復する(図9)。そのため図6に示すように、BERはガンマ線照射により、一時的に増加するが時間経過でBERは減少する。この実験は加速試験であり、宇宙空間と比較して、ガンマ線を高い線量率で短時間照射している。宇宙空間では低い線量率になるため、しきい値電圧の減少が緩やかで、回復も同時に起こる。そのため宇宙空間で同様の線量を照射しても、図6の照射直後のBERより、小さくなると考えられる。

FG型も同様にしきい値電圧が回復するが、正孔が電子と再結合しやすいため、回復量は小さい。加えて、FG型はガンマ線照射後によりデータ保持特性が劣化する。これはガンマ線照射でトンネル酸化膜の欠陥密度が増加することが原因である。FG型はCT型と比較して、欠陥を経由して電子が基板に漏れやすく、時間経過でしきい値電圧が減少する。この影響は、上位のデータパターンになるほど大きい。そのため、000よりしきい値電圧が大きいデータパターンでは、24時間の室温放置しても、正孔の放出より電子の漏れの影響が大きく、しきい値電圧はわずかに減少している(図8)。しかし、いずれも変化量は1.2au以下のため、照射後から時間経過でBERは大きくは変化しない(図6)。

## 7. まとめ

ガンマ線照射によるしきい値電圧の減少、室温放置による回復と時間経過によるBERの変化を測定した。TLCフラッシュメモリのFG型はデータパターンの依存性が小さく、いずれのデータパターンでもTID耐性には、CT型は総合的にはFG型より高いTID耐性を持つ一方で、データパターンに強く依存する。CT型は下位のデータパターンでは優れたTID耐性を持

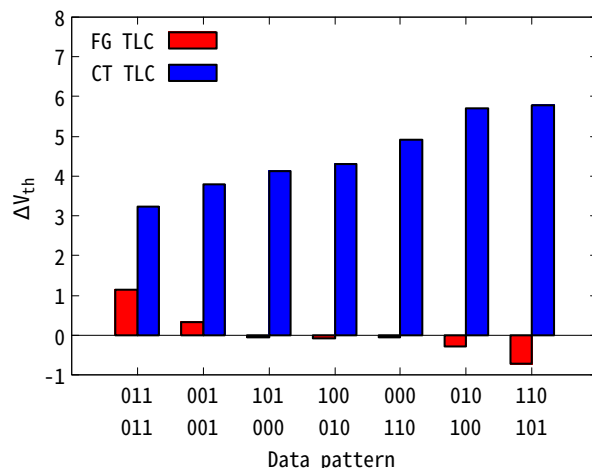


図10: 各データパターンの室温放置によるしきい値電圧の回復量  $\Delta V_{th}$

つが、上位のデータパターンになるにつれてTID耐性は脆弱になる。これは電子を保持する構造の違いによるものである。CT型は上位のデータパターンの読み出しマージンを大きくするなどの対策を行うことで、エラーを起りにくくすることができる。

また、CT型は照射後から室温放置することで正孔が抜けるため、BERが回復する。低線量率、長時間照射を想定した宇宙空間では、照射中に回復効果が起きるため測定結果よりBERは減少し、TID耐性を高くすることができる。

## 謝 辞

測定に使用したNANDフラッシュメモリテスト SigNAS3は、株式会社シグリードから提供されたものである。

## 文 献

- [1] Zhangyi'an, M. Qiao, X. Li, D. Hou, S. Zhang, X. Zhou, Z. Li, B. Zhang: "Improved model on buried-oxide damage induced by total-ionizing-dose effect for hv soi ldmos", IEEE Transactions on Electron Devices, **68**, 4, pp. 2064–2070 (2021).
- [2] G. Cellere, P. Pellati, A. Chimenton, J. Wyss, A. Modelli, L. Larcher and A. Paccagnella: "Radiation effects on floating-gate memory cells", IEEE Transactions on Nuclear Science, **48**, 6, pp. 2222–2228 (2001).
- [3] M. J. Marinella: "Radiation effects in advanced and emerging non-volatile memories", IEEE Transactions on Nuclear Science, **68**, 5, pp. 546–572 (2021).
- [4] M. Buddhanoy, P. Kumari, U. Surendranathan, M. Wasiolek, K. Hattar and B. Ray: "Total ionizing dose effects on long-term data retention characteristics of commercial 3-d nand memories", IEEE Transactions on Nuclear Science, **69**, 3, pp. 390–396 (2022).
- [5] M. Bagatin, S. Gerardin, G. Cellere, A. Paccagnella, A. Visconti, M. Bonanomi and S. Beltrami: "Error instability in floating gate flash memories exposed to tid", IEEE Transactions on Nuclear Science, **56**, 6, pp. 3267–3273 (2009).
- [6] C.-Y. Lu, H.-T. Lue and Y. Chen: "State-of-the-art flash memory devices and post-flash emerging memories", Science China Information Sciences, **54**, pp. 1039–1060 (2011).
- [7] H. Hu, Y. Feng, X. Zhan, K. Xi, L. Ji, J. Chen and J. Liu: "Experimental characterizations on tid radiation impacts in charge-trap 3d nand flash memory", 2021 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW), pp. 1–2 (2021).

- [8] J. Bi: “Radiation effects of floating-gate (fg) and charge-trapping (ct) flash memory technologies”, 2019 International Conference on IC Design and Technology (ICICDT), pp. 1–3 (2019).
- [9] N. Papandreou, H. Pozidis, N. Ioannou, T. Parnell, R. Pletka, M. Stanisavljevic, R. Stoica, S. Tomic, P. Breen, G. Tressler, A. Fry, T. Fisher and A. Walls: “Open block characterization and read voltage calibration of 3d qlc nand flash”, 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp. 1–6 (2020).